

FİZİK

ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER



EDİTÖR

Prof. Dr. E. Nihal ERCAN

ARALIK 2025

YAYLIK 3032

gece
kitaplığı

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Aralık 2025 - Ankara
ISBN / 978-625-388-993-7

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

FİZİK
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER

ARALIK 2025

EDİTÖR

Prof. Dr. E. Nihal ERCAN

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

ÇEVRESEL ZORLUKLAR VE NANOTEKNOLOJİ ÇÖZÜMLERİ

Elanur DİKİCİOĞLU 7

BÖLÜM 2

YENİ NESİL OPTOELEKTRONİK Sb_2Se_3 İNCE FİLMER: KRİSTAL YAPISI, ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE ÖZELLİKLERİ

Tuğba BAYAZIT 21

BÖLÜM 3

OPTİK KOHERENS TOMOGRAFİ (OCT)

Firdevs Banu ÖZDEMİR 35

BÖLÜM 4

DOĞAYLA AYNİ RİTİMDE: BİLİM İNSANININ MOTİVASYONU VE MODERN BİLİM ÜZERİNE NOTLAR

Elif ORHAN 49

BÖLÜM 5

GÖZ OPTİĞİNDE GEOMETRİK OPTİK UYGULAMALARI

Firdevs Banu ÖZDEMİR 75

BÖLÜM 6

TEK-FOTON KAYNAKLARI VE KUANTUM İLETİŞİM TEKNOLOJİLERİNDEKİ ROLÜ

Zeynep BERKTAŞ, Elif ORHAN 85

BÖLÜM 7

BİYOSENSÖRLER VE TERMAL SENSÖRLERDE ÇOK ALANLI YAKLAŞIMLAR

E. Canan GÜNAY DEMİREL, Özlem COŞKUN 113

BÖLÜM 1

ÇEVRESEL ZORLUKLAR VE NANOTEKNOLOJİ ÇÖZÜMLERİ

Elanur DİKİCİOĞLU¹

1. Giriş

Sanayileşmenin hızla artması ve teknolojik gelişmelerin süratle ilerlemesi, çevresel sistemler üzerinde derin ve giderek ağırlaşan etkiler yaratmış; özellikle su kirliliği ve katı atık birikimi önemli bir tehdit hâline gelmiştir. Endüstriyel süreçlerin daha karmaşık hâle gelmesi, ortaya çıkan atığın artırılmasını güçleştirmekte ve mevcut “temiz ve yeşil” protokoller bu çevresel baskıyla başa çıkmakta yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesi bir zorunluluk olarak ortaya çıkmış, nanoteknoloji bu gereksinim doğrultusunda kritik bir çözüm alanı hâline gelmiştir. Özellikle nanoparçacıkların izleme ve arıtım süreçlerinde kullanımı, düşük maliyetli, verimli ve uygulanabilir yöntemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Nano-kitosan gibi organik tabanlı nanomalzemeler, yüksek yüzey alanı ve güçlü adsorpsiyon kapasiteleri sayesinde atık sulardaki kirleticilerin uzaklaştırılmasında öne çıkmaktadır. Bu kitap bölümü, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda yeşil nanoteknolojilerin ve diğer nano-ölçekli arıtım yaklaşımlarının su ve toprak gibi çevresel ortamlardaki kirleticilerin giderilmesindeki başarılarını kapsamlı biçimde ele almakta; nano-tabanlı sıfır atık teknolojilerinin endüstriyel uygulamalardaki önemini ve potansiyelini ortaya koymaktadır.

Dünya, yaşam barındırdığı bilinen tek gezegen olup, insanlar ve diğer canlılar için gerekli olan su ve gıda gibi temel kaynaklar giderek azalmakta veya kirlenmektedir. Toprak bozulması, temiz su kıtlığı ve gıda güvenliği sorunları, özellikle hızlı nüfus artışı, kentleşme ve tüketim alışkanlıklarındaki değişimle birlikte, dünyanın birçok bölgesinde büyük bir tehdit hâline gelmiştir. Bu durumun yanı sıra insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan büyük miktardaki atık, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde çevresel sürdürülebilirliği ciddi şekilde tehdit etmektedir (Balwan vd., 2022).

Biyobozunur olmayan ve geri dönüştürülemeyen atıkların su ekosistemleri, tarım alanları, insan sağlığı ve yaban hayatı üzerindeki olumsuz etkileri giderek artmaktadır. Bu nedenle çevre yönetiminde **Sıfır Atık** yaklaşımı önem kazanmış; 5R prensipleri—**Refuse (Reddet), Reuse (Yeniden Kullan), Reduce (Azalt), Repurpose (Yeniden Amaçlandır), Recycle (Geri Dönüştür)**—sürdürülebilir bir çevresel stratejinin temel bileşenleri hâline gelmiştir (Balwan vd., 2022). Bu bölümün amacı, özellikle katı atık üretimindeki küresel artışı değerlendirmek ve hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler için tehdit oluşturan bu sorunun yönetilmesi için yeni teknolojik yaklaşımları ortaya koymaktır.

Son on yılda nüfus artışı, kentleşme, ekonomik büyüme ve tüketici davranışlarındaki değişimler nedeniyle küresel ölçekte katı atık üretimi ciddi şekilde artmıştır. Kırsal bölgelerden kentlere yoğun göç, şehirlerdeki atık üretimini hızlandırmakta; altyapı üzerinde büyük bir baskı oluşturmaktadır (Bhattacharjee vd., 2024). Birinci Dünya ülkeleri daha gelişmiş atık yönetim sistemlerine sahip olsa da, ürettikleri atığın önemli bir kısmını hâlâ düzenli depolama alanlarına göndermektedir. Özellikle **inşaat ve yıkım (C&D) atıkları**, tasarım değişiklikleri, yetersiz koordinasyon, uzun proje süreleri ve tasarım konusunda bilgi eksikliği gibi sebeplerle her yıl artmakta; düzenli depolama alanlarına bırakıldığında arazi kıtlığı sorununu daha da ağırlaştırmaktadır (Wang vd., 2014).

Katı atık depolama alanlarından sızan zehirli çözeltiler (sızıntı suyu), endüstriyel boşaltımlar, petrol sızıntıları, asit yağmurları ve denizlere atılan çöpler, su kaynaklarının kirlenmesinde başlıca etkenlerdir. Temiz suya erişimin giderek zorlaşması ve 3,6 milyar kişinin yılda en az bir ay su sıkıntısı yaşadığı tahminleri, daha etkili atık su arıtım yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Geetha vd., 2023). Bu bağlamda **nanoteknoloji**, çevre kirliliğinin azaltılmasında yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler sunan önemli bir alan olarak öne çıkmaktadır. Yunanca kökenli “nano” terimi metrenin bir milyarda biri anlamına gelirken, “nanoteknoloji” kavramı ilk kez Norio Taniguchi tarafından 1974 yılında ortaya atılmıştır. Nanoteknoloji; nanometre ölçeğinde çalışan yapıların, materyallerin ve sistemlerin tasarımı, üretimi ve uygulanmasını içeren disiplinler arası bir bilim alanıdır. Nano fazlı ve nano yapılı materyaller, biyolojik, farmasötik ve çevresel

uygulamalardaki seçicilik ve verimlilikleri nedeniyle giderek daha fazla ilgi çekmektedir (Taniguchi, 1974; Jeevanandam vd., 2018; Khalid vd., 2021).

Nano ölçek, makroskopik dünyada geçerli fizik yasalarının yerini kuantum mekaniğinin almaya başladığı kritik bir eşiği temsil eder. Bir saç telinin yüz binde biri kadar küçük bir boyuta indiğimizde, malzemelerin rengi, iletkenliği ve hatta manyetikliği değişmeye başlar. Bir zamanlar bilim kurgu fantezisi olarak görülen bu "There's Plenty of Room at the Bottom" "Aşağıda Çok Yer Var" (Richard Feynman) dünyasının, modern fiziğin en derin prensipleriyle gerçeğe dönüşmüştür. Nanoteknoloji, temel fiziği uygulayarak insanlığın en büyük sorunlarını (enerji, sağlık, çevre) çözme potansiyelini barındıran bir atomik oyun alanıdır.

Nanoparçacık sentezinde iki temel yaklaşım benimsenmektedir: **yukarıdan aşağıya (top-down)** ve **aşağıdan yukarıya (bottom-up)**. Üstten aşağı yöntemlerde dökme malzemeler küçültülerek nanoparçacıklara dönüştürülür; öğütme, lazer ablasyonu, ark boşalımı, sonikasyon, buharlaştırma-kondenzasyon gibi fiziksel yöntemler bu gruptadır. Bu yaklaşım büyük ölçekli üretim için avantaj sağlar. Altan yukarı yöntemlerde ise önce çekirdek oluşur ve daha sonra nano boyuta doğru büyüme gerçekleşir; sol-jel, kimyasal buhar biriktirme, piroliz gibi yöntemler bu gruba dahildir (Baig vd., 2021).

2. Nano Ölçekte Neler Değişir?

Kuantum Hapsolma Etkisi (Quantum Confinement Effect): Yarı iletken parçacıkların boyutu azaldıkça enerji seviyeleri ayrışır ve bunun sonucunda malzemenin optik özellikleri (örneğin, **Kuantum Noktaları (Quantum Dots)**) değişir. Çünkü parçacık boyutu küçüldükçe elektronların enerji seviyeleri birbirinden uzaklaşır, bant aralığı büyür ve yayılan ışığın enerjisi artar. Bu da görünür spektrum içinde renk kaymasına (kırmızıdan maviye doğru) yol açar. Kuantum noktasının rengi, yayılan veya soğurulan fotonun enerjisine bağlıdır:

$$E=h\nu=hc/\lambda$$

Enerji (E) artarsa → dalga boyu (λ) azalır.

Büyük kuantum noktaları: Bant aralığı küçük. Yayılan ışık daha uzun dalga boylu → kırmızı / turuncu

Orta büyüklük: Yeşil / sarı renkler

Küçük kuantum noktaları: Bant aralığı büyük. Yayılan ışık daha kısa dalga boylu → mavi / mor

Bir gitar telinin boyunu kısaltmak frekansını yükseltir ve daha ince ses çıkar. Benzer şekilde bir kuantum noktasının boyunu küçültmek, "enerji frekanslarını" yükseltir ve daha enerjik (maviye kaymış) foton yayılır.

Buna ek olarak, nanoparçacıkların **mikroorganizmalar** kullanılarak biyosentezi, fiziksel ve kimyasal yöntemlere kıyasla daha çevre dostu, ekonomik ve ölçeklenebilir bir alternatif sunmaktadır. Bakteriler, mantarlar, algler ve aktinomisetler aracılığıyla gümüş, altın, platin, demir gibi metallerin veya titanyum oksit ve çinko oksit gibi metal oksitlerin nano ölçekte sentezlenmesi mümkündür (Sharma vd., 2019). Bu biyosentetik süreçler, partikül morfolojisi ve boyut kontrolü açısından da avantaj sağlamaktadır.

Dünyada artan su krizi ve yükselen atık miktarı göz önüne alındığında, nanoteknolojik uygulamaların çevresel çözümlerdeki rolü büyümektedir. Düzenli depolama alanlarından kaynaklanan ve toksik maddeler içeren sızıntı sularının arıtımında **nano-filtrasyon** gibi nanoteknoloji tabanlı yöntemler etkin çözümler sunmaktadır (Nakum & Bhattacharya, 2022). Aynı şekilde altın ve gümüş gibi değerli metallerden üretilen nanoparçacıklar, yüksek yüzey alanları

sayesinde atık sulardaki organik kirleticilerin katalitik indirgenmesi için kullanılmakta; su arıtma tesislerinde verimliliği artırmaktadır.

Bu mini-derleme, özellikle **yeşil sentez** yöntemleriyle elde edilen nanoparçacıkların atık su ve kirlenmiş toprakların arıtımındaki potansiyel uygulamalarını, ayrıca bu yaklaşımların sürdürülebilir enerji ve çevresel temizliğe katkılarını kapsamlı biçimde değerlendirmektedir.

3. Küresel Atık Sorunu

Sanayileşme ve teknolojik müdahaleler, gezegenimiz üzerinde kirlenmiş su ve sağlam katı atık birikimi şeklinde derin çevresel hasarlara yol açmıştır. Dünya, hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşmenin bir sonucu olarak katı atık oluşumunda büyük bir artışla karşı karşıyadır. Tatlı su kıtlığı sorunu küresel bir tehdit oluşturmakta ve dünya nüfusunun önemli bir kısmının yılda en az bir ay su sıkıntısı yaşaması beklenmektedir. Bu baskılar altında, yıllık atık üretiminin 2016'dan 2050'ye kadar %70 artışla 3,40 milyar tona çıkacağı öngörülmektedir. Düzenli depolama ve yakma gibi geleneksel atık yönetim yöntemleri ise genellikle zaman alıcı, pahalı ve düşük verimlidir (Geetha vd., 2023).

4. Sıfır Atık Yönetiminin Önemi

Sıfır atık yönetimi, çevre, insan sağlığı ve ülke ekonomisi açısından hayati bir rol oynamaktadır. Depolama alanlarından salınan metan, CO₂ ve H₂S gibi zararlı gazlar atmosferi kirletmekte ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Ayrıca, şiddetli yağışlarda kirleticiler toprağa ve yeraltı sularına sızarak tarım arazilerini ve içme suyunu kirletmektedir. Atık üretimindeki katlanarak artış nedeniyle geri dönüşüm endüstrileri üzerindeki baskı artmıştır (Duru vd., 2019). Bu nedenle, sıfır atık yönteminin temel amacı olan geri dönüşümün üzerindeki baskıyı azaltmak için atık geri dönüşümüne ve doğal kaynakların korunmasına yönelik yeni tasarımların geliştirilmesi gerekmektedir. İklim değişikliği sorunlarını ele almak için sıfır atık ve döngüsel ekonomi yöntemlerine güvenmek, atık yönetiminde daha pratik bir yoldur.

5. Sürdürülebilir Yaşamın 5 R'si

Daha önce "Geri Dönüştür (Recycle), Yeniden Kullan (Reuse), Azalt (Reduce)" şeklindeki 3 R kuralına, **Reddet (Refuse)** ve **Geri Kazan (Recover)** da eklenerek **5 R** kuralı oluşturulmuştur. Bu adımlar, çevreyi kirleticilerden ve uygunsuz şekilde bertaraf edilen atıklardan korumada, aynı zamanda insan sağlığını güvence altına almada yardımcı olur. Bireylere, geri dönüşüme başvurmadan önce reddetme, azaltma, yeniden kullanma ve farklı amaçla kullanma (upcycling) gibi diğer dört seçeneği tercih etmeleri önerilir (Brooks vd., 2018; Wang vd., 2019).

- **Reddetmek**, 5 R sürecinin ilk adımıdır ve ihtiyacımız olmayan şeyleri satın almamayı öğütler. Bu, plastik ve geri dönüştürülemez malzemelerin kullanımını reddetmekle başlar.
- **Azaltmak**, kaynakların aşırı kullanımını önler ve çevreye yardımcı olmanın yanı sıra tasarruf sağlar.
- **Yeniden Kullanmak**, atılmadan veya geri dönüştürülmeden önce evde tekrar kullanılabilir veya faydalı olabilecek eşyaları aramayı içerir.
- **Farklı Amaçla Kullanmak (Repurpose/Upcycling)**, birden fazla amaca hizmet edebilecek öğeleri seçmeyi amaçlar. Bu adım da geri dönüşümden önce gelmelidir.
- **Geri Dönüşüm (Recycling)**, 5 R sürecindeki sonuç adımıdır. Bu, atığı tekrar kullanılabilir ve işlevsel ürünlere dönüştürmeyi amaçlayan bir atık yönetim tekniğidir. Bu yöntem, az enerji tüketir ve hammadde tasarrufu sağlar. Plastik, cam, kâğıt gibi

inorganik malzemelerin yanı sıra, solucanlar gibi organizmaların eklenmesiyle **organik atıklar** da geri dönüştürülebilir ve bu süreç sonucunda bitki yaşamı için paha biçilmez olan gübre elde edilir (Bhattacharjee vd., 2024).

Atıkları azaltmak ve geri dönüştürmek için **nanoteknoloji** hayati bir rol oynamaktadır. Nanoadsorbanlar, fotokatalistler ve membran filtreler, atık suyun ışlahında kullanılabilirken, nanokatalistler ile mikroplar organik ve inorganik atıkları zararsız yan ürünlere dönüştürebilir.



şekil 1. Sıfır Atığın 5R'si (Bhattacharjee vd., 2024)

6. Atık Yönetiminde Nanoteknolojinin Yeri

Bu zorluklarla mücadele etmek için, **nanoteknoloji** ileri tekniklerin benimsenmesiyle öne çıkan bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Nanoteknoloji terimi ilk kez Norio Taniguchi tarafından 1974 yılında, metrenin milyarda biri ölçeğindeki malzemelerin üretimini tanımlamak için ortaya atılmıştır. Nanoteknoloji, nano ölçekte çalışan malzeme ve sistemlerin oluşturulması ve uygulanmasını içeren multidisipliner bir alandır (Jeevanandam vd., 2018).

Nanomalzeme, benzersiz yapısal özellikleri sayesinde yüksek yüzey alanına ve yüksek emme kapasitesine sahip olduklarından, kirleticilerin **adsorpsiyon** yoluyla giderilmesi için düşük maliyetli, verimli ve basit bir yöntem sunmaktadır (Ahmaruzzaman, 2008). Nanopartiküllerin

üretimi, **yukarıdan aşağıya** (örneğin bilyalı değirmen) veya **aşağıdan yukarıya** (örneğin sol-jel) yaklaşımlarla gerçekleştirilebileceği gibi (Iravani, 2011), bakteri ve mantarların kullanıldığı **biyosentez** gibi çevre dostu, ekonomik ve kontrol edilebilir yöntemlerle de yapılabilmektedir (Malik vd., 2023).

7. Nanoteknolojinin Atık Yönetimi Uygulamaları

Nanoteknolojinin kullanımı, insan faaliyetlerinden kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılmasına yardımcı olmuştur (Abdillah vd., 2018; Govekar vd., 2018). Endüstrilerde nanoteknolojinin kullanımı, çevrede sindirilebilir ve sonrasında başka yararlı bir ürüne dönüştürülebilir malzemeler üretmemizi sağlar.

Endüstriyel ve kentsel atıklar, çevreye tehlikeli organik ve inorganik kirleticiler bırakmaktadır. Atık yönetiminde **nanofiltreler**, **nanofotokatalistler**, **nanosensörler** ve **nanoparçacıklar** gibi nanomateryaller yaygın olarak kullanılmaktadır.

Fotokatalist, herhangi bir değişime uğramadan güneş ışığı ile etkileşime giren bir malzemedir. Bu malzemeler, reaksiyona doğrudan katılmak yerine yalnızca koşulları sağlarlar. İdeal bir fotokatalistin özelliklerinin çoğu **titanyum dioksit (TiO₂)** bulunur. Titanyum dioksit, su, oksijen ve UV radyasyonu ile reaksiyona girdiğinde, zararlı bileşikler daha az toksik karbon bileşiklerine ayırabilen **serbest radikaller** üretir. Gözenekli nanokatalistler kullanılarak, atıklar etanole dönüştürülebilir.

Nanoteknoloji, **nanokatalistler**, **nanosensörler**, **nanofiltreler**, **nanokompozitler** ve **nanobiyomalzemeler** üreterek hava kirliliğini azaltmak için kullanılır. **Nanofiltreler** çoğunlukla hava kirliliğini kontrol etmek için kullanılır. Nanofiltrelerin gözenekleri 1 ila 10 nm arasındadır ve bakteri, virüs ve organik kirleticileri etkili bir şekilde giderebilirler (Taran vd., 2021). Toprak ıslah edici (iyileştirici) olarak uygulamaları için, **titanyum dioksit**, **metal oksitler**, **karbon nanotüpler** ve **nanozeolitler** dahil olmak üzere bir dizi nanomateryal değerlendirilmiştir.

Karbon Nanotüpler (CNT'ler), bir grafit tabaka üzerindeki altıgen karbon atomu dizileridir ve diğer moleküller veya atomlarla güçlü bir etkileşime sahiptir. Bu özellik, onları birçok uygulama için aktif karbonun yerine geçecek ideal bir malzeme yapmaktadır. **Altın nanoparçacıklar**, karbon monoksiti oksitleyerek hava kirleticilerini tehlikeli olmayan maddelere dönüştürebilir (Abdillah vd., 2018).

Nano boyutlu sıfır değerlikli demir (nZVI), **karbon nanotüpler** ve **nanolifler** kullanılarak klorlu bileşikler, hidrokarbonlar, organik bileşikler ve ağır metaller dahil olmak üzere çeşitli kirleticiler iyileştirilmiştir (Bhandari, 2018).

7.1. Su Kıtlığı ve Atık Suyun Nanopartiküllerle Arıtılması.

Aşırı kuraklıklar, aşırı nüfus, sanayileşmenin büyümesi ve tarımsal uygulamaların gelişmesi nedeniyle dünya, **su kıtlığı** adı verilen ciddi bir sorunla karşı karşıyadır. Tatlı su kıtlığının ve su kirliliğinin temel nedenleri arasında, depolama alanlarındaki kirleticilerin sızıntı yoluyla yeraltı suyunu ve toprağı kirletmesi, atmosfer kirliliğinin hidrosferi etkilemesi (örneğin asit yağmurları), petrol sızıntıları ve endüstrilerden su kütlelerine toksik çözeltilerin salınması yer almaktadır.

Tatlı su kıtlığının ve kirliliğin ana sebepleri şunlardır:

- Depolama alanlarındaki kirleticilerin toprağı sızarak hem yeraltı suyunu hem de toprağı kirletmesi.
- Atmosfer kirliliğinin hidrosferi etkilemesi (örneğin **Asit Yağmuru**), bunun da deniz yaşamını ve su kütlelerini büyük ölçüde etkilemesi.

- Petrol sızıntıları ve endüstrilerden su kütlelerine toksik çözeltilerin salınması.

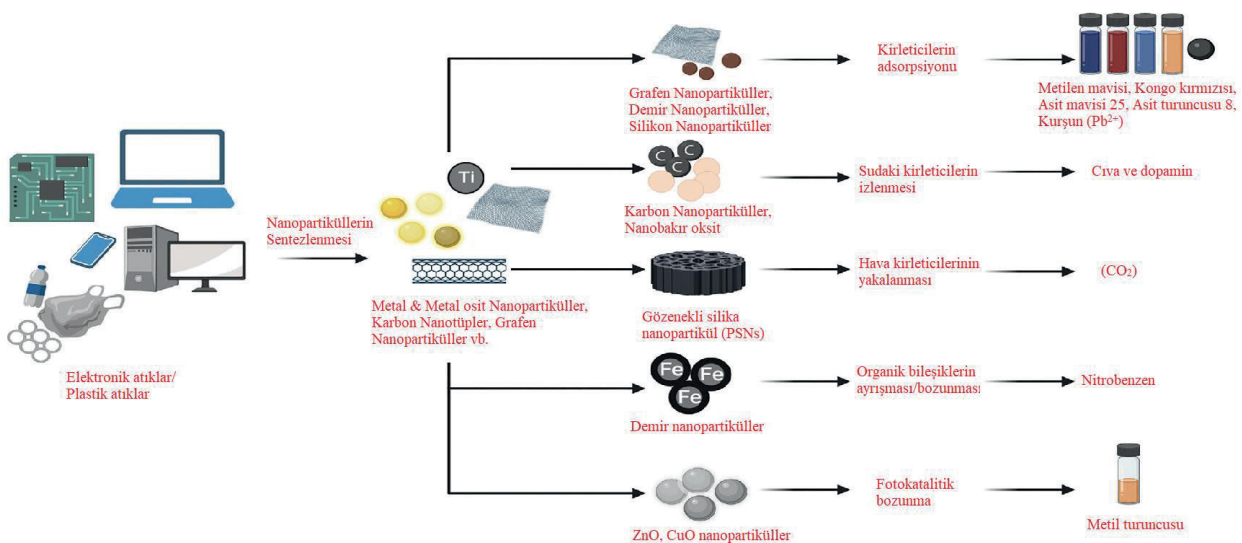
Bu zararlı uygulamaları yönetmek ve durdurmak için yeni ve yaratıcı fikirler bulmak hayati önem taşımaktadır.

Deniz ve insan yaşamını etkileyen bu zararlı uygulamaları yönetmek ve durdurmak için yeni adımlar atılması gerekmektedir. **Nanoteknoloji**, uzun zamandır atık su ıslahı yönetiminde uygulanmaktadır (Agboola vd., 2020; Aithal & Aithal, 2018; Ajith vd., 2021; Ali & Ahmad, 2020; Chaturvedi vd., 2020). Son kırk yılda, nanomateryal ve nanomebranların kullanımı su arıtma prosedürlerinde önemli gelişmelere yol açmıştır. Özellikle karışık oksit nanoparçacıklar (TiO_2 , CuO , ZnO , CNT'ler, Ag gibi) ve polimerik membranlar gibi mühendislik malzemeleri artan başarıyla kullanılmaktadır (Manikandan vd., 2022).

İçme suyu krizi ve yeraltı sularının ağır metal kirliliği, insan uygarlığı için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Küresel olarak, **arsenik (As) kirliliği** Bangladeş, Hindistan ve diğer gelişmekte olan/gelişmiş ülkelerde büyük bir sorundur (Palit, 2020).

Ağır metaller, daha yeşil bir çevre sağlamak ve insan sağlığı riskini azaltmak amacıyla nanomateryaller içeren çeşitli teknolojiler kullanılarak giderilmiştir (Dhiman vd., 2021). As giderme yöntemleri arasında en etkili olanı **adsorpsiyondur**. Nano-adsorbentlerin üretimi, insan tüketimi için temiz, güvenli ve uygun maliyetli su sağlamaya yardımcı olabilir. Daha önceki raporlarda, araştırmacılar manyetik nanomateryaller, karbon nanotüpler, titanyum, seriya, zirkonyum, biyo-kömür, alümina ve polimerik nanokompozitler gibi çeşitli nano-adsorbentlerin As giderilmesindeki son gelişmelerini ele almıştır (Ghosh vd., 2021).

Atık sudan ağır metallerin uzaklaştırılması; **fiziksel** (membran ayırma, filtreleme), **kimyasal** (kimyasal çöktürme, adsorpsiyon, iyon değişimi) ve **biyolojik** (aerobik ve anaerobik mikroorganizmalar kullanarak) yöntemlerle gerçekleştirilebilir (Abdel-Raouf & Abdul-Raheim, 2017).

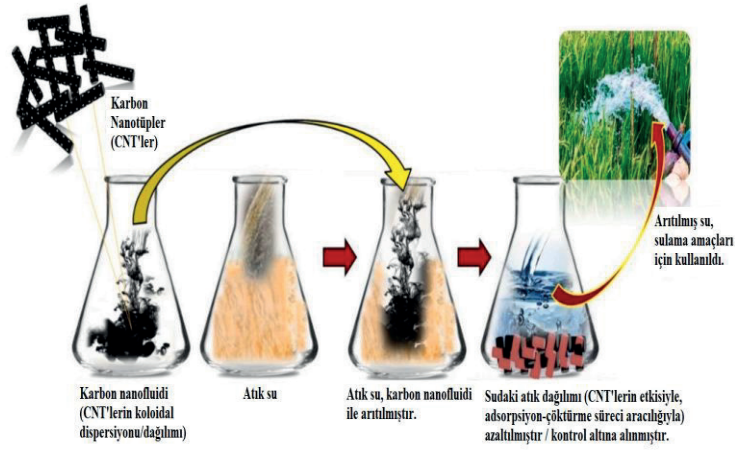


Şekil 2. Çevre kirlenmelerinin giderilmesinde kullanılan farklı nanomalzeme türleri (Bhattacharjee vd., 2024)

Tablo 1. Atık suyun arıtılması için kullanılan nanomateriyaller (Bhattacharjee vd., 2024)

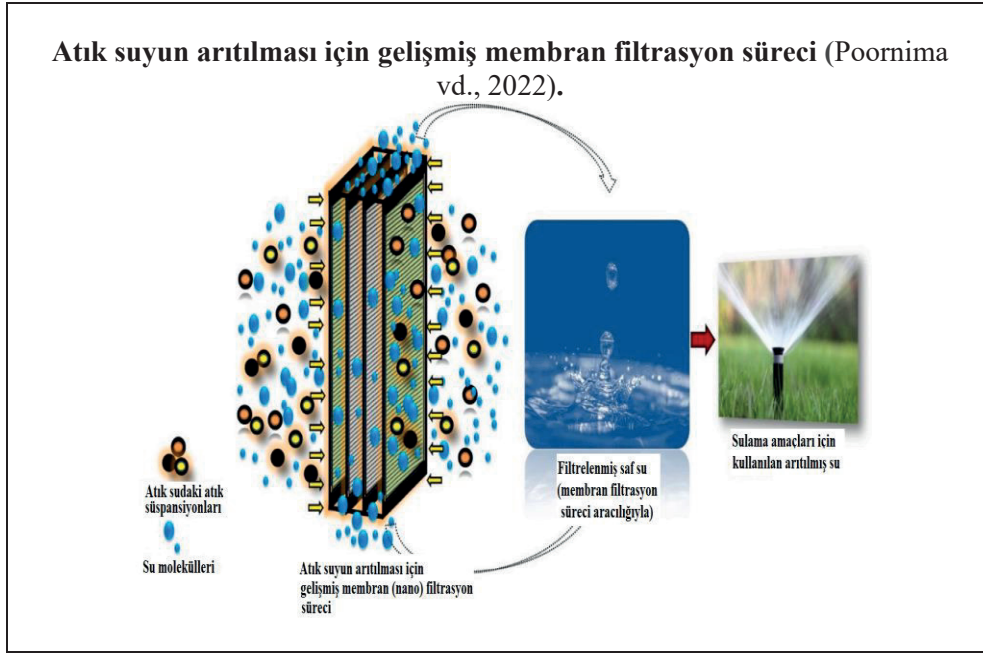
Kullanılan Nanomateriyal Türü	Başlıca Sonuçlar	Referanslar
Metal iyonlar, polimer filmler (karbon nanotüpler (CNT'ler) gibi) ve fullerener (C60), Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , CuO, MgO, ZnO ve zeolitler	Suyu dezenfekte etmek ve daha sonraki arıtma/demineralizasyon/tuzdan arındırma için uygun hale getirmek amacıyla antimikrobiyal özellikler sergilerler.	(Khan, Anjum, vd., 2021; Khan, Naushad, vd., 2021; Liu, Wang, vd., 2013)

Atıksu arıtımında karbon nanotüpler (Poornima vd., 2022).



Polimerzomlar	Hiper dallı ve nano ölçekli kopolimerlerden oluşan polimerzomlar kullanılarak kirli sulardan mikrobiyolojik büyüme ve toksik elementler uzaklaştırılır.	(Motshekga & Ray, 2017)
Kitosan nanoparçacıkları	Nano boyutlu kitosan, mükemmel antibakteriyel özellikler sergiler ve insanlara ve hayvanlara karşı düşük toksisiteye sahipken, geniş bir yelpazedeki mantar, bakteri ve viral organizmaların hareketini engelleylebilir.	(Li vd., 2008)
Gümüş nanoparçacıkları	Gümüş veya polielektrolit nanoparçacıkları kullanılarak, arıtılmamış endüstriyel suyun ilk kullanımında koliform bakterilerin %90'ı ve yeniden kullanım için koliform bakterilerin toplam %90'ı, E. coli dahil olmak üzere, 6 saat içinde yok edilebilir.	(Zarpelon vd., 2016)
Fe ₃ O ₄ /rGO nanokompozit	Grafen yüzeylerinde biriken patojenlerin varlığında membran hücreleri oluşturarak hücre zarı yapısını bozar.	(Boruah vd., 2017)

Kullanılan Nanomateryal Türü	Başlıca Sonuçlar	Referanslar
------------------------------	------------------	-------------



Grafen pulları	Bakteri hücrelerinde indirgenmiş oksijen türleri (ROS) üreterek lipid peroksidasyonuna yol açar.	(Krishnamoorthy vd., 2012)
Grafen nano-tabakalar	Grafen ve lipit molekülleri arasındaki güçlü temas nedeniyle, grafen nano-tabakalar hücre zarlarına nüfuz edebilir ve önemli miktarda fosfolipit emebilir .	(Tu vd., 2013)
Zeolitler ve dendrimerler, Karbonlu nanomateryaller (karbon nanokompozitler, nanotüpler ve fullerenler)	Organik eser elementleri uzaklaştırmış ve patojenleri öldürmüştür.	(Boyd vd., 2013)

7.1.1. Arsenik Giderimi ve Adsorpsiyon

As giderme yöntemleri arasında **adsorpsiyon** en etkili yöntemdir. Yeni adsorbanlar geliştirilirken maliyet etkinliği, eklenen reaktif olmaması, kolay kullanım, atık bertarafı kolaylığı ve rejenerasyon kolaylığı en önemli kriterler olarak kabul edilir. Nano-adsorbentlerin üretimi, insan tüketimi için temiz ve uygun fiyatlı su sağlanmasına yardımcı olabilir. As'in etkin bir şekilde giderilmesi için **manyetik nanomateryaller, karbon nanotüpler, titanyum, zirkonyum, biyo-kömür, alümina** ve polimerik nanokompozitler dahil olmak üzere çok sayıda nano-adsorbentteki son gelişmeler rapor edilmiştir (Ghosh vd., 2021).

Ağır metallerin sudan uzaklaştırılması; **fiziksel** (membran ayırma, filtreleme), **kimyasal** (adsorpsiyon, iyon değişimi) ve **biyolojik** (mikroorganizmalarla) yöntemlerle gerçekleştirilebilir (Abdel-Raouf & Abdul-Raheim, 2017).

Atık su ıslahında kullanılan başlıca **beş tür nanomateriyal** sınıfı bulunmaktadır (Deshpande vd., 2020):

1. **Nano-adsorbentler:** Genellikle ağır metal giderimi için kullanılan metal oksitler gibi.
2. **Karbon Nanomateriyalleri:** Etkili adsorpsiyon ve iletkenlik için kullanılabilir.
3. **Grafen Bazlı Nanoparçacıklar:** Çevreyi iyileştirmek için kullanılır.
4. **Nanotüpler:** Hibrit nano membranlar, nanolifler ve karbon nanotüp membranlar aracılığıyla kirleticileri gidermek için kullanılır.
5. **Geri Dönüştürülebilir Nanokompozitler, Matlar ve Boncuklar:** Su dekontaminasyonu için kullanılır.

Ayrıca, bazı **sıfır değerlikli nano boyutlu metaller** de güçlü adsorpsiyon kabiliyetine sahiptir (Deshpande vd., 2020).

- Nano boyutlu malzemeler (nanopartiküller ve nanokompozitler) yüksek yüzey alanları sayesinde sudaki ağır metalleri, organik bileşikleri ve kirleticileri gidermek için etkili adsorbanlar olarak kullanılabilir.
- **Nano-filtrasyon membranları** ve nano-mühendislik ürünü filtreler (örneğin karbon nanomalzemeler) kullanılarak, atık sudaki partikül madde ve mikroorganizmalar geleneksel yöntemlere göre daha etkili bir şekilde uzaklaştırılabilir.
- Ayrıca, organik kirleticilerin giderilmesinde manyetik nanosorbentler ve katalitik indirgeme süreçlerinde altın ve gümüş gibi soylu metal nanopartikülleri kullanılmaktadır.

8. Sonuç

Bu bölümde, artan çevresel kirlilik, su kıtlığı ve katı atık birikimi gibi küresel sorunların çözümünde nanoteknolojinin sunduğu yenilikçi ve sürdürülebilir yaklaşımları kapsamlı bir bakış açısıyla ele almıştır. Nanoteknoloji, yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir fizikokimyasal özellikler ve hedefe yönelik etkileşim kapasitesi sayesinde, geleneksel arıtım ve atık yönetimi yöntemlerine kıyasla daha etkili, ekonomik ve evre dostu çözümler sunmaktadır. Özellikle nano-adsorbanlar, nanofiltreler, fotokatalistler ve biyotabanlı nanomalzemeler, atık su ve kirlenmiş toprakların ıslahında umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır.

Sıfır Atık yaklaşımı çerçevesinde değerlendirildiğinde, nanoteknoloji yalnızca kirliliğin giderilmesinde değil, aynı zamanda atıkların yeniden değerlendirilmesi, kaynak verimliliğinin artırılması ve döngüsel ekonominin desteklenmesi açısından da stratejik bir rol üstlenmektedir. 5R prensipleri ile entegre edilen nano-tabanlı uygulamalar, hem bireysel hem de endüstriyel ölçekte sürdürülebilir yaşam pratiklerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bununla birlikte, nanomalzemelerin çevresel ortamlardaki davranışları, toksikolojik etkileri ve uzun vadeli ekolojik sonuçları henüz tam olarak aydınlatılmış değildir. Bu nedenle, nanoteknolojinin atık yönetimi ve çevresel iyileştirme alanlarında güvenli ve sorumlu biçimde uygulanabilmesi için yaşam döngüsü analizleri, risk değerlendirmeleri ve düzenleyici çerçevelerin güçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, nanoteknoloji; çevresel sürdürülebilirlik, temiz suya erişim ve sıfır atık hedeflerine ulaşmada güçlü bir araç olarak öne çıkmakta, ancak bu potansiyelin etkin biçimde kullanılabilmesi disiplinler arası iş birlikleri, etik yaklaşımlar ve uzun vadeli çevresel değerlendirmelerle desteklenmelidir. Gelecekte geliştirilecek akıllı ve yeşil nano-sistemlerin, çevresel sorunların zmnde dnştrc bir rol oynayacağı ngrlmektedir.

Kaynaklar

- Abdel-Raouf, M. S., & Abdul-Raheim, A. R. M. (2017). Removal of heavy metals from industrial waste water by biomass-based materials: A review. *j pollut eff cont* 5: 180. doi: 10.4172/2375-4397.1000180 page 2 of 13 volume 5• issue 1• 1000180 j pollut eff cont, an open access journal issn: 2375-4397 the top six toxic threats: Estimated population at risk at identified sites*(million people) estimated global impact**(million people) 1. lead 10 18-22 2. Mercury, 8, 15-19.
- Abdillah, F., Pramudita, D., Indarto, A., & Handojo, L. A. (2018). Nanotechnology: an emerging technology for bioremediation of environmental pollutants. In *Recent advances in environmental management* (pp. 109-143). CRC Press.
- Agboola, O., Popoola, P., Sadiku, R., Sanni, S. E., Fayomi, S. O., & Fatoba, O. S. (2019). Nanotechnology in wastewater and the capacity of nanotechnology for sustainability. In *Environmental Nanotechnology Volume 3* (pp. 1-45). Cham: Springer International Publishing.
- Ahmaruzzaman, M. (2008). Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: a review. *Advances in colloid and interface science*, 143(1-2), 48-67.
- Aithal, S., & Aithal, P. S. (2018). Concept of ideal water purifier system to produce potable water and its realization opportunities using nanotechnology. *International Journal of Applied Engineering and Management Letters (IJAEML)*, 2(2), 8-26.
- Ajith, M. P., Aswathi, M., Priyadarshini, E., & Rajamani, P. (2021). Recent innovations of nanotechnology in water treatment: A comprehensive review. *Bioresource technology*, 342, 126000.
- Ali, Z., & Ahmad, R. (2019). Nanotechnology for water treatment. In *Environmental Nanotechnology Volume 3* (pp. 143-163). Cham: Springer International Publishing.
- Baig, N., Kammakakam, I., & Falath, W. (2021). Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials advances*, 2(6), 1821-1871.
- Balwan, W. K., Singh, A., & Kour, S. (2022). 5R's of Zero Waste Management to save our green planet: A narrative review. *European Journal of Biotechnology and Bioscience*, 10(1), 7-11.
- Bhandari, G. (2018). Environmental nanotechnology: applications of nanoparticles for bioremediation. In *Approaches in Bioremediation: The new era of environmental microbiology and nanobiotechnology* (pp. 301-315). Cham: Springer International Publishing.
- Bhattacharjee, S., Girigoswami, A., Nag, M., Rubab, T., & Girigoswami, K. (2024). Role of nanotechnology as a zero waste tool. *Environmental Quality Management*, 33(4), 193-209.
- Boruah, P. K., Sharma, B., Hussain, N., & Das, M. R. (2017). Magnetically recoverable Fe₃O₄/graphene nanocomposite towards efficient removal of triazine pesticides from aqueous solution: Investigation of the adsorption phenomenon and specific ion effect. *Chemosphere*, 168, 1058-1067.
- Boyd, G. R., Tuccillo, M. E., Sandvig, A., Pelaez, M., Han, C., & Dionysiou, D. D. (2013). Nanomaterials: Removal processes and beneficial applications in treatment. *Journal-American Water Works Association*, 105(12), E699-E708.

- Brooks, A. L., Wang, S., & Jambeck, J. R. (2018). The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. *Science advances*, 4(6), eaat0131.
- Chaturvedi, V. K., Kushwaha, A., Maurya, S., Tabassum, N., Chaurasia, H., & Singh, M. P. (2019). Wastewater treatment through nanotechnology: Role and prospects. In *Restoration of wetland ecosystem: a trajectory towards a sustainable environment* (pp. 227-247). Singapore: Springer Singapore.
- Deshpande, B. D., Agrawal, P. S., Yenkie, M. K. N., & Dhoble, S. J. (2020). Prospective of nanotechnology in degradation of waste water: A new challenges. *Nano-structures & Nano-objects*, 22, 100442.
- Dhiman, N., Kumar, R., Kaushik, A., & Kumar, R. (2021). Nanotechnology for the remediation of heavy metals. In *New Frontiers of Nanomaterials in Environmental Science* (pp. 145-164). Singapore: Springer Singapore.
- Duru, R. U., Ikpeama, E. E., & Ibekwe, J. A. (2019). Challenges and prospects of plastic waste management in Nigeria. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 1(2), 117-126.
- Geetha, K., Akshitha, S., Kiran, R., & Tadikonda, R. (2023). An Over View of Nano Technology in Waste Management. *Nanoscience*, 8, a281-a289.
- Ghosh, S., Bhagwat, T., & Webster, T. J. (2021). Arsenic removal using nanotechnology. In *Emerging Treatment Technologies for Waste Management* (pp. 73-102). Singapore: Springer Singapore.
- Govekar, S., Kumar, R., Suresh, R., & Sridharan, K. (2018). Nanotechnology to sustain a clean environment. In *Emerging trends of nanotechnology in environment and sustainability: A review-based approach* (pp. 3-11). Cham: Springer International Publishing.
- Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green chemistry*, 13(10), 2638-2650.
- Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., & Danquah, M. K. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein journal of nanotechnology*, 9(1), 1050-1074.
- Khalid, M., & Abdollahi, M. (2021). Environmental distribution of personal care products and their effects on human health. *Iranian journal of pharmaceutical research: IJPR*, 20(1), 216.
- Khan, S., Anjum, R., & Bilal, M. (2021). Revealing chemical speciation behaviors in aqueous solutions for uranium (VI) and europium (III) adsorption on zeolite. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101503.
- Khan, S., Naushad, M., Al-Gheethi, A., & Iqbal, J. (2021). Engineered nanoparticles for removal of pollutants from wastewater: Current status and future prospects of nanotechnology for remediation strategies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106160.
- Krishnamoorthy, K., Veerapandian, M., Zhang, L. H., Yun, K., & Kim, S. J. (2012). Antibacterial efficiency of graphene nanosheets against pathogenic bacteria via lipid peroxidation. *The journal of physical chemistry C*, 116(32), 17280-17287.
- Li, Q., Mahendra, S., Lyon, D. Y., Brunet, L., Liga, M. V., Li, D., & Alvarez, P. J. (2008). Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: potential applications and implications. *Water research*, 42(18), 4591-4602.

- Liu, X., Wang, M., Zhang, S., & Pan, B. (2013). Application potential of carbon nanotubes in water treatment: a review. *Journal of Environmental Sciences*, 25(7), 1263-1280.
- Malik, A. Q., Mir, T. U. G., Kumar, D., Mir, I. A., Rashid, A., Ayoub, M., & Shukla, S. (2023). A review on the green synthesis of nanoparticles, their biological applications, and photocatalytic efficiency against environmental toxins. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(27), 69796-69823.
- Manikandan, S., Subbaiya, R., Saravanan, M., Ponraj, M., Selvam, M., & Pugazhendhi, A. (2022). A critical review of advanced nanotechnology and hybrid membrane based water recycling, reuse, and wastewater treatment processes. *Chemosphere*, 289, 132867.
- Motshekga, S. C., & Ray, S. S. (2017). Highly efficient inactivation of bacteria found in drinking water using chitosan-bentonite composites: Modelling and breakthrough curve analysis. *Water Research*, 111, 213-223.
- Nakum, J., & Bhattacharya, D. (2022). Various green nanomaterials used for wastewater and soil treatment: a mini-review. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 724814.
- Palit, S. (2020). Bioremediation, waste management, and nanotechnology applications: A critical overview and the vision for the future. *Chemistry and Industrial Techniques for Chemical Engineers*, 227-247.
- Poornima, S., Manikandan, S., Karthik, V., Balachandar, R., Subbaiya, R., Saravanan, M., ... & Pugazhendhi, A. (2022). Emerging nanotechnology based advanced techniques for wastewater treatment. *Chemosphere*, 303, 135050.
- Sharma, D., Kanchi, S., & Bisetty, K. (2019). Biogenic synthesis of nanoparticles: a review. *Arabian journal of chemistry*, 12(8), 3576-3600.
- Taniguchi, N. (1974). On the basic concept of 'nano-technology'. In *Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, 1974*. Japan Society of Precision Engineering.
- Taran, M., Safaei, M., Karimi, N., & Almasi, A. (2021). Benefits and application of nanotechnology in environmental science: an overview. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(1), 7860-7870.
- Tu, Y., Lv, M., Xiu, P., Huynh, T., Zhang, M., Castelli, M., ... & Zhou, R. (2013). Destructive extraction of phospholipids from *Escherichia coli* membranes by graphene nanosheets. *Nature nanotechnology*, 8(8), 594-601.
- Wang, J., Li, Z., & Tam, V. W. (2014). Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: a Shenzhen case study, China. *Resources, Conservation and Recycling*, 82, 1-7.
- Wang, W., Themelis, N. J., Sun, K., Bourtsalas, A. C., Huang, Q., Zhang, Y., & Wu, Z. (2019). Current influence of China's ban on plastic waste imports. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 1(1), 67-78.
- Zarpelon, F., Galiotto, D., Aguzzoli, C., Carli, L. N., Figueroa, C. A., Baumvol, I. J. R., ... & Giovanela, M. (2016). Removal of coliform bacteria from industrial wastewaters using polyelectrolytes/silver nanoparticles self-assembled thin films. *Journal of environmental chemical engineering*, 4(1), 137-146.

BÖLÜM 2

YENİ NESİL OPTOELEKTRONİK Sb_2Se_3 İNCE FİLMER: KRİSTAL YAPISI, ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE ÖZELLİKLERİ

Tuğba BAYAZIT¹

¹ Öğr. Gör. Dr. Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye tugba.bayazit@erdogan.edu.tr ORCID: 0000-0002-8695-0298

1. Giriş

Sürdürülebilir ve temiz enerji teknolojilerine yönelik artan talep, yüksek performanslı ve düşük maliyetli fotovoltaik (PV) sistemlere olan küresel ilgiyi yoğunlaştırmıştır. Kristal silikon güneş pilleri ticari PV pazarında hakimiyetini sürdürürken, dolaylı bant aralığı, enerji yoğun üretim gereksinimleri ve saf malzemelerin sınırlı bulunabilirliği, alternatif ince film soğurucu malzeme arayışını teşvik etmektedir (Ballif, Haug, Boccord, Verlinden, & Hahn, 2022). Yeni adaylar arasında, antimon selenit (Sb_2Se_3), benzersiz yapısal, optik ve elektronik özellikleri nedeniyle gelecek nesil güneş enerjisi soğurucusu olarak ilgi çekmiştir (Bosio, Foti, Pasini, & Spoltore, 2023). Sb_2Se_3 , V–VI. grup ikili kalkojenür bileşiklerinin bir üyesidir ve bu bileşikler arasında şunlar yer alır: Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Bi_2S_3 , Sb_2Te_3 , Sb_2Se_3 , Sb_2S_3 ve $\beta\text{-As}_2\text{Te}_3$ (Anandan, Xavier, & Piraviperumal, 2024; Ohki et al., 2001; Tigau, 2005; Yesugade, Lokhande, & Bhosale, 1995). Sb_2Se_3 , c eksenini boyunca istiflenmiş $(\text{Sb}_4\text{Se}_6)_n$ şeritlerinden oluşan yarı-tek boyutlu (1D) ortorombik kristal yapıya (Pnma) sahiptir. Şeritler içindeki atomlar güçlü kovalent bağlarla bir arada tutulurken, şeritlerin birbirine bağlandığı bölgeler zayıf van der Waals etkileşimleriyle bir arada tutulur. Bu belirgin yapısal anizotropi, Sb_2Se_3 'ü CdTe ve CIGS gibi geleneksel üç boyutlu kalkojenür soğuruculardan ayırır ve yük taşınımı, kusur oluşumu ve film yönlendirilmesi üzerinde kritik bir etkiye sahiptir (Mamta, Singh, Maurya, & Singh, 2021).

Şeritlerin yönüne paralel tane sınırları genellikle elektriksel olarak zararsızdır. Buna karşılık, yanlış yönlendirilmiş veya bükülmüş taneler potansiyel bariyerleri ve rekombinasyon bölgelerini artırarak taşıyıcı iletimini sınırlar. Bu nedenle, kristal yöneliminin kontrolü, Sb_2Se_3 tabanlı cihazlarda yüksek performansın temel belirleyicisidir (Dong, Liu, Wang, & Zhang, 2021).

Kristal kimyasının sağladığı yapısal avantajlara ek olarak, Sb_2Se_3 önemli optoelektronik özelliklere de sahiptir. Malzemenin bant aralığı ($\sim 1,1\text{-}1,3$ eV), tek bağlantılı güneş pilleri için neredeyse idealdir ve görünürden yakın kızılötesi bölgeye kadar ışığı yüksek verimlilikle emmesini sağlar (Li et al., 2018). Bu durum, ($>10^5$ cm^{-1}) gibi yüksek bir soğurma katsayısı, yüksek bir dielektrik sabiti ve şerit yönü boyunca verimli taşıyıcı iletimi ile görülür (Akshay, Benny, & Bhat, 2022). Ayrıca, Sb_2Se_3 esasen p tipi bir yarı iletkenidir ve bazı yönlendirilmiş yapılarda delik hareketliliği birkaç on $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 'e ulaşabilir. Bu içsel özellikler, soğurucu tabakanın 1 μm 'den daha ince olduğu durumlarda bile etkili ışık emilimini ve düşük sıcaklıkta, uygun maliyetli ince film mimarilerinin uygulanmasını mümkün kılar. (Bosio et al., 2023; Mamta et al., 2021).

Son yıllarda, biriktirme teknolojilerindeki gelişmeler, yakın mesafeli süblimasyon (CSS), solvotermal ve hidrotermal yöntemler, buhar fazlı taşıma biriktirme, kimyasal banyo biriktirme (CBD), püskürtme teknikleri ve çözeltiyle işlenmiş öncü stratejileri, film morfolojisi, kristal yönelimi ve genel malzeme kalitesinde önemli iyileşmelere yol açmıştır. Bu gelişmeler, Sb_2Se_3 tabanlı cihazların performansını doğrudan etkilemiş, güç dönüşüm verimlilikleri erken duyarlılaştırılmış yapılarda %1'den, optimize edilmiş düzlemsel hücrelerde %10'un üzerine çıkmış ve malzemeyi ince film fotovoltaik alanında ciddi bir aday haline getirmiştir (Anandan et al., 2024; Tang et al., 2019; Wu, Wu, Wang, Lv, & Shi, 2021).

Fotovoltaik uygulamaların ötesinde, Sb_2Se_3 , güçlü anizotropik yük taşıma özelliği, hızlı tepki süreleri ve aydınlatma altında kararlılığı nedeniyle fotodedektörlerde, foto elektrokimyasal (PEC) sistemlerde ve geniş bantlı optoelektronik uygulamalarda da umut vaat etmektedir (Kim, You, Yun, Kim, & Seong, 2023; Li et al., 2018; Nefzi, Rabhi, & Kanzari, 2023).

