

FİZİK ALANINDA AKADEMİK TARTIŞMALAR

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Esra UYAR

yaz
yayınları

Fizik Alanında Akademik Tartışmalar

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Esra UYAR

yaz
yayınları

2026

Fizik Alanında Akademik Tartışmalar

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Esra UYAR

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8996-50-0

Haziran 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Optisyenlikte Dijitalleşme ve Yapay Zekâ Uygulamaları.....	1
<i>Özge ERDEM</i>	
Optisyenlik Eğitimi Sonrası İstihdam ve Kariyer Memnuniyeti Üzerine Bir Çalışma.....	21
<i>Songül IŞIKTAŞ, İlayda AYDIN, Göknur ÖZEL, Özge ERDEM</i>	
Çevresel Radyoaktivite ve Moleküler Etkileşimler	37
<i>Ali KAYA</i>	
Crystal Structure and Spectroscopic Characterization of Bis{2-ETHOXY-6-[(E)-(4-BROMOPHENYL) IMINOMETHYL] PHENOLATO-κN,κO} COPPER(II)	70
<i>Başak KOŞAR KIRCA, Çiğdem ALBAYRAK KAŞTAŞ</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

OPTİSYENLİKTE DİJİTALLEŞME VE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

Özge ERDEM¹

1. GİRİŞ

Optisyenlik, göz doktoru tarafından verilen reçeteye uygun gözlük camı ve çerçevesinin seçilmesi, hazırlanması ve hastaya uygulanması işlemlerini gerçekleştiren bir meslektir. Bu görevleri yerine getirebilecek optisyen yetiştiren eğitim programları; temel optik bilgisi, cam türleri, çerçeve seçimi, ölçüm teknikleri ve hasta iletişimi gibi konular üzerine yoğunlaşır (Jalie, 2008). Günümüzde dijital ekran kullanım sıklığının artması optisyenleri yalnızca uygulayıcı değil, aynı zamanda analiz edici bir role sokmaktadır (Sheppard & Wolffsohn, 2018).

Teknolojik gelişmeler ve malzeme biliminin ivme kazanması, sağlık alanında yalnızca tanı ve tedavi yöntemlerini değil, aynı zamanda mesleklerin tanımını, sorumluluklarını ve eğitim süreçlerini de köklü biçimde değiştirmektedir (Topol, 2019). Optisyenlik, bu dönüşümden etkilenen meslek gruplarından biridir.

Gözlük ve kontakt lens uygulamaları içeren optisyenlik mesleği, günümüzde bireyselleştirilmiş optik çözümlere olan talebin giderek artması ile yapay zekâ destekli analizler, akıllı optik teknolojiler ve dijital görüntüleme sistemleri ile birlikte çok daha geniş bir uzmanlık alanına dönüşmektedir (Resnikoff & Foster, 2020). Bu durum, bir optisyenin ölçüm ve uygulama becerilerinin yanı sıra, teknolojiye uyum sağlayabilen, dijital

¹ Assoc. Prof., Bayburt University, Vocational High School of Health Services, Department of Medical Services and Techniques, ORCID: 0000-0003-4542-941X.

sistemleri etkin biçimde kullanabilen ve veri temelli karar süreçlerine katkı sunabilen daha nitelikli bir eleman olmasını gerektirir.

Sağlık alanında dijitalleşme; elektronik sağlık kayıtları, tıbbi görüntüleme sistemleri ve yapay zekâ destekli karar mekanizmaları gibi yenilikleri içerir. Göz sağlığı alanında ise; optik koherens tomografi (OCT), fundus kameraları ve korneal topografi sistemleri gibi dijital görüntüleme teknolojileri görme analizlerini daha ölçülebilir bir hale getirir (Huang et al., 1991). Bu gelişmeler, dijital verileri okuyabilme ve temel analiz süreçlerini anlayabilme becerileri gerektirir.

Yapay zekâ, görüntü işleme ve desen tanıma alanlarında sağlık alanına önemli bir katkı sunar. Yapay zekâ destekli sistemler ölçüm ve analiz süreçlerini hızlandırır. Yapay zekânın optisyenlik alanındaki en bilinen uygulamalarından biri, retina görüntülerinin otomatik analizi ve görme kusurlarının sınıflandırılmasıdır (Ting et al., 2019). Tüm bunlar dikkate alındığında, optisyenlik alanında yapay zekâ sistemlerinin çalışma prensiplerini temel düzeyde anlayabilen optisyenlerin yetiştirilmesi kritik bir öneme sahiptir.

Optisyenlik eğitiminde dijital görüntüleme ve yapay zekâ temelli uygulamaların sınırlı olması, eğitim ile mesleki uygulamalar arasında bir boşluk oluşmasına neden olmaktadır. Bu boşluğun giderilmesi için eğitim programlarının; simülasyon tabanlı öğrenme modellerini, dijital görüntüleme temellerini ve yapay zekâ destekli analiz sistemlerini içerecek şekilde güncellenmesi gerekmektedir (Ellaway & Masters, 2008).

Bu bölümde, optisyenlikte dijital görüntüleme ve yapay zekâ teknolojileri ile bu teknolojilerin optisyenlik mesleğindeki uygulamaları ve gelecekteki rolü değerlendirilmiştir.

2. OPTİSYENLİKTE YAPAY ZEKÂ TABANLI DİJİTAL GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİLERİ

Yapay zekâ (Artificial Intelligence, AI), bilgisayar sistemlerinin öğrenme, karar verme ve problem çözmeye insan benzeri yetenek sergilemesini amaçlayan disiplinler arası bir alandır. Yapay zekâ kavramı ilk kez 1956 yılında ortaya atılmış ve insan zekâsını taklit edebilen makinelerin geliştirilmesi hedeflenmiştir (McCarthy et al., 1956). 2000'li yıllardan itibaren hesaplama kapasitesinin artması ve büyük veri kaynaklarının ortaya çıkmasıyla birlikte, yapay zekâ alanında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle sağlık alanında, görüntü işleme ve örüntü tanıma yetenekleri ile yapay zekâ sistemleri klinik karar destek aracı olarak kullanılmaya başlanmıştır (Topol, 2019).

Yapay zekâ teknolojisi optisyenlik alanında, özellikle dijital görüntüleme sistemleriyle elde edilen görsel verilerin analizinde ve kişiselleştirilmiş optik çözümler sunmada kullanılmaktadır. Bu nedenle, optisyenlik öğrencileri ve meslek profesyonelleri için yapay zekânın temel kavramlarını anlaşılır hale getirmek; görme bilimleriyle ilişkisini ortaya koymak ve optisyenlik uygulamalarındaki rolünü öğrenmek kritik öneme sahiptir.

Optisyenlik alanında yapay zekânın en yaygın kullanıldığı alan makine öğrenmesidir (machine learning). Makine öğrenmesi, bilgisayar sistemlerinin açıkça programlanmadan, verilerden öğrenmesini sağlayan bir yöntemdir. Sistem, geçmiş veriler üzerinden örüntüler öğrenerek yeni veriler hakkında tahminlerde bulunur (Mitchell, 1997). Makine öğrenmesinin bir alt dalı ise **derin öğrenmedir (deep learning)**. **Burada**, çok katmanlı yapay sinir ağları kullanılır ve özellikle görüntü tanıma ile sınıflandırma konularını içerir. Derin öğrenme, retina görüntülerinin analizi ve görsel bozuklukların

sınıflandırılması konularında sıkça kullanılmaktadır (LeCun et al., 2015).

Modern göz sağlığı uygulamalarının temel bileşenlerinden biri, dijital görüntüleme teknolojileridir. Ölçüm ve analiz cihazlarının büyük bir bölümü, görsel verilerin dijital ortamda elde edilmesine ve işlenmesine dayanır. Dijital görüntüleme, bir nesneden yansıyan ışığın bir sensör tarafından elektriksel sinyallere dönüştürülmesi sürecidir. Bu süreç; ışığın optik sistemle odaklanması, algılanması ve sayısallaştırılması aşamalarından oluşur (Gonzalez & Woods, 2018). Optisyenlikte kullanılan görüntüleme cihazlarında, göz dokularından yansıyan ışık mercekle sistemleri aracılığıyla sensör yüzeyine yönlendirilir. Sensörde ışık yoğunluğu elektrik sinyallerine dönüşür ve sinyaller sayısal verilere çevrilip belirli bir parlaklık veya renk bilgisi taşıyan piksellerden meydana gelen dijital görüntü oluşur.

Dijital görüntüleme sistemlerinde en yaygın kullanılan sensör türleri CCD (Charge-Coupled Device) ve CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) sensörleridir. Her iki sensör tipi de ışığı elektrik sinyaline dönüştürme prensibi ile çalışır fakat teknik özellikleri ve kullanım alanları farklılık gösterir (Holst & Lomheim, 2011). CCD sensörler, yüksek görüntü kalitesi ve düşük gürültü seviyesi sunar; CMOS sensörler ise hızlı veri işleme, daha düşük enerji tüketimi ve maliyet avantajı sunar. Pek çok taşınabilir ve klinik optik cihazlarda CMOS sensör tercih edilir.