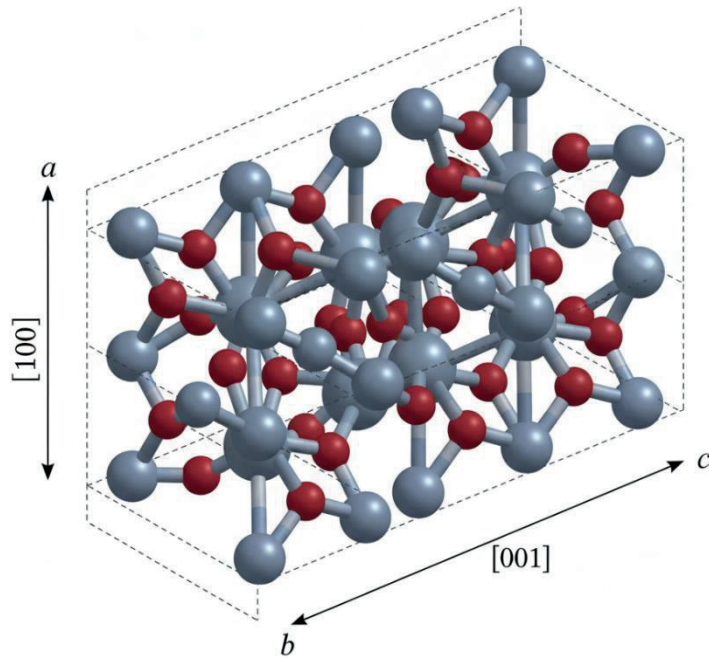
Bu ilerlemelere rağmen, Sb_2Se_3 cihazlarının performansı teorik Shockley-Queisser sınırının oldukça altında kalmaktadır. Başlıca darboğazlar arasında derin seviye kusurları, radyasyon yaymayan rekombinasyon kayıpları, arayüz kaynaklı taşıyıcı tuzaklanması ve kontrollü doping elde etmedeki zorluklar yer almaktadır. Bu faktörler, şu anda verimlilik iyileştirmelerine

yönelik en önemli zorluğu temsil eden kalıcı bir açık devre voltajı (V_{oc}) açığına katkıda bulunur (Dong et al., 2021; Liu et al., 2024).

Sb_2Se_3 araştırmalarının hızlı gelişimi ve yapı-özellik-işleme ilişkilerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması ihtiyacı göz önüne alındığında, bu inceleme, Sb_2Se_3 ince filmlerinin kristal yapısı, büyüme ve biriktirme teknikleri, optik ve elektriksel özellikleri, mikro yapısal evrimi ve cihaz uygulamalarına ilişkin derinlemesine bir genel bakış sunmayı, aynı zamanda mevcut sınırlamaları ve gelecekteki araştırma yönlerini vurgulamayı amaçlamaktadır.

1. Yapısal Özellikleri

şekil 1, ilk olarak 1950'lerde Dönges tarafından yapısal olarak çözümlenen ve doğal olarak antimon selenit minerali olarak bulunan bir yarı iletken olan Sb_2Se_3 'ün ortorombik kristal yapısını göstermektedir (Dönges, 1950). Sb_2Se_3 , $a=11,794$ Å, $b=3,986$ Å ve $c=11,648$ Å kafes parametrelerine sahip Pnma (No. 62) uzay grubunda kristalleşir ve bu da yaklaşık $0,524$ nm³'lük bir birim hücre hacmine karşılık gelir (Zeng, Xue, & Tang, 2016).



şekil 1. Antimon Selenit Ortorombik Kristal Yapısı

Sb_2Se_3 'ün belirleyici bir özelliği, c eksenı boyunca hizalanmış (Sb_4Se_6)_n şeritlerinin yarı-tek boyutlu (1D) düzenlenmesidir. Güçlü kovalent bağlar her şerit içindeki atomları bir arada tutarken, zayıf van der Waals etkileşimleri bitişik şeritleri birbirine bağlar. Bu anizotropik bağ, Sb_2Se_3 'ü CdTe veya CIGS gibi üç boyutlu kalkojenitlerden ayırır ve optik tepkisinin, yük taşımasının ve kusur toleransının temel yönlerini belirler (Bosio et al., 2023; Mamta et al., 2021). şerit yönü boyunca taşıma doğal olarak tercih edilir, bu da yön bağımlı hareketliliğe yol açar ve kristalografik yönlenmeyi cihaz performansında merkezi bir faktör haline getirir.

Yüksek kaliteli Sb_2Se_3 ince filmler tipik olarak [001], [211] veya [221] gibi yönelimler sergiler; bunların hepsi dikey şerit hizalanmasını ve bağlantı noktasında verimli taşıyıcı ekstraksiyonunu destekler (Yuan, Jin, Jiang, Liu, & Zhu, 2016). Bunun aksine, şeritlerin alt tabakaya paralel olduğu yönelimler, düzlem dışı taşımayı engeller ve rekombinasyonu artırır (Anandan et al., 2024; Duan et al., 2022; Tang et al., 2019). Çok sayıda yüksek verimli Sb_2Se_3 güneş hücresi, %10'un üzerinde güç dönüşüm verimliliğine ulaşmak için güçlü dikey hizalamanın şart olduğunu göstermiştir (Bosio et al., 2023; Duan et al., 2022).

Anizotropik yapı, kusur oluşumunu da etkiler. Selenyum ve antimon boşlukları veya ters yerleşim kusurları gibi içsel nokta kusurları, şerit sınırlarında ve zayıf şeritler arası bağlantı bölgelerinde oluşma eğilimindedir. SbSe ters yerleşimleri gibi derin seviye kusurları, radyasyonsuz rekombinasyona önemli ölçüde katkıda bulunur ve Sb₂Se₃ tabanlı fotovoltalıklardeki kalıcı açık devre voltajı açığıyla yakından ilişkilidir. Bu nedenle, bu kusurların şerit çerçevesi içinde nasıl ortaya çıktığını anlamak, elektronik kaliteyi iyileştirmek için kritik öneme sahiptir (Dong et al., 2021; Liu et al., 2024).

Film büyüme dinamikleri, Sb₂Se₃'ün şerit tabanlı davranışını daha da vurgulamaktadır. Püskürtme, kimyasal banyo biriktirme, elektro biriktirme veya çözelti yöntemleriyle hazırlanan ilk biriktirilmiş katmanlar genellikle küçük kristalitler, karışık yönelimler ve yerel yapısal düzensizlik içerir. Tavlama (özellikle selenizasyon) sırasında şeritler yeniden düzenlenir, tercih edilen yönelimi teşvik eder, uzun menzilli düzeni artırır ve düzensizliği azaltır. Klasik tane irileşmesi yerine, Sb₂Se₃ şerit yeniden düzenlenmesine uğrar; burada iyileşmeler, şeritler arası bağlantının güçlenmesinden ve şerit ağı içindeki yapısal gevşemeden kaynaklanır (Molaei & Kazeminezhad, 2019).

Sonuç olarak, Sb₂Se₃ tabanlı cihazların performansı doğrudan yapısal kalitesiyle bağlantılıdır. Dikey olarak hizalanmış şeritler, düşük kusur yoğunlukları ve iyi tanımlanmış sınırlar sergileyen filmler, sürekli olarak daha yüksek hareketlilik, azaltılmış rekombinasyon, daha dar bant kuyukları ve geliştirilmiş fotovoltalik veya fotodedektör performansı göstermektedir. Bu nedenle, yönlendirme kontrolü, kusur bastırma ve şerit hizalaması üzerindeki ustalık, malzemenin tam verimlilik potansiyelini ortaya çıkarmak için temel öneme sahiptir.

2. Sb₂Se₃ İnce Filminin Üretim Yöntemleri

Kaplama tekniği, Sb₂Se₃ ince filmlerinin yapısal ve optoelektronik kalitesini belirlemede merkezi bir rol oynar. Vakum tabanlı yaklaşımlar arasında, CSS, yoğun ve iyi kristalleşmiş katmanlar üretmede son derece etkili olduğunu kanıtlamıştır. Süblimasyon ve ardından arayüz mühendisliği yoluyla hazırlanan buharla büyütülmüş Sb₂Se₃ soğurucularında gösterildiği gibi, CSS ile büyütülen filmler güçlü tercihli yönelim, büyük taneler ve keskin X-ray kırınımı (XRD) yansımaları sergiler (Anandan et al., 2024; Duan et al., 2022). Yöntemin kompakt, yüksek derecede düzenli filmler oluşturma potansiyeli vurgulansa da yüksek sıcaklık gereksinimleri ölçeklenebilirliğini sınırlamaktadır. Manyetik püskürtme, Sb₂Se₃ biriktirme için en endüstriyel uyumlu yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, püskürtülen filmler genellikle biriktirilmiş halde amorf veya zayıf kristal yapıdadır. Bu nedenle, kristalleşmeyi, faz saflaştırmayı ve tercih edilen yönelimin geliştirilmesini sağlayan buhar fazlı selenizasyon şarttır. Çalışmalar, sonradan selenizasyona tabi tutulan püskürtülmüş Sb₂Se₃ filmlerinin önemli ölçüde iyileştirilmiş kristallığe ve dokuya sahip olduğunu göstermiştir (Tang et al., 2019; Zheng et al., 2025), benzer davranışın ise sülfürleme/selenizasyona tabi tutulan püskürtülmüş Sb₂Se₃ öncülleri için de rapor edildiği bildirilmiştir (Luo et al., 2020). Bu teknik, geniş yüzeylerde mükemmel kalınlık kontrolü ve homojenlik sağlar.

Çözeltiyle işlenmiş çeşitli yöntemler de araştırılmıştır. CBD, uyumlu öncü katmanlar üretir ancak genellikle kimyasal olarak biriktirilmiş Sb₂Se₃ filmlerinde gözlemlenenlere benzer şekilde, karışık yönelimlere sahip nanokristalin veya amorf filmler üretir (Krishnan, Arato, Cardenas, Roy, & Castillo, 2008; Ohki et al., 2001). Bu nedenle, öncülün iyi düzenlenmiş bir soğurucuya dönüştürülmesi için biriktirme sonrası tavlama veya selenizasyon çok önemlidir. CBD, düşük sıcaklıkta, geniş alanlı işleme için cazip olsa da, önemli termal aktivasyon olmadan stokiyometriyi kontrol etme ve güçlü tercihli yönelimi sağlama konusunda zorluklar devam etmektedir.

Elektro biriktirme, Sb₂Se₃ öncüllerini hızla üretebilen başka bir düşük maliyetli yöntemdir. Bununla birlikte, elektro biriktirilmiş filmler genellikle ikincil fazlar, bileşimsel homojen

olmama ve biriktirilmiş halde zayıf yapısal tutarlılık içerir (Bai et al., 2024), Sb_2Se_3 ve Bi_2S_3 dahil olmak üzere elektro biriktirilmiş kalkojenit filmlerde de benzer sorunlar gözlemlenmiştir (Yesugade et al., 1995). Daha sonra yapılan selenizasyon işlemi, yapısal kaliteyi önemli ölçüde artırarak optoelektronik uygulamalar için uygun, yoğun ve faz açısından saf filmlerin elde edilmesini sağlar (Ye et al., 2018).

Düşük sıcaklıktaki hidrotermal ve solvotermal sentez yöntemleri, özellikle nanotel olmak üzere kristal yapılı Sb_2Se_3 nanoyapılarının üretimi için oldukça etkilidir. Hidrotermal nanoteller doğal olarak genişletilmiş yapısal tutarlılık sağlar ve yüksek duyarlılık ve hızlı yükselme-düşme dinamikleri de dahil olmak üzere mükemmel optoelektronik performans sergiler; bu da onları fotodedektörler için cazip hale getirir (Y. Chen et al., 2022; Veeramalai et al., 2023). Çözeltiyle üretilen heteroyapılar ve kompozit nanomalzemeler, yaklaşımın ayarlanabilirliğini daha da vurgulamaktadır (Davoodi et al., 2016), ancak bu yöntemler, homojenlik sınırlamaları nedeniyle geniş alanlı fotovoltaiik katmanlar için uygun değildir.

Termal buharlaştırma yöntemi, vakum altında elementel veya bileşik kaynakların buharlaştırılmasıyla Sb_2Se_3 'e de uygulanmıştır. Bu yöntem, pürüzsüz filmler ve kararlı bir stokiyometri sağlar, ancak biriktirilen katmanlar genellikle amorf yapıdadır ve kristalleşmeleri için termal aktivasyon veya selenizasyon gerektirir (El-Shazly et al., 2002.; Huang et al., 2019; Tigau et al., 2005). Amorf halden kristal hale Sb_2Se_3 geçişi, malzemenin neredeyse tek boyutlu doğasını yansıtan, geleneksel tane irileşmesinden ziyade genellikle şerit yeniden düzenlenmesini içerir.

Tüm biriktirme yöntemlerinde ortak bir eğilim ortaya çıkmaktadır: selenizasyon, yüksek kaliteli Sb_2Se_3 filmlerinin elde edilmesinde belirleyici adımdır. Ön madde püskürtme, CBD, elektrokaplama, termal buharlaştırma veya hatta bazı buhar fazı yöntemleriyle oluşturulmuş olsun, selenizasyon kristalleşmeyi hızlandırır, yapısal düzeni artırır ve derin kusurları bastırır. Selenizasyon sonrası filmlerin sürekli olarak iyileştirilmiş hareketlilik, azaltılmış rekombinasyon ve gelişmiş optoelektronik performans sergilediği cihaz çalışmalarında da kendini göstermektedir (Anandan et al., 2024; Tang et al., 2019; Xu et al., 2024). Tablo 1'de, Sb_2Se_3 filmleri için bildirilen bant aralıkları, büyüme yöntemleri ve cihazla ilgili elektriksel özelliklerin kapsamlı bir karşılaştırması sunulmakta ve farklı biriktirme stratejilerinin işlevsel performansı nasıl etkilediğine dair özlü bir genel bakış sağlanmaktadır.

Tablo 1. Sb₂Se₃ İnce Filmlerinin Kaplama Yöntemleri, Bant Aralıkları ve Cihazla İlgili Temel Özellikleri

Malzeme	Üretim Metodu	Bant Aralığı (eV)	Elektriksel/Cihaz Özellikleri	Referans
Sb ₂ Se ₃	RF magnetron püskürtme + selenizasyon	~1.15	PCE ≈ %2,1; Selenizasyon kristallliği/yönelimi iyileştirir.	(Bai et al., 2024; Tang et al., 2019)
Sb ₂ Se ₃	Solüsyon tabanlı (döndürerek kaplama) + selenizasyon	1.10–1.20	Yüksek absorbsiyon katsayısı (~10 ⁵ cm ⁻¹); PCE ~%3–4; düşük tavlama sıcaklığında kristalleşme	(El-Shazly et al., 2002; Tigau et al., 2005)
Sb ₂ Se ₃ (nano çubuk)	Kapalı hacim süblimasyon (CSS)	~1.1–1.2	Dikey nano çubuk dizilimi; PCE ≈ %9,2; güçlü [001] yönelimi	(Anandan et al., 2024; Duan et al., 2022)
Sb ₂ Se ₃	Enjeksiyon Buhar Biriktirme (IVD)	1.15–1.20	PCE = %10,12; Azaltılmış tuzak yoğunluğu, geliştirilmiş şerit hizalaması ve kristallliği	(Bosio et al., 2023; Duan et al., 2022)
Sb ₂ Se ₃	Buhar Taşımalı Biriktirme Yöntemi (VTD)	~1.2	PCE ≈ %7,6; taneli yapı ve tercih edilen yönelimi güçlü bir şekilde etkiler V _{oc} ve J _{sc}	(Duan et al., 2022; Ohki et al., 2001)
Sb ₂ Se ₃	Elektrokaplama + tavlama	1.10–1.30	p veya n tipi iletim; taşıyıcı konsantrasyonu ve iletkenlik, biriktirme potansiyeli ve diğer faktörler tarafından kontrol edilir.	(Bai et al., 2024)
Sb ₂ Se ₃	RF magnetron püskürtme + farklı sıcaklıklarda selenizasyon	1.20–1.23	Öz direnç 3,9–11×10 ⁴ Ω·cm; fotodedektör tepkisi tavlama sıcaklığına büyük ölçüde bağlıdır.	(Olğar, Yılmaz, Rehman, & Bacaksız, 2025)
Sb ₂ Se ₃ (nano tel)	Hidrotermal sentez	~1.2	Yüksek foto duyarlılık; hızlı yükselme/düşme süreleri; düşük tuzak destekli rekombinasyon	(Veeramalai et al., 2023)
Sb ₂ Se ₃	Termal buharlaştırma + selenizasyon	~1.15	Amorf-kristal dönüşüm; selenizasyon sırasında belirlenen yönelim	(Tang et al., 2019)

3. Sb₂Se₃ İnce Filminin Optik Özellikleri

Sb₂Se₃'ün optik tepkisi, fotovoltaiik ve fotodedektör cihazlarındaki performansını belirlemede çok önemli bir rol oynar. Deneysel olarak bildirilen optik bant aralıkları tipik olarak 1,1–1,3 eV aralığındadır (Andriyevsky et al., 2025). Bu aralık püskürtme, çözelti işleme ve buharla büyütme yöntemleriyle üretilen filmlerde tutarlı bir şekilde gözlemlenmiştir (Anandan et al., 2024; Duan et al., 2022; El-Shazly et al., 2002; Luo et al., 2020; Tigau et al., 2005). Bant aralığı değerlerindeki küçük farklılıklar esas olarak yapısal düzen, kalıntı düzensizlik veya Se eksikliğindeki farklılıklardan kaynaklanır. Örneğin, püskürtme filmleri genellikle selenizasyondan önce hafifçe genişlemiş bant aralıkları sergiler ve bu bant aralıkları kristalleşme ve kusur azalmasının ardından daralır (Olğar et al., 2025).

Sb₂Se₃'ün en çekici özelliklerinden biri, soğurma kenarına yakın yüksek soğurma katsayısıdır ($\alpha > 10^5 \text{ cm}^{-1}$) (Zhao, Tang, Yang, & Chen, 2025). Bu güçlü soğurma, alt mikron soğurucu katmanlar kullanılarak görünür ve yakın kızılötesi ışığın verimli bir şekilde toplanmasını sağlar. Çeşitli deneysel çalışmalar, 800 nm'nin altındaki kalınlıklar için 400-900 nm aralığında etkili soğurmayı doğrulamaktadır (Ohki et al., 2001; Tigau et al., 2005). Bu özellikler, Sb₂Se₃'ü ultra ince ve esnek fotovoltaiik platformlar için oldukça rekabetçi hale getirmektedir.

Soğurma kenarının keskinliği, optik kalite hakkında ek bilgi sağlar. Bant aralıkları tipik olarak Tauc formalizmi kullanılarak elde edilir. Burada Sb₂Se₃ doğrudan bir yarı iletken gibi davranır ve yüksek kristalliğe sahip filmler için $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiklerinde iyi tanımlanmış doğrusal bölgeler verir (Anandan et al., 2024; Duan et al., 2022; El-Shazly et al., 2002; Tigau et al., 2005). Buna karşılık, püskürtme veya elektrokaplama ile elde edilen katmanlarda gözlemlenen genişlemiş veya kavisli Tauc bölgeleri, artan düzensizliği ve yerel yapısal dalgalanmaları yansıtır (Olğar et al., 2025).

Urbach enerjisi, Sb₂Se₃'teki bant kuyruklarını ve lokalize durumların yoğunluğunu ölçmek için yaygın olarak kullanılır. Yüksek Urbach enerji değerleri, genişlemiş soğurma kenarlarıyla ilişkilidir ve genellikle yapısal düzensizliğin daha belirgin olduğu düşük sıcaklık veya çözelti bazlı filmlerde bulunur. Özellikle selenizasyon yoluyla termal aktivasyon, kusur kaynaklı kuyruk durumlarını bastırarak Urbach enerjisini düşürür; bu eğilim, cihaz performansının iyileşmesiyle tutarlı bir şekilde ilişkilendirilir. Çalışmalar, optik düzensizlikteki azalmanın doğrudan daha yüksek açık devre voltajlarını ve azalmış radyasyonsuz rekombinasyonu desteklediğini göstermektedir.

Yönelime bağlı davranış, Sb₂Se₃'ün bir diğer belirleyici optik özelliğidir. Sıklıkla güçlü düzlem dışı yönelimler geliştiren CSS veya IVD ile büyütülen filmler, daha dik soğurma kenarları ve azaltılmış bant kuyrukları sergileyerek üstün yapısal düzenlerini yansıtır. Yönelimsel iyileştirmeler, gelişmiş foto hassasiyet ve hızlı foto tepki dinamiklerinin rapor edildiği nano tel gibi hidrotermal olarak sentezlenen nanoyapılarda da belirgindir (Veeramalai et al., 2023; Wang, Ji, & Shin, 2022). Bu, mikro yapı ve optik geçişler arasındaki güçlü etkileşimi vurgular. Stokiyometri, optik özellikleri daha da etkiler; Se eksikliği olan filmler, kusur kaynaklı bozulmalar nedeniyle genişlemiş bant aralıkları, azalmış kenar altı soğurma ve artmış kuyruklanma sergileme eğilimindedir. Buna karşılık, iyi selenyumlanmış filmler daha keskin kenarlar ve minimum bant altı soğurma göstererek, iyileştirilmiş homojenliği ve azalmış kusur yoğunluğunu doğrular (Duan et al., 2022; Li et al., 2018). Çeşitli biriktirme yollarından elde edilen Sb₂Se₃'ün temel optik parametreleri, deneysel olarak gözlemlenen aralıkları, ilgili film tiplerini ve bunların cihaz performansı üzerindeki etkilerini vurgulayan özellikler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Sb₂Se₃ İnce Filmlerinin Deneyisel Olarak Bildirilen Optik Özellikleri

Optik Parametre	Deneyisel Aralık	Gözlenen	Notlar / Yorumlama
Bant aralığı (E _g)	1,10 – 1,30 eV	Püskürtme (Olğar et al., 2025); Solüsyon (El-Shazly et al., 2002; Tigau et al., 2005); CSS/IVD (Duan et al., 2022; Olğar et al., 2025)	Selenizasyon sonrasında bant aralığı daralır; stokiometriye bağlıdır.
Adsorbsiyon katsayısı (α)	>10 ⁵ cm ⁻¹	Termal buharlaştırma (El-Shazly et al., 2002; Tigau et al., 2005); CBD (Vargas, Murphy, & Ramana, 2014)	PV/PD cihazları için <1 μm soğurucuya olarak tanır.
Adsorbsiyon kenar keskinliği	Yüksek kristalli filmler	CSS/IVD filmler (Duan et al., 2022; Luo et al., 2020; Olğar et al., 2025)	Bant kenarı düzensizliklerinin azalır ve yapısal düzen artar.
Tauc eğrisi davranışı	Yüksek kaliteli filmler için doğrudan geçiş	CSS/IVD (Duan et al., 2022; Olğar et al., 2025); Selenizasyon (Luo et al., 2020)	Eğri/genişleyen grafikler düzensizliği gösterir.
Urbach enerjisi	Yüksek → düzensiz; Düşük → selenyumlanmış filmler	Solüsyon [3,4]; püskürtme (Luo et al., 2020; Olğar et al., 2025); hidrotermal (Veeramalai et al., 2023)	Daha düşük Urbach enerjisi, Voc'yi iyileştirir ve rekombinasyonu azaltır.
Optik anizotropi	Güçlü (yönelime bağlı olarak)	CSS/IVD (Duan et al., 2022; Olğar et al., 2025); nano tel (Veeramalai et al., 2023)	Hizalama, band basamağı ve tepki hızını artırır.
Alt-band Emilimi	Se eksikliği olan filmlerde belirgindir.	Püskürtme/selenizasyon altında (Luo et al., 2020; Olğar et al., 2025)	Uygun selenizasyon sonrasında azalmıştır
Foto yanıt davranışı	Yüksek tepki hızı, hızlı yükselme-düşme	Nano tel (Veeramalai et al., 2023); Buharla işlem görmüş filmler (Olğar et al., 2025; Veeramalai et al., 2023)	Daha iyi kristal yapısı ve daha az tuzak merkezi

Genel olarak, ideal bant aralığına yakınlığı, güçlü soğurması, kuyruk durumu hassasiyeti ve yönelimle bağlantılı kenar keskinliği ile karakterize edilen Sb₂Se₃'ün optik performansı, filmlerin temel kalitesini doğrudan yansıtmaktadır. Bu gözlemler, malzemenin optoelektronik potansiyelini tam olarak kullanmak için yüksek yapısal düzenin, uygun stokiometrinin ve etkili biriktirme sonrası işlemlerin önemini vurgulamaktadır.

4. Sb₂Se₃ İnce Filminin Elektriksel Özellikleri

Sb₂Se₃'ün elektriksel davranışı, anizotropik bağlanma ortamı ve film büyümesi sırasında elde edilen yapısal düzenin kalitesi tarafından belirlenir. Çok çeşitli biriktirme yöntemlerinde, Sb₂Se₃ genellikle p-tipi iletkenlik sergiler; bu durum tipik olarak antimon boşlukları ve

selenyum ters yerleşimleri gibi içsel alıcı kusurlarıyla ilişkilidir. Deneysel alışmalar ayrıca, elektrokimyasal biriktirme ve alt-stokiyometrik öncü oluşumu da dahil olmak üzere büyüme kimyasındaki varyasyonların, yük dengesinin yerel bileşime olan güçlü duyarlılığını yansıtan n-tipi veya karışık iletkenlik davranışına neden olabileceğini göstermiştir (Bai et al., 2024; Olęar et al., 2025). Taşıyıcı konsantrasyonları sıklıkla 10^{14} - 10^{16} cm⁻³ mertebesinde rapor edilmekte olup, bu değerler çözelti bazlı ve vakum bazlı çökelme yöntemleriyle hazırlanan diğer kalkojenür soğurucularda gözlemlenen değerlerle tutarlıdır (El-Shazly et al., 2002; Krishnan et al., 2008; Tigau, 2006).

Sb₂Se₃'teki yük taşınımı belirgin şekilde anizotropiktir. Güçlü düzlem dışı doku sergileyen filmler, genişletilmiş yapısal birimlerin yönü boyunca verimli yük yayılımı nedeniyle önemli ölçüde artırılmış hareketlilik gösterir. CSS veya IVD ile hazırlanan buharla büyütölmüş filmler, tutarlı bir şekilde nispeten yüksek hareketlilik ve düşük tuzak yoğunlukları sergileyerek üstün yapısal tutarlılıklarını yansıtır (Duan et al., 2022; Olęar et al., 2025). Buna karşılık, selenizasyondan önce püskürtölerek elde edilen filmler, bozulmuş düzen ve yerelleşmiş tuzak durumları nedeniyle genellikle azalmış hareketlilik gösterir; bu sınırlamalar, buhar fazlı selenizasyonun kristalleşmeyi ve yönlü yeniden düzenlemeyi tetiklemesinden sonra önemli ölçüde hafifletilir (Tang et al., 2019). Isıl işlem sonrası taşıma davranışındaki benzer iyileşmeler, CBD ve spre y piroliz yöntemleriyle yetiştirilen Sb₂S₃ filmlerinde de yaygın olarak bildirilmiştir. Burada termal olarak yönlendirilen yapısal düzenleme, tuzak aracılı taşıma yollarını azaltır (Gadakh & Bhosale, 2002; Krishnan et al., 2008).

İletkenlik için aktivasyon enerjisi genellikle 0,20-0,30 eV aralığındadır, ancak püskürtme veya elektrokaplama ile elde edilen katmanlarda, daha yüksek düzensizlik derecesi ve eksik bağ sürekliliği nedeniyle daha yüksek değerler sıklıkla gözlemlenir (Bai et al., 2024; Tang et al., 2019). Selenizasyon sonrasında, yapısal düzen iyileştikçe ve yanlış hizalanmış sınırlardaki potansiyel bariyerler azaldıkça aktivasyon enerjileri düşer. Bu eğilim, tavlama işleminin amorf ağları, azaltılmış sıçrama kısıtlamalarına sahip iyi bağlantılı yarı iletken çerçevelere dönüştürdüğü, çözeltiyle yetiştirilen çeşitli Sb₂S₃ öncüllerinin eğilimini yansıtır (Gadakh & Bhosale, 2002).

Elektriksel direnç (ρ) de benzer şekilde film mikro yapısı ve kaplama sonrası işlemden etkilenir. Püskürtme yöntemiyle üretilen Sb₂Se₃ filmler, kristalleşmeden önce 10^4 - 10^5 Ω·cm kadar yüksek direnç değerleri sergileyebilir ve selenizasyon sonrasında faz saflığının artması ve tane bağlantısının güçlenmesi nedeniyle direnç belirgin şekilde azalır (Olęar et al., 2025). Benzer bir azalma, Sb₂S₃ ve Cd içermeyen sülfürler gibi çözeltiyle işlenmiş kalkojenür filmlerde de gözlemlenir; burada termal aktivasyon amorf fraksiyonları azaltır ve yük geçirgenliğini artırır (El-Shazly et al., 2002; Rajpure & Bhosale, n.d.; Tigau et al., 2005). Buna karşılık, CSS ve IVD ile hazırlananlar da dahil olmak üzere buharla büyütölen Sb₂Se₃ filmleri, daha büyük kristal alanları ve kusur kaynaklı saçılmanın azalması nedeniyle genellikle önemli ölçüde daha düşük öz dirençler gösterir (Duan et al., 2022; Luo et al., 2020; Olęar et al., 2025).

Kusurlar elektriksel performansı büyük ölçüde etkiler. Sb₂Se₃'teki selenyum boşlukları derin donör durumları olarak işlev görürken, antisite kusurları derin alıcı seviyeleri oluşturur; her ikisi de ışımasız rekombinasyona ve taşıyıcı ömrünün kısalmasına katkıda bulunur. Bu kusur türleri, özellikle düşük sıcaklıkta büyütölmüş veya yetersiz selenyumlanmış filmlerde yaygındır ve optik ölçümlerde gözlemlenen yüksek Urbach enerjileri ve gelişmiş bant aralığı altı soğurmasıyla tutarlıdır (Luo et al., 2020; Xu et al., 2024). Benzer davranışlar sıklıkla Sb₂S₃ ince filmlerinde de rapor edilmektedir. Kükürt eksikliği ve antisite oluşumu tuzak yoğunluğunu artırır ve elektronik kaliteyi düşürür (Krishnan et al., 2008). Etkin selenizasyon, stokiyometriyi geri kazandırarak ve uzun menzilli yapısal düzeni teşvik ederek bu kusurları bastırır; bu da daha yüksek taşıyıcı hareketliliğine ve gelişmiş cihaz ölçütlerine yol açar.

Tane sınırları boyunca yük taşınımı, Sb₂Se₃'ün anizotropik doğasını daha da yansıtır. Uzatılmış yapısal motifler boyunca hizalanmış sınırlar tipik olarak ihmal edilebilir elektronik direnç

gösterirken, yanlış yönlendirilmiş veya bükülmüş arayüzler, taşıyıcı akışını engelleyen potansiyel bariyerler oluşturur. Bu da tutarlı sınırların verimli taşınımı desteklediği CSS ile yetiştirilen Sb_2Se_3 'te (Duan et al., 2022), ve yanlış hizalanmış tanelerin hareketliliği önemli ölçüde azalttığı ve tuzak destekli rekombinasyonu artırdığı çözelti kaynaklı Sb_2S_3 filmlerinde yapılan gözlemlerle tutarlıdır (Gadakh & Bhosale, 2002; Krishnan et al., 2008).

Toplu olarak, taşıyıcı konsantrasyonu, hareketlilik, aktivasyon enerjisi, direnç ve rekombinasyon davranışı dahil olmak üzere Sb_2Se_3 'ün elektriksel performansı, yapısal düzen, stokiometri ve kusur kimyası arasındaki dengeden kaynaklanır. Kristalleşmeyi teşvik eden, yapısal düzensizliği en aza indiren ve tutarlı bağlantı kuran teknikler, özellikle selenizasyon gibi buhar fazı işlemleri, yüksek performanslı fotovoltaik ve fotodedektör uygulamaları için uygun, gelişmiş elektronik kaliteye sahip filmler elde edilmesini sağlar.

5. Sb_2Se_3 İnce Filminin Aygıt Uygulamaları

Yarı tek boyutlu soğurucu Sb_2Se_3 , malzeme özellik çalışmaları alanının ötesine geçerek çeşitli cihaz uygulamalarında kullanılmaya başlandı. İnce film fotovoltaiklerde, Sb_2Se_3 , güçlü ışık soğurması, uygun bant aralığı ve gelişmiş biriktirme ve pasivasyon yoluyla iyileştirilmiş film kalitesi sayesinde %10'u aşan onaylanmış güç dönüşüm verimliliklerine ulaştı. Örneğin, enjeksiyon buhar biriktirme yöntemiyle üretilen Sb_2Se_3 güneş pilleri, derin seviye kusurlarının bastırılması ve taşıyıcı ekstraksiyonunun artırılması yoluyla ~%10,12'lik bir PCE'ye ulaştı (Duan et al., 2022). Arayüz katmanlarının ve tampon bileşimlerinin optimizasyonu performansı daha da iyileştirdi: $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ tabanlı mimarilerde, ultra ince AlO_x pasivasyonunun eklenmesi, V_{oc} ve doluluk faktörünün iyileştirilmesini sağladı (Z. X. Chen et al., 2024).

Fotovoltaiklerin ötesinde, Sb_2Se_3 fotodedektör teknolojilerinde umut vadeden sonuçlar göstermiştir. Sb_2Se_3 ince filmlerini kullanan görünürden yakın kızılötesine kadar kendi kendine çalışan fotodedektörler, malzemenin soğurma kenarı ve şerit eksen boyunca iletiminden yararlanarak yüksek duyarlılık ($>3 \text{ AW}^{-1}$) ve $\sim 10^{11}$ Jones algılama yeteneği sergilemektedir (Yuan et al., 2016).

Sb_2Se_3 ayrıca termoelektrik ve çok fonksiyonlu cihazlarda da potansiyel göstermektedir. Termal kararlılığı ve enerji dönüşüm çok yönlülüğü üzerine yapılan araştırmalar, Sb_2Se_3 'ün birleşik fotovoltaik-termoelektrik sistemlerde veya geniş spektrumlu algılama için soğurucu olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Altuntas, Isik, Surucu, Parlak, & Surucu, 2025). Ayrıca, toksisiteyi ve arayüz kaybını azaltmak için daha geniş alanlı cihaz konseptleri ve alternatif tampon katmanlar (örneğin $\text{Zn}(\text{O},\text{S})$ süper tabaka yapıları) araştırılmaktadır (Cantas, 2025).

Uygulama başarısının anahtarı şunlardır: (1) şerit hizalı kristallliği korumak ve rekombinasyon aktif kusurlarını en aza indirmek, (2) anizotropik taşımaya uyacak şekilde heteroeklemleri ve taşıyıcı seçici kontakları tasarlamak, (3) geniş alanlarda yapısal kaliteyi koruyan biriktirme yollarını ölçeklendirmek ve (4) esnek ve hafif formatlar için ultra ince soğurucu kalınlıklarından yararlanmak. Bu gelişmeler göz önüne alındığında, Sb_2Se_3 , yeni nesil optoelektronik cihazlar için çok yönlü bir soğurucu olarak hızla kendini kanıtlamaktadır.

6. Sonuç

Sb₂Se₃, yapısal anizotropisi, uygun bant aralığı ve güçlü optik soğurması nedeniyle son derece çekici, bol bulunan bir soğurucu malzeme olarak ortaya ıkmiş ve yeni nesil ince film optoelektronik için rekabetçi bir aday konumuna gelmiştir. Son on yılda yapılan kapsamlı araştırmalar, elektronik performansının, şerit hizalama derecesi, içsel kusurların yoğunluğu ve cihaz üretimi sırasında oluşan arayüzlerin kalitesi tarafından yakından belirlendiğini göstermiştir. Biriktirme koşullarının dikkatli optimizasyonu, etkili selenizasyon işlemleriyle birlikte, iyileştirilmiş kristalliğe, iyi tanımlanmış tercih edilen yönelimlere ve azaltılmış tuzak yoğunluklarına sahip filmlerin oluşturulmasını sağlamış ve bu da hem fotovoltaiik hem de fotodedektör uygulamalarında önemli ilerlemelere katkıda bulunmuştur.

Bu başarılar rağmen, malzemenin tam potansiyelinin gerçekleştirilmesini sınırlayan çeşitli zorluklar hala mevcuttur. Derin kusurlardan kaynaklanan radyasyonsuz rekombinasyon, stokiyometrik sapmalara duyarlılık, arayüz kaynaklı taşıyıcı kayıpları ve kararlı ve kontrol edilebilir doping elde etmenin zorluğu, cihaz verimliliğini kısıtlamaya devam etmektedir. Ayrıca, laboratuvar ölçekli optimizasyon stratejilerinin geniş alanlı üretime aktarılması, özellikle süreç homojenliğinin ve uzun vadeli istikrarın sağlanmasıda önemli bir engel olmaya devam etmektedir.

Gelecekteki ilerleme, kusur mühendisliğiyle gerçekleştirilen büyüme, yönlendirme güdümlü film oluşumu ve bant hizalı temas katmanlarıyla rafine edilmiş arayüz pasivasyonunun entegrasyonuna bağlı olacaktır. Düşük sıcaklık ve esnek işleme yollarının genişletilmesi, Sb₂Se₃'n teknolojik erişimini daha da genişletebilir. Bunların hepsi birlikte ele alındığında, bu yarı-tek boyutlu kalkojenitin umut vadeden deneysel gösterimlerden, geniş ölçekli enerji dönüşümü ve gelişmiş optoelektronik algılama için güvenilir, yüksek performanslı platformlara ne kadar etkili bir şekilde geçiş yapabileceğini belirleyecektir.

Kaynaklar

- Abegunde, O. O., Akinlabi, E. T., Oladijo, O. P., Akinlabi, S., & Ude, A. U. (2019). Overview of thin film deposition techniques. In *AIMS Materials Science* (Vol. 6, Issue 2, pp. 174–199). AIMS Press. <https://doi.org/10.3934/Matersci.2019.2.174>
- Akshay, V. V., Benny, S., & Bhat, S. V. (2022). Solution-processed antimony chalcogenides based thin film solar cells: A brief overview of recent developments. In *Solar Energy* (Vol. 241, pp. 728–737). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.06.042>
- Altuntas, G., Isik, M., Surucu, G., Parlak, M., & Surucu, O. (2025). Exploring the Thermal Stability of Sb₂Se₃ for Potential Applications through Advanced Thermal Analysis Methods. *ACS omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10053>
- Anandan, R., Xavier, T. P., & Piraviperumal, M. (2024). Selenization-induced [001]-oriented Sb₂Se₃ film formation and its photo-sensing characteristics. *Materials Chemistry and Physics*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129571>
- Bai, H., Li, Y., Shen, H., Wang, L., Li, H., Xie, Z., Chen, A., Shi, Z., & Wang, W. (2024). Preparation of antimony selenide thin films by electrochemical deposition and application in optoelectronic devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.108027>
- Ballif, C., Haug, F. J., Boccard, M., Verlinden, P. J., & Hahn, G. (2022). Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. In *Nature Reviews Materials* (Vol. 7, Issue 8, pp. 597–616). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00423-2>
- Bosio, A., Foti, G., Pasini, S., & Spoltore, D. (2023). A Review on the Fundamental Properties of Sb₂Se₃-Based Thin Film Solar Cells. In *Energies* (Vol. 16, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en16196862>
- Cantas, A. (2025). Photovoltaic Performance Investigation of Superstrate Sb₂Se₃ Solar Cells with Non-toxic Zn(O,S) Buffer Layer via Magnetron Sputtering. *Cumhuriyet Science Journal*, 46(3), 550–562. <https://doi.org/10.17776/csj.1657583>
- Choi, J. H., Ha, C. W., Choi, H. Y., Shin, H. C., & Lee, S. M. (2017). High performance Sb₂S₃/carbon composite with tailored artificial interface as an anode material for sodium ion batteries. *Metals and Materials International*, 23(6), 1241–1249. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-7105-y>
- Dong, J., Liu, Y., Wang, Z., & Zhang, Y. (2021). Boosting V OC of antimony chalcogenide solar cells: A review on interfaces and defects. *Nano Select*, 2(10), 1818–1848. <https://doi.org/10.1002/nano.202000288>
- Dönges, E. (1950). Über Chalkogenohalogenide des dreiwertigen Antimons und Wismuts. II. Über Selenohalogenide des dreiwertigen Antimons und Wismuts und über Antimon(III)-selenid Mit 2 Abbildungen. *ZAAC - Journal of Inorganic and*

General Chemistry, 263(5–6), 280–291.
<https://doi.org/10.1002/zaac.19502630508>

- Duan, Z., Liang, X., Feng, Y., Ma, H., Liang, B., Wang, Y., Luo, S., Wang, S., Schropp, R. E. I., Mai, Y., & Li, Z. (2022). Sb₂Se₃ Thin-Film Solar Cells Exceeding 10% Power Conversion Efficiency Enabled by Injection Vapor Deposition Technology. *Advanced Materials*, 34(30). <https://doi.org/10.1002/adma.202202969>
- El-Shazly, A. A., Seyam, M. A. M., El-Samanoudy, M. M., Ammar, A. H., & Assim, E. M. (2002). The effect of deposition rate and heat treatment on conduction and charge carrier transport mechanisms in Sb₂S₃ films. *Applied Surface Science*, 189(1). [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00015-6)
- Kim, S. K., You, H. K., Yun, K. R., Kim, J. H., & Seong, T. Y. (2023). Fabrication of High-Responsivity Sb₂Se₃-Based Photodetectors through Selenization Process. *Advanced Optical Materials*, 11(7). <https://doi.org/10.1002/adom.202202625>
- Li, G., Li, Z., Chen, J., Chen, X., Qiao, S., Wang, S., Xu, Y., & Mai, Y. (2018). Self-powered, high-speed Sb₂Se₃/Si heterojunction photodetector with close spaced sublimation processed Sb₂Se₃ layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 737, 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.039>
- Liu, Y., Xu, S., Luo, Y., Chen, G., Chen, S., Zheng, Z., & Liang, G. (2024). A Review on Suppressing Nonradiative Recombination Losses in Antimony Chalcogenide Thin-Film Solar Cell. In *Solar RRL* (Vol. 8, Issue 19). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/solr.202400499>
- Mamta, Singh, Y., Maurya, K. K., & Singh, V. N. (2021). A review on properties, applications, and deposition techniques of antimony selenide. In *Solar Energy Materials and Solar Cells* (Vol. 230). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111223>
- Molaei, P., & Kazeminezhad, I. (2019). One-step in situ synthesis of antimony sulfide/reduced graphene oxide composite as an absorber layer with enhanced photocurrent performances for solar cells. *Journal of Nanoparticle Research*, 21(3). <https://doi.org/10.1007/s11051-019-4490-9>
- Nefzi, K., Rabhi, A., & Kanzari, M. (2023). Impact of air annealing on the properties of Cu₃SbS₃ thin films deposited by vacuum thermal evaporation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(5). <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09763-9>
- Ohki, S., Mineta, S., Mizunuma, M., al, Heikonen, J. M., Ploehn, H. J., White-, R. E., Salem, A. M., & Soliman Selim, M. (2001). Structure and optical properties of chemically deposited Sb₂S₃ thin films. In *J. Phys. D: Appl. Phys* (Vol. 34). www.iop.org/Journals/jdPPII:S0022-3727
- Olğar, M. A., Yılmaz, S., Rehman, F., & Bacaksız, E. (2025). Exploring the relationship between reaction temperature and photodetection properties in Sb₂Se₃ thin film-

- based devices. *Surfaces and Interfaces*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106109>
- Shi, J., Wang, Y., Yang, M., Gu, Y., An, W., Men, Y., Yang, J., & Rui, Y. (2021). Enhanced interface properties of solution-processed antimony sulfide planar solar cells with n-type indium sulfide buffer layer. *Electrochimica Acta*, 376. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138031>
- Tang, R., Chen, X. Y., Liang, G. X., Su, Z. H., Luo, J. ting, & Fan, P. (2019). Magnetron sputtering deposition and selenization of Sb₂Se₃ thin film for substrate Sb₂Se₃/CdS solar cells. *Surface and Coatings Technology*, 360, 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.102>
- Tigau, N., Ciupina, V., & Prodan, G. (2005). The effect of substrate temperature on the optical properties of polycrystalline Sb₂O₃ thin films. *Journal of Crystal Growth*, 277(1–4), 529–535. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.01.056>
- Veeramalai, C. P., Xu, Y., Chen, Y., Lin, G., Wang, J., Wang, Y., Li, C., & Zhang, X. (2023). Photoelectronic properties of antimony selenide nanowire synthesized by hydrothermal method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 674. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131889>
- Wang, Y., Ji, S., & Shin, B. (2022). Interface engineering of antimony selenide solar cells: a review on the optimization of energy band alignments. *JPhys Energy*, 4(4). <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ac8578>
- Wu, D., Wu, Y., Wang, Y., Lv, K., & Shi, C. (2021). A facile two-step preparation of compact and crystalline Sb₂S₃ thin film for efficient solar cells. *Current Applied Physics*, 29, 5-8. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2021.05.013>
- Yuan, C., Jin, X., Jiang, G., Liu, W., & Zhu, C. (2016). Sb₂Se₃ solar cells prepared with selenized dc-sputtered metallic precursors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(9), 8906-8910. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4917-3>
- Ye, Q., Xu, Y., Chen, W., Yang, S., Zhu, J., & Weng, J. (2018). Enhanced photovoltaic performance of Sb₂S₃ -sensitized solar cells through surface treatments. *Applied Surface Science*, 440, 294–299. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.090>
- Zeng, K., Xue, D. J., & Tang, J. (2016). Antimony selenide thin-film solar cells. In *Semiconductor Science and Technology* (Vol. 31, Issue 6). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/6/063001>

BÖLÜM 3

OPTİK KOHERENS TOMOGRAFİ (OCT)

Firdevs Banu ÖZDEMİR¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Simav Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Simav-Kütahya, Türkiye, ORCID: 0000-0002-7935-2062

1. Giriş

Optik Koherens Tomografi (Optical Coherence Tomography, OCT), biyolojik dokuların mikrometre ölçeğinde uzaysal çözünürlükle, non-invaziv ve gerçek zamanlı olarak görüntülenmesini sağlayan bir optik görüntüleme tekniğidir. OCT, düşük koherensli ışık kaynakları kullanılarak gerçekleştirilen interferometrik ölçümlere dayanmakta olup, bu sayede dokuların iç yapısına ait bilgiyi derinlik ekseninde çözümleyebilen yüksek çözünürlüklü kesitsel görüntüler üretmektedir (Huang et al., 1991). Bu interferometrik yaklaşım, OCT'nin ultrason benzeri bir derinlik algılama prensibini optik dalga boylarında gerçekleştirmesine olanak tanıyarak, biyomedikal görüntüleme alanında ayırt edici bir konum kazanmasını sağlamıştır (Fujimoto et al., 2000)

OCT'nin gelişimi, 20. yüzyılın ikinci yarısında interferometri, koherens teorisi ve fiber optik teknolojilerinde yaşanan ilerlemelerin doğal bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. OCT'nin doğrudan öncülü, düşük koherens interferometri (Low Coherence Interferometry, LCI) olarak bilinen ve optik yol farklarının hassas ölçümüne olanak tanıyan tekniklerdir (Drexler & Fujimoto, 2015).

1970'li ve 1980'li yıllarda düşük koherensli ışık kaynaklarının interferometrik ölçümlerde kullanımı, özellikle endüstriyel yüzey profili ölçümleri ve optik metrologi alanlarında gelişmiştir. Bu dönemde interferometrinin temel sınırlaması, yüksek koherensli lazerlerin kullanılması nedeniyle derinlik seçiciliğinin olmamasıydı. Geniş spektral bant genişliğine sahip kaynakların kullanılmasıyla, interferansın yalnızca kısa optik yol farklarında oluştuğu fark edilmiş ve bu durum “koherens kapılama (coherence gating)” kavramını doğurmuştur (Fercher, 1996).

Bu fiziksel prensip, daha sonra biyolojik dokuların derinlik bazlı görüntülenmesi için kritik bir avantaj haline gelmiştir (Fercher et al., 2003).

OCT kavramı ilk kez 1991 yılında Huang ve çalışma arkadaşları tarafından tanımlanmış ve literatüre kazandırılmıştır. Bu ilk sistemler, günümüzde Time-Domain OCT (TD-OCT) olarak adlandırılan yapıya sahiptir. TD-OCT'de referans kolu mekanik olarak taranmakta ve interferans sinyali yalnızca referans aynasının konumu, örnekten gelen yansımanın optik yol farkı ile eşleştiğinde elde edilmektedir. Bu yaklaşım, OCT'nin biyolojik dokular üzerinde uygulanabilirliğini göstermiş olsa da, mekanik tarama gereksinimi nedeniyle görüntüleme hızı sınırlı kalmıştır. Buna ek olarak, sinyal-gürültü oranı ve hassasiyet, klinik kullanım için henüz yeterli seviyede değildir (Bouma & Tearney, 2002).

2000'li yılların başında, OCT alanında en önemli dönüm noktalarından biri gerçekleşmiş ve **Fourier-Domain OCT (FD-OCT)** konsepti geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda referans kolu sabit tutulmakta; interferometrik sinyalin spektral bileşenleri ölçülerek Fourier dönüşümü aracılığıyla derinlik bilgisi elde edilmektedir (Leitgeb et al., 2003).

Spectral-Domain OCT (SD-OCT) olarak bilinen bu yöntem, TD-OCT'ye kıyasla:

- Daha yüksek sinyal-gürültü oranı,
- Daha hızlı görüntüleme,
- Daha yüksek hassasiyet

sunmuştur. Bu gelişme, OCT'nin klinik alanda yaygınlaşmasını doğrudan hızlandırmış ve özellikle oftalmolojide standart tanı yöntemlerinden biri haline gelmesini sağlamıştır (Wojtkowski et al., 2004).

FD-OCT'nin bir diğer türevidir olan **Swept-Source OCT (SS-OCT)**, dalga boyu zamana bağlı olarak taranan lazer kaynakları kullanır. Bu sistemler, daha uzun dalga boylarında çalışabilmeleri sayesinde daha derin doku penetrasyonu sağlar ve özellikle kardiyovasküler görüntüleme ile ön segment oftalmik uygulamalarda avantaj sunar (Choma et al., 2003).

Son yıllarda OCT teknolojisi; OCT anjiyografi, fonksiyonel OCT, adaptif optik OCT, yapay zeka destekli görüntü analizi gibi çok disiplinli yaklaşımlarla gelişimini sürdürmektedir. Bu evrim, OCT'yi yalnızca yapısal değil, aynı zamanda fonksiyonel ve kantitatif bir görüntüleme aracı haline getirmektedir (Spaide, Fujimoto, & Waheed, 2018). OCT'nin tarihsel gelişimi, teknolojik ilerlemenin yalnızca donanım değil, aynı zamanda fiziksel kavrayış ve sinyal işleme yöntemleri ile şekillendiğini göstermektedir. Düşük koherens interferometrinin keşfi ve Fourier-domain yaklaşımların uygulanması, OCT'nin günümüzdeki yüksek performanslı haline ulaşmasının temelini oluşturmuştur (Drexler & Fujimoto, 2015).

OCT'nin temel avantajı, ultrason görüntüleme ile kavramsal olarak benzer bir derinlik çözümü prensibini benimsemesine rağmen, mekanik dalgalar yerine optik dalgaları kullanmasıdır. Bu durum, dalga boyunun birkaç mertebe daha kısa olması nedeniyle, ultrason tekniklerine kıyasla çok daha yüksek aksiyel ve lateral çözünürlük elde edilmesini mümkün kılar (Huang et al., 1991; Fercher et al., 2003). Tipik bir OCT sistemi, 1–15 μm aralığında aksiyel çözünürlük sunabilmekte olup, bu değer klasik manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve bilgisayarlı tomografi (BT) gibi yöntemlerin oldukça üzerindedir (Drexler & Fujimoto, 2015).

Özellikle oftalmoloji alanında retina ve optik sinir başının tabakalı yapısının ayrıntılı olarak görüntülenmesini mümkün kılan OCT, kısa sürede klinik pratiğin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir (Schuman et al., 2004). Günümüzde OCT yalnızca oftalmoloji ile sınırlı kalmayıp; kardiyoloji, dermatoloji, gastroenteroloji, diş hekimliği, onkoloji ve nöroloji gibi çok sayıda biyomedikal alanda aktif olarak kullanılmaktadır (Tearney et al., 2012). Bununla birlikte, endüstriyel metroloji ve yarı iletken ince film karakterizasyonu gibi biyomedikal olmayan uygulamalar da OCT'nin geniş kullanım alanını ortaya koymaktadır (Izatt & Choma, 2008).

Bu kitap bölümünün amacı, OCT teknolojisini yalnızca bir görüntüleme aracı olarak değil; altında yatan optik interferometri, koherens teorisi ve sinyal işleme prensipleriyle birlikte ele almak ve okuyucuya hem teorik hem de uygulamaya dönük bütüncül bir bakış açısı sunmaktır.