Dijital görüntülerin kalitesi ve klinik olarak kullanılabilirliği, bazı faktörlere bağlıdır. Optisyenlikte önemli görüntü parametreleri arasında kontrast, çözünürlük, dinamik aralık ve gürültü sayılabilir:

- **Kontrast:** Görüntüdeki açık ve koyu alanlar arasındaki farktır.
- **Çözünürlük:** Görüntünün detay seviyesini belirler ve piksel sayısı ile ilişkilidir.
- **Dinamik aralık:** Aynı görüntüde algılanabilen en parlak ve en karanlık alanlar arasındaki farktır.
- **Gürültü:** Sensör veya çevresel faktörlerden kaynaklanan istenmeyen sinyallerdir.

Bu parametreler, korneal haritalar, retina görüntüleri ve biyometrik ölçümlerin doğru yorumlanmasında önemli bir role sahiptir (Bushberg et al., 2012).

Optisyenlik uygulamalarında kullanılan önemli dijital görüntüleme sistemleri ise şunlardır:

- **Biyometrik ölçüm cihazları:** Gözün anatomik parametrelerini dijital olarak ölçer.
- **Fundus kameraları:** Retina ve optik sinirin görüntülenmesini sağlar.
- **Korneal topografi sistemleri:** Korneanın yüzey yapısını ve eğriliğini analiz eder.
- **Optik Koherens Tomografi (OCT):** Retina tabakalarının kesitsel görüntülerini yüksek çözünürlükle sunar.

Dijital görüntüleme sistemleri sayesinde gözün ön ve arka segmentine ait veriler yüksek doğrulukla elde edilebilir ve ölçüm hataları minimize edilir. Ayrıca, optisyenlerin gözlük camı ve kontakt lens seçiminde daha hassas ve kişiselleştirilmiş çözümler sunmasına imkan tanır (Fercher et al., 2003; Huang et al., 1991). Bu sistemler optisyenlik uygulamalarında, ölçümlerin objektif ve tekrarlanabilir olmasını, görüntülerin dijital ortamda saklanabilmesini ve hasta takibinin kolaylaşmasını sağlar.

Göz rahatsızlığı tanısı koymak için, dijital görüntüleme sistemlerinden elde edilen veriler tek başına yeterli değildir. Bu sistemler, klinik karar süreçlerini desteklemek amacıyla kullanılır. Optisyenlerin ve alan uzmanlarının bu görüntüleri yorumlayabilmesi, görüntü kalitesini etkileyen faktörleri bilmesi ve olağan dışı bulguları ayırt edebilmesi mesleki yetkinlik açısından önemlidir. Bu nedenle, dijital görüntüleme teknolojilerinin optisyenlik eğitime entegrasyonu öğrencilerin mezuniyet sonrası mesleki yeterlilikleri açısından önemli bir avantaj sunar (Ellaway & Masters, 2008).

2.1. Optisyenlikte Kullanılan Dijital Görüntüleme Sistemleri

2.1.1. Fundus Kameraları

Fundus kameraları (Şekil 1), retina, optik disk, makula ve retinal damar yapılarının görüntülenmesini sağlar. Bu cihazlar, gözün arka segmentine ait geniş alanlı ve yüksek çözünürlüklü görüntü sunarak retina sağlığının incelenmesinde kullanılır (Li et al., 2020).

Fundus kameraları, genellikle beyaz ışık veya kızılötesi ışık kullanarak görüntü elde eder. Elde edilen dijital görüntüler, renkli veya monokrom olarak kaydedilebilir. Fundus görüntülerinden, optisyenlikte doğrudan tanı koymak için değil; gözlük veya kontakt lens uygulamaları sırasında olağandışı retinal bulguların fark edilmesi ve gerekli durumlarda hastanın göz hekimine yönlendirilmesi amacıyla yararlanılır.

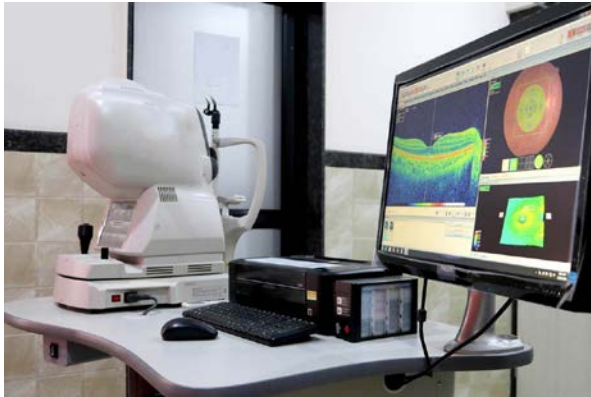
Şekil 1. Zeiss FF 450plus Fundus Kamera (URL-1)



2.1.2. Optik Koherens Tomografi (OCT)

Optik Koherens Tomografi (OCT) (Şekil 2), düşük koherensli ışık kullanarak retina ve diğer göz dokularının mikrometre düzeyinde kesitsel görüntülerini elde eden non-invaziv (göze temas etmeyen) bir görüntüleme yöntemidir. OCT, özellikle retina tabakalarının ayrıntılı incelenmesini mümkün kıldığından göz sağlığı alanında yaygın olarak kullanılır (Huang et al., 1991).

Şekil 2. Optik Koherens Tomografi (OCT – Göz Tomografisi) cihazı (URL-2)



Optisyenlik uygulamalarında OCT cihazları, makula bölgesinin yapısal bütünlüğünün gözlemlenmesi, kontakt lens uyumunun değerlendirilmesi ve görsel performansı etkileyebilecek anatomik farklılıkların belirlenmesi açısından önemlidir. OCT verilerinin temel düzeyde yorumlanabilmesi, optisyenin klinik farkındalığını artırır (Fercher et al., 2003).

2.1.3. Tomografi Sistemleri: Korneal Topografi

Korneal topografi (Şekil 3), korneanın ön yüzey eğriliğini ve şeklini dijital olarak haritalandıran bir görüntüleme cihazıdır. Özellikle kontakt lens uygulamaları ve astigmatizma değerlendirmesinde önemli rol oynar (Klyce & Smolek, 1997).

Şekil 3. Korneal topografi cihazı (URL-3)



Korneal tomografi sistemleri ise; korneanın yalnızca ön yüzeyini değil, arka yüzeyini ve kalınlık dağılımını da analiz eder. Böylece, korneal yapıya ilişkin daha kapsamlı veriler elde edilir. Bu sistemler optisyenlikte, düzensiz kornea yapılarının fark edilmesinde, kontakt lens seçiminde ve uyum problemlerinin değerlendirilmesinde destekleyicidir.

2.1.4. Biyometrik Ölçüm Cihazları

Şekil 4. Optik biyometre cihazı (URL-4)



Biyometrik ölçüm cihazları (optik biyometre, Şekil 4), gözün anatomik parametrelerini dijital olarak ölçer. Bu cihazlar ile aksiyel uzunluk, lens kalınlığı, ön kamara derinliği ve korneal çap gibi ölçümleri yüksek hassasiyetle ölçmek mümkündür (Olsen, 2007).

Optisyonik uygulamalarında biyometrik veriler, özellikle progresif cam tasarımları ve kişiye özel optik çözümlerin planlanmasında önem taşır. Biyometrik ölçümlerin temel ilkelerinin anlaşılması ile optisyenler elde edilen verileri doğru değerlendirebilir.

2.2. Yapay Zekâ Tabanlı Dijital Görüntü İşleme

Dijital görüntü işleme, görüntülerin bilgisayar ortamında analiz edilmesini ve iyileştirilmesini amaçlayan bir teknolojidir. Dijital görüntüleme sistemleriyle elde edilen görsel verilerin anlamlı ve klinik olarak kullanılabilir bilgiye dönüştürülmesi, yapay zekâ tabanlı dijital görüntü işleme teknikleri sayesinde mümkündür. Optisyonik alanında kullanılan pek çok modern cihaz, ham görüntü verilerini çeşitli işleme aşamalarından geçirip analiz sonuçları üreterek kullanıcıya sunar.

Dijital görüntü işleme, görüntülerin bilgisayar ortamında iyileştirilmesi, analiz edilmesi ve yorumlanması amacıyla kullanılan yöntemleri içerir. Bu süreç, tıbbi ve optik görüntüleme klinik karar destek sistemlerinin temelini oluşturur (Gonzalez & Woods, 2018).

Görüntünün dijital olarak elde edilmesi; ön işleme (gürültü azaltma, kontrast artırma), görüntü segmentasyonu, özellik çıkarımı ve sınıflandırma aşamalarından oluşur. Optisyenlikte dijital görüntü işleme korneal haritaların değerlendirilmesi, retina görüntülerinin analizi ve refraksiyon verilerinin yorumlanması gibi birçok optisyenlik uygulamasının temelini oluşturur (Gonzalez & Woods, 2018).