2. Temel Fizik Prensipleri

2.1. Düşük Koherens İnterferometri

Düşük koherens interferometri (Low Coherence Interferometry, LCI), geniş spektral bant genişliğine sahip bir ışık kaynağıyla yapılan interferometrik ölçümlere dayanan optik bir tekniktir. Bu teknik, hem yüzey profili metrologisi gibi endüstriyel uygulamalarda hem de biyolojik dokuların mikronsal çözünürlükle görüntülenmesinde kullanılabilir (Fercher et al., 1995).

OCT'nin temel amacı, biyolojik bir dokuya gönderilen ışığın dokunun farklı derinliklerinden geri yansıyan bileşenlerini derinlik ekseninde ayırt ederek bu bilgiyi kesitsel bir görüntüye dönüştürmektir. Klasik optik mikroskopide dokudan geri dönen tüm ışık bileşenleri üst üste bindiğinden böyle bir derinlik ayrımı mümkün değildir; OCT'de bu ayrımı sağlayan temel mekanizma ise düşük koherens interferometridir. İnterferometri, ölçülen optik sinyalin fiziksel varlığını ve büyüklüğünü tanımlarken, düşük koherensli ışık kullanımı interferansın yalnızca belirli bir optik yol farkında oluşmasına imkan tanıyarak sinyalin doku içindeki hangi derinlikten kaynaklandığını belirler (Fercher et al., 2003).

OCT’de derinlik bilgisi, geniş bantlı düşük koherensli ışık kaynakları kullanılarak elde edilen interferometrik sinyalin koherens kapısı prensibiyle derinlik açısından seçici olarak algılanmasına dayanır; bu nedenle düşük koherens interferometri, OCT’de yalnızca yardımcı bir teknik değil, doğrudan ölçümün temel mekanizmasını oluşturmaktadır (Schmitt, Knüttel, & Bonner, 1993). LCI’de kullanılan ışık kaynaklarının geniş spektral bant genişliğine sahip olması, koherens uzunluğunun kısa olmasına yol açar; koherens uzunluğu, bir ışık kaynağının dalga boyunca belirli bir faz ilişkisini koruduğu mesafe olarak tanımlanır ve düşük koherensli kaynaklarda bu mesafe genellikle milimetrik veya daha kısa ölçeklerde dir. Bu kısa koherens uzunluğu, interferansın yalnızca referans ve örnek yolları arasındaki optik yol farkının koherens uzunluğu sınırları içinde kaldığı belirli bir derinlik aralığında oluşmasına imkân tanıyarak, OCT’de derinlik seçiciliğini sağlayan koherens kapısı mekanizmasını mümkün kılar (Izatt et al., 1994).

LCI için en yaygın düzenek Michelson interferometresidir. Bir broadband ışık kaynağı, ayrııcı (beam splitter) aracılığıyla iki kola ayrılır: referans kolu ve örnek kolu. Örnek kolu doku veya yüzeye yönlendirilirken, referans kolu sabit bir ayna üzerinden geri yansıtılır. Her iki koldan geri dönen ışık, interferometrede birleşir ve sadece optik yol farkı koherens uzunluğu içinde ise interferens deseni oluşturur (Rollins & Izatt, 1999).

Bu koherens gating mekanizması, doku içindeki farklı derinliklerden gelen yansımalar karşılık gelen interferometrik sinyallerin seçilmesine imkan tanır. Yani, farklı derinliklere karşılık gelen optik yol farkları interferans sinyali oluşturur ve bu sayede derinlik çözümlenebilir. Bu özellik, OCT’de aksiyel çözünürlük elde edilmesinin anahtarıdır (Hitzenberger, 1998).

OCT’de görüntü kalitesini ve ayırt edilebilir yapısal detayları belirleyen en temel parametreler aksiyel ve lateral çözünürlüktür. Bu iki çözünürlük bileşeni, fiziksel olarak birbirinden bağımsız mekanizmalar tarafından belirlenir ve OCT’nin diğer optik görüntüleme tekniklerinden ayrılmasında merkezi bir rol oynar (Drexler & Fujimoto, 2015).

2.2. Aksiyel Çözünürlük

Aksiyel çözünürlük, OCT sisteminin derinlik eksenini boyunca birbirine yakın iki yansıtıcı yapıyı ayırt edebilme yeteneğini ifade eder. OCT’de aksiyel çözünürlük, odaklama optiklerinden bağımsız olup tamamen kullanılan ışık kaynağının koherens özellikleri tarafından belirlenir. Bu özellik, OCT’yi konfokal mikroskopi gibi diğer optik tekniklerden ayıran temel avantajlardan biridir. LCI’de koherens uzunluğu (L_c) doğrudan aksiyel çözünürlüğü belirler (Fercher et al., 2003).

Geniş bantlı düşük koherensli bir ışık kaynağı için aksiyel çözünürlük, ideal koşullarda aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\Delta z \approx \frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda}$$

Burada λ_0 merkez dalga boyunu, $\Delta \lambda$ ise kaynağın spektral bant genişliğini temsil eder. Bu bağıntı, spektral bant genişliği arttıkça aksiyel çözünürlüğün iyileştiğini açıkça göstermektedir (Fercher et al., 2003). Güncel OCT sistemlerinde süperlüminesan diyotlar (SLD), femtosaniye lazerler ve swept-source lazerler kullanılarak 1–5 μm düzeyinde aksiyel çözünürlük elde edilebilmektedir (Huang & Rolland, 2021).

Fourier-domain OCT (Spectral-Domain ve Swept-Source OCT) sistemlerinde aksiyel çözünürlük, time-domain OCT'ye kıyasla değişmemekle birlikte, sinyal-gürültü oranının artması sayesinde pratikte daha etkin şekilde kullanılabilir (Liu & Brezinski, 2006).

2.3. Lateral Çözünürlük

Lateral çözünürlük, OCT sisteminin enine (x-y) düzlemde birbirine yakın iki yapıyı ayırt edebilme yeteneğini ifade eder ve doğrudan odaklama optiklerinin sayısal açıklığına (Numerical Aperture, NA) bağlıdır. Bu açıdan lateral çözünürlük, klasik optik mikroskopideki çözünürlük kavramına benzer şekilde tanımlanır (Yu et al., 2007).

Yaklaşık olarak lateral çözünürlük şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta x \approx \frac{0.4 \lambda_0}{NA}$$

Bu ifade, sayısal açıklığın artırılmasıyla lateral çözünürlüğün iyileştirilebileceğini göstermektedir. Ancak NA'nın artırılması, odak derinliğinin azalmasına yol açtığından OCT sistem tasarımında lateral çözünürlük ile odak derinliği arasında bir denge kurulması gerekmektedir (Pircher & Zawadzki, 2017).

Modern OCT sistemlerinde lateral çözünürlük tipik olarak 10–20 µm aralığında olup, adaptif optik OCT (AO-OCT) sistemlerinde bu değer birkaç mikrometreye kadar düşürülebilmektedir. AO-OCT, göz optiklerinden kaynaklanan aberasyonları düzelterek özellikle retinal görüntülemeye hücresel düzeyde ayrıntıların elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Miller et al., 2011).

Aksiyel ve lateral çözünürlük, OCT görüntüsünün farklı boyutlarını tanımlar ve klinik uygulamalarda farklı öneme sahiptir:

- **Aksiyel çözünürlük**, retina tabakaları gibi derinlik boyunca sıralı yapıların ayırımında kritik öneme sahiptir.
- **Lateral çözünürlük**, enine yönde küçük lezyonların ve mikro yapısal detayların ayırt edilmesini belirler.

Bu iki çözünürlük bileşeninin birbirinden bağımsız olarak optimize edilebilmesi, OCT'nin biyomedikal görüntülemadaki benzersiz avantajlarından biridir (Folgar et al., 2015).

3. Görüntü Oluşumu

OCT'de görüntü oluşumu, biyolojik dokudan geri saçılan ışığın interferometrik olarak algılanması ve bu sinyalin sayısal işleme adımlarıyla derinlik ve uzaysal bilgi içeren bir görüntüye dönüştürülmesi sürecine dayanır. Bu süreç, fiziksel ölçüm, sinyal elde edilmesi ve görüntü rekonstrüksiyonu olmak üzere birbirini izleyen üç temel aşamada ele alınabilir (Walther et al., 2011).

3.1. İnterferometrik Sinyalin Elde Edilmesi

OCT sistemlerinde görüntü oluşumunun ilk aşaması, referans kolundan yansıyan ışık ile örnek kolundan, yani biyolojik dokudan geri saçılan ışık arasındaki interferansın algılanmasıdır. Geniş bantlı düşük koherensli ışık kaynakları kullanılması sayesinde interferans yalnızca referans ve örnek kolları arasındaki optik yol farkı koherens uzunluğu sınırları içinde olduğunda oluşur. Bu durum, koherens kapısı prensibi aracılığıyla derinlik seçiciliği sağlar ve her interferometrik sinyal bileşeni belirli bir doku derinliğine karşılık gelir (Popescu et al., 2011).

Elde edilen interferometrik sinyal, dokunun farklı derinliklerinden gelen geri saçılmaların genlik ve faz bilgilerini içerir. Bu sinyal, OCT’de ölçülen temel fiziksel büyüklüğü oluşturur ve görüntünün yapı taşıdır (Fujimoto & Schmitt, 2007).

3.2. A-Tarama, B-Tarama ve Hacimsel Görüntüleme

OCT’de görüntü oluşumu hiyerarşik bir yapı izler. Tek bir interferometrik ölçümden elde edilen derinlik profili **A-taraması (A-scan)** olarak adlandırılır ve bu tarama, doku boyunca yansıma yoğunluğunun derinliğe bağlı dağılımını temsil eder. A-taramaları, yanal yönde ardışık olarak elde edildiğinde **B-taraması (B-scan)** adı verilen iki boyutlu kesitsel görüntüler oluşturulur. Üçüncü boyutta ek taramalar yapılmasıyla ise **hacimsel (3B) OCT görüntüleri** elde edilir. Bu yapı, OCT’nin klinik uygulamalarda gerçek zamanlı kesitsel ve hacimsel görüntüleme sunabilmesini mümkün kılar (Wang, 2020).

3.3. Fourier-Domain OCT’de Görüntü Rekonstrüksiyonu

Güncel OCT sistemlerinin büyük çoğunluğu Fourier-domain OCT prensibiyle çalışmaktadır. Bu sistemlerde interferometrik sinyal, dalga boyuna veya optik frekansa bağlı olarak ölçülür. Elde edilen spektral interferogram, doğrudan derinlik bilgisini içermez; bu bilgi, sayısal Fourier dönüşümü ile açığa çıkarılır (Yaqoob, Wu, & Yang, 2005).

Görüntü rekonstrüksiyonu süreci tipik olarak aşağıdaki adımları içerir:

- Spektral sinyalin doğrusal dalga sayısı eksenine yeniden örneklenmesi,
- Ofset ve doğru akım bileşenlerinin giderilmesi,
- Pencereleme (windowing) işlemleri,
- Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) uygulanması (Fercher et al., 2003).

Bu işlemler sonucunda interferometrik sinyal, derinlik ekseninde yansıma yoğunluğu dağılımına dönüştürülür ve A-taraması elde edilir. Rekonstrüksiyonun doğruluğu ve görüntü kalitesi, kullanılan sayısal algoritmaların yanı sıra sinyal-gürültü oranı ve sistem kararlılığı ile doğrudan ilişkilidir (Jørgensen et al., 2007).

3.4. Görüntü Kontrastı ve Fiziksel Anlamı

OCT görüntülerinde kontrast, temel olarak dokunun optik saçılma özelliklerinden kaynaklanır. Farklı doku katmanları ve yapılar, kırılma indisi farklılıkları nedeniyle ışığı farklı oranlarda geri saçar. Bu geri saçılma şiddeti, OCT görüntüsünde parlaklık değişimleri olarak temsil edilir. Dolayısıyla OCT görüntüleri, doku yapısının doğrudan bir optik yoğunluk haritasını sunar (Kholodnykh et al., 2003).

Ancak OCT, klasik bir yoğunluk görüntüleme tekniği değildir; interferometrik doğası gereği ölçülen sinyal, doku içindeki mikro yapısal düzen ve saçılma merkezlerinin istatistiksel özelliklerini de yansıtır. Bu durum, speckle desenlerinin oluşumuna yol açar ve görüntü kalitesini etkileyen önemli bir faktördür (Schmitt, Xiang, & Yung, 1999).

Sonuç olarak OCT’de görüntü oluşumu, düşük koherens interferometrik ölçümün sayısal sinyal işleme teknikleriyle birleştirilmesiyle gerçekleşen çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreç, OCT’nin yüksek çözünürlüklü, derinlik seçici ve klinik olarak anlamlı görüntüler sunabilmesinin temelini oluşturur (Wang et al., 2023).

4. OCT Sistem Tipleri

OCT sistemleri, interferometrik sinyalin elde edilme ve işlenme biçimine göre temelde Time-Domain OCT (TD-OCT), Spectral-Domain OCT (SD-OCT) ve Swept-Source OCT (SS-OCT) olmak üzere üç ana sınıfta incelenir. Bu sınıflandırma, yalnızca tarihsel bir gelişimi değil; aynı zamanda görüntüleme hızı, duyarlılık, penetrasyon derinliği ve klinik uygulanabilirlik açısından temel farkları da yansıtmaktadır (Lavinsky & Lavinsky, 2016).

4.1. Time-Domain OCT (TD-OCT)

Time-Domain OCT, OCT teknolojisinin ilk neslini temsil eder ve düşük koherens interferometri prensibinin en doğrudan uygulamasıdır. Bu sistemlerde referans kolundaki ayna mekanik olarak hareket ettirilir ve interferometrik sinyal, referans kolu ile örnek kolu arasındaki optik yol farkı koherens uzunluğu içinde olduğunda algılanır. Böylece her referans aynası konumu, dokudaki belirli bir derinliğe karşılık gelir (Zeppieri et al., 2023).

TD-OCT sistemleri, OCT'nin biyolojik dokularda uygulanabilirliğini ilk kez göstermiş olmakla birlikte, mekanik tarama gereksinimi nedeniyle görüntüleme hızı sınırlıdır. Ayrıca duyarlılık (sensitivity) ve sinyal-gürültü oranı, daha sonraki nesil OCT sistemlerine kıyasla düşüktür. Bu nedenlerle TD-OCT, günümüzde büyük ölçüde tarihsel ve eğitsel bir öneme sahiptir ve klinik uygulamalarda yerini Fourier-domain tabanlı sistemlere bırakmıştır (Anvari et al., 2021).

4.2. Spectral-Domain OCT (SD-OCT)

Spectral-Domain OCT, OCT alanındaki en önemli teknolojik kırılma noktalarından birini temsil eder. Bu sistemlerde referans kolu sabit tutulur ve interferometrik sinyal, dalga boyuna bağlı olarak bir spektrometre yardımıyla ölçülür. Elde edilen spektral interferogram, sayısal Fourier dönüşümü uygulanarak derinlik bilgisine dönüştürülür (Yaqoob, Wu, & Yang, 2005).

SD-OCT'nin en önemli avantajı, TD-OCT'ye kıyasla çok daha yüksek duyarlılık ve görüntüleme hızı sunmasıdır. Aynı anda tüm derinlik bilgisinin ölçülmesi, sinyal-gürültü oranında teorik olarak yaklaşık 20–30 dB'lik bir avantaj sağlar. Bu özellik, SD-OCT'yi özellikle oftalmoloji alanında standart görüntüleme yöntemi haline getirmiştir.

Güncel SD-OCT sistemleri, yüksek spektral çözünürlüklü dedektörler ve gelişmiş sinyal işleme algoritmaları sayesinde retina tabakalarının mikrometre ölçeğinde ayrıntılı biçimde görüntülenmesini mümkün kılmaktadır. Ancak spektral dedektörlerin sınırlamaları ve sinyal düşüşü (roll-off) etkisi, SD-OCT'nin derin penetrasyon gerektiren uygulamalardaki performansını kısmen sınırlandırmaktadır (Kiernan vd., 2010).

4.3. Swept-Source OCT (SS-OCT)

Swept-Source OCT, Fourier-domain OCT'nin bir diğer türevidir olup, spektral bilgiyi bir spektrometre yerine zamanla taranan dar bantlı lazer kaynakları aracılığıyla elde eder. Bu sistemlerde dalga boyu, belirli bir hızda ve doğrusal biçimde taranır; interferometrik sinyal, zamana bağlı olarak kaydedilir ve Fourier dönüşümü ile derinlik bilgisi elde edilir. SS-OCT'nin temel avantajları arasında daha yüksek görüntüleme hızları, daha uzun merkez dalga boylarında çalışma imkanı ve daha derin doku penetrasyonu yer alır. Özellikle 1.050 nm ve 1.300 nm dalga boylarında çalışan SS-OCT sistemleri, ön segment oftalmolojisi, koroid görüntüleme ve intravasküler OCT uygulamalarında önemli üstünlükler sunmaktadır (Liu ve Brezinski, 2007).

Günümüzde SS-OCT, yüksek hızlı tarama kabiliyeti sayesinde hacimsel görüntüleme, OCT anjiyografi ve hareket artefaktlarına duyarlı uygulamalarda giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bununla birlikte swept-source lazerlerin maliyeti ve sistem karmaşıklığı, bu teknolojinin yaygınlığını sınırlayan faktörler arasında yer almaktadır.

TD-OCT, SD-OCT ve SS-OCT sistemleri arasındaki temel farklar; derinlik bilgisinin elde edilme yöntemi, görüntüleme hızı ve duyarlılık düzeylerinde ortaya çıkmaktadır. TD-OCT tarihsel açıdan önemli bir başlangıç noktası oluştururken, SD-OCT klinik uygulamalarda geniş kabul görmüş; SS-OCT ise güncel araştırma ve ileri klinik uygulamalar için öne çıkan bir teknoloji haline gelmiştir. Bu evrim, OCT teknolojisinin donanım, optik kaynaklar ve sinyal işleme alanlarındaki gelişmelerle birlikte sürekli olarak ilerlediğini göstermektedir (Liu ve Brezinski, 2007).

5. Çözünürlük ve Penetrasyon

OCT'nin görüntü kalitesini ve klinik uygulanabilirliği belirleyen temel fiziksel parametrelerden ikisi çözünürlük ve penetrasyon derinliğidir. Bu iki kavram, OCT sistem tasarımında doğrudan birbiriyle ilişkili olup çoğu durumda birbirleriyle ters yönlü bir denge (trade-off) içerisinde. Dolayısıyla OCT'nin farklı klinik ve araştırma uygulamalarında tercih edilen sistem mimarileri ve çalışma dalga boyları, bu denge gözetilerek belirlenmektedir. Penetrasyon derinliği ise çoğu biyolojik doku için yaklaşık 2–3 mm ile sınırlıdır ve bu sınır, dokuda meydana gelen çoklu saçılma ve absorpsiyon mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. Daha kısa dalga boylarında yüksek aksiyel çözünürlük elde edilirken, artan saçılma nedeniyle penetrasyon derinliği azalmakta; daha uzun dalga boylarında çalışan sistemlerde ise çözünürlükten kısmen ödün verilerek daha derin doku katmanlarının görüntülenmesi mümkün hale gelmektedir. Bu sayısal değerler, özellikle oftalmoloji, dermatoloji ve yüzeysel doku görüntüleme uygulamalarında OCT'nin neden tercih edilen bir yöntem olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Aumann, vd., 2019).

5.1. Çözünürlük Kavramı ve Fiziksel Belirleyicileri

OCT'de çözünürlük, aksiyel ve lateral olmak üzere iki bileşenle tanımlanır. Aksiyel çözünürlük, düşük koherensli ışık kaynağının spektral bant genişliği tarafından belirlenirken; lateral çözünürlük, odaklama optiklerinin sayısal açıklığına bağlıdır. Bu ayrım, OCT'nin önemli avantajlarından biridir; zira aksiyel çözünürlük, odaklama koşullarından bağımsız olarak optimize edilebilir (Aumann, 2019).

Geniş bantlı ışık kaynaklarının kullanımı, koherens uzunluğunu kısaltarak aksiyel çözünürlüğü iyileştirir ve mikrometre ölçeğinde hatta ultra-yüksek çözünürlüklü OCT sistemlerinde mikrometre altı değerlere ulaşılmasını mümkün kılar. Ancak bu iyileştirme, çoğu zaman daha kısa merkez dalga boylarının kullanımını gerektirir; bu durum ise doku içinde ışık saçılmasını artırarak penetrasyon derinliğini sınırlar (Shu et al., 2019).

Güncel klinik OCT sistemlerinde tipik olarak aksiyel çözünürlük 2–7 μm , lateral çözünürlük 10–20 μm aralığında olup, bu değerler OCT'nin biyolojik dokulardaki mikro yapıları güvenilir biçimde ayırt edebilmesini sağlamaktadır. Aksiyel çözünürlük, kullanılan ışık kaynağının spektral bant genişliği ile belirlenirken; lateral çözünürlük, odaklama optiklerinin sayısal açıklığına ve tarama geometrisine bağlıdır (Drexler, 2014; Spaide & Kollegger, 2022).

5.2. Penetrasyon Derinliği ve Doku–Işık Etkileşimi

Penetrasyon derinliği, OCT sisteminin doku içinde anlamlı sinyal elde edebildiği maksimum derinliği ifade eder ve temel olarak doku içindeki saçılma ve absorpsiyon mekanizmaları tarafından belirlenir. Biyolojik dokularda ışık saçılması, dalga boyu arttıkça azalır; bu nedenle daha uzun dalga boylarında alışan OCT sistemleri daha derin doku penetrasyonu sağlar (Fujimoto, 2000).

Bu bağlamda, oftalmik OCT sistemlerinde yaygın olarak kullanılan 800–900 nm aralığı, yüksek aksiyel çözünürlük sunarken retina ve koroid sınırında sınırlı penetrasyon sağlar. Buna karşılık 1.050 nm ve 1.300 nm dalga boylarında alışan Swept-Source OCT sistemleri, çözünürlükten kısmen ödün vererek daha derin doku katmanlarının görüntülenmesine olanak tanır. Bu özellik, ön segment oftalmolojisi, koroid görüntüleme ve intravasküler OCT uygulamalarında belirleyici olmaktadır (Kodach et al., 2010; Gabriele, 2010).

Çözünürlük ve penetrasyon arasındaki denge, OCT sistem tasarımının merkezinde yer alır. Yüksek özünürlük gerektiren uygulamalarda, daha kısa dalga boyları ve geniş bantlı kaynaklar tercih edilirken; derin doku görüntüleme gerektiren uygulamalarda daha uzun dalga boyları ve swept-source mimarileri ön plana çıkmaktadır (Marschall, 2012). Bu durum, OCT’nin tek bir “ideal” konfigürasyona sahip olmadığını, aksine uygulamaya özğü olarak optimize edilen bir teknoloji platformu olduğunu göstermektedir.

Güncel araştırmalarda bu dengeyi iyileştirmeye yönelik olarak adaptif optik, çoklu dalga boylu OCT ve hesaplamalı süper çözünürlük yaklaşımları geliştirilmektedir. Bu yöntemler, çözünürlükten ödün vermeden penetrasyonu artırmayı veya penetrasyon kaybını sayısal yöntemlerle telafi etmeyi amaçlamaktadır (Yasuno, 2022).

Klinik açıdan bakıldığında çözünürlük, özellikle tabakalı yapıya sahip dokularda mikro-morfolojik değişimlerin saptanması için kritik öneme sahiptir; penetrasyon ise daha derin yerleşimli patolojilerin değerlendirilmesini mümkün kılar. Bu nedenle oftalmoloji, kardiyoloji ve dermatoloji gibi alanlarda kullanılan OCT sistemleri, çözünürlük ve penetrasyon gereksinimlerine göre farklı mimariler ve çalışma parametreleriyle tasarlanmaktadır (Fujimoto, 2000; Gabriele, 2010).

6. OCT Artefaktları

OCT görüntüleri, yüksek çözünürlük ve derinlik seçiciliği sunmasına karşın, ölçüm prensibinin interferometrik doğası ve biyolojik dokuların optik özellikleri nedeniyle çeşitli artefaktlara açıktır. Bu artefaktlar, görüntü kalitesini düşürmekle kalmayıp, bazı durumlarda klinik yorumlamayı doğrudan etkileyebilecek hatalı çıkarımlara yol açabilir (Fercher et al., 2003; Schmitt, 1999). OCT sistemlerinin hem donanımsal hem de yazılımsal sınırlarını yansıtmakta; bu nedenle artefaktların tanınması ve uygun düzeltme stratejilerinin uygulanması, OCT görüntülerinin güvenilirliğini artırmak açısından kritik önem taşımaktadır.

OCT artefaktları, klinik değerlendirmede yanlış tabaka sınırlarının belirlenmesine, lezyon boyutlarının hatalı ölçülmesine veya patolojik bulguların yanlış yorumlanmasına yol açabilir. Bu nedenle klinisyenlerin ve araştırmacıların, artefaktları gerçek anatomik yapılarla ayırt edebilme yetkinliğine sahip olması gerekmektedir. Donanımsal iyileştirmeler, gelişmiş sinyal işleme algoritmaları ve kullanıcı eğitimi, artefakt yönetiminde temel stratejiler arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak OCT artefaktları, teknolojinin fiziksel sınırlarının ve biyolojik doku-ışık etkileşiminin doğal bir sonucudur. Bu artefaktların doğru şekilde tanımlanması ve yorumlanması, OCT görüntülerinin güvenilirliğini artırmakta ve klinik karar süreçlerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle OCT artefaktları, OCT sistemlerinin teknik özellikleri kadar önemli bir değerlendirme başlığı olarak ele alınmalıdır.

Glokomda, Retina Sinir Lifi Tabakası (RNFL) Analizinde, Optik Sinir Başı ve Papilla Parametrelerinin ölçülmesinde, Ganglion Hücre Kompleksi (GCC) Analizinde, Makula Hastalıklarında, Yaşa Bağlı Makula Dejenerasyonunda (YBMD), Diyabetik Makula Ödemi, Epiretinal Membran ve Vitreomaküler Traksiyon, Santral Seröz Koryoretinopati ve Diğer Makülopatiler, Koroid Görüntülemeye OCT kullanımı hastalıklarının değerlendirilmesinde günümüzde standart görüntüleme yöntemlerinden biri haline gelmiştir (Huang et al., 1991; Drexler & Fujimoto, 2008).

Ayrıca Ön Segment OCT, kornea, ön kamara, iris ve açığı yapılarının non-invaziv, yüksek çözünürlüklü ve kesitsel olarak görüntülenmesini sağlayan bir OCT uygulamasıdır. Ön segment yapılarının mikromorfolojik değerlendirilmesi, özellikle refraktif cerrahi, glokom ve kornea hastalıkları alanlarında tanı ve tedavi planlaması açısından kritik öneme sahiptir. OCT teknolojisinin ön segmente uyarlanması, optik biyometri ve anterior segment görüntüleme alanlarında önemli bir dönüşüm yaratmıştır. Ön segment OCT, kornea, ön kamara ve açığı yapılarının ayrıntılı ve tekrarlanabilir biçimde değerlendirilmesini sağlayan güçlü bir görüntüleme aracıdır. Özellikle Swept-Source OCT tabanlı sistemlerin gelişimiyle birlikte, ön segment OCT'nin klinik uygulama alanı genişlemekte ve oftalmik tanı süreçlerinde merkezi bir rol üstlenmektedir (Radhakrishnan et al., 2001; Ang et al., 2018).

Kaynaklar

- Ang, M., Baskaran, M., Werkmeister, R. M., Chua, J., Schmidl, D., Aranha Dos Santos, V., ... Schmetterer, L. (2018). Anterior segment optical coherence tomography. *Progress in Retinal and Eye Research*, 66, 132–156.
- Anvari, P., Ashrafkhorasani, M., Habibi, A., & Falavarjani, K. G. (2021). Artifacts in optical coherence tomography angiography. *Journal of Ophthalmic & Vision Research*, 16(2), 271–279.
- Aumann, S. (2019). Optical coherence tomography (OCT): Principle and technical realizations. In *Optical coherence tomography*. National Center for Biotechnology Information (NCBI) Bookshelf.
- Aumann, S., Donner, S., Fischer, J., & Müller, F. (2019). Optical coherence tomography (OCT): principle and technical realization. *High resolution imaging in microscopy and ophthalmology: new frontiers in biomedical optics*, 59-85.
- Bouma, B. E., & Tearney, G. J. (Eds.). (2002). *Handbook of optical coherence tomography*. New York, NY: Marcel Dekker.
- Choma, M. A., Sarunic, M. V., Yang, C., & Izatt, J. A. (2003). Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography. *Optics Express*, 11(18), 2183–2189.
- Drexler, W., & Fujimoto, J. G. (2008). State-of-the-art retinal optical coherence tomography. *Progress in Retinal and Eye Research*, 27(1), 45–88.
- Drexler, W. (2014). Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality. *Journal of Biomedical Optics*, 19(7), 071412.
- Drexler, W., & Fujimoto, J. G. (Eds.). (2015). *Optical coherence tomography: Technology and applications* (2nd ed.). Heidelberg: Springer.
- Fercher, A. F. (1996). Optical coherence tomography. *Journal of Biomedical Optics*, 1(2), 157–173.
- Fercher, A. F., Hitzenberger, C. K., Kamp, G., & El-Zaiat, S. Y. (1995). Measurement of intra-ocular distances by backscattering spectral interferometry. *Optics Communications*, 117(1–2), 43–48.
- Fercher, A. F., Drexler, W., Hitzenberger, C. K., & Lasser, T. (2003). Optical coherence tomography—Principles and applications. *Reports on Progress in Physics*, 66(2), 239–303.
- Fercher, A. F., et al. (2003). *Reports on Progress in Physics*, 66(2), 239–303.
- Folgar, F. A., Yuan, E. L., Farsiu, S., & Toth, C. A. (2015). Erratum: Lateral and axial measurement differences between spectral-domain optical coherence tomography systems. *Journal of Biomedical Optics*, 20(5), 059802.
- Fujimoto, J. G., Pitris, C., Boppart, S. A., & Brezinski, M. E. (2000). Optical coherence tomography: An emerging technology for biomedical imaging and optical biopsy. *Neoplasia*, 2(1–2), 9–25.

- Fujimoto, J. G. (2000). Optical coherence tomography: Imaging depth mechanisms. In *Optical Coherence Tomography*. National Center for Biotechnology Information (NCBI).
- Fujimoto, J. G., & Schmitt, J. M. (2007). Principles of OCT. In B. E. Bouma & G. J. Tearney (Eds.), *Optical coherence tomography in cardiovascular research* (pp. 35–50). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Gabriele, M. L. (2010). Three-dimensional optical coherence tomography imaging. *Journal of Biomedical Optics*.
- Huang, D., Swanson, E. A., Lin, C. P., Schuman, J. S., Stinson, W. G., Chang, W., ... Fujimoto, J. G. (1991). Optical coherence tomography. *Science*, 254(5035), 1178–1181.
- Huang, J., & Rolland, J. P. (2021). Broad bandwidth light sources in optical coherence tomography (OCT). In C. Alford, D. R. Jones, & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of laser technology and applications* (pp. 309–319). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Izatt, J. A., Hee, M. R., Owen, G. M., Swanson, E. A., & Fujimoto, J. G. (1994). Optical coherence microscopy in scattering media. *Optics Letters*, 19(8), 590–592.
- Izatt, J. A., & Choma, M. A. (2008). Theory of optical coherence tomography. In W. Drexler & J. G. Fujimoto (Eds.), *Optical coherence tomography: Technology and applications* (pp. 47–72). Heidelberg: Springer.
- Jørgensen, T. M., Thomadsen, J., Christensen, U., Soliman, W., & Sander, B. (2007). Enhancing the signal-to-noise ratio in ophthalmic optical coherence tomography by image registration—Method and clinical examples. *Journal of Biomedical Optics*, 12(4), 041208.
- Kholodnykh, A. I., Petrova, I. Y., Larin, K. V., Motamedi, M., & Esenaliev, R. O. (2003). Precision of measurement of tissue optical properties with optical coherence tomography. *Applied Optics*, 42(16), 3027–3037.
- Kiernan, DF, Mieler, WF ve Hariprasad, SM (2010). Spektral alan optik koherens tomografisi: modern yüksek çözünürlüklü retina görüntüleme sistemlerinin karşılaştırılması. *Amerikan oftalmoloji dergisi*, 149 (1), 18-31.
- Kodach, V. M., et al. (2010). Quantitative comparison of OCT imaging depth at 1300 nm. *Biomedical Optics Express*.
- Lavinsky, F., & Lavinsky, D. (2016). Novel perspectives on swept-source optical coherence tomography. *International Journal of Retina and Vitreous*, 2(1), 25.
- Leitgeb, R., et al. (2003). *Optics Express*, 11(8), 889–894.
- Leitgeb, R. A., Hitzenberger, C. K., & Fercher, A. F. (2003). Performance of Fourier domain vs. time domain optical coherence tomography. *Optics Express*, 11(8), 889–894.
- Liu, B., & Brezinski, M. E. (2006). Noise sources and optoelectronics which affect axial detection performance of time domain, Fourier domain, and swept source optical coherence tomography. In J. G. Fujimoto & J. A. Izatt (Eds.), *Coherence domain optical methods and optical coherence tomography in biomedicine X* (Vol. 6079, pp. 213–225). Bellingham, WA: SPIE.

- Liu, B., & Brezinski, M. E. (2007). Theoretical and practical considerations on detection performance of time domain, Fourier domain, and swept source optical coherence tomography. *Journal of biomedical optics*, 12(4), 044007-044007.
- Marschall, S. (2012). Frequency-swept light sources for optical coherence tomography. Doctoral dissertation, Technical University of Denmark.
- Miller, D. T., Kocaoglu, O. P., Wang, Q., & Lee, S. (2011). Adaptive optics and the eye: Super-resolution OCT. *Eye*, 25(3), 321–330.
- Pircher, M., & Zawadzki, R. J. (2017). Review of adaptive optics OCT (AO-OCT): Principles and applications for retinal imaging. *Biomedical Optics Express*, 8(5), 2536–2562.
- Popescu, D. P., Choo-Smith, L. P. I., Flueraru, C., Mao, Y., Chang, S., Disano, J., ... Sowa, M. G. (2011). Optical coherence tomography: Fundamental principles, instrumental designs and biomedical applications. *Biophysical Reviews*, 3(3), 155–169.
- Radhakrishnan, S., Rollins, A. M., Roth, J. E., Yazdanfar, S., Westphal, V., Bardenstein, D. S., & Izatt, J. A. (2001). Real-time optical coherence tomography of the anterior segment at 1310 nm. *Archives of Ophthalmology*, 119(8), 1179–1185.
- Rollins, A. M., & Izatt, J. A. (1999). Optimal interferometer designs for optical coherence tomography. *Optics Letters*, 24(21), 1484–1486.
- Schmitt, J. M., Knüttel, A., & Bonner, R. F. (1993). Optical coherence tomography of a dense tissue: Statistics of attenuation and backscattering. *Physics in Medicine and Biology*, 38(10), 1449–1472.
- Schmitt, J. M., Xiang, S. H., & Yung, K. M. (1999). Speckle in optical coherence tomography. *Journal of Biomedical Optics*, 4(1), 95–105.
- Schuman, J. S., Puliafito, C. A., & Fujimoto, J. G. (Eds.). (2004). *Optical coherence tomography of ocular diseases* (2nd ed.). Thorofare, NJ: Slack Incorporated.
- Shu, X., et al. (2019). Designing visible-light optical coherence tomography towards improved axial resolution. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*.
- Spaide, R. F., Fujimoto, J. G., & Waheed, N. K. (2018). Optical coherence tomography angiography. *Progress in Retinal and Eye Research*, 64, 1–55.
- Spaide, R. F., & Kollegger, R. (2022). Lateral and axial resolution characteristics in commercial optical coherence tomography instruments. *Translational Vision Science & Technology*.
- Tearney, G. J., Regar, E., Akasaka, T., Adriaenssens, T., Barlis, P., Bezerra, H. G., ... Bouma, B. E. (2012). Consensus standards for acquisition, measurement, and reporting of intravascular optical coherence tomography studies. *Journal of the American College of Cardiology*, 59(12), 1058–1072.
- Walther, J., Gaertner, M., Cimalla, P., Burkhardt, A., Kirsten, L., Meissner, S., & Koch, E. (2011). Optical coherence tomography in biomedical research. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 400(9), 2721–2743.

- Wang, Y. (2020). Scanless optical coherence tomography for high-speed 3D biomedical microscopy (Doctoral dissertation). New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ.
- Wang, Z., DeBuc, D. C., Beg, M. F., Sadda, S. R., & Hu, Z. J. (2023). OCT imaging and applications in the retina. In Z. Hu & S. R. Sadda (Eds.), *Digital eye care and teleophthalmology: A practical guide to applications* (pp. 119–144). Cham: Springer International Publishing.
- Wojtkowski, M., Bajraszewski, T., Gorczyńska, I., Targowski, P., Kowalczyk, A., Wasilewski, W., & Kowalczyk, A. (2004). Ophthalmic imaging by spectral optical coherence tomography. *American Journal of Ophthalmology*, 138(3), 412–419.
- Yaqoob, Z., Wu, J., & Yang, C. (2005). Spectral domain optical coherence tomography: A better OCT imaging strategy. *BioTechniques*, 39(Suppl. 6), S6–S13.
- Yasuno, Y. (2022). Optical coherence tomography in ophthalmology: Penetration depth and clinical utility. *ArXiv preprint*.
- Yu, L., Rao, B., Zhang, J., Su, J., Wang, Q., Guo, S., & Chen, Z. (2007). Improved lateral resolution in optical coherence tomography by digital focusing using two-dimensional numerical diffraction method. *Optics Express*, 15(12), 7634–7641.

BÖLÜM 4

DOĞAYLA AYNİ RİTİMDE: BİLİM İNSANININ MOTİVASYONU VE MODERN BİLİM ÜZERİNE NOTLAR

*Elif ORHAN*¹

¹ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Ankara, Türkiye. eliforhan@gazi.edu.tr ORC – ID: 0000-0002-3949-6141

ÖNSÖZ

Bilim yalnızca bir gözlem faaliyeti değil, aynı zamanda derin bir tutkudur. Doğayla kurulan bu ilişki, insanın doğayla “dans etmesinin” en eski biçimlerinden biri olarak görülebilir. İnsan, doğayı uzaktan izlemekle yetinmemiş; rüzgârın yönünü, ışığın hızını ve hücrelerin sessiz işleyişini anlamaya yönelmiştir. Büyük bilimsel keşiflerin her biri, doğayla kurulan bu uyumlu ilişkinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda bilim, doğanın içindeki ritmi sezme ve anlamlandırma çabası olarak karşımıza çıkar.

Marie Curie, laboratuvarında gecenin karanlığında ışıldayan tüplerle doğanın sırlarını keşfederken; Richard Feynman, tahtasında denklemleri adeta bir ritme dönüştürüyordu. Albert Einstein, küçük bir ofiste ışığın hızını hayal ederken zaman kavramını yeniden düşünüyordu. Werner Heisenberg, Helgoland Adası’nda yalnız başına belirsizliğin doğasını sezdi. Barbara McClintock ise sabah sessizliğinde, mısır tanelerinin içinde var olan düzeni dinledi. Günümüz bilim insanları da atomların ve genlerin derinliklerinde hâlâ aynı uyumu aramaktadır. Tüm bu örnekler, insanın doğaya karşı değil, onunla birlikte düşünme ve anlamlandırma çabasının birer yansımasıdır.

Bilim yalnızca ölçmek veya tanımlamak değildir; aynı zamanda bir etkileşimin ve uyum arayışının ifadesidir. Her formül, her deney ve her gözlem, doğanın cevabını duymaya çalışan bir adımdır. “*Bilimle dans etmek*” derken kastedilen de budur: doğayı denetlemek değil, onun ritmine uyum sağlamayı öğrenmek. Buradaki dans, mekanik bir tekrar değil, doğanın ritmine duyulan hassasiyet ve uyum arayışıdır. Bilim insanı her gözleminde doğaya bir soru yöneltirken, aynı zamanda kendine de sorar. Cevap her zaman açık olmasa da, arayışın kendisi anlam taşır. Bilim, yalnızca sonuçların toplamı değil, merakın estetiğidir.

Bu çalışma, o ritmi duyan insanların hikâyelerini anlatıyor. Onların tutkusu yalnızca bilmeye değil, anlamaya yönelmişti. Bilim, bu insanların elinde bir araç olmaktan çıkarak bir dil hâline geldi; bir iletişim biçimi ve bir varoluş yolu oldu. Doğa ise onlara karşılık verdi; çünkü doğa, onunla dans edenleri ödüllendirir. Belki de bilimin en saf hâli, doğayı kontrol etmeye çalışmak değil, onun ritmiyle birlikte yürümeyi öğrenmektir.

Bu yazı, o ritmin izini sürmektedir ve genç bilim insanlarını, bu ritmi duymaya ve kendi soru ve cevaplarıyla yürümeye davet etmektedir.

1. GİRİŞ

Bilimin tarihini yalnızca deneylerle, denklemlerle ya da laboratuvarlarla anlatmak, insanın doğayla kurduğu ilişkinin bir kısmını göz ardı etmek olur. Çünkü bilimin kökeninde yalnızca merak değil, tutku da vardır; bir dans etme arzusu: doğayı anlamak kadar onunla aynı ritimde hareket etme isteği.

Bilimsel düşüncenin ilk evrelerinde insan, doğaya dışarıdan bakan bir gözlemciydi. Galileo'nun teleskopuyla göğe uzanışı, Descartes'in doğayı çözülmesi gereken bir makine olarak tanımlaması, Newton'un evreni bir saat mekanizması gibi kavramsallaştırması... Tüm bu çabalar, insanın doğayı uzaktan kontrol etme isteğini gösterir. René Descartes, *“Doğayı anlamak için onu parçalara ayırmak gerekir”* diyordu (Descartes, 1985).

Bu anlayış bilime inanılmaz bir hız kazandırdı; fakat aynı zamanda insanı doğanın dışına itti. Albert Einstein, yaklaşık üç yüzyıl sonra bu mesafeyi sorgulayanlardan biriydi. Ona göre doğa, insanın dışında duran bir sistem değil, insan bilincinin ayrılmaz bir parçasıydı: Einstein, Carl Seelig'e yazdığı bir mektupta şöyle der: *“Özel bir yeteneğim yok. Yalnızca tutkulu bir merak sahibim”* (Einstein, 1954). Einstein'ın bu *“tutkulu merakı”*, bilimin yalnızca mantık değil, duygu, sezgi ve ısrar gerektiren bir etkinlik olduğunu gösteriyordu. O, görelilik teorisini geliştirirken yalnızca matematikle değil, hayal gücüyle de dans ediyordu. Zamanın göreliliği olduğunu öne sürdüğünde, insanlık yalnızca fiziğin değil, varoluşun ritmini de yeniden düşünmek zorunda kaldı. 20. yüzyılın başında, kuantum devrimiyle birlikte bu *“dans”* metaforu somutlaştı.

Werner Heisenberg, 1925'te Helgoland adasında yalnız başına yürürken, elektronların yörüngesini hesaplamaya çalışıyordu. Fakat klasik fizik denklemleri çökmüştü; doğa adeta adımlarını değiştirmişti. Bir gece, matematiğin değil sezginin peşine düştü ve ertesi sabah kuantum mekaniğinin matris formülasyonunu buldu. Heisenberg der ki: *“Gözlemlediğimiz şey doğanın kendisi değil, doğanın ona yönelttiğimiz sorgulama biçimine açılmış hâlidir”* (Heisenberg, 1958). Bu cümle yalnızca bilimsel değil, felsefi bir devrimdi. Heisenberg'e göre artık gözlemci doğadan ayrı değildi; her ölçüm, doğayla bir etkileşim, bir dokunuş, bir dans adımıydı.

Bu noktadan sonra bilimin doğası geri dönülmez biçimde değişti. Niels Bohr, bu yeni anlayışı şöyle özetlemişti: *“Fizik, gerçekliğin kendisini değil; gerçeklik hakkında söyleyebildiklerimizi betimler”* (Bohr, 1958). Bohr'a göre doğa bizim kontrolümüzde olan bir nesne değil, bizimle ilişki kuran bir özneydi. Bilim artık Tanrı'nın planını çözmek değil, doğanın ritmini hissetme sanatı haline gelmişti. Modern fizik, bu anlamda insanın doğayla olan uzaklığını kapatan en derin köprülerden biridir.

Carlo Rovelli bu dönüşümü şöyle tanımlar: *“Gerçeklik nesnelerden değil; süreçlerden ve etkileşimlerden oluşur”* (Rovelli, 2017). Bir elektron, bir gözlem, bir enerji değişimi, hepsi bir dans figürüdür. Bilim insanı, artık doğanın dışında değil; doğayla birlikte, onun içinde, onunla uyum içinde hareket eder.

Bu nedenle bilim, yalnızca bir gözlemden ibaret değildir; varlıkla kurulan bir diyalogun biçimidir. Curie, gecelerini laboratuvarında geçirirken, Feynman bir formül üzerinde bongo çalıyordu, Heisenberg ise denizin kıyısında düşünüyordu. Hepsi farklı yollarla, ama aynı amaç doğrultusunda hareket ediyorlardı: Doğayı yalnızca incelemiyor, onunla birlikte var oluyorlardı.

Bu ortak tutku, bilimin gerçek kaynağıdır: merakla gelen sevgi, sabırla birleşen inat ve sonuçtan bağımsız bir estetik bağlılık. Bilimle dans etmek, doğaya hükmetmek değil, onunla birlikte hareket etmektir.

Gözlem yalnızca ilk adımdır; asıl anlam, etkileşimin ritminde gizlidir. Bir deney, sadece veri üretmez; insan ile evren arasındaki ortak nabzı ortaya çıkarır. Bu nabzı hissetmek, bilimin en derin yönüdür: Doğayı sadece anlamak değil, onunla aynı anda ve aynı tempoda var olabilmek.

2. Marie Curie: Işığın Peşinde Yanmak



Marie Curie laboratuvarında çalışırken (1920'li yıllar)

(Wikimedia Commons)

*“Hayatta korkulacak hiçbir şey yoktur;
yalnızca anlaşılması gereken şeyler vardır”*

Marie Curie, 1937

Marie (Curie) Sklodowska, 1867’de Varşova’da doğdu. Kadınların üniversiteye kabul edilmediği bir dönemde, gizlice “Uçan Üniversite (Flying University)” olarak bilinen yeraltı derslerine katıldı; dersler evlerde, kütüphanelerde, bazen parklarda yapılıyor, bu yüzden sürekli yer değiştiriyordu (Quinn, 1995). Yıllar sonra, laboratuvarında karanlıkta parlayan küçük cam tüplere bakarken, yalnızca bir kimyasal tepkimeye değil, bilimin yanıcı özüne tanıklık ediyordu. Radyum, yalnızca yeni bir element değildi; Curie’nin doğayla kurduğu ilişkinin metaforu hâline gelmişti. O, doğayı dışarıdan gözlemleyen bir araştırmacı değil, onunla aynı ışımanın içinde yaşayan bir insandı. Tüplerin solgun yeşil ışığı hem keşfin hem fedakârlığın sembolüydü, bilimle dans ederken yanmanın güzelliği idi.

Bilim, o yıllarda bile onun için bir sığınak değil, bir özdeşlik biçimiydi. Paris’e gittiğinde, Sorbonne’daki ilk kadın fizik lisans öğrencisiydi, -açlık, soğuk ve yalnızlık içinde okudu. Fakat o, evrenin yasalarına yaklaşmanın açlığıyla yanıyordu. Ona göre bilimin anlamı, konforla değil sabırla ve tutkuyla ölçülürdü. Eşi Pierre Curie ile tanıştığında, aralarındaki bağ yalnızca romantik değil, entelektüel bir uyumdu. Birlikte, doğanın içinde saklı bir dansı çözmeye koyuldular: radyoaktivite. Henri Becquerel’in 1896’da uranyumdan yayılan gizemli ışınları keşfetmesinden sonra, Curie çifti bu olgunun kimyasal temelini anlamaya çalıştı. Marie, binlerce kilogram uranyum cevherini (pitchblende) laboratuvarlarında aylarca kaydattı, çöktürdü, ayırttı. Geriye kalan koyu renkli tortu, onların asıl ilgisini çekti. Curie uranyum miktarına göre çok daha fazla radyoaktivite ölçtü. Bu da şunu düşündürdü: “*Demek ki bu cevherde uranyumdan başka, daha aktif bir madde var.*” Curie’ler bu tortuyu sabırla çözümleyip defalarca arıttılar. Aylar süren bu işlemler sonunda 1898’de polonyum ve radyum elementinin varlığını kanıtladılar. İlki, Marie’nin anavatanının onuruna “polonyum” adını aldı. Diğeri ise, olağanüstü güçlü ışımlarına atıfla “radyum” olarak adlandırıldı. Her iki keşif de 1898 yılında duyuruldu ve bilimin ışığı artık gerçekten parlamaya başlamıştı. Her günün sonunda elleri, elbiseleri, hatta not defterleri bile parlıyordu. “*Kendi gözlerimizle, karanlıkta yumuşak bir ışıqla parlayan radyum tüplerini gördük*” (Curie, 1937). O ışık, yalnızca radyumun değil, insan iradesinin ışığıydı.

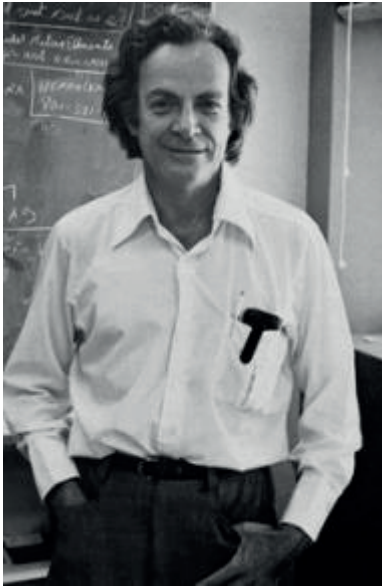
Ancak onun asıl başarısı, doğanın içinden parlayan bir fenomeni bilimin diliyle görünür kılmasıydı. Radyumun sürekli enerji yaydığını fark ettiğinde, enerjinin yalnızca dışarıdan eklenen bir şey değil, maddenin kendi varlığından doğan bir akış olduğunu anladı. Bu sezgi, nükleer fizik ve tıbbın temelini oluşturdu, fakat o zamanlar Marie Curie bunun sonuçlarını hayal bile etmiyordu. 1903’te, Pierre Curie ve Henri Becquerel ile birlikte aldığı Nobel Ödülü, bu keşfin bilim dünyasındaki ilk karşılığıydı; onun içinse yalnızca yolun bir durağıydı. O, sadece doğayı daha yakından hissetmek istiyordu. Pierre Curie 1906’da bir trafik kazasında öldüğünde, Marie tek başına laboratuvara döndü.

Çünkü onun için laboratuvar, yasın değil varoluşun mekânıydı. Pierre’in yokluğunda bile deneylerine devam etti; 1911’de ikinci Nobel Ödülü’nü, bu kez kimya alanında, tek başına kazandı; böylece tarihte iki farklı bilim dalında Nobel alan ilk insan oldu.

Ama o, ödülleri bir zafer olarak görmüyordu. “*İnsan, yapılanları neredeyse hiç fark etmez; yalnızca yapılması gerekenleri görür*” (Curie, 1937). Marie Curie, bilimin bitmeyen bir görev olduğuna inanıyordu: Bilim, sonuç değil, sürekli bir dönüştü. Her deney bir adım, her hata bir figür, her buluş bir dönüş. Ve doğa, her seferinde farklı bir adımla karşılık veriyordu. İşte bu yüzden Curie’nin hayatı, “*bilimle dans etmenin*” en gerçek metaforlarından biridir. Onun tutkusu yalnızca bilgiyi değil, bedeni de dönüştürdü. Yıllarca radyumla çalışmak, ellerinde kalıcı yanıklara, kemiklerinde hasara yol açtı. Ama o vazgeçmedi. Çünkü onun için bilim, korunulacak bir alan değil, kendini adamakla anlam kazanan bir tutkuydu.