Ön işleme aşaması, ham görüntülerin analiz için uygun hale getirilmesi sürecidir. Görüntü kalitesini düşüren faktörler azaltılır ve klinik olarak önemli yapıların görünürlüğü artırılır. Optisyenlikte sık kullanılan ön işleme teknikleri aşağıda verilmiştir:

- **Gürültü azaltma:** Sensör kaynaklı bozulmaların giderilmesi
- **Kontrast artırma:** Retina ve kornea gibi yapıların daha net görünmesi
- **Filtreleme:** Kenarların ve geçiş bölgelerinin belirginleştirilmesi

Bu işlemler, özellikle retina ve kornea görüntülerinde ölçüm doğruluğunu artırır. (Bushberg et al., 2012).

Dijital bir görüntüde yer alan anatomik yapıların birbirinden ayrılması işlemine ise görüntü segmentasyonu denir. Optisyenlik uygulamalarında segmentasyon işlemleri, cihaz yazılımları tarafından otomatik olarak gerçekleştirilir. Retina tabakalarının, kornea sınırlarının veya pupil alanının belirlenmesi

gibi uygulamalarda segmentasyon önemli bir yere sahiptir (Pham et al., 2000).

Görüntüdeki anlamlı bilgilerin sayısal parametrelere dönüştürülmesi sürecine ise özellik çıkarımı denir. Bu parametreler; eğrilik değerleri, kalınlık ölçümleri, yoğunluk farkları veya doku özellikleri olabilir. Optisyenlikte özellik çıkarımı; refraksiyon verilerinin dijital karşılaştırılması, korneal eğrilik analizleri ve retina yüzey yapısının değerlendirilmesi süreçlerinde sıkça kullanılır. Bu aşama, yapay zekâ algoritmalarının çalışabilmesi için temel veri kaynağını oluşturur (Sharma & Aggarwal, 2010).

3. OPTİSYENLİKTE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

Görme optiğinde yapay zekâ sistemleri, görüntü işleme aşamalarından geçen verileri kullanarak sınıflandırma, tahmin ve karar destek işlemlerini gerçekleştirir. Optisyenlik alanında yapay zekâ destekli görme analizi; refraksiyon ölçümlerinin tutarlılığının değerlendirilmesi, kontakt lens uyum analizlerinin desteklenmesi ve görsel performansı etkileyebilecek yapısal farklılıkların ön analizi uygulamalarında kullanılır.

Göz sağlığı alanında yapay zekâ, doğrudan tanı koyma amacı ile değil, genel tarama, ölçüm süreçlerini destekleme, verileri analiz etme, karar süreçlerine yardımcı olma ve erken risk belirleme uygulamalarında kullanılır. Retina görüntülerinden glokom şüphesinin sınıflandırılması, diyabetik retinopati riskinin belirlenmesi ve makula bölgesindeki yapısal değişimlerin tespiti bu uygulamalara örnek olarak verilebilir (Ting et al., 2019).

Optisyenlik alanında yapay zekâ destekli sistemler, ölçüm ve analiz süreçlerinin hızlanmasını sağlar, büyük veri setlerinin anlamlandırılmasına yardım eder, insan kaynaklı hata payını

azaltır ve kişiselleştirilmiş optik çözümler sunar. Bu avantajlar, optisyenlik hizmetlerinin kalitesini artırmakta ve hasta memnuniyetine olumlu katkı sağlamaktadır (Reddy et al., 2020).

Optisyenlik eğitiminde yapay zekâ tabanlı dijital görüntü analizi becerilerinin kazandırılması, öğrencilerin teknolojik sistemleri bilinçli bir şekilde kullanmasını sağlar. Eğitim sürecinde örnek görüntüler üzerinden yapılan analizler, öğrencilerin klinik farkındalığını artırır. Simülasyon tabanlı uygulamalar ve vaka temelli öğrenme yöntemleri, dijital görüntü analizi becerilerinin geliştirilmesinde etkili araçlar olarak değerlendirilmektedir (Cook et al., 2011).

Bu bölümde, yapay zekâ destekli sistemlerin klinik optisyenlik uygulamalarındaki kullanımı ve bu sistemlerin sağladığı avantajlar ele alınmıştır.

3.1. Kontakt Lens Uygulamaları ve Yapay Zekâ

Kontakt lens uyumu; lens materyali, korneal yapı ve gözyaşı filmi gibi çok sayıda değişkenin birlikte değerlendirilmesini gerektiren bir süreçtir. Yapay zekâ destekli sistemler, korneal topografi ve tomografi verilerini analiz ederek uygun lens parametrelerine ilişkin öneriler sunar (Kim et al., 2018). Özellikle ilk kez lens seçimi yaparken uyum problemlerinin değerlendirilmesinde destek sağlar.

3.2. Refraksiyon Ölçüm Sistemleri ve Yapay Zekâ

Refraksiyon ölçümleri, optisyenlik uygulamalarının temelidir. Geleneksel yöntemlerde ölçüm doğruluğu; uygulayıcının deneyimine, ortam şartlarına ve hastanın kooperasyonu gibi etkilere bağlıdır. Yapay zekâ destekli refraksiyon sistemleri (otomatik refraktometre, Şekil 5), bu değişkenleri minimize etmeyi amaçlar.

Şekil 5. Otomatik refraktometre (URL-5)



Bu sistemler, geçmiş ölçüm verileri ve büyük veri setleri üzerinden eğitilmiş algoritmalar kullanarak, otomatik refraksiyon sonuçlarını optimize eder ve ölçümler arasındaki tutarlılığı artırır (Liu et al., 2020). Böylece, hem ölçüm hataları azalır hem de ölçüm süresi kısalmaktadır.

3.3. Retina ve Ön Segment Görüntülerinde Ön Analiz ve Yapay Zekâ

Retina ve ön segment görüntülerinin ön analizinde, yapay zekâ algoritmaları giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu sistemler, normal ve olağandışı görüntü örüntülerini ayırt edebilmekte ve potansiyel risk durumlarını belirlemektedir (Ting et al., 2019). Bu nedenle, özellikle göz rahatsızlıklarının erken fark edilmesinde ve doğru tanı koyma konusunda destekleyicidir.

3.4. Kişiselleştirilmiş Optik Çözümler ve Yapay Zekâ

Yapay zekâ, görsel ihtiyaçlara göre kişiselleştirilmiş optik çözümlerin geliştirilmesinde önemli bir araçtır. Yapay zekâ tabanlı analizlerle görsel ergonomi, dijital yaşam alışkanlıkları, hastaların görsel ihtiyaçları ve progresif cam tasarımları gibi faktörler birlikte değerlendirilebilmektedir (Resnikoff & Foster, 2020).

Yapay zekâ ile progresif ve multifokal lens tasarımları, bireysel göz parametreleri ve kullanıcı alışkanlıkları göz önüne alınarak optimize edilebilir. Yapay zekâ algoritmaları, kullanıcıların göz hareketlerini, dijital ekran kullanımını ve mesafeye göre odaklanma ihtiyaçlarını analiz ederek en uygun lens tasarımını önerir (Kim et al., 2018). Korneal topografi ve gözyaşı filmi analizi, kontakt lens uyumunun kritik bileşenleridir. Yapay zekâ tabanlı sistemler, büyük veri setlerinden öğrenerek hastaya uygun lens tipi, materyali ve çapını önerebilir (Kim et al., 2018).

Gözlük kullanıcısının gerçek zamanlı yüz görüntüsünü analiz edip uygun gözlük çerçevelerinin dijital ortamda denenmesine imkân sağlayan yapay zekâ tabanlı sanal deneme kabinleri (Virtual Try-On Systems) ve giyilebilir akıllı gözlükler (*smart glasses*) de optisyenlikte kişiselleştirilmiş optik çözümler sunmaya yardımcıdır.

Geleneksel yaklaşımda, standart lens ve cam seçenekleri sunulurken, artık yapay zekâ ve dijital analiz araçları sayesinde hastaya özel ve optimize edilmiş çözümler üretilebilmektedir (Resnikoff & Foster, 2020).

3.5. Klinik Karar Destek Sistemleri ve Yapay Zekâ

Yapay zekâ ve veri analitiğini kullanarak sağlık profesyonellerine öneriler sunan sistemler klinik karar destek sistemleri olarak adlandırılır. Optisyenlikte bu sistemler, ölçüm sonuçlarının yorumlanması ve uygun optik çözümlerin belirlenmesi aşamalarında destekleyicidir (Shortliffe & Sepúlveda, 2018).

Kişiselleştirilmiş optik çözümler, büyük veri analitiği ile desteklenebilir. Yapay zekâ, binlerce hasta verisini analiz ederek belirli lens ve cam türlerinin hangi kullanıcı profillerinde daha başarılı olduğunu tespit edebilir (Esteva et al., 2019).