Carlo Rovelli, Curie hakkında şunu yazar: “*Doğaya dışarıdan bakan bir göz değildi; onunla birlikte yanıyordu*” (Rovelli, 2018). Bu “yanmak”, hem fiziksel hem ruhsal bir metafordur: Curie, doğayı anlamak için kendini onun ateşine bırakmıştı. Bugün hâlâ Paris’teki Curie laboratuvarında onun defterleri hafifçe ısıma yapar, -yüz yıl geçmiş olmasına rağmen. Bu radyasyon, yalnızca atomik bir kalıntı değil, bilimsel tutkunun kalıcılığıdır. Curie’nin ışıması, bilimin tehlikesini değil, güzelliğini anlatır: Bilim, sadece gözlem değil, onunla yanarak dans etmektir. Marie Curie’nin hikâyesi, bilimi bir meslek değil, varoluş biçimi olarak görenlerin manifestosudur. O, doğayı kontrol etmeye değil, onunla aynı titreşimde yanmaya çalıştı. Bu yüzden Curie’nin hayatı bir deney değil, bir koreografidir: – ışığın ve kararlılığın dansı.

3. Richard Feynman: Bilimin Neşesi



Richard Feynman (1986)

(Wikimedia Commons)

“Uyumsuz görünen şey, aslında en ilgi çekici olandır.”

Richard P. Feynman, 1988

Richard Feynman, 1918’de New York’ta doğdu. Babasının küçük yaşta ona anlattıkları; doğadaki her şeyin bir hikâyesi olduğu fikri, onun dünyaya bakışını şekillendirdi. “*Bana hiçbir zaman isim ezberlemeyi öğretmedi, anlamayı öğretti*” der Feynman (Feynman, 1999).

Bu anlayış, onun ilerideki bilim felsefesinin temelini oluşturdu: Bilim, doğayı tanımlamak değil, onunla konuşmak demektir. Massachusetts Institute of Technology’de başladığı fizik eğitimi, Princeton’da John Wheeler’la çalışırken derinleşti.

Feynman'ın bilime yaklaşımı, Curie'nin radyumla yanışı kadar yoğun ama çok daha oyuncu bir danstı. Onun laboratuvarı bir tiyatro sahnesi gibiydi: formüller, renkli tebeşirler, kahkahalar... Kuantum elektrodinamiğinin karmaşık denklemlerini açıklarken bile, sanki evrenle oyun oynuyordu. Bilim onun için bir görev değil, merakın saf zevkiydi.

1940'ların başında kuantum teorisini yeniden şekillendiren "*path integral formulation*" fikrini geliştirdi; -bu yöntem, elektronların bir noktadan diğerine giderken tüm olası yolları aynı anda "denediği" düşüncesine dayanır.

Feynman'ın ifadesiyle, "*doğa her olası yolu dener, biz ise yalnızca ortalama sonucu görürüz*" (Feynman, 1985). Bu, sadece bir matematiksel fikir değil, bir düşünce ritmiydi. Elektron, Feynman'ın gözünde, doğanın dansındaki bir parçacıktı: - her yöne dönebilen, ama sonunda anlamlı bir desen oluşturan bir dansçı gibi. "*Yaratmadığım şeyi anlayamam*" (Feynman'ın, kara tahtasına yazdığı son not, 1999). Bir deneyi anlatmak yerine onu kurmayı, bir formülü okumak yerine yeniden türetmeyi severdi. Ona göre bilim, dışarıdan izlenemezdi, içinde yaşanmalıydı. Bu yaklaşım, onun bilimle dans etme biçimiydi. Bir deney masasının başında, doğanın adımlarını izlemek yerine ona eşlik ederdi. Feynman'ın bilimi, ciddiyetle değil, neşeyle doluydu. Los Alamos'taki Manhattan Projesi sırasında bile, diğerlerinin korku ve gizlilik içinde yaşadığı dönemde o, laboratuvar kapılarını kilitli bırakarak "*bilimsel merakın özgürlüğünü*" savundu (Gleick, 1992).

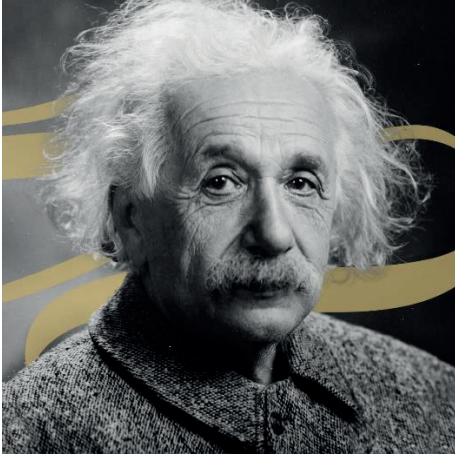
Sonrasında bu projede nükleer bombanın yapılmasına katkıda bulunduğu için pişmanlık duysa da, bilimin sorumluluğunu sanatsal bir duyarlılıkla taşıdı. "*Daha önce hiç çözülmemiş bir problemi çözebilmek için, bilinmeyene açılan kapıyı aralık bırakmak gerekir*". (Feynman, 1999). Bu "*kapıyı aralık bırakma*" fikri, onun felsefesini özetler: Bilim bir cevaba ulaşma değil, bilinmeyene dans davetidir. 1950'lerde Caltech'te profesör olduğunda, dersleri sahne gösterisi gibiydi. Tebeşirle tahtaya denklemler yazarken bir yandan hikâyeler anlatır, şakalaşır, öğrencilerini doğaya âşık etmeye çalışırdı. Öğrencileri onu sadece bilgeliğiyle değil, "*yaşayan bir merak kaynağı*" oluşuyla hatırlardı.

Feynman için bir elektronun davranışıyla bir samba ritmi arasında fark yoktu: — ikisi de doğanın içsel uyumunun ifadesiydi. "*Şüpheyle, belirsizlikle ve bilmemekle yaşayabilirim. Bana göre bilmemek, yanlış olabilecek cevaplara sahip olmaktan çok daha ilginçtir*." (Feynman, 1999). Bu söz, bilimsel cesaretin tanımıdır.

Feynman için "bilmek" değil, bilinmeyene dayanabilmek önemliydi. Belirsizlik onun için korku değil, özgürlüktü. Heisenberg'in "*belirsizlik ilkesi*" teorik bir olguydu; Feynman için ise yaşam biçimiydi. Doğanın ritmine güvenmek, her zaman net olmayan adımlarla bile dans etmeyi sürdürmektir. Richard Feynman yalnızca bir teorisyen değil, aynı zamanda bilimin şairiydi. Fizik yasalarının estetik boyutunu ele aldığı derslerinde, bilimsel bir yasanın güzelliğinin evrensel oluşunda yattığını vurgular: "*Bilimsel bir yasanın güzelliği, her şeye uygulanabilmesinde yatar; buna karşın, herhangi bir şeyin gerçekte ne olduğunu bize söylemez*." (Feynman, 1965). Bu cümle, onun bilimle ilişkisindeki paradoksu anlatır: Bilim evreni açıklarken, gizemini de büyütür. Feynman'a göre bu bir eksiklik değil, güzelliğin kaynağıydı. Her denklem, doğanın daha derin bir dans figürünü ima ederdi.

Richard Feynman, 1965'te Julian Schwinger ve Sin-Itiro Tomonaga ile birlikte Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı, ama o hiçbir zaman bu ödülü bilimin zirvesi olarak görmedi. Ona göre keşif, sonuç değil oyunun devamıydı. "*Bilim, uzmanların her şeyi bilmediğini kabul etme cesaretidir*" (Feynman, 1999). Bu söz, bilimin özündeki çocukluk merakını savunur. Bir çocuk, doğayı otoriteden bağımsız merak eder; O, bilimle sadece düşünerek değil, yaşayarak dans etti: bongo çalarak, resim yaparak, dağlara tırmanarak. Feynman'ın hikâyesi, bilimin sadece doğruluk değil, yaşama sevinci olduğunu hatırlatır. Curie'nin tutkusu yanmaksa, Feynman'ınki ışığın ritminde gülümsemektir. İkisi de doğayı izlemiyordu: biri onunla yanıyordu, diğeri onunla kahkaha atıyordu. Ve her ikisi de bilimin en saf biçimini temsil ediyordu: Bilimle dans etmenin insan hâlini.

4. Albert Einstein: Işık Hüzmesinin Üzerinde



Albert Einstein (1947)

(Wikimedia Commons)

*“Hayal gücü bilgidenden daha önemlidir.
Çünkü bilgi sınırlıdır; hayal gücü ise tüm
dünyayı kuşatır.”*

Albert Einstein, 1954

Albert Einstein, 1879’da Ulm’da doğdu; evrenin sessizliğinde yalnız yürüyen bir düşünürdü. O, laboratuvar camlarının değil, zihninin derinliklerinin fizikçisiydi. Birçok bilim insanı doğayı ölçmeye çalışırken, Einstein onu hayal etmeyi tercih etti. Onun için bilimin kaynağı merak değil, hayranlıktı. “*Gizem duygusunu kaybetmek, ölmek gibidir*” (Einstein, 1954). Bilimle dans etmek onun için doğanın içindeki melodiye duymaktı ve bu melodi, bazen yalnızlıkla, bazen isyanla çalardı.

Einstein 1905’te, Bern Patent Ofisi’nde çalışırken “*mucize yılı*”nı yaşadı. Küçük bir odada, bir masa, birkaç kalem ve sınırsız bir hayal gücüyle, modern fiziği yeniden yazdı. O yıl yayınladığı dört makale; —fotoelektrik etki, Brown hareketi, özel görelilik teorisi ve $E = mc^2$ — bilimin tarihini kökten değiştirdi.

Fotoelektrik etki üzerine yaptığı çalışma, ışığın yalnızca bir dalga olmadığını, aynı zamanda enerji paketçikleri yani “*fotonlar*” hâlinde davrandığını gösterdi. Bu fikir, kuantum fiziğinin temel taşlarından biri oldu ve ona 1921’de Nobel Ödülü’nü kazandırdı. Brown hareketiyle ilgili ikinci makalesi, mikroskobik taneciklerin rastgele hareketlerini açıklayarak atomların gerçekten var olduğunu deneysel olarak kanıtladı. Özel görelilik teorisi ise zamanı ve mekânı mutlak değil, gözlemciye göre değişen kavramlar olarak yeniden tanımladı. Işık hızının evrensel sabit olduğunu öne sürmesi, modern fiziğin temellerini kökten değiştirdi. Ve sonunda, meşhur formül $E = mc^2$ ile enerji ve madde arasındaki ilişkiyi birleştirdi.

Bu makaleler, evrenin yapısına dair dört farklı pencereden baksa da, hepsinde ortak bir ritim vardı: doğa, her ölçekte aynı uyumun izlerini taşıyordu. Einstein’ın dansı, atomlardan yıldızlara uzanan bu uyumu sezmekti.

Ama o bu devrimi laboratuvarında değil, zihninin tiyatrosunda başlattı. On yıl sonra, Einstein evrenin ritmini yeniden dinlemeye başladı. Özel görelilik, zamanı ve mekânı birbirine bağlamıştı; ama şimdi o, kütle ve yerçekiminin bu dokuyu nasıl eğip bükebileceğini merak ediyordu.

1915’te tamamladığı genel görelilik teorisi, evreni sabit bir sahne olmaktan çıkarıp dinamik bir dans alanına dönüştürdü. Artık yerçekimi, görünmez bir kuvvet değil; kütle ve uzay-zamanın dokusuna bıraktığı bir izdi. Güneş, etrafındaki uzayı eğiyor, gezegenler ise bu eğri yüzeyde dönüyordu. Einstein’ın denklemleri, kâğıt üzerinde bir melodi gibiydi: her terim, evrenin ahenginden bir nota taşıyordu.

1919’da, Güneş tutulması sırasında yapılan gözlemler onun teorisini doğruladı. Güneş’in yanından geçen yıldız ışıkları, öngördüğü gibi bükülmüştü. Einstein bir anda dünya çapında bir isim

oldu, ama onun için bu bir zafer değil, doğayla yeniden kurduğu uyumun işaretiydi. Evren artık durağan bir mekân değil, ritmik bir varlıktı — dalgalanan, nefes alan bir bütün. Einstein, doğanın bu devasa dansında bir adım atabilmişti.

Düşünce deneyleri (Gedankenexperimente) onun dans figürleriydi: Bir ışık huzmesine bindiğini, bir asansörde serbest düşüş yaşadığını, uzay-zamanın eğrildiğini hayal etti. Bu imgeler, denklemlere dönüşmeden önce şiirsel sezgilerdi. Onun laboratuvarı zihniydi; orada doğa, düşüncenin ritmine katılırdı. *“Hayal gücü bilgiden daha önemlidir. Çünkü bilgi sınırlıdır; hayal gücü ise tüm dünyayı kuşatır.”* (Einstein, 1954). Bu cümle, onun bilim anlayışını özetler. Bilgi, doğayı açıklayabilir; ama hayal gücü doğayla etkileşime geçer.

Einstein için doğa, bir nesne değil, bir varlıktı. Bu yüzden o, doğayı anlamayı bir tür ruhsal ilişki olarak yaşadı. *“Tanrı’nın düşüncelerini bilmek istiyorum; geri kalan her şey ayrıntıdır.”* (Einstein, 1993). Buradaki *“Tanrı”* dini bir figür değil, doğadaki rasyonel düzenin, evrensel aklın simgesiydi. Einstein için doğanın yasalarındaki düzeni ifade eden felsefi bir metafordur. Einstein, Baruch Spinoza’nın *“Tanrı = Doğa”* görüşüne derinden inanıyordu. 1941’de bir mektubunda şöyle yazmıştı: *“Ben, Spinoza’nın Tanrısına inanıyorum: var olan her şeyin düzenli uyumunda kendini açığa vuran bir Tanrıya; insanların kaderleri ve eylemleriyle ilgilenen bir Tanrıya değil”.* (Einstein, 1954). Bu inanç, onun bilime bakışını tamamen değiştirdi. Evren, kendini açıklayan bir sistem değil, kendini ifade eden bir varlıktı. Ve bilim, bu varlığın müziğini çözmek değil, duymak anlamına geliyordu.

Einstein’ın dansı burada başladı: denklemlerle değil, sezgiyle, doğaya dokunmadan onunla uyum içinde hareket etmekle. Einstein’ın zihniyle evrenin ritmi her zaman tam uyum içinde değildi. O, kuantum fiziğinin olasılık temelli doğasına asla tam inanmadı. Heisenberg ve Bohr’un *“ölçümün doğayı değiştirdiği”* düşüncesine karşı çıkarken şu cümleyi söyledi: *“Tanrı evrenle zar atmaz.”* (Einstein & Born, 1971).

Einstein için evren, rastlantısal bir oyun değil, derin bir uyumdu. Bu nedenle Bohr’la aralarındaki tartışmalar yalnızca bilimsel değil, varoluşsalı. Einstein, evrenle tartışan bir dans partneri gibiydi —onun ritmini anlamak istiyor, ama bu ritmin rastgele olmasına dayanamıyordu. Walter Isaacson, Einstein’ı şöyle tanımlar: *“O, düzen ve uyuma inanan bir isyankârdı”* (Isaacson, 2007). Bu paradoks, onun tüm yaşamının özeti gibidir. Einstein, düşüncede devrimciydi ama doğada düzen arıyordu. O, bilimi bir başkaldırıyla başlattı ama uyumla bitirmek istedi. Ve bu, onun “bilimle dansı”nı trajik ama büyüleyici kıldı. Einstein’ın son yılları, insanlıkla evren arasındaki mesafeyi düşünmekle geçti. Nükleer enerjinin barışçıl kullanımını savundu, savaşın bilimi yozlaştırdığına inandı. Kuantum fiziğini tam olarak kabul etmese de, onun açtığı yollar modern fiziğin temelini oluşturdu.

Princeton’daki son günlerinde, masasında tamamlanmamış bir denklem bırakmıştı: genel alan teorisi için son bir girişim. Bu denklem tamamlanmadı, ama belki de doğanın dansı zaten tamamlanmamış olmalıydı. Çünkü bilim, hiçbir zaman son figürü bilmez; yalnızca ritme katılmayı sürdürür.

Einstein, ölümünden kısa süre önce şu cümleyi yazdı: *“Dünyanın en büyük gizemi, onun anlaşılabilir olmasıdır”* (Einstein, 1954). Evrenin anlaşılabilir olması bile ona bir mucize gibi görünüyordu. O, bilimsel kesinlik değil, kozmik hayret arıyordu. Ve bu hayret, onun bütün teorilerinden daha değerlidir. Einstein, evreni çözmedi; onunla birlikte düşündü. Doğayı bir denklem değil, bir melodi olarak dinledi ve belki de tüm hayatı boyunca o melodinin içinde kayboldu. Albert Einstein, bilimin yalnız filozofudur.

Curie gibi yanmadı, Feynman gibi güldürmedi; ama o, evrenin sessizliğinde yürümeyi seçti. Her adımı bir soru, her sorusu bir ritimdi. Ve sonunda, bilimin en büyük gerçeğini dile getirdi: *“Önemli olan, soru sormaktan vazgeçmemektir. Merak, var olmak için kendi nedenine sahiptir”* (Einstein, 1954). Bu cümle, onun bilimle dansının son adımıydı. Çünkü Einstein için soru sormak, doğanın elini tutmaktı. Her cevapsızlıkta yeni bir dönüş, her denklemde yeni bir nefes...

5. Werner Heisenberg: Belirsizliğin Dansı



Werner Heisenberg (1933)
(Wikimedia Commons)

*“Gözlemlediğimiz şey doğanın kendisi
değil, doğanın ona yönelttiğimiz sorgulama
biçimine açılmış hâlidir.”*

Werner Heisenberg, 1958

Werner Heisenberg, 1901’de Almanya’da doğmuş genç bir fizikçiydi. 1925 yazında, Kuzey Denizi’nin rüzgârlarıyla sarsılan Helgoland Adası’nda, evrenin ritmini yeniden duymaya çalışıyordu. Werner Heisenberg, yirmi üç yaşındaydı; ağır bir saman nezlesi nedeniyle karasal polenlerden uzak kalmak için adaya sığınmıştı. Ama o yalnızlığı, bir tür içsel sığınak hâline getirdi. Dalga seslerinin arasında, kuantum dünyasının sessizliğini dinliyordu ve doğanın müziğinde yeni bir ritim buldu: belirsizlik.

Heisenberg’in önünde duran sorun, klasik fiziğin çözemediği bir çelişkiydi. Atom altı düzeyde, elektronlar sanki hem parçacık hem dalga gibi davranıyor, ama hiçbir gözlem iki özelliği aynı anda ortaya koyamıyordu. O dönemde bilim insanları hâlâ Newtoncu bir hayal kuruyordu: eğer yeterince dikkatle bakarsak, evrenin tüm değişkenlerini ölçebiliriz. Ama Heisenberg o gece, denizin uğultusu eşliğinde fark etti ki, ölçmek = müdahale etmektir. Bir elektronun yerini kesin olarak saptamaya çalıştığımız anda, onun momentumunu değiştiriyoruz. Birini öğrenmek, diğeri karartmak anlamına geliyor. Bu düşünce bir formüle dönüştü:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

Bu formülde, Δx parçacığın konumundaki belirsizliği, Δp ise momentumundaki belirsizliği gösterir. “ $\hbar$ ” (h-bar) Planck sabitinin indirgenmiş hâlidir ve doğadaki en küçük eylem birimini temsil eder. Bu, ölçüm cihazlarının yetersizliğiyle değil, doğanın kendisiyle ilgilidir: evrenin temel yapısı, mutlak kesinliğe izin vermez. Bir elektronun hem nerede olduğunu hem de ne kadar hızlı gittiğini aynı anda bilemeyiz, çünkü bu özellikler aynı anda “gerçekleşmez”; biri belirdiğinde diğeri olasılığa dönüşür.

Böylece Heisenberg, klasik fiziğin “*deterministik evren*” fikrini yıkarak, doğanın özüne belirsizliği yerleştirdi. Bu denklem (belirsizlik ilkesi) yalnızca fizik yasası değil, varoluşun yeni felsefesi idi. Artık doğayı “bilmek” yerine, onunla etkileşim içinde var olmak gerekiyordu. “*Modern fiziğin atomları, bir tür dans olarak düşünülebilir... dalgalar ve parçacıklardan oluşan karmaşık, ritmik bir örüntü.*” (Heisenberg, 1974). Heisenberg’in “*dans*” metaforu rastgele değildi. Çünkü kuantum dünyasında hiçbir parçacık sabit bir yer tutmuyordu; her şey, bir olasılıklar dansıydı. Elektron bir yörünge çizmezdi; o, olasılıkların içinde titreşen bir adım gibiydi.

Bilim, artık sabit noktalar değil, ritmik ilişkiler keşfediyordu. Heisenberg bu keşfiyle sadece fiziği değil, epistemolojiyi de dönüştürdü. Gerçeklik, artık gözlemciden bağımsız değildi. Niels Bohr’un Kopenhag yorumu, bu fikri bir adım ileri taşıdı: ölçüm eylemi, olasılıklardan birini “gerçekliğe” dönüştürüyordu. Bohr bunu şöyle özetledi: “*Kuantum düzeyinde gözlem, doğaya dışarıdan yöneltilmiş bir bakış değil; gerçekliğin kendisiyle kurulan zorunlu bir etkileşimdir.*” (Bohr, 1958). Heisenberg için bu fikir hem büyüleyici hem rahatsız ediciydi. Çünkü o, evrenin temellerinin

insan zihninden bu kadar etkileniyor olabileceği düşüncesini, hem kabul ediyor hem de sorguluyordu. Bohr’la yaptığı tartışmalarda sık sık “doğanın bağımsızlığı”nı savundu, ama içten içe biliyordu ki, doğa artık sessiz bir makine değil, diyalog kuran bir ortaktı. David Cassidy, bu dönemi şöyle özetler: “Heisenberg yalnızca atom fiziğini yeniden yazmamıştı; insan ile doğa arasındaki ilişkiyi de kökten yeniden tanımlamıştı.” (Cassidy, 1992).

Artık bilim, “nesnel ölçüm” değil, katılımcı gözlem demektir. Bir deneyci yalnızca doğayı izlemezdi; her sorusu, doğanın cevabını biçimlendirirdi. Bu, insanlık tarihinde bilginin doğasına dair en radikal farkındalıklardan biriydi. Belirsizlik ilkesi aynı zamanda insan varoluşunun bir metaforu haline geldi. Heisenberg’in kendisi de bunu fark etmişti: “Ne kadar kesin ölçersek, sistemi o kadar fazla bozmuş oluruz” (Heisenberg, 1958). Bu yalnızca elektronlar için değil, insan ilişkileri, toplum ve düşünce için de geçerliydi. Bir şeyi aşırı analiz ettiğimizde, doğallığını kaybederiz. Bilgi, her zaman bir bedel taşır; dokunmanın bedeli.

Heisenberg’in dansı, Curie’nin yanışı ya da Feynman’ın gülümsemesi gibi dışa dönük değildi. Onunki sessiz bir dansı, soyut, düşünsel, denklemlerle örülü. Ama yine de bir ritim vardı: doğayla insan arasında gidip gelen bir nabız. Her gözlem bir adım, her deneme bir dönüş, her hata bir duraklamaydı ve bu ritim, bilimin insan ile doğa arasındaki en içten diyaloguna dönüşüyordu.

Heisenberg, hayatının ilerleyen dönemlerinde bilimin etik boyutunu düşünmeye başladı. Nükleer fiziğin savaşta nasıl kullanılabileceğini gördüğünde, “bilimle dansın” bazen ölümcül olabileceğini anladı. Bilim insanının elindeki güç, bir melodiyi ya da bir silahı doğurabiliyordu. Heisenberg o farkı, niyetin belirlediğini anlamıştı. Bilim, ellerdeki denklemden önce, kalpteki amaçla başlıyordu. Ama yine de umudunu kaybetmedi. “Bilim hayata hizmet etmelidir; onu yok etmemelidir” (Heisenberg, 1974). Bu söz, bilimin estetik doğasını ahlaki sorumlulukla birleştiren bir çağrıdır. Belirsizlik ilkesi, yalnızca ölçümün sınırlarını değil, insanın haddini de gösteriyordu. Bilim, doğanın önünde diz çöken bir merak değil, onunla aynı zeminde dans eden bir bilinçti.

Werner Heisenberg’in hikâyesi, bilimin doğayla ilişkisini yeniden tanımlayan bir şiirdir. O, Newton’un saatini kırdı ama yerine bir müzik koydu. Evren artık mekanik bir makine değil, bir olasılıklar senfonisiydi. Ve biz, bu senfonideki her notayı ölçmeye çalıştığımızda, melodiyi değiştiriyoorduk. Belki de bilimin güzelliği tam da burada yatıyor: Gerçekliği asla tam bilemeyiz, ama onunla birlikte titreşebiliriz.

6. Barbara McClintock: Doğanın Diline Kulak Veren Bilim Kadını



Barbara McClintock

Cold Spring Harbor Laboratuvarı’ndaki mısır tarlalarından birini incelerken.

Cold Spring Harbor Laboratuvar arşivi.
NobelPrize.org.(n.d.)

“Doğada her yürüyüşüm, bana yeni bir şey öğretti.”

Barbara McClintock, 1983

Barbara McClintock, 1902’de Connecticut’ta doğdu. Çocukluğunda doğayla arasında garip bir uyum vardı; *“bitkilerle konuşabildiğini”* söylerdi. Doğayı, uzaktan gözlemlenecek bir nesne değil, sabırla kulak verilmesi gereken canlı bir düzen olarak görüyordu. Bazı bilim insanları doğayı gözlemler, bazılarıysa onu dinler; McClintock, doğayı dinleyenlerdendi. Mısır tanelerinin sessiz düzeninde, genlerin yalnızca sabit yapılar değil, hareket eden ve konuşan varlıklar olduğunu sezdi. Onun laboratuvarı gürültülü değildi; sabah sessizliğinde, sabırla ve tekrar tekrar bakarak, doğanın kendini açmasını beklerdi. O, mikroskobun başında yalnızca hücreleri incelemiyor, onlarla konuşuyordu. Bunun şiirsel bir mecaz olmadığını, kendisi de açıkça söylemişti: *“Canlının kendisine karşı bir sezgiye sahip olmalısınız”* (Keller, 1983). Doğayı anlamak, onun ritmini hissetmekti — tıpkı bir dans gibi. Ve bu his, 20. yüzyıl genetik biliminin en sessiz devrimini doğurdu.

Cornell Üniversitesi’nde bitki sitogenetiği (kromozom bilimi) üzerine çalışmaya başladığında, laboratuvarı bir konser salonu gibiydi: her hücre bölünmesi, her kromozom hareketi, onun için bir ritimdi. Klasik genetik, o yıllarda Mendel kalıtım yasalarının katı çizgileriyle tanımlanıyordu. Ama McClintock, bu çizgilerin arasında esnek, dinamik bir doğa sezdi. 1940’larda, mısır bitkilerinde yaptığı sitolojik gözlemlerle *“sıçrayan genleri”* (transpozonlar) keşfetti.— DNA’nın bazı parçalarının, genom içinde yer değiştirebildiğini fark etti (McClintock, Carnegie Institution of Washington Yearbook, 1950). Bu keşif, o dönemin bilim dünyası için fazla *“canlı”*ydı. Çünkü genler, o zamana kadar sabit, değişmez, mekanik birimler olarak düşünülüyordu. McClintock ise doğayı sabitlikten değil, hareketten ibaret görüyordu. *“Genom, çevresine son derece duyarlı olan, hücrenin hassas bir organıdır.”* (McClintock, 1983). Bu söz, onun bilim felsefesinin özüdür: Genetik bileşim bile, doğayla iletişim hâlinindedir. Bilim, durağan bir fotoğraf değil, canlı bir müziktir.

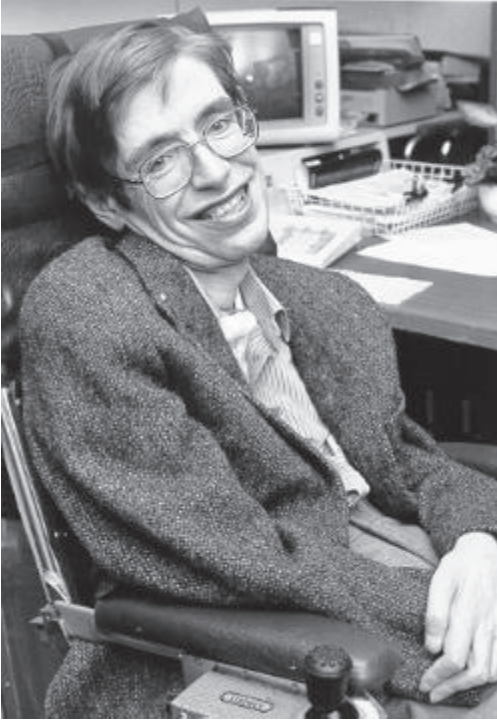
Ancak bu görüşler, 1950’lerde fazla radikal bulundu. Makalesi yayınlanmadı, fikirleri *“mistik”* olarak küçümsendi. McClintock bilimsel topluluktan yavaş yavaş çekildi, tek başına çalışmaya başladı. New York’taki Cold Spring Harbor Laboratuvarı’nda, mısır tarlalarıyla çevrili bir odada yıllarca yalnız yaşadı. Ama o yalnızlığı yenilgi değil, doğayla baş başa kalma fırsatı olarak gördü. Bilim onun için sosyal bir yarış değil, doğayla kurulan içsel bir diyalogdu. Laboratuvarda saatlerce sessiz kalır, mikroskobun altındaki görüntüyü yalnızca gözleriyle değil, sezgisiyle *“okurdu.”* Bu sezgi, bilimin çoğu zaman reddettiği ama en saf hâliyle gereksinim duyduğu bir duyguydu.

Evelyn Fox Keller, McClintock’un yöntemini şöyle anlatır: *“Hiçbir zaman tanınma ihtiyacı duymadım. Eğer haklı olduğunuzu biliyorsanız ve yeterince uzun yaşarsanız, bunun karşılığını görürsünüz.”* (Keller, 1983). Bu, bilimin maskülen *“doğayı fethetme”* anlayışının tam tersiydi. McClintock, doğayı kontrol etmek değil, anlamak istiyordu. Doğa onun için bir makine değil, bir organizmaydı ve bilim, o organizmayla empatik bir dans gibiydi.

1970’lerde moleküler biyoloji geliştiğinde, McClintock’un yıllar önceki bulguları yeniden keşfedildi. Transpozonlar artık genetik mühendisliğin merkezindeydi. O, haklı çıkmıştı fakat hiçbir *“zafer”* ifadesi kullanmadı. 1983’te Nobel Ödülü’nü aldığı anda, sahnede yalnızca doğayı selamladı: *“Doğayı dinlemeyi başardığınızda, yanıt kendiliğinden ortaya çıkar”* (McClintock, 1983). Bu söz, bilimin epistemolojik sınırlarını aşar. Çünkü McClintock için bilgi, ölçümle değil, katılımıla doğuyordu. Doğanın cevabı, zorla alınmaz; sessizce dinlenir. Onun yaklaşımı, Curie’nin tutkusu ya da Feynman’ın coşkusu gibi dışa dönük değildi, ama belki de en derin olanıydı: doğayla empati kurmak.

Barbara McClintock’un hayatı, sabrın ve sezginin dansıdır. Laboratuvarın sessizliğinde, mikroskop camının ötesinde bir evren buldu. Kuantum fiziği evrenin belirsizliğini ortaya koyarken, McClintock genetikte yaşayan düzenin belirsizliğini gösterdi. O, doğayı çözmedi, onunla birlikte düşündü, birlikte sustu, birlikte var oldu. Ve sonunda bilimin en insani tanımını bıraktı geriye: Bilim, doğayı dinleme sanatıdır.

7. Stephan Hawking: Kara Deliklerin Işığını Görebilen Göz



*“Zekâ, değişime uyum
sağlama yeteneğidir.”*

Stephen Hawking, 2010

Stephen Hawking
(Wikimedia Commons)

Stephen Hawking, 1942’de İngiltere’nin Oxford kentinde doğdu. Evreni anlamaya çalışırken, kendi bedeninin giderek sessizleştiği bir hayatın içine girdi. Konuşamayan ama düşünebilen, hareket edemeyen ama hayal edebilen bir zihinle, kozmosa bakmayı sürdürdü. Onun için bilim, yalnızca yıldızlara yönelen bir merak değil; zamanın, mekânın ve varoluşun sınırlarını sabırla dinleme biçimiydi.

Stephen Hawking, modern kozmoloji ve kara delik fiziğine yaptığı teorik katkılarla bilim dünyasında kalıcı bir etki bırakmıştır. Roger Penrose ile birlikte geliştirdiği tekilite teoremleri, Genel Görelilik Kuramı altında evrenin belirli enerji koşulları sağlandığında kaçınılmaz olarak bir tekillik çöktüğünü göstererek Büyük Patlama’nın matematiksel temelini güçlendirmiştir. Hawking’in 1974’te ortaya koyduğu Hawking ışıması ise kara deliklerin kuantum alan teorisi etkileri nedeniyle tamamen “kara” olmadığını ve olay ufku çevresindeki dalgalanmalar sonucu termal ışıyım yaydığını göstermiştir (Hawking, 1988). Bu bulgu, kara deliklerin zamanla enerji kaybedip buharlaşabileceğini ortaya koymasının yanı sıra, kara delik bilgi paradoksunu gündeme getirerek kuantum mekaniğinin “bilgi korunumu” ilkesini tartışmaya açmıştır. Hawking’in hesaplamalarına göre kütlesi M olan bir kara deliğin sıcaklığı

$$T = \hbar c^3 / (8 \pi G M k_B)$$

denklemleriyle verilir (Hawking, 1988); bu ifade Hawking ışımasının kuantum kökenini matematiksel olarak tanımlayan temel bağıntıyı oluşturur. Bu formülde T sıcaklığı, $\hbar$ indirgenmiş Planck sabitini, c ışık hızını, G evrensel kütle çekim sabitini ve k_B Boltzmann sabitini temsil eder. Denklem, kara delik sıcaklığının kütleyle ters orantılı olduğunu gösterir; bu nedenle büyük kütleli kara delikler son derece soğuk, küçük kütleli kara delikler ise çok daha sıcak olur. Bu bağıntı, kara deliklerin kuantum etkileri nedeniyle zamanla enerji kaybedip buharlaşabileceğini açıklayan Hawking ışımasının temel fiziksel dayanağıdır.

Stephen Hawking, yaşamının son döneminde Tomas Hertog ile birlikte çoklu evren modellerinin matematiksel tutarlılığını yeniden değerlendirmiş ve klasik ebedî enflasyon senaryosunun öngördüğü sonsuz sayıda düzensiz evrenin fiziksel olarak tanımlanabilir olmadığını savunmuştur (Hawking & Hertog, 2018). 2018’de yayınlanan *A Smooth Exit from Eternal Inflation* başlıklı çalışmalarında Hawking ve Hertog, Hartle–Hawking sınır koşulsuzluğu modelinin güncellenmiş bir versiyonunu kullanarak, çoklu evrenin gelişigüzel ve sınırsız bir yapı olmadığı; aksine fiziksel yasalar tarafından kısıtlanmış daha dar ve belirli bir evrenler topluluğu oluşturduğu sonucuna varmıştır (Hartle & Hawking, 1983; Hawking & Hertog, 2018). Bu yaklaşım, evrenimizin birçok olası evrenden biri olabileceğini, ancak yalnızca belirli fiziksel sabitlere sahip evrenlerin yaşamın ortaya çıkmasına izin verebileceğini ima eder (Hawking & Hertog, 2018).

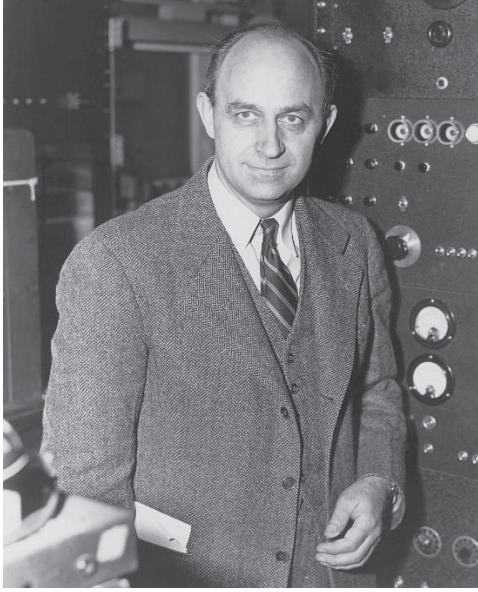
Hawking, kozmoloji alanında da önemli katkılar sunmuştur. James Hartle ile birlikte geliştirdiği sınır koşulsuzluğu modeli (no-boundary proposal), evrenin başlangıcında klasik anlamda bir tekilliğin bulunmadığını; uzay-zamanın kuantum ölçeğe “kenarsız” ve kapalı bir geometriye sahip olabileceğini öne sürmüştür (Hartle & Hawking, 1983). Bu model, kuantum kozmolojisi literatüründe evrenin kökenini açıklamaya yönelik modern yaklaşımlardan biri olarak kabul edilir (Hawking, 1988). Evrenin genişlemesi, erken dönemdeki kuantum dalgalanmalarından yapı oluşumu ve zamanın oku gibi konular da Hawking’in kozmoloji çalışmalarında merkezi bir yer tutmuştur (Hawking, 1988; Hawking, 1994).

Zaman oku, fizik yasalarının büyük çoğunluğunun zaman açısından simetrik olmasına rağmen bizim zamanı yalnızca ileri yönde deneyimlememizin nedenini açıklamaya çalışan kavramsal bir çerçevedir. Stephen Hawking, *A Brief History of Time* adlı eserinde ve çeşitli derslerinde bu kavramı modern kozmolojinin merkezine yerleştirerek zamanın yönünün temel nedeninin evrenin başlangıçtaki olağanüstü düşük entropisi olduğunu vurgulamıştır (Hawking, 1988). Fizikteki temel etkileşimlerin — Newton mekaniği, Maxwell denklemleri, Schrödinger denklemi ve hatta Genel Görelilik — tümü zaman tersinimlidir; yani bu yasalar geçmişe doğru işletildiğinde de aynı şekilde geçerlidir. Buna karşın günlük yaşamda yumurtaların kırılması, ısıнын sıcaktan soğuğa akması ya da karışmış gazların yeniden ayrılmaması gibi süreçler geri döndürülemezdir. Bu geri döndürülemezlik, İkinci Termodinamik Yasası ile ifade edilen entropi artışından kaynaklanır; dolayısıyla termodinamik zaman oku, evrende gerçekleşen tüm makroskopik süreçlerde entropinin artış yönüyle tanımlanır (Hawking, 1988).

Hawking, zaman okunu yalnızca termodinamik düzeyde değil, bilinç ve kozmoloji düzeyinde de ele alır. Psikolojik zaman oku, insan zihninin geçmişi hatırlayıp geleceği hatırlayamamasına dayanır; çünkü bellek oluşumu, entropi artışı gerektiren fiziksel süreçlere bağlıdır ve bu nedenle yalnızca geçmişi kaydedebiliriz (Hawking, 1994). Kozmolojik zaman oku ise evrenin genişlemesiyle ilişkilidir. Hawking’e göre evrenin ilk anları son derece düşük entropili, homojen ve izotropik bir durumdayken zamanla galaksiler, yıldızlar ve kara delikler gibi yüksek entropili yapılar oluşmuş; böylece kozmolojik zaman oku, Büyük Patlama’dan sonraki genişleme yönüyle tanımlanmıştır (Hawking, 1994).

Günümüzde zaman oku tartışması hâlâ çözülmemiş bir problemdir. Roger Penrose’un Weyl eğrilik hipotezi, Sean Carroll’un düşük entropili başlangıç kozmolojileri ve hâlen araştırılmakta olan kuantum yerçekimi modelleri, Stephen Hawking’in bıraktığı bu teorik mirası geliştirmeye devam etmektedir (Penrose, 1989; Carroll, 2010). Ancak bütün modern yaklaşımlar hâlâ Hawking’in temel sonucuna dayanır: Zamanın ileri yönde akmasının kökeni, fizik yasalarının kendisinde değil, evrenin başlangıçtaki olağanüstü düzenli ve düşük entropili hâlinindedir (Hawking, 1988; Hawking, 1994).

8. Enrico Fermi – Teoriyi Deneyle Birleştiren Usta



Enrico Fermi

(Wikimedia Commons)

“İki olası sonuç vardır: Eğer sonuç hipotezi doğruluyorsa, bir ölçüm yapmışsınızdır; eğer hipotezle uyuşmuyorsa, bir keşif yapmışsınızdır.”

Enrico Fermi, 1983

Enrico Fermi, 1901’de Roma’da doğdu. Bilim dünyasında hem teorinin hem deneyin ustası olabilmek son derece nadir bir özelliktir. Enrico Fermi, bu iki alanı olağanüstü bir ustalıkla birleştiren birkaç bilim insanından biridir. Onun çalışmaları, modern fiziğin temel yapı taşlarını oluştururken, bilimin yalnızca soyut kavramlardan değil, aynı zamanda somut deneylerden ve mühendislik zekâsından da beslendiğini gösterir (Segrè, 1970).

Fermi, genç yaştan itibaren olağanüstü bir matematiksel sezgiye sahipti. Karmaşık fiziksel problemleri hızlı bir şekilde tahmin edebilmesiyle ün kazandı. Bugün “*Fermi problemleri*” olarak bilinen yaklaşım, büyük hesapları kısa sürede yaklaşık akıl yürütmeye çözme öğretir (Segrè, 1970, Galison 1997).

Teorik fizik alanındaki en büyük katkılarından biri beta bozunumu teorisidir. Bu teori, atom çekirdeğinde gerçekleşen zayıf etkileşmenin anlaşılmasını sağlayarak parçacık fiziğinin bugünkü kuramsal yapısının temelini atmıştır (Pais, 1986). Fermi’nin deneysel yönü en açık biçimde ilk kontrollü nükleer zincirleme reaksiyonun gerçekleştirilmesi sürecinde ortaya çıkmıştır. 1942’de Chicago Üniversitesi’nde kurulan deneysel düzenekte Fermi ve ekibi, insanlık tarihinde ilk kez kontrollü bir çekirdek reaksiyonu gerçekleştirmeyi başarmıştır (Rhodes, 1986). Fermi, Manhattan Projesi’nde yer almış; nükleer enerjinin hem bilimsel potansiyelini hem de yıkıcı sonuçlarını yakından gözlemlemiştir. Bu deneyim, bilimin toplumsal sorumluluğu üzerine daha temkinli ve sorgulayıcı bir yaklaşım geliştirmesine yol açmıştır (Segrè, 1970; Rhodes, 1986).

Enrico Fermi’nin hikâyesi, bilimin yalnızca soyut fikirlerden değil, aynı zamanda pratik zekâ, yaratıcılık ve sorumluluk bilincinden oluştuğunu gösterir. O, evrenin yasalarını hem matematiksel sezgisiyle hem de fiziksel araçlarla açığa çıkarabilmiş ender bilim adamlarından biridir (Segrè, 1970, Galison 1997).

9. Modern Dönem: Kuantum Noktaları, CRISPR ve Yeni Dans Alanları

21. yüzyıla gelindiğinde, bilim yalnızca doğayı anlamanın değil, onunla birlikte yeni ritimler kurmanın yollarını aramaya başladı. Bilim, her çağda yeni bir müzik duyar. Curie'nin laboratuvarında parlayan ışık, Heisenberg'in dalgalarında titreşen olasılıklar ve McClintock'un mikroskopunda sessizce değişen genler... 21. yüzyılda bu müzik yeniden hızlandı. Doğa, bir kez daha insanla birlikte sahneye çıktı ve bu kez, sahne hem atomun hem genin içindeydi.

I. Kuantum Noktalarının Işığı: Maddenin Yeni Ritimleri



“Kuantum noktaları sayesinde kuantum mekaniğinin etkileri artık doğrudan gözlemlenebilir hâle gelmiştir”

Alexei Ekimov, 2023

Alexei Ekimov, Louis Brus ve Moungi Bawendi

(Nobel Prize profili /Wikimedia Commons)

2023 Nobel Kimya Ödülü, kuantum noktalarının keşfi ve geliştirilmesiyle bilimi yeni bir ölçekte düşünmemizi sağlayan üç isme verildi. Alexei Ekimov, 1945'te Sovyetler Birliği'nde doğdu; Louis Brus, 1943'te Amerika Birleşik Devletleri'nde dünyaya geldi; Moungi G. Bawendi ise 1961'de Paris'te doğdu. Farklı coğrafyalardan gelen bu üç bilim insanını birleştiren şey, maddenin en küçük ölçeklerinde saklı ritmi fark etmeleriydi. Bu üç bilim insanı, 1980'lerden itibaren atomik ölçekli kristallerin, yani kuantum noktalarının, boyutlarına bağlı optik özellikler gösterdiğini kanıtladılar (Ekimov, 1981; Brus, 1983; Bawendi, 1993). Bu olguya verilen isim: quantum confinement (kuantum sınırlaması) idi. Bir zamanlar yalnızca teorik olan bu kavram, artık doğrudan gözlemlenebilir bir olgu hâline gelmişti.

Ekimov, 1980'de bakır klorit (CuCl) nanokristallerinde ışığın renk değişimini fark etti; Brus, 1983'te kolloidal çözeltilerde aynı etkiyi gösterdi; Bawendi ise 1993'te, kuantum noktalarının boyutunu atomik hassasiyetle kontrol eden bir sentez yöntemi geliştirdi. Bu buluş, bilimin hem görsel hem felsefi anlamını değiştirdi. Çünkü artık maddenin rengi, yalnızca kimyasal bileşimle değil, boyutun kendisiyle belirleniyordu. Bir parçacık küçüldükçe, enerjisi artıyor ve emisyonu maviye kayıyordu. Atomlar adeta kendi iç ritmini değiştiriyor, doğa boyuta göre dans ediyordu. *“Parçacık boyutunun değiştirilmesi, kuantum sınırlama etkisi nedeniyle yayılan ışığın rengini doğrudan belirler”* (Brus, 1983).

Bu fenomen, hem bilimin hem sanatın sınırında durur: Bir nanometre fark, bir melodinin tınısını değiştirir gibi, ışığın tonunu değiştirir. Teorik fizikçiler için bu, dalga fonksiyonunun bir tezahürüdür; ama sanatçılar için, maddenin kendi ışığını bestelemesidir. Kuantum noktaları bugün LED ekranlardan biyogörüntülemeye kadar birçok alanda kullanılıyor. Ama belki de en büyüleyici yanları, gözle görülür hâle gelen kuantum dünyası olmalarıdır. Ekimov'un ifadesiyle: *“Kuantum noktaları sayesinde kuantum mekaniğinin etkileri artık doğrudan gözlemlenebilir hâle gelmiştir”* (Nobel Media, 2023). Bu, bilimin dansının yeni bir evresidir: Eskiden soyut olan kuantum yasaları, artık renkli ışıklar şeklinde parlıyor. Doğa, yalnızca ölçülüyor, ışıkla ifade ediliyor.

II. CRISPR (Kümelenmiş, Düzenli Aralıklı, Kısa Palindromik Tekrarlar): Hayatın Koreografisini Öğrenmek



*“Biz yaşamı yeniden yazmıyoruz;
onun koreografisini öğreniyoruz.”*

Jennifer Doudna,

Interview with The Guardian, 2020

Emmanuelle Charpentier- Jennifer Doudna

(Wikimedia Commons)

2020 Nobel Kimya Ödülü, CRISPR-Cas9 gen düzenleme tekniğini geliştiren Emmanuelle Charpentier ve Jennifer Doudna'ya verildi. Charpentier, 1968'de Fransa'da; Doudna ise 1964'te Amerika Birleşik Devletleri'nde doğdu. Farklı coğrafyalardan gelen bu iki bilim insanını bir araya getiren şey, genetik bilginin içinde saklı ritmi çözme arzusu: hücrenin kendi mekanizmalarından öğrenerek, ona hükmetmeden müdahale edebilmek. CRISPR, bakterilerin savunma mekanizmalarından ilham alan bir gen düzenleme tekniğidir. Doğanın kendi çözümünden doğan bu yöntem, bilimin doğaya karşı değil, onunla birlikte ilerleyebileceğini gösteren en güncel örneklerden biridir.

Onların buluşu, DNA'nın kelimelerini yeniden yazmak değil, hayatın dilini anlamak girişimiydi. CRISPR-Cas9 teknolojisi, canlı hücrelerin genetik dizilimlerini kesip yeniden düzenlemeyi mümkün kıldı (Jinek *et al.*, Science, 2012). Ama Doudna'nın ifadesiyle, mesele bir *“Tanrı oyunu değil, bir dans dersiydi”* (Doudna, 2016). Bu yaklaşım, bilimin etik boyutunu yeniden gündeme getirdi. Çünkü artık doğayla yalnızca konuşmuyoruz; ona dokunuyoruz.

Doudna ve Charpentier'in buluşu, bakterilerin doğal savunma sisteminden esinlendi. Doğa, milyonlarca yıldır DNA'yı kesip onarabiliyordu; bilim insanları sadece bu ritmi duymayı öğrendiler. Bu, McClintock'un *“doğayı dinleme”* yaklaşımının genetik düzeydeki devamıydı. McClintock genlerin dansını hissetmişti; Doudna bu dansın adımlarını kaydetti. *“Yaşam bir moleküler senfonidir ve biz bu müziği henüz çözmeye başlıyoruz.”* (Charpentier, 2021). Bu metafor, çağdaş bilimin özünü tanımlar: Artık bilgi, kontrol değil; uyum arayışıdır. Doğayı düzeltmek değil, onunla birlikte yeni biçimler üretmektir. Bilim insanı bir düzenleyici değil, bir koreograf hâline gelir. Ama bu güçle birlikte yeni sorumluluklar da doğar. Kuantum noktalarının renkleri göz kamaştırıcı olabilir, ama nadir elementlerin madenciliği çevresel bedeller taşır. Gen düzenleme umut verici olabilir, ama etik sınırları da yeniden çizer. Bilimle dans etmek, her zamankinden daha dikkatli bir denge gerektirir. Doğayla uyum içinde hareket etmek, onu yönetmekten daha güçtür, çünkü bu dansın yanlış adımı, ritmi bozabilir.

III. Kuantum Dolanıklık ve Makroskopik Kuantum Tünelleme



“Kuantum geleceği artık yalnızca bir teori değil — oktan gençlerin ellerinde.”

Michel Devoret, 2025

John M. Martinis, Michel H. Devoret ve John Clarke

(Nobel Prize Outreach., 2025)

21. yüzyılın ortasına gelindiğinde kuantum dünyası, atom ölçeğini aşarak mühendisliğin konusu hâline geldi. Bir zamanlar yalnızca düşünce deneylerinde var olan kuantum olguları, artık ölçülen, tasarlanan ve çalışan sistemlere dönüştü. Bilim, bu noktada doğayı yalnızca anlamakla kalmadı; onun en kırılgan ritimlerini aygıtlarla birlikte sürdürmeyi öğrendi.

John Clarke, İngiltere’de; Michel H. Devoret, Fransa’da; John M. Martinis ise Amerika Birleşik Devletleri’nde doğdu. Farklı coğrafyalardan gelen bu üç bilim insanı, süperiletken devreler ve kubitler üzerine yaptıkları öncü çalışmalarla, kuantum mekaniğini soyut bir kuram olmaktan çıkarıp çalışan aygıtların dili hâline getirdi ve 2025 Nobel Fizik Ödülünü aldılar. Çünkü onlar kuantum davranışını ilk kez makroskopik sistemlerde — süperiletken devrelerde — gözlemlemeyi başardılar. Bu sistemlerde elektronlar, milyonlarca atomdan oluşan bir yapının içinde tünelleme hareketi yapabiliyordu: bir enerji bariyerini klasik olarak aşamayacak olmalarına rağmen, olasılık dalgasının bir kısmı sayesinde diğer tarafa “geçebiliyorlardı.” Bu olguya “*kuantum tünelleme*” (*quantum tunnelling*) denir. Clarke ve Devoret’in deneylerinde, bu tünelleme süreci süperiletken bir halkada “kuantize enerji seviyeleri” (quantized energy levels) oluşturdu; Martinis’in ekibi ise bu olguyu kuantum bilgisayarlarının temel bileşenleri olan Josephson eklemleri (Josephson junctions) üzerinden doğruladı. Böylece kuantum etkilerinin yalnızca atomik ölçekte değil, insan eliyle üretilmiş makroskopik devrelerde de gerçekleştiği gösterildi.

“Bugün, kuantum dolanıklık ve kuantum tünelleme, kuantum bilgi çağının iki temel direğini oluşturuyor. Dolanıklık, bilgiyi uzaydan bağımsız kılarken; Tünelleme, enerjiyi bariyerlerden özgürleştiriyor.” (Nobel Fizik Ödülü Basın Bildirisi, 2025; You ve ark., 2025).

“Bu çalışmalar, kuantum mekaniğinin yalnızca atomik düzeyde değil, insan eliyle üretilebilen makroskopik sistemlerde de geçerli olduğunu göstermektedir.” Araştırmalar, geleceğin kuantum teknolojilerine —kuantum bilgisayarları, kuantum sensörleri ve kuantum kriptografi sistemlerine — temel oluşturmuştur. *“Kuantum davranışları yalnızca mikroskopik dünyada değil; uygun koşullar altında makroskopik sistemlerde de gözlenebilir. Bu, doğanın kuantum yasalarının günlük yaşama açılabilceğini göstermektedir.”* (Royal Swedish Academy of Sciences, 2025; Nobel Prize, 2025).

Ödöl sahipleri, açıklamalarında hem şaşkınlıklarını hem de bilimin hâlâ keşif sürecinde olduğuna dair inançlarını dile getirdiler. Michel Devoret, *“İlk anda bunun bir şaka olduğunu düşündüm; çünkü kuantum bilgisayar henüz gerçekten hayatımıza girmiş bir teknoloji değil.”*

diyerek, kuantum bilgisayarın henüz tamamlanmamış bir hayal olduğunu ancak temellerinin atıldığını vurguladı. John Clarke, “*Tam anlamıyla şaşkınım; böyle bir çalışmanın Nobel Ödülü’ne temel oluşturacağını asla hayal etmemiştim.*” sözleriyle şaşkınlığını ifade ederken, bilimin günlük yaşamla bağına göstermek için “*Şu anda cep telefonumdan sizinle konuşuyorum ve siz de büyük olasılıkla kendi telefonunuzdan benimle konuşuyorsunuz. Bunun işe yaramasının nedenlerinden biri de bu fiziktir.*” diyerek çalışmalarının teknolojik yansımalarına dikkat çekti. John M. Martinis ise, “*Kuantum geleceği artık yalnızca bir teori değil, çoktan gençlerin ellerinde.*” diyerek kuantum geleceğinin artık yalnızca teorik bir vaat olmadığını; laboratuvarlarda, kod satırlarında ve sınıflarda çalışan genç zihinlerin ellerinde, şimdiden biçimlenmeye başladığı ifade ediyor.

Ancak bu noktaya gelmeden önce, kuantum fiziğinin temelinde yatan fikirlerin nasıl doğduğunu yeniden hatırlamak gerekir: Kuantum fiziği, 20. yüzyılın başında atomları anlamak için doğdu; ama bugün, doğanın kendisini yeniden tanımlıyor. Kuantum dolanıklık (entanglement), iki ya da daha fazla parçacığın kuantum durumlarının birbirine bağımlı hâle gelmesi durumudur. Bu parçacıklar birbirinden ne kadar uzağa giderse gitsin, biri üzerinde yapılan ölçüm anında diğerini de etkiler. Yani sistemin tamamı, ayrı ayrı değil, tek bir birleşik kuantum hâli olarak davranır. Kuantum mekaniğinde bir parçacığın durumu, kesin değerlerle değil, olasılıklar dalgasıyla tanımlanır. İki parçacık etkileşip dolanık hâle geldiğinde, bu olasılık dağılımları artık birbirine bağlanır. Örneğin iki elektron zıt spinlerle (biri yukarı, biri aşağı) dolanık hâle getirilsin. Bu elektronlar kilometrelerce uzağa gönderilse bile, birinin spinini ölçtüğünüzde — diyelim ki “*yukarı*” — diğerininki anında “*aşağı*” olarak belirlenir. Bu sonuç, önceden “*bilinçli bir seçim*” değil, ölçüm anında gerçekleşen bir fiziksel olgudur. Einstein bu durumu 1935’te EPR (*Einstein–Podolsky–Rosen*) paradoksu olarak tanımlamış ve daha sonra Max Born’a yazdığı bir mektupta bu tür etkileşimleri “*uzaktan ürkütücü etki*” (spooky action at a distance) olarak adlandırmıştır; çünkü bu olgu, klasik fiziğin hiçbir bilginin ışık hızından hızlı iletilemeyeceği ilkesine meydan okuyor gibi görünmektedir (Einstein *et al.*, 1935; Einstein, 1947). Parçacıkların özellikleri ölçülmeden önce “*var değildir*” — yalnızca olasılık olarak mevcuttur: “*Ölçmeden önce var değildir*” ifadesi, kuantum fiziğinin klasik gerçeklik anlayışını kökten sarsan en temel ilkelerden biridir.

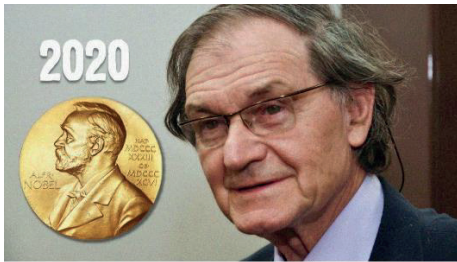
Klasik fizikte nesneler gözlemciden bağımsız, belirli özelliklere sahip kabul edilirken; kuantum düzeyde parçacıkların konumu, spini ya da momentumu ölçülmeden önce yalnızca olasılık dalgaları hâlinde var olur. Yani elektron ya da foton gibi parçacıklar, ölçüm yapılmadan önce belirli bir yerde değil, birden çok olasılığın süperpozisyonu içinde bulunur. Ölçüm yapıldığında dalga fonksiyonu çöker ve bu olasılıklardan yalnızca biri gerçekleşir. Dolayısıyla, gözlem eylemi sistemin durumunu belirler; gerçeklik, gözlemiden bağımsız değil, onunla birlikte şekillenir. Bu durum, evrenin mutlak ve deterministik bir yapı olmadığını, aksine etkileşimle sürekli yeniden tanımlanan bir olasılıklar ağı olduğunu gösterir. Bohr’un tamamlayıcılık ilkesiyle başlayan, Heisenberg’in belirsizlik ilkesinde derinleşen bu düşünce çizgisi, Wheeler’ın “*katılımcı evren*” kavramıyla yeni bir boyut kazanır. Bohr’a göre ölçüm, doğanın kendisini değil, doğayla kurduğumuz ilişkiyi tanımlar; Heisenberg ise bu ilişkinin kaçınılmaz olarak müdahaleci olduğunu göstermiştir. Wheeler, bu iki yaklaşımı bir adım ileri taşıyarak, evrenin anlamının ancak gözlemle birlikte belirdiğini savunur. Bu bakış açısında evren, önceden tamamlanmış bir yapı değil; gözlem, seçim ve bilgiyle birlikte sürekli olarak “*oluşan*” bir süreçtir. Modern kuantum bilgi kuramı da tam bu noktada devreye girer: Bilgi artık yalnızca fiziksel sistemlerin betimi değil, fiziksel gerçekliğin kurucu bir unsurudur. Böylece kuantum fiziği, doğayı dışarıdan izleyen bir bilimin ötesine geçerek, insanı evrenin anlam üretim sürecinin ayrılmaz bir parçası olarak konumlandırır. Wheeler’a göre evren, gözlemciden bağımsız, kendi kendine işleyen bir mekanizma değildir; aksine, gözlemcinin varlığı ve etkileşimi olmadan “*gerçeklik*” tamamlanamaz. Gözlem yapmak, pasif bir eylem değil, doğanın olasılıklar içinden bir durumu “*seçmesine*” aracılık eden etkin bir süreçtir. Bu bakış açısı, insanı evrende yalnızca gözlemleyen bir varlık olmaktan çıkarıp, gerçekliğin ortaya çıkışına katılan bilinçli bir unsur hâline getirir. Dolayısıyla, bilgi edinme eylemi artık sadece evreni anlamak değil, aynı zamanda onu şekillendirmektir. Bu, fizik ile felsefenin kesiştiği noktada, bilincin doğadaki rolünü yeniden düşünmemizi gerektiren bir çağrı niteliği taşır.

Kuantum mekaniğinin temel ilkeleri olan süperpozisyon, ölçüm ve dolanıklık, günümüzde yalnızca teorik fiziği değil, bilgi teknolojileri ve biyolojiyi de dönüştürmektedir. Kuantum bilgi ve hesaplama alanında, klasik bitin karşılığı olan qubit, ölçülmeden önce aynı anda hem 0 hem 1 durumlarında bulunabilen bir kuantum bilgi birimidir; bu özellik, çoklu durumların paralel biçimde işlenmesini sağlayarak hesaplama gücünü olağanüstü ölçüde artırır. Kuantum iletişim ise dolanıklık ilkesine dayanır: iki parçacık arasında kurulan kuantum bağı sayesinde, birinde yapılan ölçüm sonucu anında diğerine “yansır” ve bu etkileşim, kuantum teleportasyon ve kırılması imkânsız şifreleme sistemlerinin temelini oluşturur.

Fizikçi David Bohm, hem kuantum teorisine yaptığı katkılar hem de bilimi felsefeyle buluşturan bütüncül yaklaşımıyla tanınır. Albert Einstein’ın öğrencilerinden biri olan Bohm, kuantum mekaniğinin klasik yorumlarını sorgulamış ve doğayı parçalar yerine ilişkiler ağı olarak anlamaya çalışmıştır. Kuantum dolanıklığın evrende rastlantısal bir etkileşim değil, “gizli bir düzenin” (*implicate order*) yansıması olduğunu savunur. Ona göre evren, yüzeyde ayrı parçacıklardan oluşuyormuş gibi görünse de, aslında tüm varlıklar tek bir bütünün farklı açılımlarıdır (*explicate order*). Parçacıklar arasındaki anlık etkileşimler —örneğin dolanık fotonların birbirini anında “bilmesi” — bu derin düzenin dışı vurumudur. Bohm bu durumu, okyanusun yüzeyindeki dalgalarla açıklar: dalgalar ayrıymış gibi görünür, ama aslında aynı denizin hareketleridir. Dolayısıyla, evrenin temeli madde ya da enerji değil, bilgidir; madde, bu bilginin görünür hâle gelmiş formudur. Bu bakış açısı, kuantum dolanıklığı yalnızca bir fiziksel fenomen değil, evrensel bir bağlılık ilkesi olarak görmemizi sağlar. Her şeyin birbirine nüfuz ettiği bu modelde, gözlemciyle gözlemlenen, özneye nesne, hatta bilinçle madde arasındaki keskin sınırlar bulanıklaşır. Böylece Bohm’un yaklaşımı, bilimi salt ölçümden ibaret bir etkinlik olmaktan çıkarıp, evreni anlamak kadar onunla bütünleşmeyi de içeren bir kavrayışa dönüştürür.

Kuantum dolanıklık, evrenin parçacıklar üzerinden değil, ilişkiler üzerinden örgülendiğini gösterdi. Bir kez etkileşime giren iki parçacık, aralarındaki mesafe ne olursa olsun birbirine bağlı kalır. Birinin durumu ölçüldüğünde, diğeri de aynı anda belirlenir; sanki doğa, iki ayrı varlık değil, tek bir ortak dalga hâlinde nefes alır. Bu etki, 2022 Nobel Fizik Ödülü’nü alan Alain Aspect, John F. Clauser ve Anton Zeilinger tarafından yapılan çalışmalarla deneysel olarak doğrulandı. Yaptıkları deneyler, Bell eşitsizliklerini test ederek, evrenin “yerel gerçeklik” ilkesiyle sınırlı olmadığını gösterdi. Gerçeklik, artık yalnızca gözlenen nesnelerin toplamı değil, gözlemin kendisiyle birlikte oluşan bir bağlantılar ağıydı.

IV. Geleceğin Ritimleri: Yapay Zekâ ve Kuantum Biyoloji



Roger Penrose (2011)

(Wikimedia Commons)

“Bilinç, bir bilgisayar tarafından simüle edilebilecek bir şey değildir. Henüz tam olarak anlamadığımız — belki de kuantum kökenli — bileşenler içermelidir.”

Roger Penrose, 2020

Bilim artık sadece doğayı gözlemlemiyor, kendi kendine öğreniyor. Yapay zekâ algoritmaları, gen dizilimlerini analiz ediyor; kuantum bilgisayarları, atomların hesaplama gücünü kullanıyor. Doğa, kendi içinden bir düşünen doğa yaratıyor. Fritjof Capra’nın sözleriyle: “Yeni fizik bize evrenin

mekanik bir aygıt değil, iç içe geçmiş ilişkilerden oluşan canlı bir bütün olduğunu gösterir” (Capra, 1975).

Yapay zekâ ve kuantum biyoloji alanları birbirine yakınlaşıyor: örneğin, Florian Neukart gibi araştırmacılar “*kuantum algoritmaları + yapay zekâ + beyin/sinir sistemleri*” gibi disiplinlerarası birleşimlerin peşinde. Bazı araştırmacılar, insan bilincinin veya sezgisinin kuantum süreçlerle (örneğin sinir hücrelerindeki olası kuantum etkileşimleriyle) ilişkili olabileceğini düşünüyor. Bu yüzden, “*insan düzeyinde yapay zekâ*”ya ulaşmak, yalnızca klasik algoritmaları değil, doğadaki kuantum biyolojik mekanizmaları anlamayı da gerektirebilir. Ray Kurzweil, yapay zekânın insan zekâsına yaklaşık 2029 civarında ulaşacağını öngörmüştür, bu da kuantum dünyasının sezgilerimizi zorladığı gibi teknoloji fütürizminin de sınırları zorladığını düşündürmektedir (Kurzweil, 2005). Kuantum fiziğinin tuhaflığıyla ilgili Kuantum biyoloji bağlamında Amit Ray’ın “*Biyolojik kuantum tutarlılık, canlı sistemlerde yalnızca istisnai bir olgu değil; yaşamın en temel işleyiş süreçlerinden biridir*” (Ray, 2018). Canlı sistemlerde kuantum etkilerinin olası ve belki de kritik bir rol oynayabileceğini öne sürüyor. Bu üç alıntı birlikte, “*yeni teknolojilerin sadece algoritmalar değil, doğadaki kuantum biyolojik mekanizmaları anlamamız ve onlardan ilham almamız sayesinde*” ilerleyeceğini düşündürüyor.

Bilincin kökeni, modern bilimin hâlâ tam olarak çözemediği en gizemli sorulardan biridir. 2020 Nobel Fizik Ödülü’nü, kara deliklerin oluşumunun Einstein’ın genel görelilik kuramının kaçınılmaz bir sonucu olduğunu kanıtlayarak alan Penrose (2018), bilincin klasik bir bilgisayar tarafından tam anlamıyla simüle edilemeyeceğini savunmakta; bu olgunun henüz tam olarak kavranamamış ve muhtemelen kuantum kökenli fiziksel bileşenler içerdiğini ileri sürmektedir. Bu görüşü paylaşan anesteziyolog Stuart Hameroff, bilincin gerçekten kuantum süreçlere dayandığı varsayıldığında, zihnin evrenin temel yapısıyla derin bir biçimde ilişkili olabileceğini ileri sürmektedir (Hameroff & Penrose, 2014; 2022). Roger Penrose ve Stuart Hameroff’un geliştirdiği Orchestrated Objective Reduction (Orch-OR) teorisi, bilinç olgusunun açıklanmasında beynin mikrotübül yapılarında meydana gelen kuantum süperpozisyon ve dolaşıklık süreçlerinin potansiyel bir rolü olabileceğini öne sürmektedir (Hameroff & Penrose, 2014) .

Orch-OR teorisi, bilinci kuantum fiziği bağlamında ele alması bakımından yenilikçi bir yaklaşım sunmakla birlikte, literatürde önemli eleştirilere de konu olmuştur. Özellikle Tegmark (2000), biyolojik ortamlarda kuantum süperpozisyon durumlarının çok kısa zaman ölçeklerinde çevresel etkileşimler nedeniyle bozunacağını ileri sürerek, mikrotübüllerde uzun süreli kuantum koheransın korunmasının fiziksel olarak son derece güç olduğunu savunmuştur. Bu bağlamda, beynin sıcak ve gürültülü yapısının kuantum hesaplama benzeri süreçler için elverişli olmadığı öne sürülmektedir.

Buna karşılık Hameroff ve Penrose, mikrotübül yapılarının çevresel gürültüye karşı belirli ölçülerde yalıtım sağlayabileceğini ve biyolojik sistemlerde kuantum etkilerin beklenenden daha dayanıklı olabileceğini ileri sürerek bu eleştirilere yanıt vermiştir (Hameroff & Penrose, 2014). Ayrıca son yıllarda fotosentez ve kuşların manyetik algısı gibi biyolojik süreçlerde kuantum koheransın deneysel olarak gösterilmesi, canlı sistemlerde kuantum etkilerin rol oynayabileceği ihtimalini tamamen dışlamanın erken olabileceğini düşündürmektedir.

Bu çerçevede Orch-OR teorisi, bilincin kuantum temelli bir açıklamasını kesin biçimde ortaya koymaktan ziyade, klasik hesaplama modellerinin sınırlarını sorgulayan ve bilinç olgusuna ilişkin yeni araştırma sorularının geliştirilmesine katkı sağlayan spekülatif fakat ufuk açıcı bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

Bu yeni evrende, bilimin dansı artık insanın tekeli altında değil. Algoritmalar da doğanın ritmine katılıyor. Ama belki de bu, bilimin son değil, en olgun evresidir: İnsanın, doğanın kendini ifade etme sürecinin bir aracı olduğunu fark etmesi. Bilim, artık ‘*doğayı anlamak*’ değil, ‘*doğanın kendini anlamasına izin vermek*’ tir. Curie ışığın içinde yanmıştı, Feynman doğayla kahkaha atmıştı, Heisenberg belirsizliğin adımlarını çözmüştü, McClintock doğayı dinlemişti. Şimdi yeni kuşak bilim insanları, doğayla birlikte düşünmeyi ve yön bulmayı öğreniyor.

Bu dans, bitmeyecek. Çünkü bilim, insanın doğaya bakışı değil, doğanın insanla birlikte bakışıdır. Ve her çağda yeniden başlar —ışığın bir dalgasında, bir genin kıvrımında, bir düşüncenin sessiz titreşiminde.

SONUÇ

Bilim, insanın doğayla kurduğu en kalıcı ve en derin ilişkilerden biridir. Fakat bu ilişki çoğu zaman yalnızca gözlemle sınırlı kalır. Oysa tarih boyunca büyük keşifler, doğayı uzaktan seyreden bir bakıştan değil, onunla etkileşime giren bir bilinçten doğmuştur. Curie'nin laboratuvarında tüplerin parlayan ışığı, Feynman'ın tahtasında ritme dönüşen denklemleri, Einstein'ın masasında sessizce akıp giden zaman düşüncesi, Heisenberg'in Helgoland'daki rüzgârla birlikte bulduğu belirsizlik, McClintock'un sabah tarlasında duyduğu hücrelerin dili ve modern laboratuvarlarda ışığın yeniden biçim alan rengi... Hepsi aynı gerçeği fısıldar: Bilim, doğaya dışarıdan bakan bir göz değil, onunla birlikte hareket eden bir kalptir.

Bilgi, sonuç değil, uyum arayışıdır. Her bilim insanı doğaya bir soru yönelttiğinde, aslında kendisine de bir soru sormaktadır. Heisenberg'in söylediği gibi, doğayı değil, doğaya sordüğümüz soruların yansımalarını görürüz. Bu yüzden bilimin gerçek estetiği mutlak doğrulukta değil, ilişki kurma biçiminde yatar. Her formül, her deney, her gözlem bu ilişkinin bir anıdır. Bazen ışıkla, bazen sessizlikle, bazen merakla kurulan bir bağıdır bu.

Bugünün laboratuvarlarında atomlar tek tek izlenebiliyor, genler yeniden yazılabiliyor, ışığın kendisi bile yönlendirilebiliyor. Ancak bu ilerlemeler, bilimi güç kadar sorumlulukla da karşı karşıya bırakıyor. Artık her ölçüm doğaya bir dokunuş anlamına geliyor ve her dokunuş, etik bir soru doğuruyor: Biz doğayı anlamaya mı çalışıyoruz, yoksa onu dönüştürmeye mi? Belki de bu yüzyılın asıl sınavı, bilgiyle gücü değil, duyarlılığı birlikte taşımak olacak.

Bilimin geleceği, geçmişin seslerini içinde taşıdığı daha anlamlı olur. Curie'nin sabrı, Feynman'ın merakı, Einstein'ın hayal gücü, Heisenberg'in sezgisi, McClintock'un sessiz duyarlılığı ve modern bilimin ortak yaratıcılığı bir araya geldiğinde, bilim yalnızca bir yöntem değil, bir yaşam biçimi hâline gelir. Çünkü doğayı anlamak, ona hükmetmek değil; onunla aynı ritimde var olmayı öğrenmektir.

Gerçeği bütünüyle ölçmek mümkün değildir, ama onunla birlikte hareket etmek mümkündür. Belki de bilimin özü tam olarak budur: ölçülemez olanın içinde ritim keşfetmek, karmaşada bir düzen sezmek, bilinmeyene bir adım daha yaklaşmak. Bilimle dans etmek, insanın doğayla paylaştığı en eski dili yeniden hatırlamasıdır; bir düşüncenin, bir ışığın, bir sessizliğin içinden yükselen ortak bir melodidir.

Son Söz – Bilimi Taşıyanlara

Bilim tarihinde ışığı ilk taşıyanlar genellikle yalnız yürüdüler. Marie Curie, laboratuvarında gecenin karanlığında tüplerin parıltısına sığındı. Ellerinde asit yanıkları vardı ama içinde sönmeyen bir merak barındırıyordu. Dorothy Hodgkin, kristallerin içindeki görünmez yapıyı çözmek için yıllarca sabırla çalıştı. Barbara McClintock, hücrelerin sessiz dilini anlamak için dünyayı susturdu. May-Britt Moser, beynin yön bulma hücrelerini keşfederken insan zihninin haritasını çizdi. Hepsi farklı dönemlerde yaşadı ama aynı inancı paylaştılar: Bilim, yalnızca bilgi değil, bir tutkuydu.

Bugün laboratuvarlarda, ekranların önünde ya da küçük sınıflarda çalışan genç bilim insanları o tutkuyu miras alıyor. Ancak bilmek gerekir ki bilim bir yarış değildir; o, doğayla kurulan uzun ve sabırlı bir diyalogun adıdır. Doğa, ona hükmetmeye çalışanları değil, onunla uyum içinde adım atanları ödüllendirir. Her ölçüm bir temas, her soru bir çağrıdır. Bilim insanı doğaya bir soru yönelttiğinde, aslında kendisine de bir soru sormaktadır.

Marie Curie'nin bir sözü bunu en sade biçimde anlatır: “*Hayatta hiçbir şeyden korkmamalı, sadece anlamaya çalışmalıyız.*” Bu anlayış, her kuşakta yeniden doğar. Bilimin en derin gücü, cevaplarda değil, soruların içtenliğindedir. Genç bir bilim insanı için en doğru rehber, merakla başlayan ama sabırla sürdürülen bir yolculuktur. Acele etmemek, doğayı zorlamamak ve anlamaya çalışırken kendi ritmini bulmak gerekir. Çünkü doğa, kendi zamanında konuşur. Kimi zaman sessiz kalır, kimi zaman bir fikir, bir ışık ya da bir rastlantı yoluyla cevap verir.

Bilim, o sessizlikleri dinlemeyi öğrenenlerin dansıdır. Her çağda, her laboratuvarında, her zihinde aynı ritim yankılanır: anlama arzusu. Belki de doğa, bütün ödülllerinden önce, o arzunun kendisini — hiç sönmeyen merakı — insana hediye eder.

KAYNAKÇA

- Bawendi, M. G., Steigerwald, M. L., & Brus, L. E. (1993). Electronic structure and photoexcitation in quantum-confined CdSe nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry*, 97(21), 606–611.
- Bawendi, M. G., Steigerwald, M. L., & Brus, L. E. (1993). The quantum mechanics of larger semiconductor clusters (“quantum dots”). *Journal of Physical Chemistry*, 97(1), 215–220. <https://doi.org/10.1021/j100108a010>
- Bohr, N. (1958). *Atomic physics and human knowledge*. John Wiley & Sons.
- Brus, L. E. (1983). A simple model for the ionization potential, electron affinity, and aqueous redox potentials of small semiconductor crystallites. *The Journal of Chemical Physics*, 79(11), 5566–5571. <https://doi.org/10.1063/1.445676>
- Capra, F. (1975). *The Tao of physics: An exploration of the parallels between modern physics and Eastern mysticism*. Shambhala Publications.
- Carnegie Institution of Washington. (1950). *Yearbook of the Carnegie Institution of Washington*. Carnegie Institution of Washington.
- Carroll, S. (2010). *From eternity to here: The quest for the ultimate theory of time*. Dutton.
- Cassidy, D. C. (1992). *Uncertainty: The life and science of Werner Heisenberg*. W. H. Freeman.
- Charpentier, E. (2021). Interview with Nature. *Nature*. <https://www.nature.com/>
- Curie, M. (1923). Autobiographical notes. G. P. Putnam’s Sons.
- Curie, E. (1937). *Madame Curie: A biography*. Doubleday.
- Curie, M. (1937). *Madame Curie: A biography* (E. Curie, Trans.). Doubleday. (Original work published 1933)
- Descartes, R. (1985). *Discourse on the method* (J. Cottingham, R. Stoothoff, & D. Murdoch, Trans.). Cambridge University Press. (Original work published 1637)
- Doudna, J. A., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*, 337(6096), 816–821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- Doudna, J. A. (2016). How CRISPR lets us edit our DNA [TED Talk]. TED Conferences. https://www.ted.com/talks/jennifer_doudna_how_crispr_lets_us_edit_our_dna
- Doudna, J. (2020). Interview by Ian Sample. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/>
- Einstein, A. (1905). On the electrodynamics of moving bodies. *Annalen der Physik*, 17, 891–921. <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47(10), 777–780. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>
- Einstein, A. (1949). Autobiographical notes. In P. A. Schilpp (Ed.), *Albert Einstein: Philosopher–scientist* (pp. 1–95). Open Court.
- Einstein, A. (1954). *Ideas and opinions* (C. Seelig, Ed.; S. Bargmann, Trans.). Crown Publishers.
- Einstein, A., & Born, M. (1971). *The Born–Einstein letters: Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955* (I. Born, Trans.). Walker and Company.
- Einstein, A. (1993). *Letters to Solovine, 1906–1955* (W. C. Seelig, Trans.). Philosophical Library.
- Einstein, A. (1993). *The collected papers of Albert Einstein, Vol. 5: The Swiss years: Correspondence, 1902–1914*. Princeton University Press.
- Ekimov, A. I., & Onushchenko, A. A. (1981). Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals. *JETP Letters*, 34(6), 345–349.
- Fermi, E. (1934). Tentative theory of beta radiation. *Physical Review*, 46(5), 618–622. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.46.618>
- Fermi, E. (1942). Chicago Pile–1: The first controlled nuclear chain reaction. *Scientific American*, 167(3), 15–18.
- Feynman, R. P. (1965). *The character of physical law*. MIT Press.

- Feynman, R. P. (1969). What is science? *The Physics Teacher*, 7(6), 313–320. <https://doi.org/10.1119/1.2351388>
- Feynman, R. P. (1981). The pleasure of finding things out [Television interview]. BBC Horizon.
- Feynman, R. P. (1982). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6–7), 467–488. <https://doi.org/10.1007/BF02650179>
- Feynman, R. P. (1985a). *QED: The strange theory of light and matter*. Princeton University Press.
- Feynman, R. P. (1985b). *Surely you're joking, Mr. Feynman!: Adventures of a curious character*. W. W. Norton & Company.
- Feynman, R. P. (1999). *The pleasure of finding things out* (J. Robbins, Ed.). Perseus Books.
- Galison, P. (1997). *Image and logic: A material culture of microphysics*. University of Chicago Press.
- Gleick, J. (1992). *Genius: The life and science of Richard Feynman*. Pantheon Books.
- Gleick, J. (2017). *Genius: The life and science of Stephen Hawking*. Pantheon Books.
- Goldsmith, B. (2005). *Obsessive genius: The inner world of Marie Curie*. W. W. Norton & Company.
- Hameroff, S. (2022). Consciousness, cognition and the neuronal cytoskeleton. In *Biophysics of consciousness*. Springer.
- Hameroff, S., & Penrose, R. (2014). Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory. *Physics of Life Reviews*, 11(1), 39–78. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2013.08.002>
- Hameroff, S. (2022). Consciousness, cognition and the neuronal cytoskeleton. In *Biophysics of consciousness*. Springer.
- Hartle, J. B., & Hawking, S. W. (1983). Wave function of the universe. *Physical Review D*, 28(12), 2960–2975. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.28.2960>
- Hawking, S. (1974). Black hole explosions? *Nature*, 248(5443), 30–31. <https://doi.org/10.1038/248030a0>
- Hawking, S. W. (1988). *A brief history of time: From the big bang to black holes*. Bantam Books.
- Hawking, S. W. (1994). The arrow of time [Lecture]. University of Cambridge.
- Hawking, S. W., & Hertog, T. (2018). A smooth exit from eternal inflation. *Journal of High Energy Physics*, 2018(4), Article 147. [https://doi.org/10.1007/JHEP04\(2018\)147](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2018)147)
- Heisenberg, W. (1958). *Physics and philosophy: The revolution in modern science*. Harper & Row
- Heisenberg, W. (1971). *Physics and beyond: Encounters and conversations*. Harper & Row
- Heisenberg, W. (1974). *Across the frontiers*. Harper & Row
- Isaacson, W. (2007). *Einstein: His life and universe*. Simon & Schuster.
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*, 337(6096), 816–821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- Keller, E. F. (1983). *A feeling for the organism: The life and work of Barbara McClintock*. W. H. Freeman.
- Kurzweil, R. (2005). *The singularity is near: When humans transcend biology*. Viking.
- McClintock, B. (1983). The significance of responses of the genome to challenge. *Nobel Lecture*. Nobel Foundation. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1983/mcclintock/lecture/>
- Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord: The science and the life of Albert Einstein*. Oxford University Press.
- Pais, A. (1986). *Inward bound: Of matter and forces in the physical world*. Oxford University Press.
- Penrose, R. (1989). *The emperor's new mind: Concerning computers, minds, and the laws of physics*. Oxford University Press.
- Penrose, R. (2018). *Fashion, faith, and fantasy in the new physics of the universe*. Princeton University Press.
- Quinn, S. (1995). *Marie Curie: A life*. Simon & Schuster.
- Ray, A. (2018). *Quantum biology: Understanding quantum mechanics in living systems*. InnerLight Publishers.
- Ray, A. (2018). *Quantum biology: Understanding quantum mechanics in living systems*.
- Rhodes, R. (1986). *The making of the atomic bomb*. Simon & Schuster.

- Rovelli, C. (2014). *Reality is not what it seems*. Riverhead Books.
- Rovelli, C. (2017). *Reality is not what it seems: The journey to quantum gravity* (S. Carnell & E. Segrè, Trans.). Riverhead Books. (Original work published 2014)
- Rovelli, C. (2018). *The order of time*. Riverhead Books.
- Royal Swedish Academy of Sciences. (2020). *The Nobel Prize in Chemistry 2020*. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2020/summary>
- Royal Swedish Academy of Sciences. (2023). *The Nobel Prize in Chemistry 2023*. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2023/summary>
- Royal Swedish Academy of Sciences. (2025). *The Nobel Prize in Physics 2025*. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/>
- Segrè, E. (1970). *Enrico Fermi, physicist*. University of Chicago Press.
- Tegmark, M. (2000). Importance of quantum decoherence in brain processes. *Physical Review E*, 61(4), 4194–4206. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.4194>
- Wheeler, J. A. (1983). Law without law. In J. A. Wheeler & W. H. Zurek (Eds.), *Quantum theory and measurement* (pp. 182–213). Princeton University Press.
- You, J.-Q. (2025). Macroscopic quantum phenomena and quantum computing. <https://arxiv.org/abs/2510.19846>

Web ve Grsel Kaynaklar

- BBC News. (2009, June 28). Stephen Hawking throws time traveller party. <https://www.bbc.com/news/>
- Curie, M. (c. 1920). *Marie Curie in her laboratory* [Photograph]. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/>
- Doudna, J. (2016). How CRISPR lets us edit our DNA [TED Talk]. TED Conferences. https://www.ted.com/talks/jennifer_doudna_how_crispr_lets_us_edit_our_dna
- Doudna, J. (2020). Interview by Ian Sample. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/>
- Charpentier, E. (2021). Interview with *Nature*. <https://www.nature.com/>
- Nobel Media. (2023). Interview with the Nobel Prize in Chemistry 2023 laureates. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/>
- Nobel Prize Outreach. (2025). John Clarke, Michel H. Devoret & John M. Martinis — Nobel Prize in Physics 2025 [Photographs]. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/press-release/>
- Wikipedia. (n.d.-a). Albert Einstein. https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein
- Wikipedia. (n.d.-b). Werner Heisenberg. https://en.wikipedia.org/wiki/Werner_Heisenberg
- Wikipedia. (n.d.-c). Roger Penrose. https://tr.wikipedia.org/wiki/Roger_Penrose

BÖLÜM 5

GÖZ OPTİĞİNDE GEOMETRİK OPTİK UYGULAMALARI

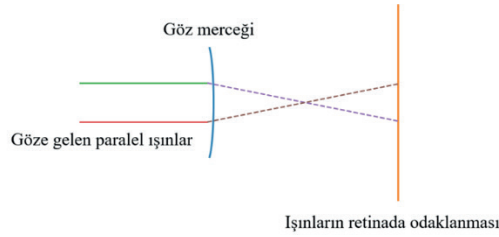
Firdevs Banu ÖZDEMİR¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Simav Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Simav-Kütahya, Türkiye

ORCID: 0000-0002-7935-2062

1. Giriş

Göz, optik açıdan yüksek derecede özelleşmiş bir kırılma sistemidir ve ışığın retinada görüntü oluşturma süreci, temel olarak geometrik optik ilkelerine dayanır. Bu fiziksel süreçte, ışığın farklı kırılma indislerine sahip dokular yoluyla yön değiştirmesi ve odaklanması, görsel kalitenin temel belirleyicisidir (Atchison, 2023). Optik modelleme tekniklerindeki gelişmeler, göz optiğinin matematiksel olarak incelenmesine olanak sağlamış ve refraktif kusurların değerlendirilmesinde optisyenlik uygulamalarını önemli ölçüde güçlendirmiştir (Artal ve Guirao, 1998). İnsan gözü, az sayıda optik yapıya sahip olmasına rağmen, iyi aydınlatma koşullarında pupilla küçüldüğünde eksen çevresinde difraksiyona oldukça yakın görüntü kalitesi üretebilir. Geniş bir görme alanı bulunan gözde, iki gözün örtüşen bölgesi yaklaşık 120° 'dir ve toplam görüş açısı bireyin yüz yapısına göre değişkenlik gösterebilir. Merkezden uzak alanlarda optik görüntü kalitesi azalsa da, retinanın çözünürlüğü eksenenden uzaklaştıkça düştüğü için sinirsel işlem açısından bu durum görsel işlevi olumsuz etkilemez. Görme eksenini optik eksenenden birkaç derece farklıdır; bunun nedeni foveanın optik eksen üzerinde değil, hafifçe kaymış bir noktada konumlanmasıdır. Gözdeki asferik yüzeyler, kırılma indisi dağılımları ve yapının homosentrik sistemlere benzerliği aberasyonların azalmasını sağlar. Düşük ışıktaki pupillanın büyümesi ve genç gözlerde akomodasyon yeteneğinin bulunması sayesinde uzak ve yakın odaklama mümkün olur; bu optik özellikler yaşla birlikte değişime uğrar (Charman, 1995).



Şekil 1. Göz Optiği: Basit şekil diyagramı

2. Gauss Optiği ile Göz Modeli

Gauss optiği, ışığın gözün mercek yapısı boyunca paraxiyal düzlemde ilerlediği kabulüne dayanmaktadır. Küçük açı varsayımı kullanılarak göz, tek mercekli bir optik sistem olarak modellenenebilir. Bu modelleme yaklaşımı özellikle kırma gücü hesaplamalarında klinik açıdan yüksek doğruluk sağlar (Campbell ve Green, 1965). Gözün toplam kırma gücü ortalama +60 D civarındadır ve bu değer yaklaşık %65'i korneanın kırıcı etkisinden kaynaklanmaktadır (Campbell ve Gubisch, 1966).

Gauss optiği, paraxiyal yani küçük açılı ışın varsayımına dayanan ve görüntü oluşumunu geometrik düzlemde ele alan temel bir optik yöntemdir. Bu yaklaşım, gözün karmaşık kırıcı sistemini basitleştirerek merceğe benzer bir optik model şeklinde değerlendirmeye olanak tanır ve görüntünün retinaya odaklanma koşullarını matematiksel olarak açıklar. Bu modele göre göz; kornea ve lensin kırıcı yüzeylerinin eşdeğer mercek yapısıyla temsil edildiği bir optik sistemdir ve ışınların optik eksene yakın doğrultuda ilerlediği kabul edilir. Böylece görüntü noktası, büyütme ve odak uzaklığı gibi optik değerler yüksek doğrulukla hesaplanabilir (Atchison ve Smith, 2000). Klinik ve teknolojik uygulamalarda bu model, kırma kusurlarının analizinde, retinal görüntü büyüklüğünün belirlenmesinde, kontakt lens ve göz içi lens tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Smith ve Atchison, 1997; Charman, 2011). Ayrıca Gauss optiği, Gullstrand göz modeli gibi ileri optik sistemlerin kuramsal temelini oluşturarak insan gözünün optik özelliklerini anlamada önemli bir perspektif sağlar.

3. Snell Yasası ve Gözde Kırılma Süreci

Snell Yasası, ışığın bir ortamdan başka bir ortama geçişi sırasında hızının değişmesine bağlı olarak yön değiştirdiğini açıklayan temel kırılma ilkesidir ve göz optiğinin işleyişini kavramada önemli bir yere sahiptir. İnsanda ışık, havadan daha yüksek kırılma indislerine sahip olan kornea, aköz hümr, lens ve vitreus ortamlarına girerken Snell yasasına göre kırılır; meydana gelen bu açısal sapma görüntünün retinaya net bir şekilde odaklanmasını mümkün kılar (Pierscionek ve Regini, 2012). Gözün kırma gücüne en büyük katkısı, ortamlar arasındaki kırılma indisi farkının en yüksek olduğu yapı olması nedeniyle kornea sağlar; lens ise esnek yapısı sayesinde akomodasyon yoluyla odak uzaklığını ayarlayarak ince düzenleme görevini üstlenir. Kırılma sürecinin duyarlılığı, kırılma indisindeki değişimler, gözyaşı tabakası özellikleri ve korneal eğrilik gibi faktörlerle yakından ilişkilidir; bu nedenle Snell yasası, numaralı gözlük, kontakt lens ve refraktif cerrahi gibi uygulamalarda optik hesaplamaların temel matematiksel referansını oluşturur (Artal, 2014). Bu bağlamda gözde görüntünün oluşumu, yalnızca tek bir merceğin kırılmasına değil, birden fazla optik yüzeyin Snell yasasına göre gerçekleştirdiği ardışık kırılmaların birleşik etkisine dayanır (Bass vd., 2009). Snell yasasının matematiksel ifadesi:

$$n_1 \times \sin(\theta_1) = n_2 \times \sin(\theta_2) \quad (1)$$

n_1 : Işığın geldiği ortamın kırılma indisi

n_2 : Işığın içine girdiği ortamın kırılma indisi

θ_1 : Gelme açısı

θ_2 : Kırılma açısı

Tablo 1. Gözde bulunan ortamların kırılma indisleri (Patel ve Tutchenko, 2019).

Göz Ortamı	Kırılma İndisi
Kornea	1.376
Aköz Hümr	1.336
Lens (Merkez)	1.406
Lens (Periferi)	1.386
Vitreus	1.336

4. Mercek Denklemleri ile Gözün Analizi

Gözün mercek modeli, klasik mercek denklemiyle açıklanabilir. Mercek denklemleri, optik sistemlerde görüntünün oluşma sürecini nicel olarak tanımlayan temel matematiksel kavramlar olup, insan gözünün optik işlevlerini değerlendirmede önemli bir yer tutar. İnce mercek denklemi olarak bilinen

$$1/f = 1/d_o + 1/d_i \quad (2)$$

formülünde f odak uzaklığını, d_o nesne uzaklığını, d_i ise görüntü uzaklığını ifade eder; bu matematiksel ilişki, kornea ve kristalin merceğin birlikte oluşturduğu toplam kırma gücünün, görüntüyü retina üzerine odaklama kapasitesini tanımlamaya yardımcı olur (Atchison ve Smith, 2000). Göz optik olarak tek bir ince mercek gibi davranmasa bile, eşdeğer odak uzaklığı ya da retinal görüntünün konumu mercek denklemleriyle hesaplanabilir; kırılma kusurları (miyopi,

hipermetropi ve astigmatizma) da bu matematiksel bakış açısıyla açıklanabilir. Ayrıca Gauss optiğinde kullanılan paraxiyal ışın analizleri mercek denklemleriyle birleştğinde; aks uzunluğu, odak uzaklığı ve kırma gücü gibi gözün biyometrik özelliklerinin hassas biçimde değerlendirilmesini sağlar (Artal, 2014). Dolayısıyla mercek denklemleri, klinik optometri uygulamalarından refraktif cerrahi planlamasına kadar pek çok alanda hem kuramsal hem uygulamalı çözümlerlerin temel dayanağını oluşturur. Refraktif kusurlar, bu dengenin bozulmasıyla ortaya çıkar: miyopide odak retina önüne, hipermetropide retina arkasına düşer (Thibos vd., 2000).

5. Foveal Görüntü Oluşumu

Retina üzerinde oluşan görüntü, gerçek, ters ve küçültülmüş yapıdadır. Foveada fotoreseptör yoğunluğunun yüksek olması, çözünürlüğün maksimum düzeyde gerçekleşmesini sağlar. Fovea, insan retinasında uzaysal çözünürlüğün en yüksek olduğu bölge olup, fotoreseptör yoğunluğunun maksimum seviyeye ulaştığı anatomik bir çöküntü şeklindedir. Foveal görüntü oluşumu, retinaya düşen optik bilginin fotoreseptör dizilimlerine ayrıntılı biçimde çözümlenmesiyle gerçekleşir. Bu bölgeye yansıyan görüntü, özellikle koni fotoreseptörlerinin yoğun bir şekilde kümelenmesi sayesinde yüksek detaylı görsel bilgiye dönüştürülür (Curcio vd., 1990). Fovea, sinaptik bağlantıların oldukça sınırlı olduğu özel bir nöral mimariye sahiptir; bu mimari, sinirsel iletimin kısa mesafe üzerinden ilerlemesini sağlayarak sinyal kaybını azaltır ve görüntü kalitesini artırır. Optik açıdan, göz merceği ve korneanın kırıcı etkisiyle yönlendirilen ışık, optik eksene son derece yakın bir düzlemde odaklanarak foveaya ulaşır; böylece eksenden uzak alanlarda aberasyonlar artsa bile, foveal görüntü yüksek netliğini korur (Atchison, 2023).

Foveal görüntünün oluşumunu belirleyen temel faktörlerden biri, koni yoğunluğunun merkezde yaklaşık $200.000 \text{ koni/mm}^2$ 'ye ulaşması ve bu bölgede rod hücrelerinin bulunmamasıdır; bu optik ve hücresel özellikler, renkli, yüksek çözünürlüklü ve fotopik görmeyi mümkün kılar (Polyak, 1941). Retina çevresine doğru ilerledikçe görsel keskinlik azalır; bu durum optik bulanıklıktan çok fotoreseptör dağılımı ve nöral ağ yapılanmasının değişmesiyle ilişkilidir. Foveal sinyallerin beyin tarafından işlenmesi, görsel kortekste ayrı temsil alanlarının oluşmasına imkân tanır; bu nedenle foveadan gelen bilgi post-retinal süreçler açısından da öncelikli olarak değerlendirilir (Dacey, 2004). Klinik açıdan bakıldığında, foveal görüntü mekanizmalarının bozulması—örneğin maküler dejenerasyon, epiretinal membran veya foveal hipoplazi durumlarında—merkezi görmenin ciddi biçimde zayıflamasına yol açar. Bu nedenle fovea, optik kırılma, retinal fototransdüksiyon ve sinirsel işleme süreçlerinin kesiştiği temel odak noktası olarak kabul edilir ve insan görsel sisteminin en kritik bileşenlerinden biridir.

6. Akomodasyonun Optik Temeli

Lens eğriliğinin değişmesiyle ortaya çıkan akomodasyon gücü: $A = D_{\text{yakın}} - D_{\text{uzak}}$. Akomodasyon yeteneği yaşla birlikte azalır ve presbiyopiye yol açar. Klinik optisyonluk uygulamalarında yakın ek hesaplamaları doğrudan bu fiziksel temele dayanır (Elliott vd., 1995).

Akomodasyon, gözün değişen mesafelerdeki nesneleri net biçimde algılayabilmesi için kırma gücünü aktif olarak ayarladığı optik bir uyum sürecidir ve bu süreç esas olarak lensin fiziksel özellikleriyle bağlantılıdır. Uzağa odaklanma sırasında silier kasların gevşemesiyle zonül lifleri gerilir ve lens daha basık bir form kazanarak kırma gücünü düşürür. Yakındaki bir nesneye bakıldığında ise silier kas kasılır, zonüller gevşer ve lens daha küresel bir şekle yaklaşarak kırma gücünü artırır; böylece görüntü retinaya net bir biçimde yansıtılır (Atchison ve Thibos,

2016). Bu optik süreç yalnızca kırma gücündeki değişimleri kapsamaz; aynı zamanda aberasyonların düzenlenmesi, pupilin boyutundaki farklılıklar ve ışığın retinaya dağıtılma biçiminin optimize edilmesi gibi ek mekanizmaları içerir. Yakın görüş esnasında pupilin daralması, görüntü keskinliğini artırarak alan derinliğini genişletir ve sferik aberasyonun etkisini azaltır (Charman, 2008). Ayrıca lens içinde merkezden periferiye doğru değişen kırılma indisi dağılımı, akomodasyon sırasında görüntü kalitesinin korunmasında önemli bir katkı sağlar (Glasser ve Campbell, 1998).

Zamanla bu optik sistem etkinliğini yitirir ve presbiyopi gelişir. Lensin elastik özelliklerinde azalma ve kapsül gerilimindeki artış, akomodasyon gücünde belirgin düşüşe neden olur; bu durum özellikle 40 yaş sonrası yakından görme kapasitesinin zayıflaması şeklinde klinik olarak ortaya çıkar (Smith, Atchison ve Bradley, 2001). Bu bağlamda akomodasyon, yalnızca gözün kırma gücünü ayarlayan biyomekanik bir sistem değil; aynı zamanda retinal görüntü çözünürlüğünü en üst düzeye çıkaran çok yönlü bir optik dengeleme mekanizmasıdır.

7. Optisyonluk Uygulamaları ile Bağlantı

7.1. Miyopi

Miyopinin optik temeli, görüntünün retina önünde oluşmasıdır ve negatif lensler kırılma gücünü azaltarak odak noktasını retina üzerine taşır. Miyopi, uzak mesafedeki nesnelerin retina üzerine net bir şekilde odaklanamamasıyla karakterize edilen optik bir kırılma bozukluğudur. Optik prensipler açısından değerlendirildiğinde, miyopide ışık ışınları retina yüzeyine ulaşmadan önce birleşerek odak noktasını retinanın önünde oluşturur; bu durum, gözün kırma gücünün fazlalığına ya da aksiyel uzunluğun normalden daha fazla olmasına bağlanmaktadır (Flitcroft, 2012). Miyopinin en yaygın optik tipi aksiyel miyopidir; burada göz küresinin uzun eksenini artır ve ince mercek denkleminde göre ($1/f = 1/d_o + 1/d_i$) görüntü uzaklığı (d_i) retina önünde oluşur. Daha nadir görülen bir diğer mekanizma ise kornea eğriliğinin artması ya da lensin kırıcı gücünün fazla olmasıyla ilişkilidir (Atchison, 2016).

Optik açıdan bakıldığında miyopi, paralel gelen ışınların retina düzlemine değil, retinanın önünde bir noktaya odaklanmasıyla tanımlanır; bu nedenle miyop bireylerde uzak görüntüler bulanıklaşırken, yakın görüş çoğu zaman korunmuş ya da normalden daha iyidir. Retinanın önünde gerçekleşen odaklanma, retinal görüntü boyutu, kontrast duyarlılığı ve aberasyon özellikleri üzerinde belirgin değişikliklere yol açabilir. Özellikle periferik retina üzerinde oluşan hiperopik defokusun, miyopi ilerlemesi ve aksiyel uzama ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Seidemann vd., 2002). Klinik optik uygulamalarda miyopinin düzeltilmesi, odak noktasını yeniden retina düzlemine taşımaya yöneliktir. Negatif diyoptrili mercekler kırma gücünü azaltarak görüntünün retina üzerine düşmesini sağlar. Güncel yaklaşımlar arasında göz içi lens uygulamaları, refraktif cerrahi yöntemleri (LASIK, PRK) ve ortokeratoloji teknikleri yer almakta olup bu yöntemler miyopik defokusu azaltmayı ve retinal görüntü kalitesini artırmayı amaçlar (Jones, vd., 2025). Miyopi sıklığının küresel ölçekte artmasıyla birlikte optik modellemeler, biyometrik ölçümler ve aberasyon kontrollü lens tasarımları klinik açıdan giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

7.2. Hipermetropi

Hipermetropta görüntü retina arkasında oluşur ve pozitif lenslerle düzeltilir. Çocukluk döneminde hipermetropik defokus, akomodasyon mekanizmasını zorlayarak asthenopi semptomlarına neden olabilir (Elliott vd., 1995).

Hipermetropi, gözün optik kırma gücünün retina düzleminde net bir görüntü oluşturmak için yetersiz olmasından kaynaklanan bir kırılma kusuru olarak tanımlanır. Optik bakış açısıyla, göze gelen ışınlar retinaya ulaşmadan geçişlerini tamamlar ve odak noktası retina yüzeyinin gerisinde oluşur; bu sonuç çoğunlukla gözün aksiyel uzunluğunun normalden kısa olması veya kornea ve lens tarafından sağlanan kırma gücünün düşük kalmasıyla ilişkilidir (Atchison ve Smith, 2000). İnce mercek denklemi ($1/f = 1/d_o + 1/d_i$) çerçevesinde değerlendirildiğinde, görüntünün retina ile aynı konumda oluşması için görüntü uzaklığının (d_i) retina düzlemiyle örtüşmesi gerekir; ancak hipermetropide odak noktası retinal bölgenin arkasında kaldığından bu koşul gerçekleşmez. Bu nedenle hipermetrop bireylerde özellikle yakın mesafeye odaklanma sırasında bulanık görme ön plandadır.

Hipermetropik gözlerde akomodasyon önemli bir dengeleme mekanizmasıdır. Yakın odaklanma esnasında silier kasın kasılması lensin kırma gücünü artırır ve görüntü retinaya yeniden yönlendirilebilir. Genç bireylerde akomodasyon bu kırılma kusurunu belirli ölçüde telafi edebilir; ancak yaşla birlikte lensin elastikiyetini kaybetmesi akomodasyon yeteneğinin azalmasına ve semptomların daha belirgin hale gelmesine neden olur. Buna ek olarak, hipermetrop gözlerde aberasyon örüntüsü görüntü kalitesini etkileyen temel optik unsurlardan biridir; artmış sferik aberasyon ve düşük retinal kontrast algısı klinik bulgular arasında yer almaktadır (Llorente vd., 2004).

Klinik uygulamalarda hipermetropinin düzeltilmesi, gözün kırma gücünü artırarak odak noktasını tekrar retina düzlemine taşımayı hedefler. Konveks camlar gibi pozitif mercekler ışığı daha fazla kırarak odak noktasını öne çeker ve net retinal görüntü oluşturur. Günümüzde göz içi lens implantları, refraktif cerrahi yöntemler ve korneal şekillendirme teknikleri hipermetropinin optik olarak düzeltilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır.

7.3. Reçeteledi Camların Optik Rolü

Reçete gücü, gözün kırılma hatasına eşit ve ters işaretlidir. Klinik değerlendirme, Snell yasası ve mercek denklemlerinin doğrudan uygulamasına dayanır.

Tablo 1. Lens Türleri ve Optik Kullanım Alanları

Lens Tipi	Optik Yapısı	Kullanım Alanı	Optisyenlik İlişkisi
Sferik lens	Sabit eğrilik	Miyopi/hipermetropi	Temel refraksiyon düzeltmesi
Silindirik lens	Eksene özgü eğrilik	Astigmatizma	Aks yönüne göre kesim ve montaj
Prizmatik lens	Yönlü ışık sapması	Şaşılık / heterofori	Optik merkez ayarlaması kritik
Progresif lens	Çok odaklı	Presbiyopi	Montaj yüksekliği kritik
Yüksek indeks lens	İnce cam tasarımı	Yüksek miyopi	Kenar kalınlığı azalır

8. Sonuç

Geometrik optiğin temel prensipleri, gözün ışığı kırma biçiminin anlaşılmasında bilimsel bir ereve sunar. Snell yasası, Gauss optiği ve mercek denklemleri ise refraktif kusurların incelenmesi ve optik düzeltme yaklaşımlarının değerlendirilmesinde hem fiziksel hem de klinik açıdan geçerli ve işlevsel araçlar olarak kullanılmaktadır.