4. OPTİSYENLİKTE YAPAY ZEKÂ VE DİJİTAL TEKNOLOJİLERİN GELECEĞİ

Optisyenlik mesleği, dijital görüntüleme ve yapay zekâ destekli karar sistemleri gibi teknolojik gelişmelerin etkisiyle hızla gelişmektedir. Bu gelişmeler ile doğru ölçümler yapılması ve kişiye özel çözümler sunulması daha mümkün hale gelmektedir. Günümüzde optisyenlikte öne çıkan teknolojik gelişmeler aşağıda verilmiştir:

- **Yapay zekâ tabanlı tanı ve analiz sistemleri:** Retina taramaları, refraksiyon ölçümleri ve korneal analizlerde kullanılır (Ting et al., 2019).
- **Giyilebilir ve akıllı optik cihazlar:** AR/VR destekli görme düzeltme ve kişiselleştirilmiş lenslerde kullanılır (Resnikoff & Foster, 2020).
- **Büyük veri ve öğrenen sistemler:** Klinik ve eğitim verileri üzerinden sürekli iyileşen yapay zekâ algoritmaları sunar (Esteva et al., 2019).

Optisyenlik eğitiminde dijital ve yapay zekâ tabanlı öğrenme sistemleri, öğrencilerin mesleki yeterliliklerini artırmada önemli bir rol oynayacaktır (Chen et al., 2020). Gelecekte optisyenlik eğitiminde öne çıkabilecek teknolojik uygulamalar aşağıda verilmiştir:

- **Artırılmış ve sanal gerçeklik (AR/VR) tabanlı simülasyonlar:** Öğrenciler sanal göz ölçümleri ve lens uygulamaları yapabilecektir.
- **Kişiselleştirilmiş öğrenme platformları:** Yapay zekâ, öğrencinin eksik olduğu konuları tespit ederek özel ders materyalleri önerecektir.
- **Uzaktan ve hibrit öğrenme:** COVID-19 sonrası dönemde yaygınlaşan model, kalıcı bir eğitim yöntemi olarak entegre olacaktır. (Garrison & Vaughan, 2008).

Optisyenlik eğitiminde sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR), öğrencilerin güvenli bir simülasyon ortamında uygulamalı bir eğitim almasını sağlar (Freina & Ott, 2015). VR simülasyonları, öğrencilere lens uygulamaları ve cihaz kullanım pratiği yapma imkânı verir. AR/VR uygulamaları, öğrencilerin el-göz koordinasyonu, cihaz kullanımı ve klinik karar süreçlerinin gelişimini sağlar. Ancak maliyet ve teknik altyapı sınırlılıkları nedeniyle bu teknolojilerin yaygın kullanımını sınırlı olabilir.

5. SONUÇ

Optisyenlikte yapay zekâ tabanlı dijitalleşme uygulamaları, mesleğin hem klinik hem de ticari boyutunda köklü bir dönüşüm başlatmıştır. Yapay zekâ tabanlı görüntüleme ve görüntü işleme sistemleri sayesinde retina analizleri, kornea haritalamaları ve refraksiyon ölçümleri daha hızlı ve hassas yapılabilmektedir. Büyük veri analiziyle desteklenen bu sistemler, erken teşhise katkı sağlarken hata payını azaltır ve kişiye özel çözümler sunulmasına imkân tanır. Ayrıca, dijital ölçüm cihazları, yapay zeka tabanlı makine öğrenimi, otomatik cam tasarım yazılımları ve akıllı envanter sistemleri optisyenlik hizmetlerinin hızını, doğruluk payını ve verimini artırır.

Optisyenlikte yapay zekâ uygulamaları yalnızca teşhis ve ölçüm süreçleriyle sınırlı değildir. Müşteriye uygun ürün öneri sistemleri ve satış sonrası hizmetlerde de önemli rol oynar. Yüz tanıma ve artırılmış gerçeklik destekli deneme uygulamaları sayesinde kullanıcılar çerçeveleri dijital ortamda deneyebilir. Yapay zekâ algoritmaları ise, yüz şekline ve görme ihtiyacına göre en uygun cam ve çerçeve seçeneklerini önerebilir. Bu durum hem müşteri memnuniyetini artırır hem de işletmeler için rekabet avantajı sağlar.

Gelecekte optisyenlikte yapay zeka ve dijital teknolojilerin daha entegre, taşınabilir ve daha fazla

kişiselleştirilmiş çözümler sunması beklenmektedir. Bulut tabanlı sistemler, uzaktan görme değerlendirmeleri ve giyilebilir akıllı optik cihazlar optisyenlik sektörünü dönüştürmektedir. Ancak bu dönüşüm sürecinde veri güvenliği, etik kullanım ve mesleki yetkinliklerin güncellenmesi büyük önem taşımaktadır. Sonuç olarak dijitalleşme ve yapay zekâ, optisyenlik mesleğini dönüştüren bir araç olmanın ötesinde, geleceğin göz sağlığı hizmetlerinin temel yapı taşlarından biri haline gelmektedir.

Teknolojinin optisyenliğe entegrasyonu ile optisyenin rolü, teknik ölçümlerden veri analizi ve yorumlamaya genişlemektedir. Böylece, optisyenlik mesleği kişiselleştirilmiş optik çözümler tasarlama becerisi ile yapay zekâ sistemlerini yönetme ve optimize etme becerisi gerektirmektedir.

KAYNAKLAR

- Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., & Boone, J. M. (2012). *The essential physics of medical imaging* (3rd ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Chen, L., Chen, P., & Lin, Z. (2020). Artificial intelligence in education: A review. *IEEE Access*, 8, 75264–75278.
- Cook, D. A., Levinson, A. J., Garside, S., et al. (2011). Instructional design variations in internet-based learning for health professions education. *Academic Medicine*, 86(3), 405–414.
- Ellaway, R., & Masters, K. (2008). AMEE Guide 32: E-learning in medical education. *Medical Teacher*, 30(5), 455–473.
- Esteva, A., Robicquet, A., Ramsundar, B., et al. (2019). A guide to deep learning in healthcare. *Nature Medicine*, 25, 24–29.
- Fercher, A. F., Hitzenberger, C. K., Kamp, G., & El-Zaiat, S. Y. (2003). Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry. *Optics Communications*, 117(1–2), 43–48.
- Freina, L., & Ott, M. (2015). A literature review on immersive virtual reality in education: State of the art and perspectives. *Conference Proceedings of eLearning and Software for Education*, 1, 133-141.
- Garrison, D. R., & Vaughan, N. D. (2008). *Blended learning in higher education: Framework, principles, and guidelines*. Jossey-Bass.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson.
- Holst, G. C., & Lomheim, T. S. (2011). *CMOS/CCD sensors and camera systems* (2nd ed.). SPIE Press.

- Huang, D., Swanson, E. A., Lin, C. P., et al. (1991). Optical coherence tomography. *Science*, 254(5035), 1178–1181.
- Jalie, M. (2008). *Ophthalmic Lenses and Dispensing*. Butterworth-Heinemann.
- Kim, J., et al. (2018). Artificial intelligence in contact lens fitting. *Contact Lens and Anterior Eye*, 41(6), 540–546.
- Klyce, S. D., & Smolek, M. K. (1997). Keratoconus detection with corneal topography. *Ophthalmology*, 104(3), 414–423.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
- Li, F., Wang, Z., & Liu, H. (2020). Retinal imaging and applications. *Progress in Retinal and Eye Research*, 76, 100799.
- Liu, X., et al. (2020). A deep learning system for automated refractive error estimation. *Ophthalmology*, 127(4), 562–570.
- McCarthy, J., Minsky, M., Rochester, N., & Shannon, C. (1956). A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence. Dartmouth College.
- Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning*. McGraw-Hill.
- Olsen, T. (2007). Calculation of intraocular lens power: A review. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 85(5), 472–485.
- Pham, D. L., Xu, C., & Prince, J. L. (2000). Current methods in medical image segmentation. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2, 315–337.
- Reddy, S., Fox, J., & Purohit, M. P. (2020). Artificial intelligence-enabled healthcare delivery. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 113(1), 22–28.

- Resnikoff, S., & Foster, A. (2020). The impact of vision impairment. *Bulletin of the World Health Organization*, 98(2), 80–80A.
- Sharma, N., & Aggarwal, L. M. (2010). Automated medical image segmentation techniques. *Medical Physics*, 37(7), 4081–4096.
- Sheppard, A. L., & Wolffsohn, J. S. (2018). Digital eye strain. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 38(5), 541–552.
- Shortliffe, E. H., & Sepúlveda, M. J. (2018). Clinical decision support in the era of artificial intelligence. *JAMA*, 320(21), 2199–2200.
- Ting, D. S. W., et al. (2019). Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *British Journal of Ophthalmology*, 103(2), 167–175.
- Topol, E. (2019). *Deep Medicine*. How artificial intelligence can make healthcare human again. Basic Books.
- URL-1: <https://tr.medeqipexp.com/%C3%BCr%C3%BCn/zeiss-ff-450plus-fundus-kamera/> Erişim tarihi: 19.02.2026
- URL-2: <https://www.girayersoz.com.tr/oct-goz-tomografisi-optik-koherens-tomografi/> Erişim tarihi: 19.02.2026
- URL-3: <https://hasmedtibbiaksesuar.com/teknik-servis/goz-cihazlari-tamir-bakim-ve-onarimi/korneal-topografi-cihazlari-tamiri/> Erişim tarihi: 20.02.2026
- URL-4: <https://turkish.alibaba.com/product-detail/Ophthalmic-Equipment-AL-VIEW-Lite-Optical-1601106493964.html?spm=a2700.7724857.0.0.70bf19a7WoD0DH> Erişim tarihi: 20.02.2026
- URL-5: <https://oculus.sk/katalog-produktov/autorefraktometre/auto-ref-keratometer-nidek-ark-1s/> Erişim tarihi: 20.02.2026

OPTİSYENLİK EĞİTİMİ SONRASI İSTİHDAM VE KARIYER MEMNUNİYETİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA¹

Songül İŞIKTAŞ²

İlayda AYDIN³

Göknur ÖZEL⁴

Özge ERDEM⁵

1. GİRİŞ

Son yıllarda Optisyenlik mesleğine ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu durum, Optisyenlik programında okuyanların sayısı ile birlikte mezun sayısında da ciddi bir artışa neden olmaktadır. Bu artışa bağlı olarak mezunların istihdam olanaklarında zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorlukların bir kısmı mezun sayısındaki artıştan kaynaklandığı gibi bir kısmı ise, Optisyenlik programında okuyan ve mezun öğrencilerin bu programın olanaklarından haberdar olmayışından kaynaklanmaktadır.

¹ Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destek Programı tarafından 2024 yılı/1.dönem 1919B012467091 proje numarası ile desteklenen “Optisyenlik programı mezunlarının istihdam olanakları, kariyer gelişimleri ve memnuniyet durumları” isimli projeden üretilmiştir.

² Optisyen, Bayburt Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, ORCID: 0009-0004-7003-3972.

³ Öğrenci, Bayburt Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, ORCID: 0009-0005-8713-8911.

⁴ Öğrenci, Bayburt Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, ORCID: 0009-0008-9944-309X.

⁵ Doç. Dr., Bayburt Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, ORCID: 0000-0003-4542-941X.

Optisyenlik programında okuyan ve mezun olmuş her öğrencinin hedefleri farklı olabilir, fakat genellikle geliri yüksek iş bulma ve işletme sahibi olma gibi hedefler öne çıkar. Optisyenlik mezunlarının iş bulma süreçleri ve kariyer gelişimleri üzerine yapılan araştırmalar, mesleki eğitimlerini tamamladıktan sonra genellikle iş bulmada başarılı olduklarını göstermektedir. Ancak, iş bulma sürecindeki zorluklar ve karşılaşılan engeller de göz önüne alınmalıdır. Optik sektöründeki talep dalgalanmaları, iş gücü piyasasındaki rekabet, mezunların beklentileri ile işverenlerin talepleri arasındaki uyumsuzluklar gibi faktörler iş bulma sürecini etkilemektedir. Özellikle, mezunların iş bulma sürecini kolaylaştırmak için staj yaparak iş deneyimi edinmeleri, sektördeki gelişmeleri takip etmeleri ve iletişim becerilerini geliştirmeleri önemlidir. Bununla birlikte, teknolojinin gelişmesiyle optisyenlik alanında da yeni iş olanakları ortaya çıkmaktadır ve mezunlara farklı kariyer imkânları sunulmaktadır. Optisyenlik mezunlarının iş bulma sürecindeki deneyimleri çeşitlilik gösterebilir ve mezunların kendilerini sürekli olarak geliştirmeleri sektörde rekabetçi kalabilmeleri için önemlidir.

Bu çalışmada, Optisyenlik programı mezunlarının istihdam durumları ve beklenti/memnuniyet düzeyleri araştırılmıştır. Mezunların şu an hangi iş/meslek gruplarında çalıştıkları, kariyer gelişimleri ve programa ilk kayıt olduklarındaki beklentileri ile şimdiki durumları arasındaki memnuniyet durumları incelenmiştir. Bunun için, Bayburt Üniversitesi'nde 2016 yılında eğitim-öğretime başlayan Optisyenlik programından son beş yılda mezun olmuş öğrenci grubu ile anket ve mülakat çalışması yapılmıştır. Elde edilen veriler analiz edilerek sonuçlar kısmında yorumlanmıştır.

Bu çalışma, optisyenlik mezunlarının istihdam deneyimlerini araştırmak ve gelecekteki optisyenlik mezunlarının işgücü piyasasına daha etkin bir şekilde entegre olmalarına yardımcı olmak açısından önemlidir. Çalışma sonuçlarının, hem

sektördeki ihtiyaçları ve eğilimleri anlamak için değerli bir kaynak olması hem de mezunlara istihdam konusunda farklı bir bakış açısı kazandırması beklenmektedir.

2. ÇALIŞMA İÇERİĞİ

2.1. Materyal/Metot

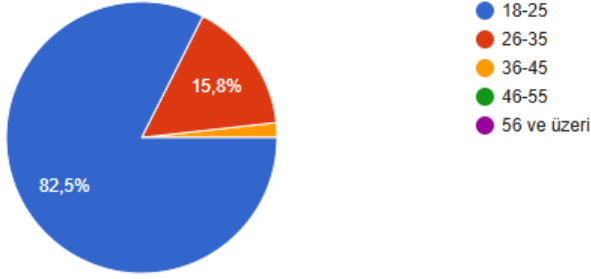
Bu çalışmanın örneklemini son 5 yılda (2021-2025) Bayburt Üniversitesi Sağlık Hizmetleri MYO Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü Optisyenlik (Örgün öğretim ve İkinci öğretim) önlisans programından mezun olan öğrenciler oluşturmaktadır. Çalışmada toplam 50 adet mezun ile anket ve mülakat çalışmalarının yürütülmesi planlanmıştır. Anket ve mülakat soruları ön uygulama ile belirlenmiş ve çalışma için gerekli izinler alınmıştır. Sonrasında Google Forms üzerinden online anket ve mülakat formları hazırlanmıştır. Anket ve mülakat linkleri, 2021-2025 yılları arasında (son beş yıl) Optisyenlik programından mezun olan öğrencilerin e-mail adreslerine gönderilmiştir. Sonuç olarak, ankete 57 mezun ve mülakata 32 mezun gönüllü katılım gerçekleştirmiştir.

2.2. Bulgular

2.2.1. Anket Formlarından Elde Edilen Veriler

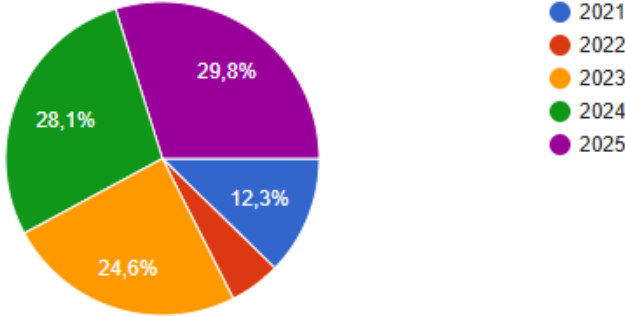
- a) Ankete %26.3 kadın ve %73.7 erkek mezun katılmıştır.
- b) Anket katılımcılarının yaş dağılımı Şekil 1’de verilmiştir. Buna göre, anket katılımcılarının %82.5’i 18-25 arasında, %15.8’i 26-35 yaş arasında ve %1.7’si 36-45 yaş arasındadır.

Şekil 1. Ankete katılan mezunların yaş dağılımı



- c) Ankete katılanların %98.2'si önlisans ve %1.8'i önlisans ve lisans mezunudur.
- d) Ankete katılanların optisyenlik programı mezuniyet yılları Şekil 2'de verilmiştir. Buna göre, anket katılımcılarının %29.8'i 2025 yılında, %28.1'i 2024 yılında, %24.6'sı 2023 yılında, %5.2'si 2022 yılında ve %12.3'ü 2021 yılında mezun olmuştur.