Kaynakça

- Artal, P., & Guirao, A. (1998). Contributions of the cornea and the lens to the aberrations of the human eye. *Optics Letters*, 23(21), 1713–1715.
- Artal, P. (2014). Optics of the eye and its impact in vision: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 6(3), 340-367.
- Atchison, D. A., & Smith, G. (2000). *Optics of the human eye*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Atchison, D. A., & Smith, G. (2005). Chromatic dispersions of the ocular media of human eyes. *Journal of the Optical Society of America A*, 22(1), 29-37.
- Atchison, D. A., & Thibos, L. N. (2016). Optical models of the human eye. *Clinical and Experimental Optometry*, 99(2), 99-106.
- Atchison, D. (2023). *Optics of the human eye*. CRC Press.
- Bass, M., DeCusatis, C., Enoch, J., Lakshminarayanan, V., Li, G., Macdonald, C., ... & Van Stryland, E. (2009). *Handbook of Optics, Volume III: Vision and Vision Optics* (set). McGraw-Hill, Inc..
- Charman, W. N. (2008). The eye in focus: accommodation and presbyopia. *Clinical and experimental optometry*, 91(3), 207-225.
- Curcio, C. A., Sloan, K. R., Kalina, R. E., & Hendrickson, A. E. (1990). Human photoreceptor topography. *Journal of comparative neurology*, 292(4), 497-523.
- Charman, W. N. (2014). Developments in the correction of presbyopia II: surgical approaches. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 34(4), 397-426.
- Campbell, F. W., & Green, D. G. (1965). Optical and retinal factors affecting visual resolution. *Journal of Physiology*, 181, 576–593.
- Campbell, M. C. W., & Gubisch, R. W. (1966). Optical quality of the human eye. *Journal of Physiology*, 186(3), 558–578.
- Charman, W. N. (1995). Optics of the eye. *Handbook of optics*, 1, 24-18.
- Dacey, D. (2004). 20 origins of perception: Retinal ganglion cell diversity and the creation of parallel visual pathways.
- Elliott, D. B., Yang, K. C., & Whitaker, D. (1995). Visual acuity changes throughout adulthood. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 36(1), 203–212.
- Flitcroft, D. I. (2012). The complex interactions of retinal, optical and environmental factors in myopia aetiology. *Progress in Retinal and Eye Research*, 31(6), 622–660.
- Glasser, A., & Campbell, M. C. (1998). Presbyopia and the optical changes in the human crystalline lens with age. *Vision research*, 38(2), 209-229.
- Jones, D., Chow, A., Fadel, D., Meijome, J. M. G., Grzybowski, A., Kollbaum, P., ... & Wolffsohn, J. (2025). IMI—Instrumentation for Myopia Management. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 66(9), 7-7.

- Llorente, L., Barbero, S., Cano, D., Dorronsoro, C., & Marcos, S. (2004). Myopic versus hyperopic eyes: axial length, corneal shape and optical aberrations. *Journal of vision*, 4(4), 5-5.
- Patel, S., & Tutchenko, L. (2019). The refractive index of the human cornea: A review. *Contact Lens and Anterior Eye*, 42(5), 575-580.
- Pierscioneck, B. K., & Regini, J. W. (2012). The gradient index lens of the eye: an opto-biological synchrony. *Progress in retinal and eye research*, 31(4), 332-349.
- Polyak, S. L. (1941). *The retina*.
- Seidemann, A., Schaeffel, F., Guirao, A., López-Gil, N., & Artal, P. (2002). Peripheral refractive errors in myopic, emmetropic, and hyperopic young subjects. *Journal of the Optical Society of America A*, 19(12), 2363–2373.
- Smith, G., & Atchison, D. A. (1997). *The eye and visual optical instruments* (p. 830).
- Thibos, L. N., Applegate, R. A., Schwiegerling, J. T., & Webb, R. (2000, February). Standards for reporting the optical aberrations of eyes. In *Vision science and its applications* (p. SuC1). Optica Publishing Group.

BÖLÜM 6

TEK-FOTON KAYNAKLARI VE KUANTUM İLETİŞİM TEKNOLOJİLERİNDEKİ ROLÜ

Zeynep BERKTAŞ¹, Elif ORHAN²

¹ Dr., Ankara Medipol Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Ankara, Türkiye. zeynep.berktas@ankaramedipol.edu.tr, ORC- ID:0000-0001-8876-271X

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Ankara, Türkiye. eliforhan@gazi.edu.tr ORC – ID: 0000-0002-3949-6141

ÖNSÖZ

Kuantum teknolojilerinde yaşanan hızlı ilerleme, ışığın temel kuantum taşıyıcısı olan fotona yönelik araştırmaları her zamankinden daha önemli hâle getirmiştir. Fotonların tekil düzeyde kontrol edilebilmesi, yalnızca kuantum mekaniğinin sınırlarını anlamamıza katkı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda geleceğin bilgi işlem ve haberleşme altyapılarını da şekillendirmektedir. Tek-foton kaynakları ve dedektörleri; kuantum kriptografi, kuantum haberleşme ve kuantum bilgisayarlar gibi stratejik alanlarda temel bileşenler hâline gelmiştir.

Son yirmi yılda, kuantum bilgi teknolojilerinin olağanüstü bir yükselişine tanık olduk — bazıları buna ikinci kuantum devriminin başlangıcı bile diyor. Bir zamanlar yalnızca bilim insanlarının erişebildiği bu teknoloji, bugün çok daha geniş bir kullanıcı kitlesine açılmaya başlamıştır.

Bu gelişme son derece olumludur; çünkü ilerleme, temel teknolojinin geniş araştırma ve geliştirme topluluğu için erişilebilir olmasıyla en iyi şekilde sürdürülebilir. Kuantum dünyasında, izole kuantum nesnelerini (atomlar, elektronlar, fotonlar vb.) manipüle edebilmek ve onların benzersiz özelliklerini (dolanıklık, süperpozisyon, yerel-olmayan davranış vb.) kontrol edebilmek, yeni ürünlerin gelişmesiyle birlikte giderek daha erişilebilir hâle gelmektedir.

Bu kuantum ışık kaynakları, optik kuantum teknolojilerinin temel yapı taşlarıdır. Örneğin, gerçekten rastgele sayı üretimi, gelişmiş görüntüleme ve algılama teknikleri, güvenli kuantum iletişimi ve ölçeklenebilir kuantum hesaplama gibi uygulamaların önünü açabilirler.

Bu bağlamda, tek-foton kaynaklarını değerlendirirken akılda tutulması gereken temel özelliklerden bazılarını tartışmak yerinde olacaktır.

Bu derleme kitap bölümü, tek-foton kavramının temel özelliklerini açıklamakta, farklı tek-foton kaynaklarını ve dedektörlerini tanıtmakta ve bu teknolojilerin kuantum bilgi işleme uygulamalarındaki rolünü incelemektedir. Ayrıca deneysel ilerlemelerden seçilmiş örnekler ile geleceğe dönük araştırma perspektifleri de ele alınmaktadır.

Okuyucunun bu bölüm aracılığıyla fotonun bilimsel arka planını ve kuantum teknolojilerindeki rolünü bütünlüklü bir şekilde kavraması hedeflenmektedir.

GİRİŞ

Foton kavramı, kuantum mekaniğinin doğuşuyla birlikte modern fiziğin merkezinde yer almıştır. Max Planck'ın 1900 yılında ısı ışınım yasalarını açıklamak için enerjinin kesikli yapısını öne sürmesi ve Albert Einstein'ın 1905'te fotoelektrik etkiyi açıklarken ışığın ayrık enerji paketleri hâlinde taşındığını göstermesiyle foton, ışık kuantumu olarak adlandırılan ve elektromanyetik ışının mümkün en küçük ayrık enerji paketi olarak tanımlanmıştır. Daha sonra Arthur H. Compton'ın X-ışınlarının parçacık doğasını ortaya koyan çalışmaları, bu yaklaşımı deneysel olarak pekiştirmiştir.

Fotonlar, elektromanyetik ışının hem dalga benzeri hem de parçacık benzeri özellikler sergileyen en küçük enerji paketleri olup; elektrik yükü ve durgun kütlesi bulunmayan, spin değeri 1 olan bozonlar olarak elektromanyetik alanın taşıyıcı parçacıkları kabul edilirler (Eisaman vd., 2011; Pearsall, 2019). Compton saçılması ve fotoelektrik etki gibi süreçler,

fotonların maddeyle etkileşimini açıkça ortaya koyarken, bu ikili doğa fotonların hem klasik dalga teorisi hem de kuantum parçacık yaklaşımıyla açıklanabilmesini mümkün kılar (Qiao vd., 2021).

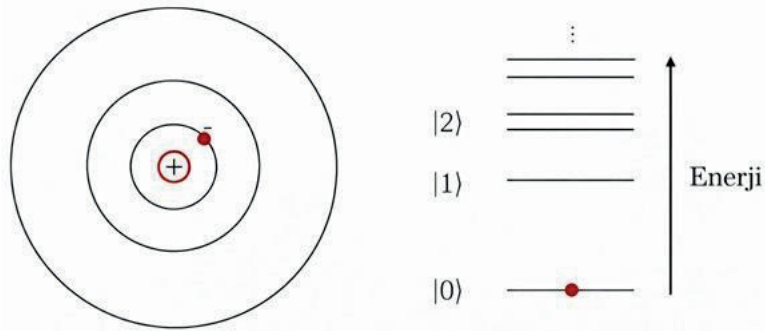
Fotonlar 20. yüzyılın ortalarında tekil olarak algılanabilmiş olsa da, istenilen anda kontrollü biçimde tek foton üretebilen kaynakların geliştirilmesi görece yeni bir ilerlemedir. P. Grangier ve arkadaşları (Grangier vd., 2004), kuantum bilgi teknolojilerinin ortaya çıkışına kadar araştırmacıların genellikle tek-foton durumlarını yaklaşık olarak temsil etmek amacıyla güçlü biçimde zayıflatılmış lazer demetleri kullandıklarını belirtmektedir. Ancak bu yöntemler, gerçek tek foton üretiminden fiziksel olarak önemli ölçüde farklıdır.

Kuantum bilgi teknolojilerinin gelişimi, kuantum kriptografi, kuantum hesaplama ve kuantum haberleşme gibi uygulamalar için hassas tek-foton kaynaklarının geliştirilmesinde temel bir itici güç olmuştur (Sanders vd., 2005). Bu nedenle fotonun fiziksel doğası, kuantum optikteki işlevi ve tek-foton kaynaklarının performans ölçütleri günümüz araştırmalarının merkezinde yer almaktadır. Bu bağlamda, bir sonraki bölümde tek-foton kavramının fiziksel temelleri ve önemi ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

1. IŞIK-MADDE ETKİLEŞİMİ VE TEK-FOTON KAVRAMI

1.1 Atom-Işık Etkileşimi

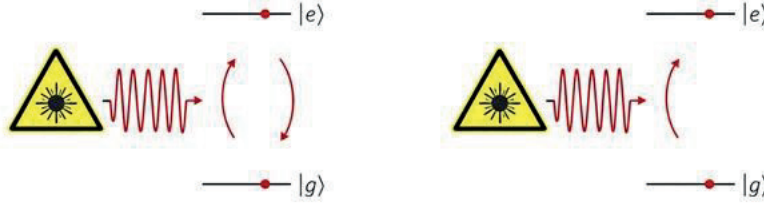
Tekil kuantum nesnelerinin — örneğin atomların — ışıqla nasıl etkileştiğine dair bilgimiz, bu etkileşimi anlamak için açık bir çerçeve sunar. Burada “tek bir kuantum nesnesi” derken aslında bağlı bir yüklü parçacığın kuantalanmış enerji seviyelerini kastediyoruz. Örneğin bir hidrojen atomunda elektron, kendisinden çok daha kütleli olan protonun etrafında hapsolmuş durumdadır ve yalnızca belirli (ya da bu seviyelerin bir süperpozisyonu olan) ayrık kuantum durumlarında bulunabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Hidrojen atomundaki elektronun kuantum durumu. Elektron şu an temel halde bulunmaktadır(<https://www.quandela.com/resources/blog/single-photon-sources-part-3/>, t.y.).

Bir atoma lazer ışığı gönderdiğinizde, iki enerji durumu arasında geçişleri harekete geçirebilirsiniz. Örneğin elektron, temel durumundan daha yüksek enerjili bir uyarılmış duruma geçirilebilir. Genel olarak, ışık altında bu geçişlerin gerçekleşebilmesi için söz konusu iki durumun belirli koşulları sağlaması gerekir. Bu koşullar bütünü seçim kuralları olarak adlandırılır ve etkileşimin uyması gereken çeşitli korunma yasalarına karşılık gelir. Bizim için önemli olan, atom ile ışık arasındaki etkileşimin güçlü olduğu *dipol-izinli* geçişlerdir. Bir

elektrik dipol geçişini sürmek için lazerin frekansı, iki durum arasındaki enerji farkıyla tam rezonans (veya rezonansa çok yakın) olmalıdır. Bu, lazerin açısal frekansı ω_{laser} 'ın öyle ayarlanması gerektiği anlamına gelir ki, foton enerjisi $\hbar\omega_{\text{laser}}$ iki seviye arasındaki enerji farkına eşit (veya çok yakın) olsun.



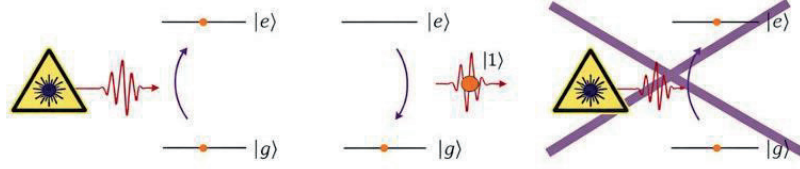
Şekil 2. İki seviyeli bir kuantum sisteminde, dışsal elektromanyetik alan etkisi altında $|g\rangle$ (temel hâl) ve $|e\rangle$ (uyarılmış hâl) durumları arasında gerçekleşen Rabi salınımları (<https://www.quandela.com/resources/blog/single-photon-sources-part-3/>, t.y.).

Lazer bu şekilde ayarlandığında, elektron temel ve uyarılmış durumlar arasında salınmaya başlar ve bu süreçte iki durumun bir kuantum süperpozisyonu oluşur (Şekil 2). Bu olaya Rabi salınımı (Rabi flopping) denir (Luo vd., 2003). Etkileşimin süresini — yani lazerin ne kadar süre açık kaldığını — tam olarak kontrol edebilirsek, elektronu temel durumdan uyarılmış duruma ya da ters yönde deterministik olarak taşıyabiliriz.

1.1. Kendiliğinden Yayınım

Elektron uyarılmış durumda olduğunda orada sonsuza kadar kalmaz. Vakum alanı dalgalanmaları, elektronu *kendiliğinden yayınım* adı verilen bir süreçle yeniden temel duruma dönmeye zorlar (gerçekte süreç biraz daha karmaşıktır, ancak bu açıklama şu an için yeterlidir). Uyarılmış durumun kendiliğinden olarak çökmesi anlık gerçekleşmez; genellikle yaşam süresi T olan üstel bir azalma biçimini izler ve buna karşılık gelen bozunma oranı $\Gamma = 1/T$ şeklindedir. *Dipol-izinli* geçişlerin bizim açımızdan kritik olan bir başka özelliği daha vardır. Etkileşimin rezonans doğasından (yani enerji korunumu gerekliliğinden) tahmin edilebileceği gibi, elektronun temel durumdan uyarılmış duruma (veya tam tersi yönde) tam bir geçişi, lazerden tek bir fotonun soğurulması (ya da yayılması) ile birlikte gerçekleşir. Daha da önemlisi, elektronun uyarılmış durumdan temel duruma *kendiliğinden* olarak dönmesi her zaman tek bir fotonun yayılmasıyla sonuçlanır. Bu noktada, tek bir foton üretmek için bir yöntemimiz ortaya çıkar: Önce bir lazer darbesi kullanarak elektronu uyarılmış duruma çıkarırız, ardından elektronun yeniden temel duruma dönmesini ve bu sırada tek bir foton yaymasını bekleriz. Ancak burada önemli bir nokta vardır: Lazer darbesinin süresi, uyarılmış durumun ömrüne kıyasla kısa olmalıdır. Elektronun yeniden temel durumda olma olasılığı ortaya çıkar çıkmaz yayıcı yeniden uyarılabilir. Dolayısıyla lazer darbesi hâlâ açıksa ve *kendiliğinden yayım* başlamışsa, yayıcı önce *kendiliğinden* bir foton yayabilir, ardından yeniden uyarılıp bir foton daha üretebilir. Bu durum, lazer darbesi boyunca iki foton oluşmasına yol açarak istenmeyen bir sonuç yaratır (Şekil 3). Böylece *kendiliğinden parametrik aşağı dönüşüm*e dayalı şema ile *kendiliğinden yayınım* temelli şema arasındaki temel fark ortaya çıkar. *Kendiliğinden yayınım*da, kısa lazer darbeleri kullanılarak çoklu foton yayınım olasılığı etkin bir şekilde bastırılabilir (ve *ikinci mertebeden korelasyon fonksiyonu*- $g^2(0)$ ın değeri küçültülebilir) ve bu süreç parlaklıktan ödün vermeden gerçekleştirilebilir. Parlaklığın etkilenmemesinin nedeni, elektron tamamen uyarılmış duruma çıkarıldığı sürece daima tek bir foton yayacak olmasıdır.

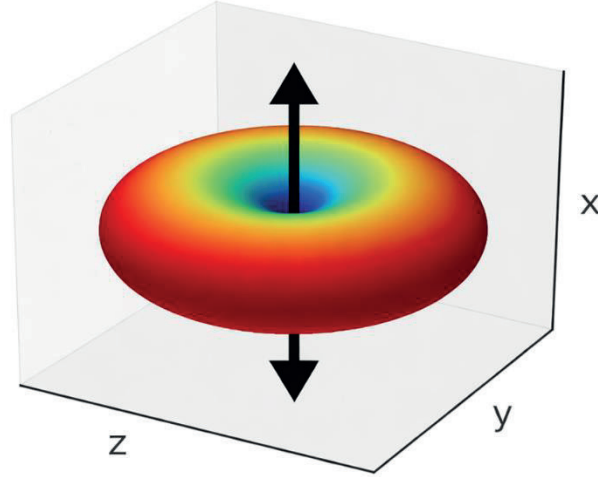
Bu nedenle bu tür yayıcılara dayanan kaynaklar genellikle “*deterministik*” tek-foton kaynakları olarak adlandırılır.



Şekil 3. Tek foton yayını (https://www.quandela.com/resources/blog/single-photon-sources-part-3/, t.y.).

1.2. Fotonların Toplanması — Dipol Işınması

Peki, her şey gerçekten bu kadar basit olabilir mi? Ne yazık ki gözden kaçırdığımız bir nokta var: fotonların hangi yönde yayıldığı. Tek-fotonlar atomdan her yöne dağılma eğilimindedir. Daha kesin bir ifadeyle, doğrusal polarizasyona sahip *dipol-izinli* bir geçişten kaynaklanan kendiliğinden yayınım, bir salınan elektrik dipolünün ışınma desenini izler; bu yapı, temel bir antenin davranışına oldukça benzer. Radyasyon yayan bir dipolün, sabit bir eksen boyunca birbirine karşı salınan iki zıt yüke karşılık geldiğini hatırlayalım. Burada dipollerin yeniden karşımıza çıkması tesadüf değildir. *Dipol-izinli geçiş kuralları* ile dipol radyasyonunun özellikleri, yayılan ışığın dalga boyunun atomun fiziksel boyutundan çok daha büyük olduğu varsayımından kaynaklanan aynı yaklaşıma dayanır. Dipolden çok uzak bir noktaya baktığımızda, her yönde uzaya yayılan optik yoğunluğu hesaplayabiliriz. Bu grafik, tek bir fotonun her açı yönünde yayılma olasılığını steradyan başına gösterir. Renk ne kadar kırmızıya yaklaşıyorsa (**Şekil 4**), fotonun o yönde ortaya çıkma olasılığı o kadar yüksektir. Bu durumun bizim açımızdan neden olumsuz olduğu oldukça açıktır. Yayılan tüm fotonları bir optik fiber gibi ışık yönlendiren bir yapıya toplamak için, ışığın her yöne dağılmış yayını fiber içine geri yönlendirebilecek imkânsız bir lens ve ayna düzeni gerekir. Üretilen fotonların büyük bir kısmını kaybedersek, *deterministik* kaynağımız düşük parlaklıklı bir kaynağa dönüşür ve bu da kuantum protokollerimizin ölçeklenebilirliğini ciddi şekilde sınırlar.



Şekil 4. Dipol-izinli bir atomik geçişten kaynaklanan kendiliğinden yayınımda, tek bir fotonun her yönde yayılma olasılığını gösteren açısıl dağılım. Renk yoğunluğu, fotonun ilgili yönde ortaya çıkma olasılığını steradyan başına ifade etmektedir (<https://www.quandela.com/resources/blog/single-photon-sources-part-3/>, t.y.).

1.3. Purcell Etkisi

Optikte atomlardan daha fazla foton toplayabilmemizi sağlayan temel bir gerçek, bir yayıcının ömrü ve ışınım deseninin çevresindeki dielektrik ortama bağlı olmasıdır. Bu olaya *Purcell etkisi* denir. Aslında, daha önce ele alınan ışınım deseni yalnızca atomun homojen bir ortamda bulunması durumunda geçerlidir. *Kendiliğinden yayınının* vakum alanındaki dalgalanmalardan kaynaklandığı hatırlandığında, atomun bulunduğu noktada bu dalgalanmaların gücünün mühendislik yoluyla değiştirilebileceği anlaşılır; böylece belirli yönlerde yayım hızlandırılabilir veya yavaşlatılabilir. Bu amaçla, yayıcının çevresine yayılan ışığın *dalga boyu* (λ) ölçeğinde yapılar inşa edilmesi gerekir. Buradaki kritik büyüklük *Purcell faktörüdür*: Yayıcının yapı içindeki ömrünün, hacimli (bulk) malzeme içindeki (bu örnekte hava) ömrüne oranı. Yayıcının, yüksek kırılma indisli iki malzeme bloğu (örneğin galyum arsenit — GaAs) arasına yerleştirildiği durumda, bloklar arasındaki mesafe d küçüldükçe, yayıcının ömrü Purcell faktörünün öngördüğü şekilde belirgin biçimde değişir. Bu davranış, yayıcının çevresindeki optik modların özelliklerinin ve vakum alanı dalgalanmalarının uzaysal dağılımının değişmesinden kaynaklanır.

1.4. Optical Modlar

Vakum alanı dalgalanmalarının büyüklüğü birden fazla etkene bağlıdır. İlk olarak, yayıcının frekansında *Maxwell denklemlerinin* sahip olduğu çözüm sayısı önemlidir; bu nicelik *optik mod yoğunluğu* olarak adlandırılır. Kullanılabilir mod sayısı arttıkça, atomun ışık yayabileceği kanal sayısı da artar ve bu durum kendiliğinden yayım hızının artmasına yol açar. İkinci olarak, bu modların elektrik alan dalgalanmalarının uzaydaki yerleşme derecesi dikkate alınmalıdır. Uzun mesafelere yayılmış bir optik mod, belirli bir noktada güçlü vakum alanı dalgalanmaları oluşturmaz.

Buna karşılık, uzaysal olarak sıkıca hapsolmüş bir mod, vakum alanını bulunduğu bölgede yoğunlaştırır. Belirli bir modun, diğer modlara kıyasla daha büyük yerel dalgalanmalara sahip olması durumunda, atom ışığı öncelikli olarak bu moda yayarak bozunur; zira daha büyük

dalgalanmalar daha yüksek bozunma oranlarına karşılık gelir. Sonuç olarak ışıma profili değişir ve yayılan ışık büyük ölçüde baskın modun uzaysal profilini yansıtır. Bu davranış, önceki örnekte ele alınan yapı için de geçerlidir. İki blok arasındaki mesafe azaldıkça, kavite modları yayıcıyla rezonansa girip çıkar. Kaviteler, aynaların oluşturduğu düzenlemeler aracılığıyla ışığı hapseden dielektrik yapılardır. Bu örnekte kavite, yüksek kırılma indisli malzemeden yansıyan ışığın, hava bölgesinde ileri-geri sekmesiyle oluşmaktadır.

1.5. Işığın Hapsedilmesi

Aynalar kullanılarak ışığı hapseden yapılarda, bir kavite modunun atomun bulunduğu noktada güçlü vakum alanı dalgalanmaları oluşturabildiğini ve böylece kendiliğinden yayınımı istenen bir yönde yönlendirebildiğini gördük. Burada önemli olan bir diğer nokta, kavite modlarının etkin biçimde hapsolmasının yalnızca aynaların birbirine yakınlığına değil, aynı zamanda ışığın kavite içinde ne kadar süre kaldığına bağlı olmasıdır. Işığı uzun süre tutamayan, başka bir deyişle “sızıntılı” bir kavite, güçlü vakum alanı dalgalanmaları da oluşturamaz. Yukarıda incelediğimiz basit kavite yapısı, ışığı yalnızca dikey yönde hapsedebilir. Sürekli öteleme simetrisi nedeniyle, modların yatay düzlemde sonsuza kadar yayıldığı görülür. Dahası, bu kavite ışığı hapsedme konusunda oldukça zayıftır. Örneğin, hava ile GaAs arasındaki yansıtıcılığın yaklaşık %30 olması, her yansımada ışığın yaklaşık %70’inin yukarı veya aşağı yönde kaybedildiği anlamına gelir.

Bu nedenle ilk adım olarak daha iyi aynaların kullanılması gerekir. Etkili bir ayna üretmenin yaygın yollarından biri, yüksek ve düşük kırılma indisli malzemelerden oluşan ince tabakaların art arda yerleştirilmesidir. Bragg aynaları olarak bilinen bu yapılar, belirli dalga boylarında son derece yüksek yansıtıcılığa sahip olacak şekilde tasarlanabilir (**Şekil 5**). Bunun için her katmanın kalınlığı, ışığın dalga boyunun dörtte biri olacak biçimde seçilir; böylece farklı ara yüzeylerden yansıyan ışıklar yapıcı girişim yaparak birbirini güçlendirir.

Bir sonraki adım, kavite modunun üç boyutta hapsedilmesidir. Bunun bir yolu, kavite içindeki ışığın kırınımını telafi etmek amacıyla Bragg aynalarından birinin (ya da her ikisinin) kavisli hâle getirilmesidir. Ancak burada tercih edilen yaklaşımla, tabaka yığınının mikro-sütunlar hâlinde yapılandırılmasıdır. Sütunun yüksek kırılma indisine sahip olması ve çevresinin hava ile çevrili bulunması, büyük bir indis farkı yaratır; bu fark, ışığın sütun içinde indis-kılavuzlama yoluyla hapsolmasını sağlar. Bu mekanizma, ışığın optik fiberlerde yönlendirilmesine oldukça benzer. Bu tür yapıların oluşturulması sayesinde, hem uzaysal olarak son derece yerleşmiş hem de ışığı uzun süre hapseden kavite modları elde edilir. Atom, kavitenin elektrik alanının bir anti-düğüm noktasına yerleştirildiğinde, ışığın kavite moduna yayılma olasılığı, atomun rastgele bir yöne yayım yapma olasılığından çok daha yüksek hâle gelir.

Bu noktada ortaya çıkan son problem, atom tarafından yayılan ve kavite içinde hapsedilen tek-fotonun kavite dışına nasıl verimli biçimde çıkarılacağıdır. Bragg aynaları ışığı uzun süre kavite içinde tutacak şekilde tasarlandığından, fotonlar çoğu zaman kavitenin yanlarından rastgele yönlerde kaçar; bu durum ise kavite kullanımının temel amacına ters düşer. İyi bir tek-foton kaynağı tasarlamak için, aynalardan birinin diğerine kıyasla daha az yansıtıcı yapılması gerekir (örneğin daha az Bragg katmanı kullanılarak). Böylece fotonlar kaviteyi ağırlıklı olarak bu aynadan terk eder. Kaynağın yönlülüğünü neredeyse mükemmel hâle getiren unsur da budur. Son aşamada, çıkış aynasının yakınına bir optik fiber yerleştirildiğinde, yayılan tek-fotonlar yüksek olasılıkla toplanabilir. Ancak bu yaklaşımla kaçınılmaz bir denge gerektirir. Aynalardan birinin yansıtıcılığının azaltılması, kavite modunun ömrünü kısaltır; bu durum vakum alanı dalgalanmalarını zayıflatır ve dolayısıyla atomun başlangıçta kavite moduna yayım yapma

olasılığını düşürür. Bu nedenle istenen performansa ulaşabilmek için kavite yapısının dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekir.



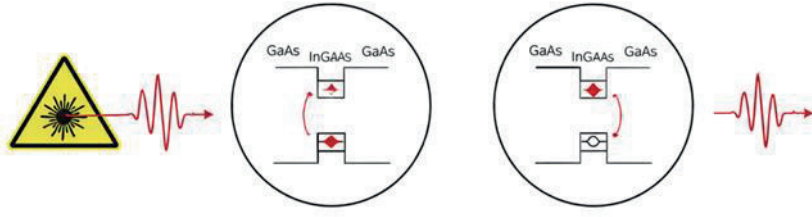
Şekil 5. Bragg aynaları kullanılarak oluşturulan düzlemsel (planar) kavite ile, optik modun üç boyutta hapsediği mikropillar kavite yapılarının şematik karşılaştırması (<https://www.quandela.com/resources/blog/single-photon-sources-part-3/>, t.y.).

Fotonları verimli bir şekilde toplayabilen mikro-yapıları üretmek, başlı başına zorlu bir teknolojik iştir. Ancak bundan daha zor olanı, bir atomu tam olarak kavite modunun vakum-alanı dalgalanmalarının en güçlü olduğu noktaya yerleştirmektir. Tek atomlar vakum ortamında kullanılarak bu hedefe ulaşılabilir, ancak bu süreç son derece karmaşık olup, bazı ekipmanlar gerektirir.

İlerlemek için bir diğer yaklaşım, kuantum yayıcıları doğrudan katı hâl ortamı içinde gerçekleştirmektir. Son birkaç on yılda, malzemelerin içinde tekil elektronların kuantum enerji seviyelerini izole etmenin çeşitli yolları geliştirilmiştir. Diğer bir yaklaşım ise kuantum noktalarının kullanılmasıdır.

Kuantum noktaları, düşük bant aralıklı bir yarı iletken malzemeden oluşan küçük adacıklar olup, daha yüksek bant aralıklı bir yarı iletken tarafından çevrelenir. Bant aralıkları arasındaki bu fark nedeniyle, bazı elektronik durumlar yalnızca düşük bant aralıklı malzeme içinde var olabilir. Elektronik durumların birkaç nanometrelik bir hacme hapsedilmesi, kuantum mekaniğindeki klasik “*kutudaki parçacık*” modeline benzer şekilde ayrı kuantum enerji seviyelerinin oluşmasına yol açar. Bu yapı, atomlardakine oldukça benzeyen bağlı elektronik durumlara erişim sağlar. Bu nedenle kuantum noktaları, katı hâl ortamında sıklıkla “*yapay atomlar*” olarak adlandırılır. Kuantum noktalarındaki bu ayrı durumlar kullanılarak, yukarıda açıklanan prensiplerle tek-foton üretimi gerçekleştirilebilir. Bu senaryoda, darbeli bir lazer yardımıyla elektronlardan biri, iletken bandındaki en yüksek dolu durumdan valans bandındaki en düşük boş duruma yükseltilir.

Hidrojen atomu ile karşılaştırıldığında, valans bandındaki bir elektron eksikliği daha belirgin bir rol oynar. Bu “*hole (deşik)*”, kendi başına bir yarı-parçacık olarak davranır ve lazer darbesinin etkisiyle elektron ile deliğin birlikte oluşturduğu bağlı durum, yani bir *eksiton*, meydana gelir. *Eksiton* kararlı bir yapı değildir; vakum alanı dalgalanmaları elektron ile deliğin yeniden birleşmesine neden olur ve bu birleşme süreci sırasında tek bir foton üretilir.



Şekil 6. Kuantum noktada eksiton relaksasyonundan kaynaklanan tek-foton emisyonu (<https://www.quandela.com/resources/blog/single-photon-sources-part-3/>, t.y.).

Elektronik enerji seviyeleri, bulundukları katı hâl ortamından tamamen izole değildir. Gürültünün en önemli kaynaklarından biri sıcaklıktır; yarı iletken içindeki atomların titreşimleri bu gürültünün temel nedenini oluşturur. Sıcaklığın kuantum noktaları üzerinde birden fazla etkisi vardır. Öncelikle, kristal kafesteki titreşimlerin varlığı, elektronik enerji seviyeleri arasındaki farklara bir belirsizlik ekler. Teknik olarak bu titreşimler, enerji seviyelerinde dekoheransa yol açar. Bu belirsizlik, yayılan fotonların frekanslarına da yansiyarak fotonların ayırt edilemezliğini olumsuz etkiler. Kristal kafes titreşimleri — yani fononlar — tek-foton yayım sürecini doğrudan etkiler. İkinci bir etki olarak, yayıcı foton yayarken çevresindeki kristalin titreşimlerini yayabilir ya da soğurabilir. Titreşimlerin enerji taşıması nedeniyle, yayılan fotonlar her yayım olayında farklı frekanslara sahip olur; bu durum da fotonların ayırt edilemezliğini daha da azaltır. Bu sorunun temel çözümü, numunenin kriyojenik sıcaklıklara kadar soğutulması malzeme içindeki titreşimlerin bastırılmasıdır. Kuantum nokta temelli tek-foton yayıcılar için numunelerin yaklaşık 4–8 K sıcaklık aralığına soğutulması, ısı gürültünün etkin biçimde azaltılması için yeterlidir (Martin vd., 2023).

Kuantum yayıcılar açısından bir diğer önemli husus, yayılan tek-fotonları uyarma amacıyla kullanılan lazer darbelerinden nasıl ayırt edeceğimizdir. Bu iki katkı yeterince ayrıştırılmazsa, tek-foton çıktısı lazer kaynaklı arka plan gürültüsü içinde kaybolur. Genellikle lazer ışığının, tek-foton kaynağının çıkışına ulaşmasını tamamen engellemek oldukça zordur. Bu nedenle etkili bir yaklaşım, kuantum yayıcının ek bir enerji seviyesinden yararlanılmasıdır. Buradaki amaç, frekans olarak birbirinden ayrılmış ya da ışığın dik polarizasyonları ile uyarılabilen iki farklı optik geçiş tanımlamaktır. Böylece tek-foton çıkışında lazer ışığı, optik filtreler veya polarizörler kullanılarak ayıklanabilir. Bu yöntemin başarılı olabilmesi için, uyarılmış durumların birbiriyle bağlantılı olması ve lazer alanının elektronu ek enerji seviyesine verimli bir biçimde aktarabilmesi gerekir. Kuantum nokta sistemlerinde bu koşulu sağlamanın iki temel yolu bulunmaktadır:

İlk yaklaşım, katı hâl ortamının sağladığı olanaklardan yararlanarak yayıcıların kristal titreşimleri ile olan etkileşimini kullanmaktır. Rezonans dışı lazer darbeleri uygulandığında, bir akustik fonon yayımı tetiklenir ve bu süreç, eksiton durumunun verimli bir şekilde hazırlanmasını sağlar.

İkinci yaklaşım ise, kuantum noktasında dik polarizasyonlu ışıklarla etkileşen iki farklı elektronik durumdan yararlanmaktır. Bu yöntem, özellikle eliptik kaviteler ile birleştirildiğinde son derece etkili sonuçlar verir ve lazer ışığının tek-foton sinyalinden ayrıştırılmasını önemli ölçüde kolaylaştırır (<https://www.quandela.com/resources/blog/single-photon-sources-part-3/>, t.y.).

2. TEK-FOTONUN TANIMI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ

Tek-foton, elektromanyetik ışınının mümkün olan en küçük birimini oluşturan ve yalnızca bir foton içeren kuantum durumu ifade eder. “*Işığın kuantumu*” olarak tanımlanan bu kavram, ışığın klasik yoğunluk dalgalanmalarından ayrılarak kesin biçimde kuantum doğasını ortaya koyar ve kuantum fiziğinin merkezinde yer alan *dalga-parçacık ikiliğini* somutlaştırır. Tek-fotonlar hem dalga hem de parçacık gibi davranabilir; süperpozisyon ve dolanıklık gibi klasik sezgiyi zorlayan özellikler sergileyebilirler.

Tek-foton kaynaklarının kavramsal ve deneysel temelleri, 1980’lerin ortalarında gerçekleştirilen öncü çalışmalarla ortaya konmuştur. Aspect ve Grangier tarafından yapılan *antikorelasyon* ölçümleri, tek-foton dalga paketlerinin varlığını deneysel olarak doğrulamış ve tek-foton emisyonunun, Poisson istatistiği ile tanımlanan klasik lazer ışığından ayrıldığını göstermiştir (Grangier vd., 1986). Bu çalışmalarla birlikte tek-foton kaynakları, *sub-Poisson istatistiği* ve *antibunching* davranışı ile karakterize edilen saf kuantum ışık kaynakları olarak tanımlanmıştır. *Antibunching* özelliği, aynı anda iki ya da daha fazla fotonun bulunma olasılığının güçlü biçimde bastırılması anlamına gelir ve tek-fotonların kuantum kriptografi, kuantum haberleşme ve kuantum bilgi işleme uygulamalarındaki kritik rollerinin temelini oluşturur. Özellikle *Kuantum Anahtar Dağıtımı* protokollerinde, her bir tek-fotonun taşıdığı bilgi güvenliği doğrudan garanti altına alınırken; fotonik tabanlı kuantum bilgisayarların ölçeklenebilirliği ve güvenilirliği de tek-fotonların saflığı, parlaklığı ve ayırt edilemezliği gibi parametrelere bağlıdır. Tek-fotonların kontrollü biçimde üretilmesi, yönlendirilmesi ve algılanabilmesi, kuantum etkilerinin pratik teknolojilere dönüştürülebildiği “ikinci kuantum devriminin temel göstergelerinden biri olarak kabul edilir.

Fotonik ve kuantum optik teknolojilerinin temel yapı taşlarından biri olan *tek-foton kaynağı*, tam olarak istenildiği anda yalnızca bir adet foton (ışık parçacığı) üretebilen özel bir kuantum aygıtıdır. Yani, fotonların termal dengede bulundukları durumda bozonik doğaları gereği sergileme eğiliminde oldukları kümelenme (bunching) davranışını bastıracak biçimde, ışığın tekil fotonlar hâlinde üretilmesini sağlayan bir ışık kaynağı olarak tanımlanır. Günlük hayatta kullandığımız ışık kaynakları—ampuller, LED’ler ya da lazerler—fotonları rastgele ve büyük kümeler hâlinde yayarlar. Hatta oldukça kısılmış bir lazer işaretçisi bile “*Poisson istatistiği*” olarak bilinen bir dağılıma uyar; yani kimi zaman hiç foton çıkarmaz, kimi zaman bir foton yayar, kimi zaman ise iki ya da üç foton birden üretir. Kuantum teknolojilerinde bu rastgelelik ciddi bir sorun oluşturur. Tek-foton kaynaklarının en temel özelliklerinden biri, aynı anda iki veya daha fazla fotonun bulunma olasılığının yok denecek kadar küçük olmasıdır. Bu davranış, “*antibunching*” olarak adlandırılır ve *ikinci mertebeden korelasyon fonksiyonu*- $g^2(\tau)$ ile tanımlanır. İdeal bir tek-foton kaynağı için $g^2(\tau) = 0$ olmalıdır. Bu durumda, hiçbir zaman aynı anda iki foton bulunmaz. Ancak pratikte bu değer sıfırdan yalnızca çok daha küçük olmaktadır. Bu durumda $g^2(0) = 1$, korelasyonsuz (rastlantısal çakışmalar içeren) fotonları tanımlar. Sıfırdan tam olarak farklı olan bu durum, bazı özel hâllerde $g^2(0) \ll 1$ iken, üçlü foton tesadüflerinin de ($g^3(0)$) gözlemlenmesine yol açabilir. Bu, herhangi bir yüksek mertebe için de geçerli olabilir. Buna karşılık, eğer $g^2(0) = 0$ tam olarak sağlanabilirse, o zaman tüm daha yüksek mertebeli korelasyon fonksiyonlarının ($g^n(0)$) da sıfır olması gerekir. İlk bakışta, iki foton çakışmalarını güçlü biçimde bastıran bir kaynağın, daha yüksek mertebeden foton çakışmalarını da zorunlu olarak bastırmaması şaşırtıcı görünebilir. Ancak, $g^2(0)$ sıfırdan farklı olduğu sürece bu durum mümkündür. Bu olgu, foton korelasyonlarının ne derece hassas olduğunu ve güvenilir bir çakışma ölçütünün tanımlanmasının ne denli güç olduğunu göstermektedir.

2.1. Tek Foton Saflığı

Tek-foton kaynaklarının performansını belirleyen temel kriterlerden biri, yayılan fotonların saflığıdır (*purity*). Yüksek tek-foton saflığı, yayılan ışık durumunun yalnızca tek bir kuantum modunu ve tek bir foton olayını temsil etmesi anlamına gelir. Saf olmayan kaynaklar ise çoklu-foton bileşenleri içererek kuantum bilgi işleme uygulamalarında hata oranlarını artırır. Adından da anlaşılacağı üzere, bir tek-foton kaynağından her uyarma çevriminde aynı anda yalnızca bir foton yayılması beklenir. Bu özellik kritik öneme sahiptir; çünkü fazladan fotonların varlığı, belirli bir foton sayısına dayalı olarak çalışan kuantum protokollerinde doğrudan hatalara yol açar.

Tek-foton saflığı, görüldüğünden çok daha zor karşılanan bir gereksinimdir. Örneğin, bir lazer ya da mum ışığını yalnızca zayıflatmak, iyi bir tek-foton kaynağı elde etmek için yeterli değildir. Lazer ışığı, ortalama olarak belirli bir zaman aralığında bir fotondan çok daha az foton içerecek şekilde zayıflatılsa bile, istatistiksel olarak birden fazla fotonun aynı anda üretilme olasılığı kabul edilemeyecek kadar yüksek kalır. Bu nedenle gerçek bir tek-foton kaynağı, çoklu-foton üretme olasılığını güçlü biçimde bastırırken, aynı zamanda tam olarak bir foton üretme olasılığını en üst düzeye çıkarmalıdır.

2.2. Talep Üzerine Foton Üretimi

Bir diğer temel gereksinim, tek-foton kaynağının tetiklenebilir olmasıdır; yani fotonların istenen anda üretilebilmesi gerekir. Gelişmiş kuantum-fotonik protokoller, çoğunlukla yarı yansıtıcı bir ayna (beam splitter) üzerinde gerçekleşen iki fotonlu girişim etkilerine dayanır. Bu tür girişimin oluşabilmesi için fotonların beam splitter'a eşzamanlı olarak ulaşması şarttır; bu durum ise yüksek derecede zamanlama ve senkronizasyon gerektirir. Bu nedenle, fotonların yayılım zamanının harici bir tetikleme sinyali ile kontrol edilebilmesi kritik öneme sahiptir. Pratikte tek-foton kaynakları genellikle, belirli zaman aralıklarında foton üretimini uyarıcı darbeleri lazerler kullanılarak tetiklenir. Bu yaklaşım, fotonların üretim zamanını hassas biçimde belirlemeye imkân tanıyarak çok-fotonlu kuantum girişim deneyleri ve ölçeklenebilir kuantum protokolleri için gerekli zaman senkronizasyonunu sağlar.

2.3. Parlaklık

Parlaklık, bir tek-foton kaynağının belirli bir zaman aralığında kullanılabilir foton üretme olasılığını tanımlar. Yüksek parlaklık, kuantum haberleşme sistemlerinde daha hızlı ve verimli bilgi aktarımına olanak sağlarken, çok-fotonlu kuantum protokollerinin uygulanabilirliğini de doğrudan etkiler. Talep üzerine foton üretiminin ötesinde, her tetikleme çevriminde kaynağın gerçekten bir foton yayma olasılığının yüksek olması beklenir. Bu özellik, tek-foton kaynaklarının parlaklığı olarak adlandırılır. Hiç foton elde edilememesi açıkça kullanışsızdır; ancak yüksek parlaklığa ulaşmak pratikte çözülmesi en zor problemlerden biridir, zira fotonlar hem yayılım hem de toplama süreçlerinde kaybolmaya son derece yatkındır. Parlaklık ile antibunching arasında çoğu zaman kaçınılmaz bir denge bulunur. Bazı kaynak türlerinde parlaklığın artırılması, aynı anda birden fazla fotonun üretilme olasılığını da yükselterek tek-foton saflığını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle yüksek parlaklık, çoklu-foton yayım olasılığının etkin biçimde bastırılmasıyla birlikte sağlanmalıdır.

Yetersiz parlaklığa sahip bir tek-foton kaynağı, sistemlerin ölçeklenebilirliği açısından ciddi bir sınırlama oluşturur. Kaynak parlaklığı, optik kuantum teknolojilerinin ölçeklenebilirliğinde kritik bir rol oynar; zira farklı kaynakların parlaklıklarındaki küçük farklar

bile, protokollere daha fazla kaynak eklendikçe performansı üstel biçimde etkileyebilir. Bu nedenle parlaklıktaki görece küçük iyileştirmeler dahi, çok sayıda kaynağın birlikte kullanıldığı deneylerde çarpıcı performans artışlarına yol açabilir.

2.4. Ayırt Edilemezlik

Kuantum bilgi uygulamalarında, farklı zamanlarda ya da farklı kaynaklardan üretilen fotonların birbirinden ayırt edilemez olması temel bir gereksinimdir. Ayırt edilemezlik (*indistinguishability*), fotonların dalga boyu, polarizasyonu, fazı ve zamansal profili gibi tüm kuantum serbestlik derecelerinde özdeş olmalarını ifade eder. Bu koşul sağlandığında, fotonlar girişim deneylerinde birbirleriyle tamamen örtüşebilir ve kuantum girişim etkileri maksimum düzeyde gözlemlenir.

İki fotonun girişim yapabilmesi için ideal durumda yalnızca polarizasyonlarının değil, aynı zamanda spektral özelliklerinin, zamansal zarf fonksiyonlarının ve uzaysal modlarının da birebir aynı olması gerekir. Dolayısıyla ayırt edilemezlik, tek-foton kaynakları üzerinde oldukça katı kısıtlamalar oluşturur. Fotonların tam anlamıyla özdeş olabilmesi için, yayım sürecinin her tetiklemede aynı kuantum durumu yeniden üretmesi gerekir.

Foton ayırt edilemezliği genellikle bir *Hong–Ou–Mandel (HOM)* girişim deneyi ile ölçülür (Brańczyk, 2017). Bu düzende, iki foton aynı anda beam-splitter’in iki farklı girişinden içeri girer. Ne olduğunu anlamak için beam-splitter’in tam etkisini dikkate almak gerekir. Beam-splitter, 1. porttan giren fotona uyguladığı işlemi, 2. porttan giren fotona tam olarak aynı şekilde uygulamaz. 2. porttan giren foton için dalga fonksiyonunun yansıyan teriminde bir eksi işareti ortaya çıkar. Bu Stokes bağıntısı olarak bilinir ve kayıpsız malzemeler için Maxwell denklemlerinin zaman tersinirliğinden kaynaklanır. Eğer fotonlar ayırt edilemez ise, son iki terim — işaretlerinin zıt olmasına rağmen — birbirinden ayırt edilemez ve olasılık genlikleri birbirini yok eder. Geriye yalnızca bir dolanık durum kalır ve iki dedektörün aynı anda tetiklenme olasılığı sıfır olur. Öte yandan fotonlar ayırt edilebilir ise, son terimler arasında tam bir iptal gerçekleşmez ve dolayısıyla eşzamanlı tespitler (*coincidences*) gözlenir. Bu nedenle deneyde ölçülen eşzamanlı tespit (*coincidence*) oranı, fotonların ne derece ayırt edilebilir olduğunu gösterir. Uygulamada bu durum, eşzamanlı tespitlerin bastırılma derecesini ifade eden Hong–Ou–Mandel (HOM) görünürlüğü V_{HOM} ile tanımlanır; bu büyüklük fotonların ne ölçüde ayırt edilemez olduğunu nicel olarak ifade eder. Düşük coincidence oranı, yüksek HOM görünürlüğüne karşılık gelir. HOM görünürlüğü ancak hiç eşzamanlı tespit gözlenmediği durumda 1 değerine ulaşır. Karmaşık kuantum protokollerinin hata baskısı altında güvenilir biçimde çalışabilmesi için, V_{HOM} ’un 1’e mümkün olduğunca yakın olması gereklidir. Ayrıca, giriş portlarında birden fazla foton bulunması durumunda HOM görünürlüğünün bozulabileceğini vurgulamak önemlidir.

2.5. Kuantum Verimliliği ve Kayıplar

Her tek-foton kaynağı, sistemin fiziksel ve deneysel sınırlamaları nedeniyle belirli bir verimlilikle çalışır. Kuantum verimliliği, üretilen fotonların dedektör tarafından başarıyla algılanabilme oranını ifade eder. Kayıplar; optik elemanlarda meydana gelen soğurma ve saçılma süreçlerinden veya dedektörlerin sınırlı algılama veriminden kaynaklanabilir. Yüksek kuantum verimliliği, güvenilir ve tekrarlanabilir tek-foton deneylerinin gerçekleştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

3. TEK-FOTON KAYNAKLARI

Tek-foton kaynakları (Single-Photon Sources, SPS), kuantum optik ve kuantum bilgi biliminin temel yapı taşlarından biridir. Bu kaynaklar, ışığı her uyarma çevriminde tekil fotonlar halinde üretebilme yetenekleri sayesinde, klasik ışık kaynaklarından ayrılır. Bu özellikleri, özellikle kuantum haberleşme ve kuantum kriptografi gibi uygulamalarda yüksek güvenilirlik ve kesinlik sağlar. Bir tek-foton yayıcı oluşturmak için, atom, iyon veya kristal yapı içerisindeki bir kusur merkezi gibi iki seviyeli tek bir kuantum sisteminin izole edilmesi gerekir. Bu süreç genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşur:

- **Uyarma:** Bir lazer darbesi, kuantum sistemini temel enerji durumundan daha yüksek bir enerji seviyesine çıkarır.
- **Yayınım:** Sistem, doğal bozunum süreciyle yeniden temel durumuna döner. Kuantum mekaniğinde enerji seviyeleri ayrık olduğundan, bu geçiş sırasında tam olarak bir enerji kuantumu, yani tek bir foton yayılır.
- **Toplama:** Yayılan foton, mercekler veya dalga kılavuzları yardımıyla toplanarak bir optik fiber ya da optik devre içine yönlendirilir.

Bir Fotonun “Şekli” (Dalga Paketi): Tek bir fotonun “şeklinin” kontrol edilmesi, kuantum optik sistemlerin mühendisliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Burada şekil kavramı, fotonun zaman ve frekans uzayındaki dağılımını tanımlayan dalga paketi anlamına gelir. İki fotonun birbiriyle girişim yapabilmesi — ki bu durum kuantum hesaplama ve kuantum ağları için temel bir gerekliliktir — yalnızca her iki fotonun dalga paketlerinin tamamen özdeş olması durumunda mümkündür. Eğer fotonlardan biri zaman açısından daha uzun ya da frekans açısından daha geniş bir dağılıma sahipse, fotonlar ayırt edilebilir hâle gelir ve kuantum girişim etkileri bastırılır. Bu durumda, kuantum mantık işlemleri istenilen şekilde gerçekleştirilemez.

Tablo 1, tek foton emisyon teknolojilerinin karşılaştırmasını sunmaktadır. Tek-foton üretimi için kullanılan başlıca teknolojiler; zayıflatılmış lazerler, kendiliğinden parametrik aşağı dönüşüm (SPDC), kuantum noktalar ve nötr atomlara dayalı sistemler olarak sınıflandırılabilir. Zayıflatılmış lazerler düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir olmalarına rağmen, yüksek çok-foton olasılığı nedeniyle gerçek tek-foton kaynakları olarak kabul edilmez. SPDC tabanlı kaynaklar yüksek ayırt edilemezlik sunsa da, foton yayınımı doğası gereği olasılıksal olup zamanlama açısından rastlantısaldır. Buna karşılık kuantum noktalar ve nötr atomlar deterministik tek-foton üretimine olanak tanır. Kuantum noktalar yüksek parlaklık ve hızlı tekrarlama oranlarıyla öne çıkarken, kriyojenik koşullar ve üretim varyasyonları önemli sınırlamalar oluşturur. Nötr atom tabanlı sistemler ise yüksek foton özdeşliği ve uzun koherens süreleri sağlamasına karşın, görece düşük tekrarlama hızları ve deneysel karmaşıklık nedeniyle sınırlıdır (Eisaman vd., 2011).