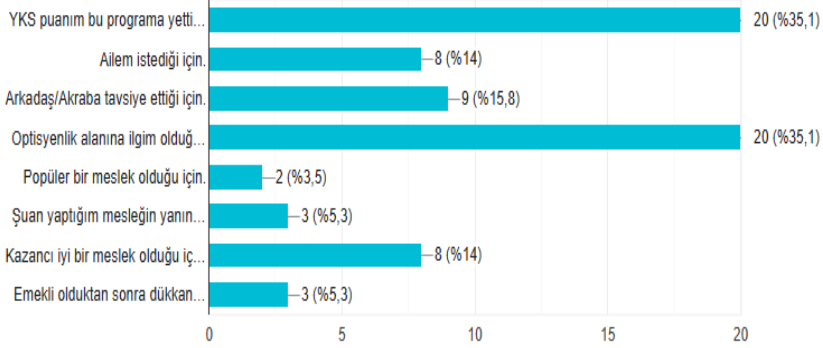
Şekil 2. Ankete katılan mezunların optisyenlik programı mezuniyet yılları



- e) Ankete katılanların optisyenlik programını seçme nedenleri Şekil 3'te verilmiştir. Birden fazla cevabın işaretlenebildiği bu soruda, seçilen nedenler arasında öne çıkanlar “YKS puanı yeten bir programı tercih etmek” (%35.1) ve “Optisyenlik alanına ilgi duyulması” (%35.1) olmuştur. Bu nedenleri, “arkadaş/akraba tavsiyesi

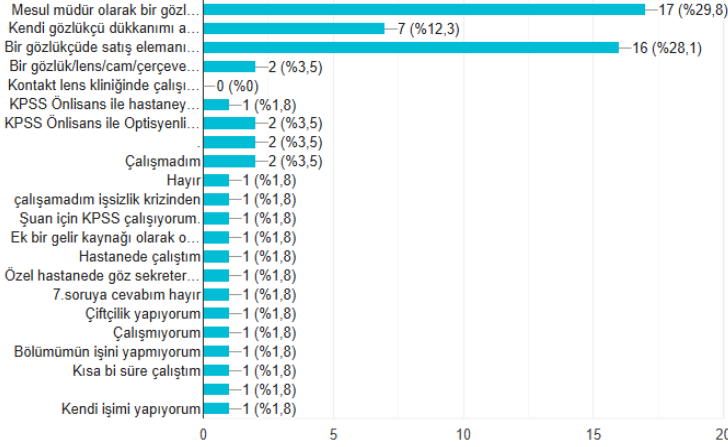
(%15.8), aile isteği (%14) ve kazancı iyi bir meslek olması (%14)” gibi nedenler izlemektedir.

Şekil 3. Ankete katılan mezunların optisyenlik programını seçme nedenleri



- f)** Ankete katılanların %71.9’u optisyenlik programından mezun olduktan sonra optisyenlik sektörü ile ilgili bir işte çalışmış ve %28.1’i ise çalışmamıştır. Optisyenlik mezunlarının çalıştıkları meslekler Şekil 4’te verilmiştir. Buna göre, mezunların %29.8’i mesul müdür olarak, %28.1’i gözlükçüde satış elemanı olarak çalışmış ve %12.3’ü kendi gözlükçü dükkânını açmıştır.
- g)** Ankete katılanların %57.9’u optisyenlik programından mezun olduğu yıl, %15.8’i mezun olduktan sonraki 1 yıl içinde, %8.8’i mezun olduktan sonraki 2 yıl içinde, %1.7’si mezun olduktan sonraki 2 yıl içinde ve %15.8’i mezun olduktan sonraki 4 ve üzeri yıl içinde optisyenlik sektöründe iş bulmuşlardır.
- h)** Ankete katılanların %1.8’i optisyenlik programından mezun olduktan sonra 4 yıllık bir lisans programı (Açık Öğretim Fakültesi ve Spor Bilimleri Fakültesi) bitirmiş ya da okumaktadır.

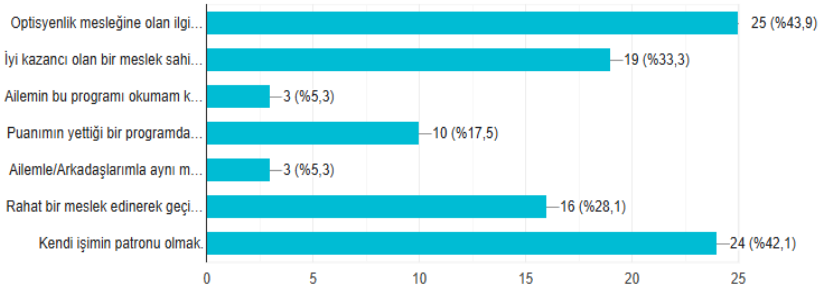
Şekil 4. Ankete katılan mezunların optisyenlik programından mezun olduktan sonra çalıştıkları meslekler



- i)** Ankete katılanların %19.3'ü optisyenlik programından mezun olduktan sonra başka bir önlisans programı (Tıbbi Dokümantasyon ve Sekreterlik, Çocuk Gelişimi) bitirmiş ya da okumaktadır.
- j)** Ankete katılanların %35.1'i optisyenlik programından mezun olduktan sonra optisyenlik sektörü ile ilgili olmayan işlerde çalışmıştır. Bu durumun öne çıkan nedenleri arasında, farklı bir meslek alanında kariyer yapmak istemek (%21.1), gözlükçü dükkanını açmak için bütçenin yeterli olmaması (%17.5) ve optisyenlik sektörü ile ilgili işlerin maaşını yeterli bulmamak (%14) yer almaktadır.
- k)** Ankete katılanların “Aldığımız Optisyenlik Önlisans eğitiminin, Optisyenlik sektöründeki iş hayatında ihtiyaç duyulan bilgi ve becerileri kazandırma konusunda yeterli olduğunu düşünüyor musunuz?” sorusuna verdikleri cevaplar; %29.8 evet, %47.4 kısmen ve %22.8 hayır olmuştur.

- l) Ankete katılanların “Optisyenlik programında okumaya başladığınızda beklentileriniz nelerdi?” sorusuna verdikleri cevaplar Şekil 5’te verilmiştir. Birden fazla cevabın seçilebildiği bu soruda seçilen cevaplar arasında, “optisyenlik sektörüne ilgi duyduğundan bu alanda daha fazla bilgi sahibi olmayı istemek (%43.9), kendi işinin patronu olmayı istemek (%42.1), iyi kazancı olan bir meslek sahibi olmak istemek (%33.3), rahat bir meslek edinerek geçimini sağlamak (%28.1) ve puanının yettiği bir programdan mezun olmak (%17.5)” cevapları öne çıkmıştır.

Şekil 5. Ankete katılan mezunların optisyenlik programında okurken beklentileri



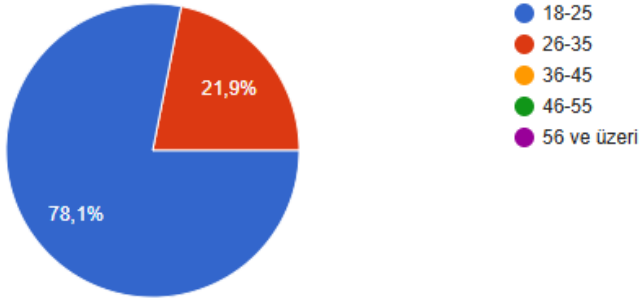
- m) Ankete katılanların “Optisyenlik mesleğine dair beklentileriniz ile Optisyenlik sektöründeki iş tecrübelerinizi karşılaştırdığınızda beklentileriniz karşılandı mı?” sorusuna verdikleri cevaplar %40.4 evet, %42.1 kısmen ve %17.5 hayır olmuştur.
- n) Ankete katılanların “Optisyenlik sektöründe çalışmayı seçtiğiniz için memnun musunuz?” sorusuna verdikleri cevaplar %56.1 evet, %29.8 kısmen ve %14 hayır olmuştur.

- o) Ankete katılanların %66.7'si optisyenlik mesleğini çevresine tavsiye ederken, %33.3'ü tavsiye etmediğini belirtmiştir.

2.2.2. Mülakat Formlarından Elde Edilen Veriler

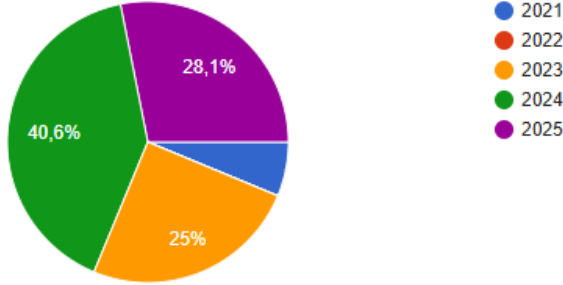
- a) Mülakata %75 bayan ve %25 erkek mezun katılmıştır.
- b) Mülakat katılımcılarının yaş dağılımı Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, katılımcıların %78.1'i 18-25 arasında ve %21.9'u 26-35 yaş arasındadır.

Şekil 6. Mülakata katılan mezunların yaş dağılımı



- c) Mülakata katılanların %96.9'u önlisans ve %3.1'i önlisans ve lisans mezunudur.
- d) Mülakata katılanların optisyenlik programı mezuniyet yılları Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre, katılımcıların %28.1'i 2025 yılında, %40.6'sı 2024 yılında, %25'i 2023 yılında ve %6.3'ü 2021 yılında mezun olmuştur. Mülakata 2022 yılında mezun olanlar katılım göstermemiştir.

Şekil 7. Mülakata katılan mezunların optisyenlik programı mezuniyet yılları



e) Mülakata katılan mezunların optisyenlik programında okuma nedenleri verilen cevaplardan analiz edilmiş ve Tablo 1’de belirtilen nedenler öne çıkmıştır.

Tablo 1. Mezun öğrencilerin optisyenlik programını tercih etme nedenleri

Verilen Cevap	Toplam	Yüzde (%)
Kendi işini kurmak	7	21.875
Optisyenlik mesleğine ilgisi olmak	10	31.250
Aile/arkadaş önerisi	5	15.625
Geliri iyi/iş imkânı olan bir meslek olması	6	18.750
YKS puanı bu bölüme yettiği için	2	6.250
Nedeni yok	1	3.125
Bilmiyorum	1	3.125
Toplam	32	100

f) Mülakata katılan mezunların optisyenlik programında okurken bu alanla ilgili hedef ve beklentilerinin neler olduğunun sorulduğu soruda verilen cevaplar analiz edilmiş ve öne çıkanlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Mezun öğrencilerin optisyenlik programında okurken hedef ve beklentileri

Verilen Cevap	Toplam	Yüzde (%)
Kendi işinin patronu olmak/Dükân açmak	15	46.875
Devlet memuru olmak/Atanmak	5	15.625
Optik mağazasında çalışmak	3	9.375
İlgim olan mesleği öğrenmek	4	12.500
Kazancı iyi/iş imkânı olan bir meslek edinmek	5	15.625
Toplam	32	100

- g) Mülakata katılan mezunların optisyenlik programından mezun olduktan sonra iş bulma sürecinde ve çalışırken hedef ve beklentilerine ulaşip ulaşmadıklarının sorulduğu soruda verilen cevaplar analiz edilmiş ve öne çıkanlar Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Mezun öğrencilerin hedef ve beklentilerine ulaşma düzeyleri

Verilen Cevap	Toplam	Yüzde (%)
Hayır ulaşamadım	17	53.125
Kısmen ulaştım	5	15.625
Ulaştım	10	31.250
Toplam	32	100

- h) Mülakata katılan mezunların “Optisyenlik programında okumadan önce bir mesleğiniz var mıydı? Herhangi bir bölüm/programdan mezun muydunuz?” sorusuna verdikleri cevaplar Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Mezun öğrencilerin optisyenlik programı dışında mezun oldukları bölüm ve programlar

Verilen Cevap	Toplam	Yüzde (%)
Hayır (Başka bölüm/program okumadım)	22	68.750
Evet (Bölüm belirtilmemiş)	2	6.250
Biyomedikal Mühendisliği	1	3.125
Harita Mühendisliği	1	3.125
Elektrik-Elektronik Pano Monitörlüğü	1	3.125
Adalet	2	6.250
Tıbbi Dokümantasyon ve Sekreterlik	1	3.125
Diyaliz	1	3.125
Sanayide işçi	1	3.125
Toplam	32	100

- i) Mülakata katılan mezunların optisyenlik programından mezun olduktan sonraki kariyer gelişimlerinin sorulduğu soruda verilen cevaplar analiz edilmiş ve Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Mezun öğrencilerin optisyenlik programından mezun olduktan sonraki kariyer gelişimleri

Verilen Cevap	Toplam	Yüzde (%)
Mezun olduktan sonra başka bölüm okumadım ve çalışmıyorum.	9	28.125
Mesul müdür olarak/satış elemanı olarak çalışıyorum.	10	31.250
İkinci/yeni optik mağazamızı açacağız.	2	6.250
Memurluk için KPSS'ye hazırlanıyorum.	3	9.375
Çiftçilik yapıyorum.	1	3.125
Önce optik mağazasında çalıştım, sonra memur olarak atandım.	2	6.250
Gözlük mağazasında 2 ay çalışıp Çocuk Gelişimi programı okumaya başladım.	1	3.125
2 aydır optik mağazasında çalışıyorum ve Yaşlı Bakım programı okuyorum.	1	3.125
Mezun olduktan sonra Tıbbi Dokümantasyon ve Sekreterlik programı okudum.	1	3.125
Mezun olduktan sonra alanımda çalışmaya başladım ve Tıbbi Dokümantasyon ve Sekreterlik programı okuyorum.	2	6.250
Toplam	32	100

j) Mülakata katılan mezunların “Optisyenlik mesleği ile ilgili iş/kariyer/kazanç/ikili ilişkiler açısından zorluklar nelerdir?” sorusuna verdikleri cevaplar ve frekans dağılımı analiz edilerek Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Optisyenlik mesleği ile ilgili iş/kariyer/kazanç/ikili ilişkiler açısından zorluklar

Verilen Cevap	Frekans (f)	Yüzde (%)
Düşük maaş/kazanç	10	28.571
Mesleğimi yapmıyorum	2	5.714
Herhangi bir zorluğu yok	5	14.286
İş alanı kısıtlı/iş bulmak zor	6	17.144
Zor (Ayrıntı belirtilmemiş)	1	2.857
Mesleği öğrenme aşaması zor	1	2.857
KPSS ataması az sayıda oluyor	2	5.714
Müşteri ile iletişim zorluyor	8	22.857
Toplam	35	100

k) Mülakata katılan mezunların “Şu anki mesleğinizden iş/kariyer/kazanç/ikili ilişkiler açısından memnun musunuz?” sorusuna verdikleri cevaplar analiz edilerek Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Mezun öğrencilerin yaptıkları meslekten iş/kariyer/kazanç/ikili ilişkiler açısından memnuniyet durumları

Verilen Cevap	Toplam	Yüzde (%)
Evet, memnunum	19	59.375
Kısmen memnunum	2	6.250
Hayır, memnun değilim	8	25.000
Bilmiyorum	1	3.125
İşsizim	2	6.250
Toplam	32	100

l) Mülakata katılan mezunların “Optisyenlik programı mezunları hangi işlerde çalışabilmektedir?” sorusuna verdikleri cevaplar ve frekans dağılımı Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Optiyenlik mezunlarının çalışabildikleri meslekler

Verilen Cevap	Frekans (f)	Yüzde (%)
Gözlükçülerde (kendi dükkânı, mesul müdür, satış temsilcisi)	29	55.769
KPSS ile atanma/Hastaneler	17	32.692
Cam/çerçeve üretim fabrikaları	5	9.616
Cam depoları	1	1.923
Toplam	52	100

m)Mülakata katılan mezunların “Optisyenlik mezunlarının mezun olduktan sonra 4 yıllık lisans programına tamamlama yapabilecekleri bölüm ve programlar nelerdir?” sorusuna verdikleri cevaplar ve frekans dağılımı Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Optisyenlik mezunlarının lisans tamamlama yapabilecekleri bölümler

Verilen Cevap	Frekans (f)	Yüzde (%)
Fizik bölümü/Fizik Mühendisliği	16	43.243
Optik ve Akustik Mühendisliği	6	16.216
Sağlık Kurumları Yönetimi	2	5.405
Fizik Öğretmenliği	1	2.703
Mekatronik	1	2.703
Bilmiyorum	11	29.730
Toplam	37	100

n) Mülakata katılan mezunların “Optisyenlik mezunları KPSS önlisans ile hangi mesleklere atanabilme hakkına sahiptir?” sorusuna verdikleri cevaplar ve frekans dağılımı Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Optisyenlik mezunlarının KPSS Önlisans ile atabilecekleri meslekler

Verilen Cevap	Frekans (f)	Yüzde (%)
Hastaneler/Göz polikliniği	22	68.750
Optisyenlik	2	6.250
Sağlıkla ilgili tüm bölümler	1	3.125
Çoğu memurluk alanları	1	3.125
BİM/A101/Japon pazarı	1	3.125
Bilmiyorum	5	15.625
Toplam	32	100

3. SONUÇ

Çalışma kapsamında uygulanan anket ve mülakat formlarından elde edilen veriler yorumlanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Anket ve mülakata, 2025, 2024 ve 2023 yıllarında optisyenlik programından mezun olanlar ve 18-25 arası mezunlar daha fazla katılım göstermiştir.
- Optisyenlik programı mezunlarının %30’dan fazlası bir önlisans ya da lisans programı okuduktan sonra

optisyenlik programı okumuştur. Optisyenlik programından mezun olduktan sonra ise yeni bir önlisans ya da lisans programı okuyan sayısı %20'den fazladır.

- Optisyenlik programı mezunlarının bu programı tercih etme nedenlerinden öne çıkanlar; YKS puanının ilgili bölüme yetmesi, arkadaş/akraba/aile tavsiyesi/isteği, optisyenlik mesleğine ilgi duyma, kendi işinin patronu olma isteği ve optisyenliğin geliri iyi bir meslek olarak bilinmesi olmuştur.
- Optisyenlik programı mezunları, yaklaşık %60 oranında mezun oldukları ilk yıl içinde alanları ile ilgili bir iş (gözlükçüde satış elemanı, mesul müdür, kendi gözlükçü dükkânının açan ve işleten) bulmuşlardır. Geri kalan kısmı ise, ya çalışmamaktadır ya da KPSS ile memur olarak atanmış veya alan dışı başka bir meslek yapmaktadır.
- Optisyenlik programı mezunlarının %75'ten fazlası optisyenlik programında aldıkları eğitimin kısmen ya da tamamen iş hayatlarında yararlı olduğunu düşünmektedir. %70'ten fazlası, optisyenlik sektöründe çalışmaktan kısmen ya da tamamen mutludur. %65'ten fazlası ise, çevrelerine optisyenlik mesleğini tavsiye etmektedir.
- Optisyenlik programı mezunlarının, programda okurken ki beklentileri arasında öne çıkanlar; ilgi duydukları meslek alanında bilgi sahibi olmak, kendi iş yerlerini açmak ve kazancı yüksek bir meslek sahibi olmaktır. Mezun katılımcıların yarısı beklentilerine kısmen ya da tamamen ulaşmış, diğer yarısı ise ulaşamamıştır.