Tablo 1. Tek Foton Emisyon Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Teknoloji	Mekanizma	Deterministik?	Avantajlar	Dezavantajlar
Kendiliğinden Parametrik Aşağı Dönüşüm (SPDC)	Yüksek enerjili tek bir fotonun iki fotona bölünmesi	Hayır (Olasılıksal)	Oda sıcaklığında çalışma, yüksek ayırt edilemezlik	Rastgele yayılım zamanları, düşük verim
Kuantum Noktaları	Yarıiletkenlerde yapay atomlar	Evet	Yüksek parlaklık, hızlı tekrarlama oranları	Kriyojenik soğutma gereksinimi, üretim varyasyonları
Zayıflatılmış Lazer	Bir lazer demetinin zayıflatılması	Hayır (Olasılıksal)	Ucuz, uygulaması kolay	Çok-foton hatası riski yüksek (güvenlik riski)
Nötr Atomlar	Lazer-soğutmalı atomik kümeler	Evet	Özdeş fotonlar, uzun bellek süresi	Kuantum noktalara kıyasla daha yavaş tekrarlama oranları

3.1. Kendiliğinden Parametrik Aşağı Dönüşüm (SPDC)

Doğrusal olmayan kristaller kullanılarak gerçekleştirilen *Kendiliğinden Parametrik Aşağı Dönüşüm* (*Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC*), en yaygın tek-foton üretim yöntemlerinden biridir. Bu süreçte, yüksek enerjili bir foton kristal içinde doğrusal olmayan etkileşim sonucu daha düşük enerjili iki fotona ayrılır. Oluşan bu foton çiftleri, enerji ve momentumun korunumu gereği birbirleriyle güçlü biçimde korelasyonludur. SPDC tabanlı kaynaklar, özellikle yüksek korelasyon verimleri ve deneysel kurulumlarının görece basit olması nedeniyle uzun yıllardır yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu sürecin doğası gereği *deterministik* olmaması ve tek bir uyarma olayında birden fazla foton çiftinin üretilme olasılığı, SPDC'yi ideal bir tek-foton kaynağı olmaktan uzaklaştırmaktadır.

3.2. Kuantum Noktaları (Quantum Dots, QDs)

Yarı iletken kuantum noktaları, tek-foton üretiminde öne çıkan *deterministik kaynaklar* arasında yer almaktadır. Ayırık enerji seviyelerine sahip bu “*yapay atomlar*”, uygun biçimde uyarıldıklarında talep üzerine tekil foton yayımı gerçekleştirebilir. Kuantum noktalarının en önemli avantajları arasında, entegre fotonik yapılara uyarlanabilir olmaları ve yüksek ayırt edilemezlik değerlerine ulaşabilmeleri bulunmaktadır. Nitekim Ding ve çalışma arkadaşlarının 2016 yılında *Nature*'da yayımlanan çalışmalarında, %90'ın üzerinde ayırt edilemezlik ve yüksek saflıkta tek-foton üretimi rapor edilmiştir (Ding vd., 2016). Bu tür gelişmeler, kuantum noktalarını kuantum haberleşme ve kuantum ağı gibi pratik uygulamalar açısından son derece cazip hâle getirmiştir.

Yarı iletken kuantum noktaları (Berktaş vd., 2022; Orhan vd., 2023; Santori vd., 2002; Shields, 2007) tek-foton kaynağı olarak kullanılmak üzere uzun süredir yoğun biçimde araştırılmaktadır. Bu yapılar genellikle Moleküler Demet Epitaksisi (MBE) yöntemiyle üretilir. Özellikle Stranski–Krastanov kendiliğinden büyüme mekanizması (Leonard vd., 1993) daha geniş bant aralıklı bir yarı iletken matrisi içerisinde, daha dar bant aralıklı malzemeden oluşan nanometre ölçekli adacıkların oluşmasını sağlar. Bunun yanı sıra, kimyasal sentez yöntemleri kullanılarak üretilen kolloidal kuantum noktaları da tek-foton kaynağı uygulamaları için araştırılmaktadır (Brokmann vd., 2004)

Kuantum noktalarının çok küçük boyutları, elektronlar ve deşikler için ayrık enerji seviyelerinin oluşmasına yol açar. Zayıf uyarma rejiminde, talep üzerine tek bir eksiton (elektron–deşik çifti) oluşturulabilir. Bu eksitonun ışımsal rekombinasyonu sonucunda tek bir foton yayılır ve bu sürecin tipik ışımsal yaşam süresi genellikle 1-1.5 ns mertebesinde veya daha kısadır (Gourdon & Lavallard, 1989). Kuantum noktaları hem optik hem de elektriksel olarak uyarılabilir. Her iki durumda da sistemin bir defada yalnızca tek bir foton yayımlamasını sağlayan temel unsur, tek bir kuantum yayıcının (emitter) varlığıdır; ancak altta yatan fiziksel mekanizma farklıdır:

- Optik uyarımda, foton soğurulması yoluyla bir eksiton oluşturulur ve sistem doygunluğa ulaşır.
- Elektriksel uyarımda, yük taşıyıcıları doğrudan kuantum noktasına enjekte edilir. Bu süreç, yalnızca tek bir yükün kuantum noktasına geçmesine izin veren Coulomb blokajı etkisi sayesinde kontrol edilebilir. Bu nedenle bu tür yapılar literatürde bazen elektron veya foton turnikesi olarak da adlandırılır (Kim vd., 1999).

Optik olarak aktif kuantum noktalarına ZnS matrisi içindeki CdSe (Beveratos vd., 2002) örnek verilebilir. Elektriksel olarak sürülen kuantum noktalarına ise InAs tabanlı yapılar (Ward vd., 2007) örnek teşkil etmektedir. Bununla birlikte, *üretimsel kuantum verimliliği* — yani bir uyarma olayının tek-foton üretimiyle sonuçlanma olasılığı — bire çok yakın olabilse de, pratikte toplam yayınım verimi sınırlı kalabilmektedir. Ayrıca iki elektron–deşik çiftinin aynı anda uyarılmasıyla biyekson durumu oluşabilir. Yerel Coulomb etkileşimleri nedeniyle biyekson ve eksiton geçiş enerjileri genellikle farklıdır; kristal asimetrisi ise her iki geçişin ince yapı çiftlenmeleri sergilemesine yol açar. Bu özellik, uygun koşullarda polarizasyon-dolanık foton çiftlerinin üretilmesi için kullanılabilir (Muller vd., 2009).

Ayrıca, kuantum noktalarının etkin tek-foton yayıcılar olarak çalışabilmesi için genellikle kriyojenik sıcaklıklarda işletilmeleri gerekir; bu durum sistemlerin pratik uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Ayrıca kuantum noktalarının kontrolsüz bir katı hâl ortamında bulunması nedeniyle elde edilen ikinci mertebe korelasyon fonksiyonu değerleri $g^2(0)$, bazı diğer tek-foton yayıcı türleriyle karşılaştırıldığında yeterince düşük olmayabilir. Bunun yanı sıra, her bir kuantum noktasının yapısal olarak benzersiz olması — her ne kadar ayırt edilemezlik sağlama konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olsa da (Patel vd., 2010)— ölçeklenebilir kuantum sistemlerin gerçekleştirilmesini hâlen sınırlayan önemli bir faktördür.

3.3. Kusur Merkezleri

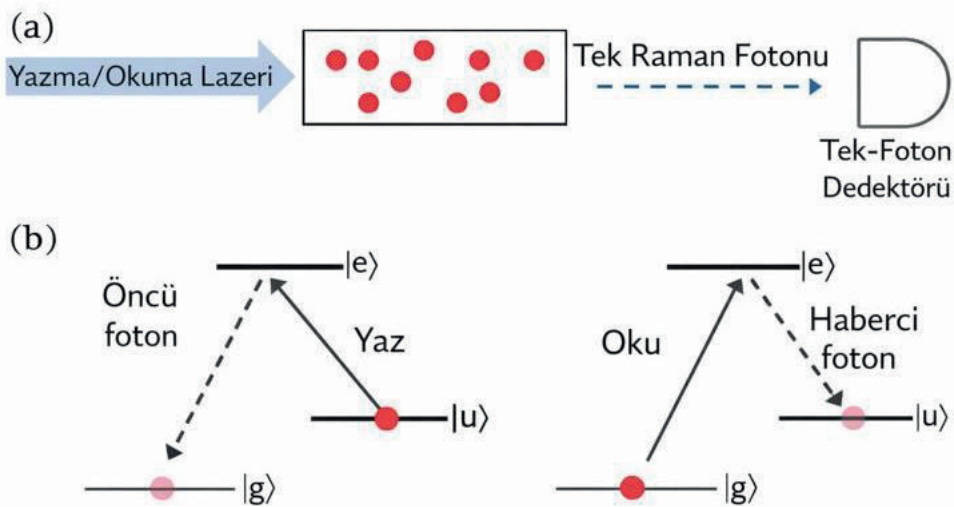
Elmas içindeki azot (N)–boşluk (NV) merkezleri ve diğer renk merkezleri, tek-foton kaynakları arasında uzun süredir yoğun biçimde çalışılan sistemlerdir. Bu tür kusur merkezleri, oda sıcaklığında dahi kararlı tek-foton emisyonu gerçekleştirebilmeleri nedeniyle kuantum optik deneylerde ve kuantum bilgi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Benzer şekilde, hegzagonal bor nitrür (hexagonal boron nitride, hBN) gibi iki boyutlu malzemelerde

bulunan kusur merkezleri, entegrasyon kolaylığı ve potansiyel ölçeklenebilirlik avantajlarıyla son yıllarda önemli ilgi görmüştür. Tran ve arkadaşlarının 2016 yılında yayınlanan çalışması, hBN monolayerlerinden elde edilen oda sıcaklığında tek-foton emisyonunu açıkça göstermiştir. Bu sonuç, iki boyutlu malzemelerin kuantum fotonikleri alanında yeni ve umut vadeden fırsatlar sunduğunu ortaya koymuştur (Tran vd., 2016).

Bir NV renk merkezi (Kurtsiefer vd., 2000), elmas kafesinde bir karbon atomunun yerini alan bir azot atomu ile ona komşu konumda oluşan bir kafes boşluğundan meydana gelir. NV merkezlerinin optik geçişleri, temel durum $|g\rangle$ uyarılmış durum $|e\rangle$ ve metastabil durum $|s\rangle$ içeren üç seviyeli bir enerji sistemi ile modellenenebilir. Uyarılmış durum $|e\rangle$, hem temel durum $|g\rangle$ ile ışımsal geçişler yoluyla hem de metastabil durum $|s\rangle$ ile termal olarak bağlantılıdır.

Uyarılmış durumdan temel duruma gerçekleşen bozunum, tek bir foton yayımı ile sonuçlanır. Bununla birlikte, sistemin metastabil durum $|s\rangle$ 'ye geçiş yapabilmesi, uyarılmış $\rightarrow$ temel geçişinin geçici olarak durmasına neden olur. Bu uzun ömürlü metastabil durum, literatürde '*raf*' (*shelving*) durumu olarak adlandırılır. Metastabil bir durumun varlığı, tek-foton yayılım hızını etkin biçimde azaltırken, ana optik geçişin karakteristik ömründen daha uzun zaman ölçeklerinde foton kümelenmesi (*bunching*) davranışının ortaya çıkmasına neden olabilir.

NV merkezinin karakteristik yayılım çizgisi yaklaşık 637 nm dalga boyunda yer alır ve tayfsal genişliği 100 nm'den daha fazladır (Brouri vd., 2000). Elmas kafesinde bulunan başka bir kusur türü olan *nikel-nitrojen-boşluk merkezleri* kullanıldığında ise, sıfır-fonon çizgisi yaklaşık 800 nm civarında konumlanır ve tayfsal genişlik birkaç nm ile sınırlıdır (Wu vd., 2007). Elmas içerisinde yüzlerce farklı renk merkezi türü bulunduğu göz önüne alındığında, başka uygun kusurların da tek-foton kaynakları için potansiyel adaylar olması mümkündür (Pezzagna vd., 2011). Bununla birlikte, elmasın yüksek kırılma indisi ($n \approx 2.4$) nedeniyle NV merkezlerinden yayılan tek fotonların etkin biçimde toplanması önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Yüksek kırılma indisi, küçük bir toplama katı açısına ve belirgin uzaysal aberasyonlara yol açarak tek-foton toplama verimini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, NV merkezlerinin pratik uygulamalardaki performansını artırmak için çeşitli fotonik mühendislik yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 7. Topluluk-tabanlı yayıcı düzeni: (a) Lazer darbeleri önce sistemi $|u\rangle$ durumuna hazırlar, ardından olasılıksal olarak tek bir kolektif uyarım oluşturur. (b) Bu uyarımın başarıyla

gerçekleştiği, $|e\rangle \rightarrow |g\rangle$ geçişinde yayılan tek bir fotonun tespiti ile haber verilir (heralding). (c) Daha sonra güçlü bir yazma darbesi (write pulse), bu tek kolektif uyarımı deterministik olarak başlangıç durumu $|u\rangle$ 'ya geri pompalar ve böylece $|e\rangle \rightarrow |u\rangle$ geçişinde tam olarak bir adet foton üretilir (Eisaman vd., 2011)

Tek molekül yayıcılarında olduğu gibi, NV merkezlerinin ışımsal verimliliği verimli optik pompalama sayesinde oda sıcaklığında 1'e yakın bir değere ulaşır. Ancak bazı sistemler, özellikle daha iyi performans için kriyojenik sıcaklıklarda çalıştırılmaktadır (Kurtsiefer vd., 2000). Ayrıca, NV merkezlerinin yakınlara optik kaviteler yerleştirilerek (Barclay vd., 2009) ışık-madde etkileşimini iyileştirmeye ve potansiyel bir ölçeklenebilirlik yolu oluşturmaya yönelik çalışmalar halen devam etmektedir.

3.4. İki Boyutlu Malzemeler

İki boyutlu malzemeler, tek-foton emisyonu sağlayan yeni nesil platformlar arasında yer almaktadır. TMD'ler (transition metal dichalcogenides) gibi malzemeler, düşük boyutlu yapıları sayesinde kuantum ışık kaynakları için cazip adaylardır. Bu sistemlerin en önemli avantajı, elektronik ve fotonik devrelere entegrasyon potansiyelleridir (Eisaman vd., 2011)

3.5. Perovskitler ve Organik Moleküller

Perovskitler ve organik moleküller, ucuz üretim yöntemleri ve kimyasal esneklikleri nedeniyle son yıllarda dikkat çeken tek-foton kaynakları arasında yer almaktadır. Bu tür malzemeler, oda sıcaklığında kararlı foton emisyonu gerçekleştirme potansiyeli ile öne çıkmaktadır (Eisaman vd., 2011)

3.6. Atom ve İyon Sistemleri

Soğutulmuş atomlar ve iyonlar, yüksek saflıkta ve kontrol edilebilir tek-foton üretimi için kullanılan sistemlerdir. Bu yöntemler, uzun koherens süreleri ve hassas kontrol imkânları ile kuantum optikte özel bir yere sahiptir. Ancak, deneysel altyapı açısından oldukça karmaşık olmaları, uygulamalarda sınırlayıcı bir faktördür (Eisaman vd., 2011)

3.7. Rydberg Eksitonları

Rydberg eksitonları, yarı iletkenlerdeki güçlü Coulomb etkileşimleri sayesinde ortaya çıkan yüksek uyarılmış eksiton durumlarıdır. Bu sistemler, güçlü foton-foton etkileşimleri ve kararlı tek-foton emisyonu potansiyeli nedeniyle araştırmalarda ön plana çıkmaktadır. Henüz deneysel olarak sınırlı sayıda gösterilmiş olsa da, Rydberg eksitonları gelecek vadeden tek-foton kaynakları arasında değerlendirilmektedir (Khazali vd., 2017)

Tablo 2'de çeşitli tek-foton kaynakları, parlaklık, saflık, ayırt edilemezlik ve entegrasyon kabiliyeti gibi temel performans ölçütleri açısından karşılaştırılmaktadır. Deterministik tek-foton kaynakları yüksek parlaklık ve ayırt edilemezlik sunmalarına karşın, karmaşık fabrikasyon süreçleri önemli bir teknik zorluk oluşturmaktadır. Haberci (heralded) kaynaklar ise çok yüksek tek-foton saflığı ve mükemmel entegrasyon potansiyeli sağlamalarına rağmen, doğaları gereği düşük parlaklıkla sınırlıdır. Haberci (heralded) terimi, tek-foton kaynaklarının belirli bir kategorisini ifade eder. İdeal olarak, bir ışık darbesini bir kaynağa gönderdiğinizde,

kaynağın çok yüksek bir olasılıkla tek bir foton üretmesi istenir. Ancak bunu gerçekleştirmek zordur ve başlangıçta mevcut olan kaynaklar, çok küçük bir olasılıkla tek foton üretebilen kaynaklardı. Bu sorunu aşmak için, kaynağa bir darbe dizisi (pulse train) gönderilebilir; böylece tek bir foton yayımını tetiklemek için çok daha fazla deneme şansı elde edilir. Ancak bu durumda başka bir problem ortaya çıkar: Fotonun ne zaman yayımlandığını nasıl anlayacaksınız? Eğer fotonu doğrudan tespit ederseniz, onu yok etmiş olursunuz. Bu sınırlamayı aşmak için, her yayımda bir çift foton üreten bir kaynak kullanılabilir. Daha sonra bu iki foton birbirinden ayrılır ve bunlardan biri tespit edilir. Böylece, düzenekte bir bölgede bir foton algıladığınızda, diğer bölgede tek bir fotonun yol almakta olduğunu bilirsiniz. İkinci foton, test edilen tek fotonun hazır olduğunu size bildiren “haberci” ya da “mesajcı” fotondur. İşte “haberci tek-foton yayımı (heralded single photon emission)” denildiğinde kastedilen tam olarak budur.

İki boyutlu geçiş metali dikalkojenitleri (TMD), hBN ve perovskit tabanlı tek foton kaynakları ise, entegre fotonik platformlar açısından büyük avantajlar sunsa da, spektral kararsızlık ve sınırlı ayırt edilemezlik gibi sorunlar bu sistemlerin performansını kısıtlamaktadır. Bu karşılaştırma, uygulamaya özgü gereksinimlerin tek-foton kaynağı seçiminde belirleyici olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Tek-foton kaynaklarının parlaklık, saflık ve entegrasyon açısından karşılaştırılması

Tek Foton Kaynakları	Parlaklık	Saflık	Ayırt Edilemezlik	Entegrasyon	Zorluk
Deterministik	Yüksek	Orta	Yüksek	İyi	Fabrikasyon
Haberci (Heralded)	Orta	Çok yüksek	Orta	Mükemmel	Düşük parlaklık
TMD/hBN/Perovskit	Orta	Orta	Düşük-Orta	Çok iyi	Spektral kararsızlık

Tablo 3’te, tek-foton kaynakları parlaklık, tek-foton saflığı $g^2(0)$, ayırt edilemezlik, çalışma sıcaklığı ve uygulama alanları açısından karşılaştırılmaktadır. Kuantum nokta tabanlı deterministik kaynaklar, çok yüksek parlaklık ve yüksek ayırt edilemezlik sunmaları nedeniyle fotonik kuantum hesaplama uygulamaları için öne çıkmakta, ancak kriyojenik çalışma gereksinimleri önemli bir sınırlama oluşturmaktadır. NV ve SIV gibi renk merkezleri oda sıcaklığında çalışabilmeleri sayesinde sensör uygulamaları ve kuantum anahtar dağıtımı için cazip bir alternatif sunarken, ayırt edilemezliklerinin görece sınırlı olması bu sistemlerin ölçeklenebilirliğini kısıtlamaktadır. SPDC tabanlı haberci (heralded) tek-foton kaynakları ise yüksek saflık değerlerine rağmen düşük parlaklıkları nedeniyle deterministik kuantum bilgi işleme uygulamalarında sınırlı kalmaktadır.

Tablo 3. Tek-foton kaynaklarının performans, çalışma koşulları ve uygulama alanları açısından karşılaştırılması

Tek-Foton Kaynağı	Parlaklık	Saflık ($g^2(0)$)	Ayırt Edilemezlik	Çalışma Sıcaklığı	Üretim Prensibi	Uygulama Alanı
Kuantum Noktaları (Deterministik)	Çok yüksek	0.01–0.1	%70–99	Kriyogenik	Uyarılmış eksiton bozunumu	Fotonik kuantum hesaplama
NV/SIV Merkezleri (Renk Merkezleri)	Orta	0.05–0.2	%30–70	Oda sıcaklığı	Kusur merkezlerinden foton yayını	Sensörler + QKD
SPDC (Haberci-Heralded)	Düşük–Orta	<0.05	%40–80	Oda sıcaklığı	Parametrik aşağı dönüşüm	QKD, dolanık foton üretimi, temel kuantum optik deneyleri

Tablo 4’te, tek-foton kaynaklarının karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan temel performans metrikleri ve bu metrikler için hedeflenen ideal değerler özetlenmiştir. İkinci mertebeden korelasyon fonksiyonu $g^2(0)$, tek-foton saflığının temel göstergesi olarak öne çıkarken, ayırt edilemezlik HOM girişimi yoluyla değerlendirilir. Parlaklık ve tek-mod çıkışı, pratik uygulamalarda kaynak verimliliğini ve entegrasyon uyumluluğunu belirleyen kritik parametrelerdir. Spektral kararlılık ise özellikle ölçeklenebilir kuantum ağları ve çok-foton girişim deneyleri açısından belirleyici bir rol oynamaktadır.

Tablo 4. Tek-foton kaynaklarının karakterizasyonunda kullanılan temel performans metrikleri ve ideal hedef değerler

Performans Parametresi	Açıklama	Ölçüm Yöntemi	İdeal Değer
$g^2(0)$	Çok-foton olasılığının göstergesi	HBT ölçümü	$g^2(0) \ll 0.1$
Ayırt Edilemezlik	Fotonların aynı kuantum durumda olma oranı	HOM girişimi	%80–100
Parlaklık	Tetikleme başına foton üretimi	Sayım oranı	%50–100
Tek-Mod Çıkışı	Çıkışın fiber veya dalga kılavuzuyla uyumu	Kuplaj verimi	%80 üzeri
Spektral Kararlılık	Dalga boyu kayma miktarı	Zaman-serisi spektroskopisi	Minimum spektral kayma

4. TEK-FOTON DEDEKTÖRLERİ

Tek-foton algılama teknolojisinin tarihsel gelişimi, yarı iletken tabanlı aygıtlarda gerçekleştirilen bir dizi önemli yenilikle şekillenmiştir. Fotodiyotlar, çıkış fotodiyotlar (APD'ler) ve tek-foton çıkış diyotlarının (SPAD'ler) erken dönem gelişimi, 1940'lı yıllarda p-n eklem teknolojisindeki ilerlemeler ve mikrop plazma oluşumlarının incelenmesiyle tetiklenmiştir. Bu çalışmalar, tek-foton duyarlılığı için gerekli olan çıkış kazanç mekanizmalarının gözlemlenmesini ve etkin biçimde kullanılmasını mümkün kılmıştır (Fisher, 2018).

Günümüzde kullanılan başlıca tek-foton dedektörleri arasında foton çoğaltıcı tüpler (PMT'ler), APD'ler ve süperiletken tek-foton dedektörleri (SSPD'ler) yer almaktadır. APD'ler özellikle yakın kızılötesi bölgede yüksek algılama verimliliği sunarken, SSPD'ler astronomi ve kuantum iletişim gibi alanlarda üstün zamanlama çözünürlüğü ve enerji algılama yetenekleri sağlamaktadır (Zhang vd., 2008).

Tek-foton dedektörleri, kuantum optiği ve kuantum bilgi teknolojilerinin temel yapı taşlarından biridir. Bu aygıtlar, tekil fotonların varlığını güvenilir biçimde tespit etmek amacıyla geliştirilmiştir. Dedektörlerin performansı; kuantum verimliliği, zaman çözünürlüğü, karanlık sayım oranı ve spektral kapsama alanı gibi temel parametreler üzerinden değerlendirilir. Aşağıda, farklı dedektör türleri ile bunların avantajları ve sınırlılıkları ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

4.1. Fotokatodlar ve Fotoçoğaltıcı Tüpler (PMT)

Fotoçoğaltıcı tüpler (Photomultiplier Tubes, PMT), tek-foton algılaması için geliştirilen ilk nesil dedektörlerdir. Bu sistemler, fotokatoda çarpan tek bir fotonun elektron salınımına yol açması prensibiyle çalışır. Sonrasında elektronlar dinodlar boyunca çoğaltılarak makroskopik bir akıma dönüştürülür. PMT'ler yüksek kazanç ve hızlı tepki süreleriyle bilinir (Suyama, 2007). Ancak düşük kuantum verimliliği, manyetik alanlara duyarlılıkları ve hacimli yapıları sebebiyle günümüzde sınırlı kullanım alanına sahiptir.

4.2. Yarıiletken Tabanlı Dedektörler (APD)

Çıkış fotodiyotlar (Avalanche Photodiode, APD), yarıiletken malzemeler kullanılarak geliştirilen ve tek-foton algılamaya olanak tanıyan dedektörlerdir. Bir fotonun p-n birleşiminde soğurulmasıyla bir elektron-delik çifti oluşur; bu taşıyıcılar yüksek elektrik alanı altında ivmelenerek çarpışma iyonizasyonu yoluyla çoğaltılır ve sonuçta ölçülebilir bir akım sinyali elde edilir. Silisyum tabanlı APD'ler (Si-APD'ler) görünür bölgede yüksek algılama verimliliği sunarken (Rawat vd., 2022), InGaAs-APD'ler telekomünikasyon dalga boylarında tercih edilmektedir. APD'lerin başlıca avantajları arasında kompakt boyut, görece düşük maliyet ve entegrasyon kolaylığı yer alırken, sınırlı zaman çözünürlüğü ve nispeten yüksek karanlık sayım oranı önemli dezavantajlar olarak öne çıkmaktadır (Pauchard vd., 2002).

4.3. Süperiletken Nanotel Tek-Foton Dedektörleri (SNSPDs)

Süperiletken nanotel tek-foton dedektörleri (Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors, SNSPDs), günümüzde en yüksek performansa sahip foton dedektörleri arasında kabul edilmektedir. Çalışma prensibi, süperiletken telden geçen akımın, tek bir foton absorbe edildiğinde yerel olarak süperiletkenliğin bozulması ve akımın ölçülebilir bir voltaj darbesine dönüşmesine dayanır. SNSPD'ler; %95'in üzerinde kuantum verimliliği, düşük karanlık sayım oranı ve ps mertebesinde zaman çözünürlüğü ile öne çıkmaktadır (You, 2020). Bununla birlikte kriyojenik soğutma gerektirmeleri, pratik kullanım açısından en büyük sınırlılıklarıdır.

4.4. Transition-Edge Sensors (TES)

Transition-Edge Sensörler (TES), süperiletken malzemelerin faz geçiş sıcaklığına çok yakın sıcaklıklarda çalıştırılması prensibine dayanır. Tek bir fotonun soğurulmasıyla, süperiletken durumdan normal iletken duruma bir geçiş meydana gelir ve bu durumdaki direnç değişimi son derece yüksek hassasiyetle ölçülebilir. TES dedektörlerinin en ayırt edici özelliği, algılanan fotonun enerjisini doğrudan ölçebilme kapasitesidir (Palosaari, 2009). Bu sayede yalnızca foton sayısı değil, aynı zamanda fotonun dalga boyuna ilişkin bilgi de elde edilebilir. Ancak TES tabanlı sistemler kriyojenik çalışma koşulları gerektirir ve zaman çözünürlükleri, süperiletken nanotel tek-foton dedektörlerine (SNSPD'lere) kıyasla daha sınırlıdır.

4.5. Karşılaştırmalı Değerlendirme

Tek-foton dedektörlerinin seçimi, uygulama alanına bağlıdır. PMT'ler tarihi öneme sahip olmakla birlikte günümüzde daha çok laboratuvar uygulamalarıyla sınırlıdır. APD'ler entegrasyon kolaylıkları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir, özellikle telekom dalga boylarında InGaAs-APD'ler standart hâle gelmiştir. SNSPD'ler, kuantum iletişim ve kuantum bilgi işlemde en güvenilir seçenek olarak öne çıkarken, TES dedektörleri enerji çözünürlüğü gerektiren hassas ölçümler için idealdir. Sonuç olarak, dedektör teknolojilerindeki ilerlemeler tek-foton kaynaklarının performansı ile birlikte kuantum teknolojilerinin gelişimini doğrudan şekillendirmektedir.

5. TEK-FOTONLARIN KUANTUM TEKNOLOJİLERİNDEKİ UYGULAMALARI

Tek-foton kaynakları ve dedektörleri, kuantum teknolojilerinin pratik uygulamalarının merkezinde yer almaktadır. Bu uygulamalar, güvenli haberleşmeden kuantum hesaplamaya, hassas ölçüm tekniklerinden geleceğin kuantum internetine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır.

5.1. Kuantum Kriptografi ve Güvenli Haberleşme

Kuantum kriptografi, özellikle kuantum anahtar dağıtımı (Quantum Key Distribution, QKD) protokolleri aracılığıyla tek-fotonların önemini açıkça ortaya koymaktadır (Trizna & Ozols, 2018). BB84 protokolü (1984 yılında Charles Bennett ve Gilles Brassard Bennett, (Bennett & Brassard, 2014)) tarafından önerilen, -iki tarafın- Alice ve Bob- kuantum mekanik ilkeleri kullanarak gizli bir anahtar paylaşmasını sağlayan bir protokoldür) gibi yöntemlerde, her bir foton bir kuantum biti (kübit) taşır ve bu kübitler farklı kutuplaşma bazlarında hazırlanır. Bir dinleyicinin bu fotonları ölçme girişimi, Heisenberg'in belirsizlik ilkesi nedeniyle tespit

edilebilir. Bu sayede, klasik şifreleme yöntemlerinden farklı olarak, kuantum kriptografi mutlak güvenlik vadetmektedir. Günümüzde QKD, fiber optik ağlarda ve uydu tabanlı haberleşme sistemlerinde başarılı bir şekilde gösterilmiştir.

5.2. Kuantum İnternet ve Haberleşme Ağları

Kuantum internet, kuantum bilgiyi uzun mesafelere taşımak için tek-fotonların kullanıldığı küresel bir ağ vizyonudur. Kuantum interneti, klasik internetin bir uzantısı değil, bambaşka prensiplere dayalı bir iletişim altyapısıdır. Temelinde, kuantum mekaniğinin süperpozisyon ve dolanıklık gibi ilkeleri yer alır. Tek-foton kaynakları ve dedektörleri, bu ağların yapıtaşlarıdır. Klasik internet bilgi paketlerini elektriksel sinyaller veya elektromanyetik dalgalar ile taşırken, kuantum internet tekil fotonlar aracılığıyla bilgi aktarır (Zhang vd., 2025). Bunun en önemli sonucu, kuantum kriptografi sayesinde teorik olarak kırılmaz güvenli iletişim imkânı doğmasıdır. Böylece kuantum internet, yalnızca hız değil, aynı zamanda mutlak güvenlik vaat eden bir paradigma değişimi sunmaktadır.

Kuantum internetin kurulabilmesi için üç ana bileşene ihtiyaç vardır. İlki, tek-foton kaynaklarıdır; bunlar, birbirinden ayırt edilemeyen, saf ve kontrol edilebilir foton üretimi sağlar. İkincisi, tek-foton dedektörleridir; bu dedektörler, fotonları yüksek hassasiyetle tespit ederek bilgi akışını güvenilir hâle getirir. Üçüncüsü ise kuantum repeater'lardır. Fiber optik kablolar ve serbest uzay bağlantıları boyunca taşınan fotonlar, çevresel kayıplardan etkilenir. Kuantum repeater'lar, dolanıklık paylaşımı ve kuantum hafıza teknikleri ile bu kayıpları telafi ederek ağın mesafe ölçeklenebilirliğini mümkün kılar. Bu üçlü altyapı, kuantum internetin işlevsel hale gelmesinde kilit rol oynamaktadır.

Kuantum internet vizyonu, günümüzde yalnızca teorik bir fikir olmaktan çıkmış, deneysel olarak da doğrulanmaya başlanmıştır. 2017 yılında Çin'in *Micius* uydusu kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, kıtalararası kuantum anahtar dağıtımı başarıyla yapılmıştır (Liao vd., 2018). Avrupa Birliği ise Quantum Internet Alliance (QIA) gibi projelerle, kıta genelinde kuantum iletişim ağlarını hayata geçirmeyi hedeflemektedir. ABD'deki DARPA ve NSF destekli girişimler de, kara ve uydu tabanlı kuantum ağ prototiplerini geliştirmektedir. Tüm bu çalışmalar, kuantum internetin önümüzdeki on yıl içinde bölgesel ölçekten küresel ölçeğe taşınabileceğini göstermektedir.

Kuantum internetin gerçekleştirilmesi, günümüzde hem teknik hem de kuramsal düzeyde aşılması gereken ciddi zorluklar içermektedir. Öncelikle, foton kayıpları fiber optik hatlarda ve serbest uzay iletiminde temel bir engeldir. Tek-fotonlar çevresel gürültü ve absorpsiyon nedeniyle uzun mesafelerde kolayca yok olur. İkinci olarak, kuantum repeater teknolojisi henüz erken aşamadır; kuantum hafızalarının kararlılığı ve dolanıklığın uzun mesafelere aktarılması günümüzde sınırlı performans göstermektedir. Üçüncü zorluk, dedektör verimliliği ve karanlık sayımların azaltılmasıdır. Mevcut tek-foton dedektörleri yüksek hassasiyet sunsa da mutlak sifıra yakın sıcaklıklarda çalıştırılma gereksinimi yaygın uygulamalar için ciddi bir kısıt oluşturmaktadır (Hadfield, 2009). Ayrıca, küresel standardizasyon ve altyapı entegrasyonu da başka bir zorluk alanıdır; farklı ülkeler ve araştırma merkezleri tarafından geliştirilen kuantum iletişim protokollerinin uyumlu hâle getirilmesi gerekmektedir.

Kuantum internet, günümüzde henüz deneysel aşamada olsa da gelecek için büyük vaatler taşımaktadır. Önümüzdeki on yıl içinde, bölgesel ölçekte çalışan kuantum iletişim ağlarının kurulması ve bunların küresel ölçekte birbirine bağlanması beklenmektedir. Bu süreçte, tek-foton kaynakları daha kararlı, verimli ve oda sıcaklığında çalışabilir hâle getirilmelidir. Benzer şekilde, tek-foton dedektörlerinde daha düşük hata oranları, daha yüksek zaman çözünürlüğü ve entegre sistemlerle uyumluluk sağlanması kritik olacaktır. Bunun yanında, kuantum

repeater'ların geliştirilmesi kuantum internetin ölçeklenebilirliği için belirleyici olacaktır. Daha uzun ömürlü kuantum hafızaları ve dolanıklık dağıtımında yüksek verimlilik sağlayacak teknikler, kıtalararası ağların kurulmasına zemin hazırlayacaktır. Ayrıca, uydu tabanlı kuantum iletişim sistemleri ile fiber optik altyapının birleşimi, hibrit bir küresel kuantum internet için en güçlü adaydır.

Son olarak, kuantum internetin yalnızca teknik bir atılım değil, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve politik bir dönüşüm getireceği öngörülmektedir. Kuantum kriptografi sayesinde mutlak güvenlik, devletler arası iletişimden finansal sistemlere kadar geniş bir alanda uygulanabilecektir. Dolayısıyla, kuantum internet vizyonu yalnızca bilimsel bir hedef değil, aynı zamanda geleceğin toplumlarını şekillendirecek bir paradigma değişimi olarak değerlendirilmektedir.

5.3. Kuantum Hesaplama

Fotonlar, kuantum bilgisayar mimarilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Fotonik kuantum bilgisayarlar, kuantum kapılarının uygulanmasında tek-foton girişiminden yararlanır. Özellikle lineer optik kuantum hesaplama (LOQC) mimarisi, tek-fotonların girişim desenleri ve ayırt edilemezlik özellikleri üzerine kuruludur (Kwon vd., 2024). Bu yaklaşım, ölçeklenebilirlik ve düşük koherans kaybı (decoherence) avantajları ile dikkat çekmektedir. Google, Xanadu (<https://www.xanadu.ai/photronics>, t.y.), ve diğer araştırma grupları, fotonik kuantum işlemciler üzerinde yoğun çalışmalar yürütmektedir.

5.4. Metroloji ve Hassas Ölçümler

Tek-foton teknolojileri yalnızca bilgi işleme ile sınırlı değildir. Yüksek hassasiyet gerektiren ölçüm ve görüntüleme uygulamalarında da kritik roller üstlenmektedir. Astronomide zayıf ışık kaynaklarının tespiti, biyomedikal görüntülemede düşük ışık koşullarında doku analizleri ve uçuş süresi (time-of-flight) ölçümleri tek-foton dedektörleri ile mümkün olmaktadır. Ayrıca, kuantum metroloji alanında tek-foton tabanlı girişim teknikleri, klasik sınırların ötesinde hassasiyet sunmaktadır.

Sonuç olarak, tek-fotonların uygulama alanları giderek genişlemekte ve her biri kuantum teknolojilerinin farklı bir yönünü güçlendirmektedir. Güvenli haberleşme, küresel kuantum internet, kuantum bilgisayarlar ve hassas ölçümler, tek-fotonların hem bilimsel hem de teknolojik açıdan stratejik değerini açıkça ortaya koymaktadır.

6. TEKNİK ZORLUKLAR VE AÇIK PROBLEMLER

Bu bölümde ele alınan konular doğrultusunda, tek-foton kaynakları ve dedektörlerinde kayda değer ilerlemeler sağlanmış olsa da, günümüzde hâlâ aşılması gereken önemli teknik sınırlılıklar mevcuttur. Bunların başında *deterministik tek-foton* üretimi gelmektedir. SPDC gibi olasılıksal yöntemler birden fazla foton üretme riski taşıırken, kuantum noktaları ve kusur merkezleri ise yüksek saflıkta fakat istikrarlı üretim konusunda sorunlarla karşılaşmaktadır.

Bir diğer problem, foton kayıpları ve kuplaj verimliliğidir. Üretilen fotonların optik fiberlere veya entegre devrelere etkin biçimde aktarılması, kuantum iletişim sistemlerinin güvenilirliği için kritik öneme sahiptir. Yüksek verimlilik hedeflenirken, optik elemanlardan kaynaklanan kayıplar performansı sınırlamaktadır.

Ayrıca, soğutma gereksinimleri de büyük bir engel oluşturmaktadır. SNSPD ve TES gibi yüksek hassasiyetli dedektörler kriyojenik koşullar altında çalışmaktadır. Bu da maliyetleri artırmakta ve sistemlerin taşınabilirliğini zorlaştırmaktadır.

Son olarak, ölçeklenebilirlik ve maliyet problemleri de dikkate değerdir. Tek-foton teknolojilerinin laboratuvar ölçeğinden ticari uygulamalara geçebilmesi için, hem malzeme sentezi hem de cihaz üretimi süreçlerinin daha ucuz, hızlı ve kararlı hâle getirilmesi gerekmektedir.

7. DİSİPLİNLERARASI ETKİLER

Tek-foton teknolojileri yalnızca kuantum bilgi işleme ve haberleşme ile sınırlı değildir. Biyomedikal görüntüleme alanında, düşük ışık koşullarında doku incelemeleri tek-foton dedektörleri ile mümkün hale gelmiştir. Özellikle “*uçuş süresi*” yöntemi kullanılarak hücre içi süreçlerin yüksek çözünürlükte gözlemlenmesi sağlanmaktadır.

Astronomi alanında, tek-foton sayımı teknikleri uzak galaksilerden gelen zayıf ışık sinyallerinin tespitinde kullanılmaktadır. Bu yöntemler sayesinde, evrenin erken dönemine ait kozmolojik verilerin elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Ayrıca, uzay tabanlı kuantum iletişim projeleri de büyük önem taşımaktadır. Çin’in *Micius* uydusu ile gerçekleştirilen deneyler, tek-fotonların kıtalararası güvenli haberleşmede kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Bu deneyler, gelecekte küresel bir kuantum internetin kurulabileceğinin güçlü göstergelerindendir.

Son olarak, tek-foton teknolojileri yapay zekâ ile birleşen fotonik veri işleme sistemlerinde de rol oynamaya başlamıştır. Fotonik entegre devreler üzerinde çalışan yapay zekâ algoritmaları, veri işleme hızlarını artırmakta ve enerji verimliliği sağlamaktadır.

SONUÇ

Tek-foton kaynakları ve dedektörleri, kuantum teknolojilerinin gelişiminde yalnızca teknik bileşenler değil, aynı zamanda bu alanın yönünü belirleyen stratejik unsurlar olarak ortaya çıkmaktadır. Bugüne kadar yapılan araştırmalar, tek-fotonların yalnızca kuantum mekaniğinin temel ilkelerinin test edilmesi için değil, aynı zamanda güvenli iletişim, bilgi işleme ve hassas ölçümler gibi pratik uygulamalar için de vazgeçilmez olduğunu göstermiştir.

Son yirmi yılda yaşanan ilerlemeler sayesinde, kuantum noktaları, kusur merkezleri, iki boyutlu malzemeler, perovskitler ve Rydberg eksitonları gibi farklı platformlarda tek-foton emisyonu başarıyla gösterilmiştir. Benzer şekilde, süperiletken nanotel dedektörleri (SNSPD) ve Transition-Edge Sensor (TES) gibi yüksek performanslı sistemler, tek-fotonların güvenilir biçimde algılanmasını mümkün kılmıştır. Ancak, her bir yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları bulunduğundan, “ideal” bir tek-foton kaynağı veya dedektörü henüz tam anlamıyla hayata geçirilememiştir.

Gelecek araştırmaların en önemli odak noktalarından biri, oda sıcaklığında çalışabilen, yüksek verimlilik ve ayırt edilemezlik sağlayan sistemlerin geliştirilmesi olacaktır. Böyle bir başarı, kuantum teknolojilerinin laboratuvar ölçeğinden çıkarak günlük yaşamda kullanılabilecek ticari ürünlere dönüşmesi için kritik önemdedir. Özellikle nanofotonik yapılar ve fotonik entegre devreler bu süreçte anahtar rol oynayacaktır.

Bir diğer önemli yönelim, küresel kuantum internetin inşasıdır. Uydular, kuantum repeater'lar ve fiber optik ağlar aracılığıyla tek-foton tabanlı iletişim altyapıları kurulmaktadır. Çin'in Micius uydusu ile geręekleřtirilen deneyler ve Avrupa'daki kuantum ağ projeleri, bu hedefin yalnızca teorik bir vizyon olmadığını, aksine pratik olarak adım adım geręekleřtięini ortaya koymaktadır.

Tek-foton teknolojilerinin disiplinlerarası etkileri de dikkate değerlidir. Biyomedikal görüntülemekten astronomiye, yapay zekâ destekli fotonik veri işlemeye kadar geniş bir alanda yeni ufuklar açılmaktadır. Bu durum, tek-foton araştırmalarının yalnızca fizik ve mühendislikle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda yaşam bilimleri ve bilgi teknolojileri gibi farklı alanlara da derin katkılar sunduğunu göstermektedir.

Son olarak, tek-foton tabanlı teknolojilerin etik ve stratejik boyutları da göz ardı edilmemelidir. Kuantum kriptografinin sunduğu mutlak güvenlik, devletler arası güç dengelerinde yeni tartişmaları beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, tek-foton araştırmalarının yalnızca bilimsel değil, aynı zamanda toplumsal ve politik etkilerinin de olduğu açıktır.

Özetle, tek-foton kaynakları ve dedektörleri üzerine yapılan çalışmaların önümüzdeki yıllarda daha da ivme kazanması beklenmektedir. Bu süreçte disiplinlerarası iş birlikleri, malzeme bilimi ile kuantum optiği arasındaki sınırları belirsizleştirecek ve yeni teknolojik ufukların açılmasına zemin hazırlayacaktır. Bu bağlamda, tek-foton kaynakları ve dedektörleri, kuantum teknolojilerinin olgunlaşma sürecinde belirleyici bir rol üstlenmeye devam edecektir.

KAYNAKÇA

- Barclay, P. E., Fu, K.-M. C., Santori, C., & Beausoleil, R. G. (2009). Chip-based microcavities coupled to nitrogen-vacancy centers in single crystal diamond. *Applied Physics Letters*, 95(19).
- Berktaş, Z., Yıldız, M., Seven, E., Oz Orhan, E., & Altındal, Ş. (2022). PEI N-doped graphene quantum dots/p-type silicon Schottky diode. *FlatChem*, 36(August). <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2022.100436>
- Beveratos, A., Brouri, R., Gacoin, T., Villing, A., Poizat, J.-P., & Grangier, P. (2002). Single photon quantum cryptography. *Physical review letters*, 89(18), 187901.
- Boissier Sébastien. (t.y.). <https://www.quandela.com/resources/blog/single-photon-sources-part-3/>.
- Brańczyk, A. M. (2017). Hong-ou-mandel interference. *arXiv preprint arXiv:1711.00080*.
- Brokmann, X., Giacobino, E., Dahan, M., & Hermier, J.-P. (2004). Highly efficient triggered emission of single photons by colloidal CdSe/ZnS nanocrystals. *Applied Physics Letters*, 85(5), 712-714.
- Brouri, R., Beveratos, A., Poizat, J.-P., & Grangier, P. (2000). Photon antibunching in the fluorescence of individual color centers in diamond. *Optics letters*, 25(17), 1294-1296.
- Ding, X., He, Y., Duan, Z.-C., Gregersen, N., Chen, M.-C., Unsleber, S., Maier, S., Schneider, C., Kamp, M., & Höfling, S. (2016). On-demand single photons with high extraction efficiency and near-unity indistinguishability from a resonantly driven quantum dot in a micropillar. *Physical review letters*, 116(2), 020401.
- Eisaman, M. D., Fan, J., Migdall, A., & Polyakov, S. V. (2011). Invited review article: Single-photon sources and detectors. *Review of scientific instruments*, 82(7).
- Gourdon, C., & Lavallard, P. (1989). Exciton transfer between localized states in CdS1–xSex alloys. *physica status solidi (b)*, 153(2), 641-652.
- Grangier, P., Roger, G., & Aspect, A. (1986). Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences. *Europhysics Letters*, 1(4), 173.
- Grangier, P., Sanders, B., & Vuckovic, J. (2004). Focus on single photons on demand. *İçinde New Journal of Physics* (C. 6, Sayı 1, s. E04).
- Kim, J., Benson, O., Kan, H., & Yamamoto, Y. (1999). A single-photon turnstile device. *nature*, 397(6719), 500-503.
- Kurtsiefer, C., Mayer, S., Zarda, P., & Weinfurter, H. (2000). Stable solid-state source of single photons. *Physical review letters*, 85(2), 290.
- Leonard, D., Krishnamurthy, M., Reaves, Cm., DenBaars, S. P., & Petroff, P. M. (1993). Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. *Applied Physics Letters*, 63(23), 3203-3205.

- Luo, C.-W., Reimann, K., Woerner, M., Elsaesser, T., Hey, R., & Ploog, K. H. (2003). Rabi flopping of intersubband transitions in GaAs/AlGaAs MQWs. *Quantum Electronics and Laser Science Conference, QFD4*.
- Martin, Z. O., Senichev, A., Peana, S., Lawrie, B. J., Lagutchev, A. S., Boltasseva, A., & Shalaev, V. M. (2023). Photophysics of Intrinsic Single-Photon Emitters in Silicon Nitride at Low Temperatures. *Advanced Quantum Technologies*, 6(11), 2300099.
- Muller, A., Fang, W., Lawall, J., & Solomon, G. S. (2009). Creating Polarization-Entangled Photon Pairs from a Semiconductor Quantum Dot<? format=?> Using the Optical Stark Effect. *Physical review letters*, 103(21), 217402.
- Orhan, E., Anter, A., Ulusoy, M., Polat, B., Okuyucu, C., Yıldız, M., & Altındal, Ş. (2023). Effect of Gadolinium on Electrical Properties of Polyethyleneimine Functionalized and Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dot Nanocomposite Based Diode. *Advanced Electronic Materials*. <https://doi.org/10.1002/aelm.202300261>
- Patel, R. B., Bennett, A. J., Farrer, I., Nicoll, C. A., Ritchie, D. A., & Shields, A. J. (2010). Two-photon interference of the emission from electrically tunable remote quantum dots. *Nature photonics*, 4(9), 632-635.
- Pearsall, T. P. (2019). Quantum photonics. (*No Title*).
- Pezzagna, S., Rogalla, D., Wildanger, D., Meijer, J., & Zaitsev, A. (2011). Creation and nature of optical centres in diamond for single-photon emission—overview and critical remarks. *New Journal of Physics*, 13(3), 035024.
- Qiao, C.-K., Wei, J.-W., & Chen, L. (2021). An overview of the compton scattering calculation. *Crystals*, 11(5), 525.
- Sanders, B., Vuckovic, J., & Grangier, P. (2005). Single photons on demand. *Europhysics news*, 36(2), 56-58.
- Santori, C., Fattal, D., Vučković, J., Solomon, G. S., & Yamamoto, Y. (2002). Indistinguishable photons from a single-photon device. *nature*, 419(6907), 594-597.
- Shields, A. J. (2007). Semiconductor quantum light sources. *Nature photonics*, 1(4), 215-223.
- Tran, T. T., Elbadawi, C., Totonjian, D., Lobo, C. J., Grosso, G., Moon, H., Englund, D. R., Ford, M. J., Aharonovich, I., & Toth, M. (2016). Robust multicolor single photon emission from point defects in hexagonal boron nitride. *ACS nano*, 10(8), 7331-7338.
- Ward, M. B., Farrow, T., See, P., Yuan, Z. L., Karimov, O. Z., Bennett, A. J., Shields, A. J., Atkinson, P., Cooper, K., & Ritchie, D. A. (2007). Electrically driven telecommunication wavelength single-photon source. *Applied Physics Letters*, 90(6).
- Wu, E., Rabeau, J. R., Roger, G., Treussart, F., Zeng, H., Grangier, P., Praver, S., & Roch, J.-F. (2007). Room temperature triggered single-photon source in the near infrared. *New Journal of Physics*, 9(12), 434.

BÖLÜM 7

BİYOSENSÖRLER VE TERMAL SENSÖRLERDE ÇOK ALANLI YAKLAŞIMLAR

E. Canan GÜNAY DEMİREL¹, Özlem COŞKUN²

¹ Dr. Öğr. Üyesi Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu-Elektrik ve Enerji Bölümü 0000-0003-2968-9780

² Doç. Dr. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Tıp Fakültesi- Biyofizik Anabilim Dalı 0000-0002-0741-5001

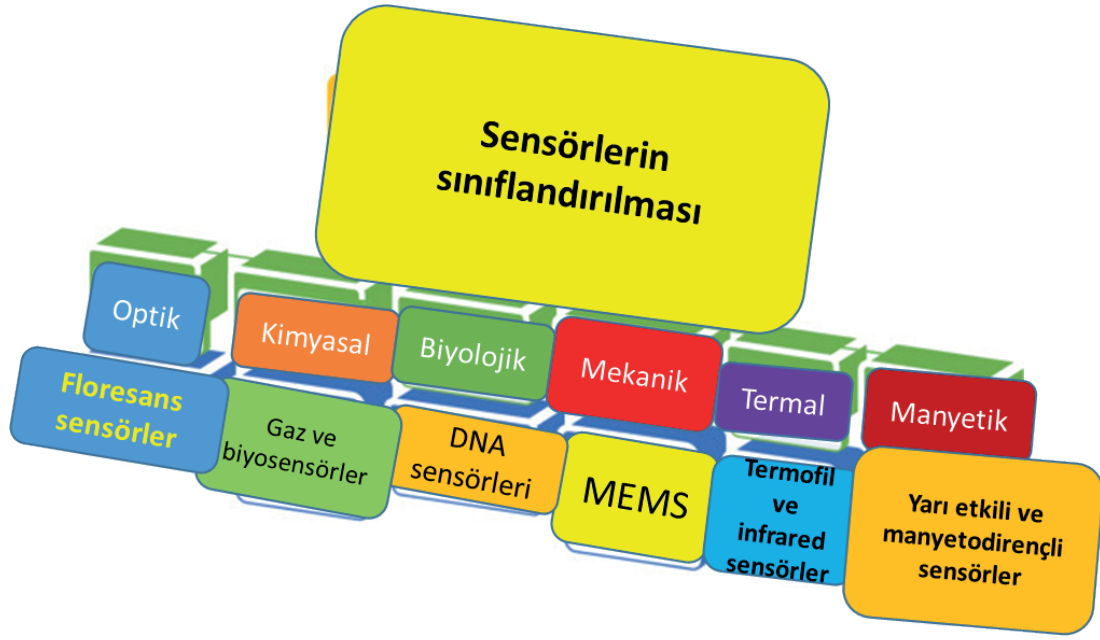
SENSÖRLER

Günümüzde, sosyal yaşamın sürekliliği ve bireylerin günlük ihtiyaçlarının karşılanması, büyük ölçüde bilim ve teknolojinin sunduğu fırsatların etkin bir şekilde kullanılmasına bağlıdır. Bilgisayarlar, fotokopi makineleri, cep telefonları, mikrodalga fırınlar, buzdolapları, klimalar, televizyon uzaktan kumandaları, duman dedektörleri, kızılötesi (IR) termometreler, aydınlatma ve havalandırma sistemlerini kontrol eden cihazlar gibi pek çok alet fiziksel çevreyle etkileşimimizi kolaylaştırmaktadır. Bu uygulamaların çoğu, sensörlerin katkısıyla mümkün olmaktadır.

Sensörler; basınç, sıcaklık, nem, hareket, kuvvet ve akım gibi fiziksel niceliklerdeki değişimleri algılayarak ölçebilen ve analiz edilebilir elektriksel sinyallere dönüştüren cihazlar veya modüller olarak tanımlanır. Dönüştürücüler enerjiyi bir formdan başka bir forma çevirebilen sistemlerdir. Bir ölçüm sisteminin kalbini oluşturan sensörlerin ideal özellikleri; geniş ölçüm aralığı, düşük sürüklenme, kolay kalibrasyon, yüksek hassasiyet, seçicilik, doğrusallık, yüksek çözünürlük, tekrarlanabilirlik ve hızlı tepki süresi olarak sıralanabilir. Genel olarak bir sensör; moleküler tanıma sistemi (reseptör), fizikokimyasal dönüştürücü ve sinyal işlemci biriminden oluşmaktadır. Çevredeki değişiklikleri izlemek ve tespit etmek için kullanılır. Günlük yaşamda sensörlerin yaygın kullanım alanı bulması ise yalnızca bilimsel ve teknolojik uygulamaları geliştirmekle kalmamış, aynı zamanda bireylerin yaşam kalitesi ve alışkanlıkları üzerinde de önemli etkiler yaratmıştır. Biyosensörler ise genellikle analit, biyoreseptör, dönüştürücü, elektronik ve ekran parçalarından oluşur. Analit, bileşenleri algılanan madde olarak tanımlar, reseptörler tarafından algılanır ve elektrik sinyallerine dönüştürülür [1,2].

SENSÖRLERİN SINIFLANDIRILMASI

Biyosensörler, biyolojik tanıma elemanlarının türüne, kullandıkları transdüksiyon mekanizmasına ve uygulama alanlarına göre farklı şekillerde sınıflandırılır.



Şekil 1. Sensörlerin Sınıflandırılması [3].

1-Aktif ve pasif sensörler: Aktif sensörlerin çalışabilmesi için harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Mikrofonlar, termistörler, gerinim ölçerler ile kapasitif ve endüktif sensörler bu gruba örnek olarak verilebilir. Bu tür sensörler literatürde parametrik sensörler olarak adlandırılmaktadır. Öte yandan, pasif sensörler dış enerjiye gereksinim duymadan kendi sinyallerini üretebilmektedir. Termokupllar, piezoelektrik sensörler ve fotodiyotlar bu sınıfa örnek olup, bu tür sensörler kendi kendine enerji üreten sensörler şeklinde tanımlanmaktadır.

2-Temaslı ve temassız sensörler: Temaslı sensörler, örneğin sıcaklık sensörleri, bir uyarana fiziksel temas gerektirirken, temassız sensörler, optik ve manyetik sensörler ve IR termometreler gibi fiziksel temas gerektirmez.

3-Mutlak ve bağıl sensörler: Termistör ve gerinim ölçer gibi mutlak sensörler, bir uyarana mutlak bir ölçekte tepki verir. Bağıl sensörler, sıcaklık farkını ve atmosferik basınca göre ölçülen basıncı ölçen bir termokupl gibi, uyarana sabit veya değişken bir referansa göre algılar.

4-Analog ve dijital sensör: Analog sensör, ölçülen fiziksel niceliği analog bir forma dönüştürür. Termokupllar, direnç sıcaklık dedektörleri (RTD) ve gerinim ölçerler bu analog sensör sınıfına aittir. Dijital sensör, bir darbe biçiminde çıktı üretir. Kodlayıcılar dijital sensör kategorisine aittir.

5-Sinyal algılama prensiplerine göre sensörler; (i) fiziksel, (ii) kimyasal, (iii) termal ve (iv) biyolojik sensörler olmak üzere dört temel grupta sınıflandırılmaktadır.

(i) Fiziksel sensörler: Fiziksel sensörler fiziksel bir niceliği ölçer ve bunu kullanıcı tarafından tanımlanabilen bir sinyale dönüştürür. Bu sensörler kuvvet, ivme, akış hızı, kütle, hacim, yoğunluk ve basınç gibi çevresel değişiklikleri algılayabilir. Fiziksel sensörler, özellikle daha hassas ve

kompakt sensörler geliştirmek için mikro elektromekanik sistem (MEMS) teknolojisinin ilerlemesi ve yeni ölçüm teknolojisinin geliştirilmesiyle birlikte biyomedikal alanda büyük ölçüde kullanılmıştır.

(ii) Kimyasal sensörler: Uluslararası saf ve uygulamalı kimya birliğine (IUPAC) göre, kimyasal sensör, "kimyasal bilgileri belirli bir numune bileşeninin konsantrasyonundan toplam bileşim analizine kadar analitik olarak yararlı bir sinyale dönüştüren bir cihaz" olarak tanımlanır. Kimyasal sensör, gaz veya sıvı fazdaki ilgili kimyasal türlerin aktivitesini veya konsantrasyonunu izlemek için kullanılır. Ayrıca çevre kirliliği izleme, gıda ve ilaç analizi, organofosfor bileşiklerinin analiz izlemesi ve klinik teşhis amaçları için de kullanılabilirler.

(iii) Termal sensörler: Termal sensörler, bir ortamın sıcaklığını ölçmek ve bu bilgiyi sıcaklık değişimlerine bağlı elektronik sinyallere dönüştürmek amacıyla kullanılan cihazlardır. Bu sensörler, girdi olarak ısı enerjisini kullanmakta ve ısı değişimlerine bağlı olarak elektrik sinyalleri üretmektedir. Termal sensörler, sağlık, savunma sanayi ve endüstriyel uygulamalardan tıbbi teşhis ve izlemeye kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin, termal kameralar savaş uçaklarında hedeflerin vücut sıcaklıklarına göre tespit edilmesinde, tıpta ise iç yaralanmaların, iltihaplanmaların ve damar tıkanıklıklarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Termal sensörler, termal enerjinin transferi sırasında oluşan değişimleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçer ve bu ölçümler farklı fiziksel parametreler üzerinden gerçekleştirilir. Örneğin, termokupllar sıcaklık değişimini voltaj farkına göre, direnç sıcaklık dedektörleri (RTD) ise sıcaklık değişimini direnç değişimine göre tanımlar. Ayrıca, farklı uygulama türleri için özel malzeme ve yapıların geliştirilmesi, termal sensörlerin hassasiyetini ve performansını artırmaktadır.

(iv) Biyolojik sensörler: Biyolojik sensörler; antikor–antijen tanıma mekanizmaları, DNA ve RNA etkileşimleri, enzimatik reaksiyonlar veya hücresel iletişim süreçleri gibi biyomoleküler olayların izlenmesine olanak tanıyan sistemlerdir. Bu tür sensörler literatürde kısaca biyosensör olarak adlandırılmaktadır [4,5].

TERMAL SENSÖRLER

Termal sensörler; ısı enerjisinin etkilerini algılamak için kullanılan ve bu açıdan değerlendirilen termal sensörlerin bir parçasıdır. Sıcaklık sensörleri günümüz endüstrisinde birçok alanda kullanılmaktadır. Sıcaklık sensörlerinin kullanım alanları olarak otomobil, sağlık, kimya ve gıda endüstrileri verilebilir. Bir sistemin sıcaklığını belirlemek, sistemin hedefleri ve amaçlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu sensörler termokupl, termistör, entegre devre (IC) ve RTD olarak sıralanabilir [6]. Termal sensörler, basit ev eşyalarından karmaşık teknolojik cihazlara kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır. Ev elektroniğinde, termostatlar ve termometreler gibi yaygın olarak kullanılan sensörlere rastlanabilir. Bunun yanı sıra, kişisel bilgisayarlar veya mikroişlemciler gibi daha karmaşık

sistemlerde de termal sensörler önemli bir rol oynar. Özellikle işlemcilerin güvenilir ve beklenen performans seviyelerinde çalışabilmesi için, çalışma sıcaklıklarının belirlenen aralıkta kalması hayati bir gerekliliktir [7].

Termoelektrik (TE) malzemeler ve sensörler, atık ısıyı kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürerek geleneksel güç üretim yöntemlerine sessiz, basit ve güvenilir bir alternatif sunarak sağlık ve çevre izleme alanında bir sınır olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca üstün stabilite ve uzun ömür sunarak uzun vadeli izleme uygulamaları için idealdir. Dahası, diğer kendi kendine güç sağlayan biyosensörlerle karşılaştırıldığında, TE sensörleri çok çeşitli sıcaklık ve çevre koşullarında çalışabilme yetenekleriyle öne çıkarak sensör çalışması için daha güvenilir ve tutarlı bir güç kaynağı sağlar [8].

BİYOSENSÖRLER

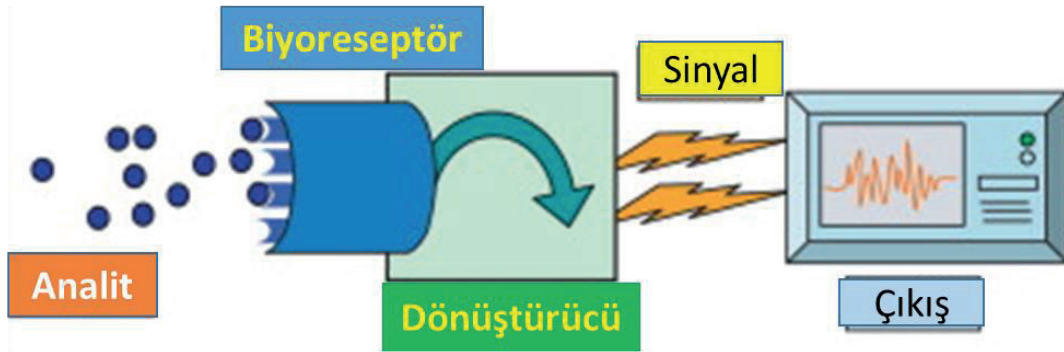
Biyosensörler, analitin varlığını veya aktivitesini, analit ile bağlanarak veya etkileşime girerek sensöre özgüllük sağlayan bir biyomoleküler bileşen kullanarak rapor edebilen bir cihazdır. Kütle, floresans, elektrik yükü veya kırılma indisinde tespit edilebilir bir değişikliğe neden olabilen ve bu etkileşimi uygun bir elektronik sinyale dönüştürebilen bir dönüştürücü elemandan oluşur. Günlük uygulamalara da entegre edilebilen, düşük maliyetli ve yüksek performanslı cihazlar olarak önemli bir potansiyel taşımaktadır. Biyosensörler temelde iki ana bileşenden oluşur: biyoreseptör ve dönüştürücü. Biyoreseptör, hedef analiti seçici olarak tanıyan biyolojik bir unsur iken; dönüştürücü, bu tanıma olayını ölçülebilir bir sinyale çeviren fizikokimyasal dedektör bileşenidir. Biyosensörler hem hıza hem de yüksek hassasiyete sahiptirler. Enzimler, antikorlar, reseptörler, organeller, mikroorganizmalar ile bitki ve hayvan hücreleri/dokuları gibi biyomoleküller, biyolojik algılama elemanları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hepsinin farklı bileşenleri ve kullanım alanları olabilir. Biyosensörler özellikle hastalıkların erken teşhisinde, çevre ve tarımda, ilaç endüstrisinde, savunma sanayinde ve gıda endüstrisinde kullanılmaktadır. Özellikle elektrokimyasal empedans spektroskopisi kullanılarak onkolojik hastalıkların tedavisinde, çevre kirleticilerinden biri olan pestisitlerin tayininde, glutamatın potansiyometrik analizinde, kimyasal savaş ajanlarının ve toksik maddelerin tespitinde kullanılmaktadır. Ayrıca gelecekte biyosensörlerin kullanım alanlarının yaygınlaşacağı ve hastalıkların erken teşhisinde daha yaygın olarak kullanılacağı beklenmektedir. Bu noktada biyosensörlerin kullanımı dünya çapında artmış ve bilim insanlarının ilgisini çekmiştir [9-11].

BİYOSENSÖRLERİN YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Biyosensörler, temel olarak bir biyo-tanılma elemanı (örneğin enzim, nükleik asit veya hücre), bir sinyal dönüştürücü (elektrokimyasal, optik, kütle tabanlı ya da kalorimetrik) ve bir sinyal işleme ünitesinden oluşan cihazlardır. Bu sistemler, biyolojik veya kimyasal analizlerde hedef moleküllerin

seçici ve hassas bir şekilde belirlenmesini sağlar. Biyosensörün elektronik bileşenleri, sinyallerin analog formdan dijital forma dönüştürülmesi ve yükseltilmesi gibi sinyal koşullandırma işlemlerini gerçekleştiren karmaşık devrelerden oluşur. İşlenen bu sinyaller, daha sonra biyosensörün ekran birimi tarafından ölçülür. Ekran, biyosensörün ürettiği sonuçları sunan, donanım ve yazılımın birlikte çalıştığı bir sistemdir. Ekrandaki çıkış sinyali, son kullanıcının gereksinimlerine bağlı olarak sayısal, grafik, tablo veya resim olabilir.

Biyosensörler, biyoreseptör tiplerine göre enzimatik biyosensörler, protein reseptör temelli biyosensörler, immünosensörler, DNA/aptamer bazlı biyosensörler ve tam hücre biyosensörleri şeklinde sınıflandırılabilir. Biyosensörlerin tasarımı, üretimi ve optimizasyonu, kimya, fizik, mühendislik, biyoloji, tıp ve eczacılık gibi çok disiplinli alanların iş birliği ile mümkün olmuştur. Günümüzde ise mikroakışkan sistemler ve nanoteknoloji gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu, biyosensör alanında hızlı ve sürekli bir gelişimi desteklemektedir. Biyoreseptörler, analiz edilecek maddeyi (analiti) özel olarak tanıyan moleküllerdir. Bunların yapıları enzimler, proteinler, antikolar, dokular, hücreler, nükleik asitler ve mikroorganizmalardan oluşabilir. Sinyal dönüştürücü, biyoreseptörün analit ile reaksiyonu sonucunda oluşan moleküler sinyali ölçülebilen, görüntülenebilen ve analiz edilebilen bir elektrik veya dijital sinyale dönüştüren yapılardır. Biyoreseptörün analit ile reaksiyonu sonucunda oluşan sinyal üretme süreci (ışık, sıcaklık, pH, yük veya kütle değişimi vb.) olan “biyotanıma” işlemi sonucunda analitin konsantrasyonuyla orantılı sinyaller üretilerek biyolojik veya kimyasal reaksiyonların ölçülmesi biyosensörlerin temel çalışma prensibidir [12-15].



Şekil 2. Biyosensörlerin yapısı [16].

BİYOSENSÖRLERİN ÖZELLİKLERİ

Birçok durumda biyosensörler tek kullanımlık olarak tasarlanır. İdeal bir biyosensör; sağlam, seçici, tekrarlanabilir, geniş bir dinamik aralığa sahip ve yüksek hassasiyetli olmalıdır.

Seçicilik: Seçicilik, bir biyosensör için bir biyoreseptör seçerken dikkate alınması gereken önemli bir özelliktir. Bir biyoreseptör, karışım baharatlar ve istenmeyen kirleticilerden oluşan bir numunede belirli bir hedef analit molekülünü tespit edebilir.

Duyarlılık: Numunede analit izlerinin varlığını doğrulamak için minimum sayıda adımda ve düşük konsantrasyonlarda (ng/mL veya fg/mL) doğru bir şekilde tespit edilebilen/tanımlanabilen minimum analit miktarı.

Doğrusallık: Doğrusallık, ölçülen sonuçların doğruluğuna katkıda bulunur. Doğrusallık (düz çizgi) ne kadar yüksekse, substrat konsantrasyonu tespiti o kadar yüksek olur.

Cevap süresi: Sonuçların %95'inin alınması için geçen süredir.

Tekrarlanabilirlik: Tekrarlanabilirlik, hassasiyet (örnek birden fazla ölçüldüğünde benzer çıktı) ve doğruluk (örnek her ölçüldüğünde sensörün gerçek değere daha yakın bir ortalama değeri üretme yeteneği) ile karakterize edilir. Biyosensörün aynı örnek birden fazla ölçüldüğünde aynı sonuçları üretme yeteneğidir.

Stabilite: Stabilite, sürekli izlemenin gerekli olduğu biyosensör uygulamalarındaki temel özelliklerden biridir. Stabilite, biyosensör cihazının içinde ve dışında çevresel bozulmalara karşı hassasiyet derecesidir. Stabiliteyi etkileyen faktörler, biyoreseptörün afinitesi (analitin biyoreseptöre bağlanma derecesi) ve biyoreseptörün zaman içindeki bozulmasıdır.

Son derece etkili ve yetenekli bir biyosensör sistemi geliştirmek için belirli statik ve dinamik gereksinimler gereklidir. Bu özelliklere dayanarak, biyosensörlerin performansı ticari kullanımlar için optimize edilebilir [17-19].

BİYOSENSÖR TÜRLERİ

Günümüzde biyolojik ve nanoteknolojik ilerlemeler sayesinde biyosensörler daha verimli hâle gelmiş ve yeni teknolojilerle sürekli gelişmiştir. Biyosensörler, fizik, kimya, biyoloji, biyokimya ve mühendislik gibi farklı bilim alanlarının bilgisiyle, biyolojik moleküllerin seçiciliği ile elektronik sistemlerin işleme yeteneklerini birleştirerek geliştirilir. Bu sayede birçok alanda kullanılabilir çeşitlilikte biyosensörler tasarlanabilir. Bunlarda farklı analitler ve reseptörler kullanılabilir. Örneğin karbonhidratlar ve nükleik asitler, gen analizleri veya hücre yüzeyi incelemelerinde kullanılmaktadır. Biyosensörler, biyoreseptör türüne (örneğin antikor/antijen, nükleik asit, hücre, enzim, biyomimetik maddeler) veya dönüştürücü türüne (örneğin elektrokimyasal, optik, kütle temelli) göre sınıflandırılabilir. Biyosensörler, hedef maddeyi tanıyıp bunun sonucunda oluşan değişimi ölçerek dijital sinyale dönüştürür. Dönüştürücü olarak; elektrokimyasal, optik, piezoelektrik, manyetik ve

kalorimetrik sistemler kullanılabilir. Genel olarak biyosensörler, fiziksel dönüştürücüler ve biyolojik bileşenler olmak üzere iki ana grupta ele alınır [20,21].

Biyosensörlerin Dönüştürücülere (Transdüser) Göre Sınıflandırılması

Biyosensörler geleneksel olarak nesne tespiti için kullanılan dönüştürücü türüne (elektrokimyasal, optik, piezoelektrik veya termal) veya biyotanıma elemanına (enzimler, antikorlar, aptamerler, nükleik asitler vb.) göre gruplandırılır [22,23].

Biyosensörlerin en yaygın sınıflandırması, sensörde kullanılan transdüser (dönüştürücü) elemanının türüne dayanır. Bu biyosensörler genel olarak amperometrik, potansiyometrik, optik, akustik/piezoelektrik ve kalorimetrik olmak üzere gruplandırılır. Her biyosensör tipinin çalışma prensibi farklıdır ve bu sayede çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilirler.

Biyosensörlerin dönüştürücü tipine göre sınıflandırması şu şekildedir.

Amperometrik biyosensörler

Potansiyometrik biyosensörler

Optik biyosensörler

Akustik/Piezoelektrik biyosensörler

Kalorimetrik biyosensörler

Kalorimetrik biyosensörler

Birçok enzim katalizli reaksiyon ekzotermiktir ve reaksiyon hızını ve dolayısıyla analit konsantrasyonunu ölçmek için bir temel olarak kullanılabilecek ısı üretir. Bu en genel olarak uygulanabilir biyosensör tipini temsil eder. Sıcaklık değişimleri genellikle sabit bir sıcaklık ortamında immobilize edilmiş enzimler içeren küçük paketlenmiş yatak kolonlarının giriş ve çıkışındaki termistörler vasıtasıyla belirlenir. Bu kadar yakından kontrol edilen koşullar altında, reaksiyonda üretilen ısıнын %80'e kadarı numune akışında bir sıcaklık değişimi olarak kaydedilebilir. Bu, entalpi değişiminden ve reaksiyona giren miktardan basitçe hesaplanabilir. Kalorimetre sensörleri biyokimya, klinik, ilaç endüstrileri gibi farklı alanlarda ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kalorimetri sensöründe, biyokimyasal reaksiyon sırasında açığa çıkan enerji, test edilen moleküllerin etkileşiminin ölçüsü olarak hesaplanır. Bu sensörde diabatik kalorimetri ve ısı iletim kalorimetrisi olmak üzere iki işlem kullanılır [24,25].

Termal Biyosensörler

Termal biyosensörler, literatürde sıklıkla kalorimetrik biyosensörler olarak da adlandırılmakta olup, biyolojik tanılayıcı bir unsurun termometre benzeri fiziksel bir dönüştürücüyle entegre edilmesiyle geliştirilmiş cihazlardır. Bu tür biyosensörlerde, biyokimyasal reaksiyonlar sonucunda meydana

gelen ısı değişimleri ölçölerek analitlerin varlığı ve konsantrasyonu tayin edilebilmektedir. Bu tip biyosensörün yaygın uygulamaları arasında pestisitlerin ve patojenik bakterilerin tespiti yer alır.

Termal temelli bu sistemler; enzim aktivitesinin belirlenmesi, klinik parametrelerin izlenmesi, endüstriyel süreç kontrolü, susuz ortamlarda analiz ve çevresel izleme uygulamaları gibi çeşitli alanlarda etkin biçimde kullanılabilmektedir [26-31].

Termal Dönüştürücölü (Transduser) Biyosensörler

Termometrik ölçümler, biyokimyasal reaksiyon sırasında verilen veya absorbe edilen ısıнын ölçümüyle ilgilidir. Toplam ısı verme veya absorbsiyonu molar entalpi ile orantılıdır ve biyokimyasal tepkimede yaratılan toplam ürün moleküllerinin sayısıdır. Termal biyosensörler, ısıнын verilmesi ve absorbsiyonu gibi biyolojik reaksiyonların temel özelliklerinden faydalanmaktadırlar.

Termal transduserler ayrıca antikör-antijen etkileşimlerinin belirlenmesi için de uygulanmıştır ve bu teknik, Termomerik Elisa Testi olarak da bilinmektedir. Ancak sofistike kullanımı ve pahalı enstrümantasyon bu tekniğin en büyük dezavantajıdır [32,33].

Termal biyosensörler, biyokimyasal reaksiyonlarda ortaya çıkan ısıyı ölçerek analit miktarını belirler. Özellikle atık sularda organik kirleticilerin COD (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) değerine göre izlenmesinde kullanılır. Oksidasyon sırasında açığa çıkan ısı, termistör veya termopil tabanlı sensörlerle tespit edilir.

MEMS teknolojiyiyle geliştirilen termal biyosensörler, küçük boyut, düşük maliyet, yüksek hassasiyet ve hızlı ölçüm gibi avantajlar sunar. Termal biyosensörler, basit tasarımı ve uzun dönem kararlılığı sayesinde biyoproseslerde tercih edilir, ancak karmaşık termostatlama ve düşük duyarlılık gibi sınırlamaları vardır.

Termal Biyosensörlerin Avantajları

Kararlılık: Dönüştürücü numuneyle doğrudan temas etmediği için termistörlerin hasar riski düşüktür.

Düşük maliyet: Termistörler uygun fiyatlıdır.

Doğruluk: Ölçümler, numunenin optik veya iyonik özelliklerinden etkilenmez.

Termal Biyosensörlerin Dezavantajları

Karmaşıklık: Termostatlamanın zor olması nedeniyle sistem karmaşıktır.

Düşük hassasiyet: Hassasiyetleri genelde sınırlıdır.

Olumsuz algı: Spesifik olmayan ısıtma etkileri nedeniyle kötü bir üne sahiptirler [34].

Termal Biyosensörlerin Özellikleri

Termal biyosensörler, biyolojik reaksiyonlarda (ekzotermik veya endotermik) açığa çıkan veya absorbe edilen ısı enerjisini ölçerek çalışır. Ölçölen sıcaklık değişimi (ΔT), reaksiyon entalpisi (ΔH)

ve oluşan ürün miktarı (n_p) ile doğru orantılı, reaksiyonun ısı kapasitesi (C_p) ile ters orantılıdır. Bu ilişki genelde

$$\Delta T = -\frac{n_p \Delta H}{C_p}$$

şeklinde ifade edilir. Kalorimetrik biyosensörler bu prensiple reaksiyon kapsamını ya da biyomoleküllerin yapısal dinamiklerini takip edebilir. Ancak klasik kalorimetrik cihazlar uzun analiz süreleri ve özgüllük eksiklikleri nedeniyle kısıtlıdır. Bu sorunlar, immobilize biyokatalizörler ve termistörlerin birlikte kullanıldığı akış enjeksiyon analiz sistemleriyle giderilmiştir. Böyle sistemlerde enzim kolonu boyunca yerleştirilen termistör veya termopil çiftleriyle diferansiyel sıcaklık ölçümleri yapılır. Bu düzenek, ortam sıcaklığı değişimlerinden daha az etkilenir ve daha güvenilir sonuçlar üretir. Termistörler, sıcaklıkla değişen dirençleri sayesinde mutlak sıcaklığı ölçerken; termopiller, iki nokta arasındaki sıcaklık farkını algılar. Ayrıca bimetalik şeritler, piroelektrik sistemler, metal dirençleri ve MEMS tabanlı dönüştürücüler de termal biyosensörlerde kullanılabilir. MEMS teknolojisi; minyatür cihazlarda düşük maliyet, yüksek hassasiyet, hızlı ölçüm ve düşük güç tüketimi avantajları sunar. Termometrik biyosensörler, birden fazla reaksiyonun eşzamanlı analizine olanak sağlar; bu nedenle enzim aktivitesi, metabolit ölçümü ve biyoproses izleme gibi alanlarda büyük potansiyel taşır [35].

Termal Algılama Biyosensörleri

Bu tip biyosensörler, biyolojik reaksiyonların temel özelliklerinden biri olan ısı emilimi veya üretimi gibi, reaksiyonun gerçekleştiği ortamın sıcaklığını değiştiren bir özelliği kullanır. Immobilize enzim molekülleri ile sıcaklık sensörlerinin birleştirilmesiyle oluşturulurlar. Analit enzimle temas ettiğinde, enzimin ısı reaksiyonu ölçülür ve analit konsantrasyonuna göre kalibre edilir. Üretilen veya emilen toplam ısı, molar entalpi ve reaksiyondaki toplam molekül sayısı ile orantılıdır. Sıcaklığın ölçümü genellikle bir termistör aracılığıyla gerçekleştirilir ve bu tür cihazlara enzim termistörleri denir. Termal değişikliklere karşı yüksek hassasiyetleri termistörleri bu tür uygulamalar için ideal hale getirir. Diğer dönüştürücülerin aksine, termal biyosensörler sık sık yeniden kalibrasyona ihtiyaç duymaz ve numunenin optik ve elektrokimyasal özelliklerine duyarlıdır. Bu tip biyosensörün yaygın uygulamaları arasında pestisitlerin ve patojenik bakterilerin tespiti yer alır. İyon duyarlı biyosensörler iyon duyarlı bir yüzeye sahip yarı iletken alan etkili transistör (FET)'lerdir. İyonlar ve yarı iletken etkileşime girdiğinde değişen yüzey elektrik potansiyeli ölçülebilir. İyon Duyarlı Alan Etkili Transistör (ISFET), sensör elektrodunu bir polimer tabakasıyla kaplayarak yapılabilir. Bu polimer tabakası 4 analit iyonuna seçici olarak geçirgendir. İyonlar polimer tabakasından difüze olur ve sırayla FET yüzey potansiyelinde bir değişikliğe neden olur. Bu tür biyosensöre ENFET (Enzim Alan Etkili Transistör) de denir ve öncelikli olarak pH tespiti için kullanılır [36].

Termal biyosensörlerdeki son gelişmeler

Termal akış analizörleri, çok çeşitli uygulama olanaklarına sahiptir. Son dönemde, termal biyosensörler, basit kullanımları ve bakım kolaylıkları nedeniyle özellikle sağlık hizmetlerinde önemli ilgi görmektedir. Örneğin, bu sensörler, diyabet yönetiminde glukoz gibi spesifik metabolitlerin izlenmesi için son derece uygun bir platform sunmaktadır. Termistör genellikle sistemin operasyonel kararlılığının işlevde artmasını sağlar. Son gelişmeler, minyatür termal biyosensör cihazlarının geliştirilmesini mümkün kılmış ve bu cihazlar biyoproses endüstrilerinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Enzim termistörleri, dayanıklılıkları ve steril örnekleme imkânları sayesinde biyoproses izleme alanında önemli bir yenilik sunmaktadır. Özellikle biyoproses ve downstream analizlerinde, termal akış analizörleri özel bir ilgi odağı haline gelmiştir [37].

Modern teknolojiler ve sanayileşme, yaşamı kolaylaştırmakla birlikte ciddi sağlık sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Her yıl milyonlarca ton zararlı kimyasal çevreye salınmakta olup, bu durum erken tespit ve sürekli izleme yöntemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Geleneksel analiz yöntemlerinin yanı sıra, kimyasalların biyoyararlanımı ve organizmalar üzerindeki etkilerini değerlendirebilen biyosensör teknolojileri, medikal uygulamalarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır [38].

Biyosensörler, hastalık yönetiminde hızlı, yüksek hassasiyetli ve minimal invaziv tanı olanağı sunarak sağlık alanında dönüştürücü bir rol oynamaktadır. Bu cihazlar, biyolojik tanıma elemanlarını dönüştürücülerle entegre ederek fizyolojik ve patolojik parametrelerin gerçek zamanlı olarak izlenmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, biyosensörler duyarlılık, özgüllük, ölçeklenebilirlik ve veri gizliliği gibi önemli teknik ve etik zorluklarla karşı karşıyadır. Giyilebilir ve implante edilebilir biyosensörlerdeki yenilikler, ileri malzeme teknolojileri ve yapay zekâ entegrasyonu sayesinde klinik etkinlik ve faydalarını önemli ölçüde artırmaktadır [39].

İlaç Keşfi ve İlaç Analizinde Biyosensörler

Biyosensörler, ilaç endüstrisinde üretim süreçlerindeki kritik parametrelerin izlenmesinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Afinite biyosensörler, antikor ve ilaç tarama süreçlerinde yüksek verim ve hassasiyet sağlamak amacıyla tercih edilmektedir. Ayrıca, yüzeye bağlı DNA ile hedef ilaç arasındaki etkileşimleri değerlendirmek için oligonükleotid biyosensörler yaygın olarak kullanılmaktadır [40-42].

Biyosensör Teknolojisinde Son Gelişmeler

Son dönemde, enzim bazlı biyosensörler, immünosensörler, doku bazlı sensörler, DNA biyosensörleri, piezoelektrik ve termal biyosensörler gibi çeşitli yeni biyosensör türleri birçok

araştırma grubu tarafından yüksek hassasiyetle incelenmiştir. Bu biyosensörler; operasyonel basitlik, dikkat çekici hassasiyet, düşük maliyetli enstrümantasyon, otomasyon potansiyeli ve içsel minyatürleşme gibi temel avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, makromoleküllerden (örn. hastalık biyobelirteçleri ve antijenler) küçük moleküllere (örn. doğal toksinler ve haptenler) ve hücreler, virüsler ile bakteriler gibi biyolojik olarak önemli ajanların eser miktarlarının tespiti için zarif ve etkin yöntemler sağlamaktadır. Elektrokimyasal sinyal iletimi ile yüksek hassasiyet elde etmek amacıyla immünoassay'lerin geliştirilmesinde amperometri, voltametri, fotoelektrokimya, elektrokemilüminesans, empedans, piezoelektrik, potansiyometri, alternatif akım elektrohidrokinamiği ve alan etkili transistörler gibi çeşitli elektrokimyasal teknikler kullanılmaktadır. Ayrıca, nanopartiküller, nanoteller, nanotüpler gibi nanotaşıyıcılar üzerine floresan etiketlerin uygulanması ve biyolojik yöntemlerdeki son gelişmeler, biyosensörlerin hassasiyetini önemli ölçüde artırmıştır. Nükleotidlerin/aptamerlerin, afibodilerin, molekül baskılı polimerlerin ve peptit dizilerinin kullanımı, gelişmiş biyosensörlerin tasarımında etkili araçlar sunmaktadır. Özellikle nanoteknolojinin biyosensör sistemleri ile entegrasyonu, tanı yeteneğini ve analitik performansı kayda değer şekilde geliştirmiştir. Floresan etiketler içeren biyolojik teknikler ve cihazların gelişmesiyle birlikte, biyosensörler için hassasiyet sınırları da artmaktadır. Yenilikçi biyosensörler oluşturmak için peptit dizileri, nükleotidler, molekül baskılı polimerler veya aptamerler de geliştirilmiştir. Yüksek rejeneratif potansiyele sahip daha hassas ve adaptif biyosensörler başka yaklaşımlarla geliştirilmiştir. Sürekli biyosensör gelişmeleri ve günlük tüketici elektroniği formatlarına dahil edilmeleri, gerçek zamanlı olarak toplanabilen, işlenebilen ve üzerinde işlem yapılabilen şeffaf bir veri ekosistemine yol açacaktır. Temel amaç, biyosensörlerin sağlamlığını ve çok yönlülüğünü ve ayrıca sağlık hizmetlerinin kalitesini nasıl artırabileceklerini göstermektir. Son olarak, bu yeni nesil biyosensör ve biyoçiplerin bulgularının, glikoz ölçüm cihazlarıyla karşılaştırılabilir bir ticari tanınırlık elde etmek için mevcut klinik gerekliliklere göre iyi bir şekilde doğrulanması gerekir [43-45].

Nanobiyosensörler

Nanoteknolojideki gelişmelerle birlikte, biyosensörler alanındaki araştırma ve geliştirme faaliyetleri son yıllarda önemli ölçüde hız kazanmıştır. Metal ve oksit bazlı nanopartiküller (NP'ler), nanotel (NW'ler), nanorod (NR'ler), karbon nanotüpler (CNT'ler), kuantum noktaları (QD'ler) ve dendrimerler gibi nanokompozitler (NM'ler) farklı özellikleri açısından incelenerek, biyosensörlerin performansını artırma ve boyut ile morfoloji kontrolü yoluyla tespit hassasiyetini yükseltme imkânı sunmaktadır [46].

LC Tabanlı Biyosensörler

Biyosensörler, modern mühendislik araçları olarak çeşitli teknolojik alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Endüstriyel proses kontrolü, askeri uygulamalar, çevre izleme, sağlık hizmetleri, mikrobiyoloji ve gıda kalite kontrolü gibi geniş uygulama alanlarına sahiptir. Ayrıca çevresel kirliliğin izlenmesi, toksik elementlerin tespiti, biyolojik tehdit oluşturan virüs ve bakterilerin belirlenmesi ile klinik teşhislerde biyomoleküllerin saptanması amacıyla da kullanılmaktadır.

Biyosensörler, in vitro tıbbi testlerde refah izleme, kronik hastalık yönetimi ve bulaşıcı hastalıkların erken tanısında kritik bir rol oynamaktadır. Kullanım kolaylığı, ölçeklenebilirlik ve basit üretim süreçleri, biyosensör teknolojisinin yaygınlaşmasını desteklemektedir. Günümüzde biyosensörler, tıpta yüksek hacimli, düşük maliyetli ve gelişmiş çözümler sunan önemli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda, sıvı kristal (LC) tabanlı biyosensörler araştırmacıların dikkatini çekmiştir. LC biyosensörler, moleküler düzenlemeye dayalı çalışma prensipleri sayesinde, son yirmi yılda sağladıkları yüksek hassasiyet ile birçok uygulamada geleneksel biyosensörlerin önüne geçmiştir. Polarize optik mikroskop (POM) altında, LC malzeme dikey olarak hizalandığında, örnek moleküllerle benzer yönelimdeki ışık polarizatör tarafından engellenerek karanlık bir görüntü oluşturur. Analit biyosensörle etkileşim gerçekleştiğinde ise LC malzeme eğik hizalanarak ışığı iki doğrusal polarize ışığa böler. Bu optik anizotropi, LC tabanlı biyosensörlerde tepkilerin hızlı, kolay ve görsel olarak tespit edilebilmesini sağlamaktadır [47].

Biyosensörlerin Gelecekteki Potansiyel Avantajları

Biyosensörler, biyomoleküllerin dinamik değişimlerini izlemek için geliştirilmiş ve birçok alanda giderek yaygınlaşan gelişmiş araçlardır. Gelecekte, daha güvenilir, kullanımı pratik, düşük maliyetli ve tekrar kullanılabilir ya da tek kullanımlık olarak seri üretilebilir olmaları sayesinde sağlık, çevre, tarım ve endüstri gibi alanlarda önemli avantajlar sunmaları beklenmektedir. Nanoteknoloji ve biyoçip teknolojilerindeki ilerlemeler, biyosensörlerin hassasiyetini artırarak daha hızlı ve kesin sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Nanobiyosensör araştırmaları, biyomedikal, biyokimya, çevre, tarım ve gıda endüstrilerine tespit ve izleme amacıyla önemli katkılarda bulunabilecek yenilikçi teknolojiler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Dahası, nanobiyosensörün odak noktası insanlığa ve topluma fayda sağlamaktır. Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte, uygulamaya göre mikron altı boyutlarında hücre içi kullanıma uygun nanobiyosensörlerin geliştirilmesi için yeni ufuklar açılmıştır. Nanoyapılı malzeme sentezine özgü ve esasen en çekici özellikleri olan boyut, kuantum boyutu ve yüzey etkisi gibi çeşitli özel etkilerin araştırılmasına dikkat edilmelidir. Ayrıca, biyosensör uygulamaları için daha da iyi özellikler sergilemek adına yeni nanomalzemelerin keşfi de büyük önem taşımaktadır. İdeal olarak, nanoteknoloji tabanlı biyosensörler, çip üzerinde numune işleme, elektronik, kontrolör ve analiz özelliklerine sahip minyatür mikroakışkan cihazlarla tam olarak

entegre edilmelidir. Elektrokimyasal, optik ve gravimetrik gibi farklı dönüştürücü teknikler kullanılarak, biyosensörler çeşitli numuneleri yüksek duyarlılıkla analiz edebilmektedir. Yapay zekâ entegrasyonu, veri analizini geliştirerek kişiselleştirilmiş tıp ve gerçek zamanlı izlemeyi mümkün kılmaktadır. Önümüzdeki dönemde biyosensörlerin, klinik tanı, gıda güvenliği, çevresel izleme ve süreç kontrolü gibi alanlarda daha yaygın şekilde uygulanması öngörülmektedir. Disiplinler arası iş birliği, yeni nesil nanomalzemeler ve mikroakışkan teknolojilerinin kullanımı, biyosensörlerin gelişimini hızlandıracaktır. Bu teknolojiler, hastalıkların evde teşhisi ve hızlı analizler için düşük maliyetli, kullanıcı dostu cihazlar sunarak sağlık hizmetlerinde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. [48-50].

SONUÇ

Biyosensörler, optik (yüzey plazmon rezonansı, floresans), elektrokimyasal ve piezoelektrik transdüksiyon yöntemleri aracılığıyla biyolojik tepkileri ölçülebilir sinyallere dönüştürmektedir. Bu sensörler, tıp, çevre, gıda, tarım ve endüstri gibi çok çeşitli alanlarda hızla yaygınlaşmaktadır. Her transdüksiyon yöntemi, uygulama alanına bağlı olarak kendine özgü avantaj ve sınırlılıklara sahiptir. Gelecekte, yüksek performanslı yeni sensörlerin geliştirilmesi, biyosensör araştırmalarının odak noktası olacaktır.

Biyosensörlerin performansında malzeme seçimi ve yapısal tasarım kritik rol oynamaktadır; biyoyumluluk, duyarlılık, özgüllük ve hızlı tepki gibi özellikler sensörlerin etkinliğini belirler. Ticari uygulamalar için bu özellikler arasında optimize edilmiş bir denge sağlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda araştırmalar, sensörlerin genel performansını artırmak için yeni teknik ve malzeme çözümlerine yönelmektedir. Termal tabanlı sensörler, sağlık ve çevre izleme alanında gelecek vaat ederken, malzeme optimizasyonu, maliyet düşürme ve teknoloji entegrasyonu için disiplinler arası iş birliği önem kazanmaktadır.

Yapay zekâ entegrasyonu, biyosensörlerin veri analiz kapasitesini artırarak duyarlılık, özgüllük ve gerçek zamanlı izleme imkânlarını geliştirmiştir. Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları sayesinde karmaşık biyolojik veriler etkin bir şekilde işlenmekte ve tanı doğruluğu yükselmektedir. Nanomalzemeler ve yeni biyotanıma moleküllerinin kullanımı, sensörlerin seçiciliğini, hassasiyetini ve dayanıklılığını artırmaktadır. Nanoteknoloji destekli biyosensörler, düşük maliyetli, yüksek hassasiyetli ve hızlı analiz imkânı sunmaktadır.

Tıbbi uygulamalarda, yanlış pozitif ve negatif sonuçları minimize etmek için daha az numune gerektiren, kullanımı kolay ve uygun maliyetli cihazlara ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda biyoçip teknolojisi ve mikroakışkan sistemler geliştirilmektedir; böylece evde hızlı, güvenilir ve doğru tanı mümkün olmaktadır. Son yıllarda biyosensör teknolojisi, minyatürleştirme ve disiplinler arası iş birliği sayesinde önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Yapay zekâ ile güçlendirilmiş biyosensörler, kişiselleştirilmiş tıp ve etkili hastalık yönetimi için büyük bir potansiyel sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- 1-Wang, L., & Beebe, D. J. (2000). A silicon-based shear force sensor: development and characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 84(1-2), 33-44.
- 2-Ensafi, A. A. (2019). An introduction to sensors and biosensors. In *Electrochemical Biosensors* (pp. 1-10). Elsevier.
- 3-Musa, N., & Singh, N. B. (2025). Advanced sensors: classification, fabrication, and applications. In *Advanced Sensors for Smart Healthcare* (pp. 47-67). Elsevier.
- 4- Tothill, I. E. (2001). Biosensors developments and potential applications in the agricultural diagnosis sector. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1-3), 205-218.
- 5- Kulshreshtha, N. M., Shrivastava, D., & Bisen, P. S. (2017). Contaminant sensors: nanotechnology-based contaminant sensors. In *Nanobiosensors* (pp. 573-628). Academic Press.
- 6- Lok, R., Karacali, H., Varol, A., Camli, U., & Yilmaz, E. (2022). Fabrication and characterization of resistance temperature detector by smart mask design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(1), 147-158.
- 7- Huynh, T. (2015). Fundamentals of thermal sensors. In *Thermal Sensors: Principles and Applications for Semiconductor Industries* (pp. 5-42). New York, NY: Springer New York.
- 8- Tang, X., Qi, C., & Sun, Q. (2025). Recent progress of biosensors based on thermoelectric effects for monitoring physical activity and environment monitoring. *Soft Science*, 5(1), N-A.
- 9- Kazemi-Darsanaki, R., Azizzadeh, A., Nourbakhsh, M., Raeisi, G., & AzizollahiAliabadi, M. (2013). Biosensors: functions and applications. *J. Biol. Today's World*, 2(1), 53-61.
- 10- Karami, E., & Kazemi-Lomedasht, F. (2022). Biosensors: Types, features, and application in biomedicine. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 12(9), 367-373.
- 11- Katey, B., Voiculescu, I., Penkova, A. N., & Untaroiu, A. (2023). A review of biosensors and their applications. *ASME Open Journal of Engineering*, 2.
- 12- Özer, İ., TEZEL, H., Sanajou, S., Yirün, A., Baydar, T., & Erkekoğlu, P. (2022). Biyosensörler ve Kullanım Alanları: Geleneksel Derleme. *Journal of Literature Pharmacy Sciences*, 11(1).
- 13- Lopez Dino, J. (2023). Structural design of biosensor: A review. *Instituto de Ingeniería y 14-Tecnología*.
- 14- Keskin, M., & Arslan, F. (2020). Biyosensörler. *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 1(1-2), 51-60.
- 15- Mishra, S., & Deshmukh, R. (2023). Overview of advancement in biosensing technology, including its applications in healthcare. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 24(3), 411-426.

- 16- Tade, R. S., Nangare, S. N., & Patil, P. O. (2021). Fundamental aspects of graphene and its biosensing applications. *Functional Composites and Structures*, 3(1), 012001.
- 17- Patil, S., Bhat, R., Kurumbanshi, S., & Chaoudhary, H. (2017). Comprehensive assessment of usage of biosensors in biomedics. *International Journal of Innovative Research in Electronics and Communications*, 4, 20-26.
- 18- Karunakaran, C., Rajkumar, R., & Bhargava, K. (2015). Introduction to biosensors. In *Biosensors and bioelectronics* (pp. 1-68). Elsevier.
- 19- Manoharan Nair Sudha Kumari, S., & Thankappan Suryabai, X. (2024). Sensing the Future—Frontiers in Biosensors: Exploring Classifications, Principles, and Recent Advances. *ACS omega*, 9(50), 48918-48987.
- 20- Mehrotra, P. (2016). Biosensors and their applications—A review. *Journal of oral biology and craniofacial research*, 6(2), 153-159.
- 21- Vigneshvar, S., Sudhakumari, C. C., Senthilkumaran, B., & Prakash, H. (2016). Recent advances in biosensor technology for potential applications—an overview. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 4, 11.
- 22- Abdel-Karim, R. (2024). Nanotechnology-enabled biosensors: a review of fundamentals, materials, applications, challenges, and future scope. *Biomedical Materials & Devices*, 2(2), 759-777.
- 23- Egbuna, C., Patrick-Iwuanyanwu, K. C., Shah, M. A., Ifemeje, J. C., & Rasul, A. (Eds.). (2021). *Analytical Techniques in Biosciences: From Basics to Applications*. Academic Press.
- 24- Sharma, A., James, A., Kapoor, D. N., Kaurav, H., Sharma, A. K., & Nagraik, R. (2024). An insight into biosensing platforms used for the diagnosis of various lung diseases: A review. *Biotechnology and Bioengineering*, 121(1), 71-81.
- 25- Monosik, R., Stredanský, M., & Sturdik, E. (2012). Biosensors-classification, characterization and new trends. *Acta chimica slovacica*, 5(1), 109.
- 26- Gundogdu, A., Gazoglu, G., Kahraman, E., Yildiz, E., Candir, G., Yalcin, D., ... & Şen, F. (2023). Biosensors: Types, applications, and future advantages. *Journal of Scientific Reports-A*, (052), 457-481.
- 27- Polshettiwar, S. A., Deshmukh, C. D., Baheti, A. M., Wani, M. S., Bompilwar, E., Jambhekar, D., ... & Tagalpallewar, A. (2021). Recent Trends on Biosensors in Healthcare and Pharmaceuticals: An Overview. *International Journal of Pharmaceutical Investigation*, 11(2).
- 28- Ramanathan, K., & Danielsson, B. (2001). Principles and applications of thermal biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 16(6), 417-423.

- 29- Yakovleva, M., Bhand, S., and Danielsson, B. (2013). The enzyme thermistor—A realistic biosensor concept. A critical review. *Analytica Chimica Acta*, 766, 1-12.
- 30- Xie, B., & Danielsson, B. (2007). Thermal biosensor and microbiosensor techniques. *Handbook of biosensors and biochips*, 2, 1-19.
- 31- Sadani, K., Nag, P., Thian, X. Y., & Mukherji, S. (2022). Enzymatic optical biosensors for healthcare applications. *Biosensors and Bioelectronics: X*, 12, 100278.
- 32- Ozoglu, O., Unal, M. A., & Altuntaş, E. G. (2017). Biyosensörler: gıda ve sağlık alanında laktat biyosensörleri. *Turk J Life Sci*, 2, 180-193.
- 33- Goumas, G., Vlachothanasi, E. N., Fradelos, E. C., & Mouliou, D. S. (2025). Biosensors, artificial intelligence biosensors, false results and novel future perspectives. *Diagnostics*, 15(8), 1037.
- 34- Vasuki, S., Varsha, V., Mithra, R., Dharshni, R. A., Abinaya, S., Dharshini, R. D., & Sivarajasekar, N. (2019). Thermal biosensors and their applications. *Am. Int. J. Res. Sci. Technol. Eng. Math*, 1, 262-264.
- 35- Naresh, V., & Lee, N. (2021). A review on biosensors and recent development of nanostructured materials-enabled biosensors. *Sensors*, 21(4), 1109.
- 36- Lalitha, K., & Lakshmi, K. N. S. V. (2017). AN OVERVIEW ON BIOSENSORS. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical & Biological Sciences*, 7(3).
- 37- Malik, S., Singh, J., Goyat, R., Saharan, Y., Chaudhry, V., Umar, A., ... & Baskoutas, S. (2023). Nanomaterials-based biosensor and their applications: A review. *Heliyon*, 9(9).
- 38- Mishra, P., & Vijayakumar, G. (2021). Biosensors Applications in Medical Field and Current Developments in Biosensors for Healthcare. *Transaction on Biomedical Engineering Applications and Healthcare*, 2(2).
- 39 Warfade, T. S., Dhoke, A. P., & Kitukale, M. D. (2025). Biosensors in healthcare: Overcoming challenges and pioneering innovations for disease management. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, 21(1), 350-358.
- 40- Lino, C., Barrias, S., Chaves, R., Adegá, F., Martins-Lopes, P., & Fernandes, J. R. (2022). Biosensors as diagnostic tools in clinical applications. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Reviews on Cancer*, 1877(3), 188726.
- 41- Rakesh, P., Pramod, P., & Sujit, P. (2019). Biosensors: Current tool for medication and diagnosis. *Asian Journal of Pharmaceutical Research*, 9(1), 27-34.
- 42- Mehrvar, M., & Abdi, M. (2004). Recent developments, characteristics, and potential applications of electrochemical biosensors. *Analytical sciences*, 20(8), 1113-1126.
- 43- Rajpoot, K. (2017). Recent advances and applications of biosensors in novel technology. *Biosens. J*, 6(2), 1-12.

- 44- Bollella, P., & Katz, E. (2020). Biosensors—Recent advances and future challenges. *Sensors*, 20(22), 6645.
- 45- Polshettiwar, S. A., Deshmukh, C. D., Baheti, A. M., Wani, M. S., Bompilwar, E., Jambhekar, D., ... & Tagalpallewar, A. (2021). Recent Trends on Biosensors in Healthcare and Pharmaceuticals: An Overview. *International Journal of Pharmaceutical Investigation*, 11(2).
- 46- Barbosa, A. I., Rebelo, R., Reis, R. L., Bhattacharya, M., & Correlo, V. M. (2021). Current nanotechnology advances in diagnostic biosensors. *Medical Devices & Sensors*, 4(1), e10156.
- 47- Moisello, E., Malcovati, P., & Bonizzoni, E. (2021). Thermal sensors for contactless temperature measurements, occupancy detection, and automatic operation of appliances during the COVID-19 pandemic: A review. *Micromachines*, 12(2), 148.
- 48- Bhatia, D., Paul, S., Acharjee, T., & Ramachairy, S. S. (2023). *Biosensors and their widespread impact on human health. Sensors Int 5: 100257.*
- 49- Smutok, O., & Katz, E. (2022). Biosensors: electrochemical devices—general concepts and performance. *Biosensors*, 13(1), 44.
- 50- Kulkarni, M. B., Ayachit, N. H., & Aminabhavi, T. M. (2022). Recent advancements in nanobiosensors: current trends, challenges, applications, and future scope. *Biosensors*, 12(10), 892.