- Optisyenlik programı mezunlarına göre mesleğin zorluklarında öne çıkanlar düşük maaş ve müşteri ile iletişim olmuştur.
- Optisyenlik mezunları arasında, mezunların gözlükçülerde ve KPSS ataması ile hastanelerde çalışabileceği bilgisi yaygındır. Mezunların çok az kısmı (%10), cam/çerçeve üretim fabrikaları ve cam depoları gibi yerlerde de çalışabileceklerini bilmektedir.
- Optisyenlik mezunlarının yaklaşık %30 kadarı mezun olduktan sonra 4 yıllık lisans programına tamamlama yapabilecekleri bölüm ve programları bilmemektedir. %18'den fazlası ise KPSS önlisans sınavı ile hangi mesleklere memur olarak atanabilme hakkına sahip olduklarını bilmemektedir.

Optisyenlik programına yönelik tercih eğilimleri incelendiğinde, öğrencilerin bu programı büyük ölçüde YKS puanları doğrultusunda, aile ve çevre tavsiyeleri ile mesleğe duydukları ilgi temelinde seçtikleri görülmektedir. Program süresince sunulan eğitim-öğretim faaliyetlerinin, mesleki yeterlilik açısından genel olarak yeterli bulunduğu anlaşılmaktadır. Mezunlar arasında, gözlükçü dükkânı açma, optik işletmelerde mesul müdür veya satış personeli olarak çalışma ile kamu personeli seçme sınavı (KPSS) aracılığıyla kamuya atanma olanaklarının yaygın olarak bilindiği dikkat çekmektedir.

Optisyenlik programı mezunlarının, mezuniyetlerinin ardından görece kısa bir süre içerisinde kendi alanlarıyla ilgili iş bulabildikleri görülmektedir. Bununla birlikte, sektörde elde edilen gelir düzeyinin mezunların beklentilerini tam anlamıyla karşılamadığı ifade edilmektedir. Bu durumun başlıca nedenlerinden biri, iş gücü piyasasında arzın talebin üzerinde

olması, bir diğer ifadeyle mezun sayısının sektörel ihtiyacın üzerine çıkmış olmasıdır. Ayrıca, mezunların önemli bir kısmının kendi iş yerini açarak yüksek gelir elde etme beklentisi, iş yeri açma maliyetlerinin ve kira giderlerinin yüksekliği nedeniyle çoğu zaman karşılanamamaktadır.

Öte yandan, mezunların KPSS aracılığıyla atanabilecekleri kadrolar ve meslek alanları hakkında bilgi düzeylerinin sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, optisyenlik mezunlarının iş gücü piyasasında alternatif kariyer olanaklarını değerlendirmelerini zorlaştıran önemli bir engel olarak öne çıkmaktadır.

Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, optisyenlik mesleğinde başarılı olabilmek için güçlü iletişim becerilerine sahip, alanında yetkin ve nitelikli bireyler olarak öne çıkmanın gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, kendi iş yerini açmayı planlayan mezunların, başlangıç maliyetlerini ve işletmenin kurulacağı lokasyonu dikkatli bir biçimde analiz etmeleri büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, kamu sektöründe istihdam olanaklarına ilişkin olarak, Sağlık Bakanlığı bünyesindeki kadrolar ile genel idari hizmetler sınıfında yer alan pozisyonlar hakkında kapsamlı araştırma yapılması gerekmektedir.

ÇEVRESEL RADYOAKTİVİTE VE MOLEKÜLER ETKİLEŞİMLER

Ali KAYA¹

1. GİRİŞ

Çevresel radyoaktivite, hem doğal hem de yapay kaynaklardan çevreye yayılan iyonlaştırıcı radyasyonun ekosistemler ve canlılar üzerindeki etkilerini inceler. Bu bölümde, radyoaktif izotopların çevredeki dolaşımı ve moleküler düzeyde biyolojik sistemlerle etkileşimlerinin araştırılacaktır. Özellikle DNA ve protein yapılarında meydana gelen değişiklikler, çevresel sağlık risklerinin anlaşılmasında temel rol oynamaktadır.

20. yüzyılın ilk çeyreğinden sonra çevresel risklerden biri de radyonüklid döngüsü ve buna bağlı radyasyon seviyeleridir; bunların önemli bir kısmı kozmik ve gama radyasyonundan kaynaklanmaktadır (Kaya ve Vural 2020). Dünya üzerinde yaklaşık 340 doğal olarak oluşan nükleidin var olduğu bilinmektedir ve bunların yaklaşık 70'i radyonüklid olarak sınıflandırılır. Bunlar kendiliğinden radyoaktif bozunmaya uğrayan kimyasal olarak kararsız elementlerdir.

Doğal yollarla oluşan ve hava, toprak ve suda yer alan Tritiyum (^3H), Karbon-14 (^{14}C), Berilyum-7 (^7Be) ve Sodyum-22 (^{22}Na) dahil olmak üzere bazı radyonüklitler, kozmik ışınlar veya güneş aktivitesi tarafından tetiklenen nükleer reaksiyonlar yoluyla üretilen kısa ömürlü kozmojenik izotoplardır. Karada yer alan Potasyum-40 (^{40}K), Uranyum-238 (^{238}U), Uranyum-235

¹ Doktor Öğretim Üyesi, Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-2326-0705.

(²³⁵U), Rubidyum-87 (⁸⁷Rb) ve Toryum-232 (²³²Th) gibi diğerleri ise, genellikle milyarlarca yılı aşan son derece uzun yarı ömürlere sahip ilkel karasal radyonüklitlerdir (Huston ve Gutzmer 2023). Bu doğal kaynaklara ek olarak özellikle nükleer silah testleri, nükleer kazalar ve endüstriyel uygulamalar sonucu ortaya çıkan Plütonyum-239 (²³⁹Pu), Sezyum-137 (¹³⁷Cs), Sezyum-134 (¹³⁴Cs), Stronsiyum-90 (⁹⁰Sr), Lantan-138 (¹³⁸La), Rubidyum-87 (⁸⁷Rb) ve Lutesyum-176 (¹⁷⁶Lu) dahil olmak üzere çeşitli antropojenik radyonüklitler de son yüzyılda çevreye salınmaktadır (Kaya 2026).

Karasal, kozmik ve insan kaynaklı kaynaklardan kaynaklanan radyasyonun etkisini anlamak giderek daha önemli hale gelmiştir (Chandrasekaran vd. 2014; Ravisankar vd. 2015; Vural ve Kaya 2021, Vural ve Kaya, 2023). Sonuç olarak, bu konuya olan bilimsel ilgi son yıllarda önemli ölçüde artmış ve ilgili çalışmalarda gözle görülür bir artışa yol açmıştır (Kaya, 2026; Vural ve Kaya, 2026; Avcı ve Uluc 2025; Kurnaz vd. 2007; Singh vd. 2025; Uzun Duran, 2025; Yalçın vd. 2025; Zinicovscaia vd. 2025). Bu araştırmaların dünyanın farklı bölgelerinde doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite değerlerini belirleme ve insan sağlığı üzerine etkileri üzerine yoğunlaştığı görülmektedir.

İnsan sağlığı üzerine radyolojik etkinin incelenmesinde radyobiyojenerasyon/genotoksikoloji odaklı (mikro) çalışmalar da yapılmaktadır (Şekeroğlu ve Şekeroğlu, 2011; Boryto ve diğ., 2017; Büyükvardar, 2020; Gökoğlan ve diğ., 2020). Radyobiyojenerasyon ve genotoksikoloji odaklı çalışmalar; iyonlaştırıcı radyasyonun hücre düzeyinde DNA hasarı, mutasyon ve genetik istikrarsızlık üzerindeki etkilerini moleküler düzeyde inceleyen disiplinler arası araştırmalardır. Bu araştırmalar, kanser tedavileri ve radyasyon güvenliği açısından kritik öneme sahiptir (Parlak ve diğ., 2020).

Mevcut literatürde çevresel radyoaktivite ölçümü yapan (makro) çalışmalar ile doğrudan radyobiyojloji/genotoksikoloji odaklı (mikro) çalışmaların genellikle bağımsız yürütüldüğü, bu iki alanı bütünleştirici araştırmalar oldukça sınırlıdır.

Özellikle antropojenik faaliyetler ve geçmiş nükleer kazalar sonucu çevreye salınan yapay radyonüklidler, ekolojik dengenin ve halk sağlığının korunması açısından küresel bir izleme ve risk değerlendirme mekanizmasını zorunlu kılmaktadır.

Yapay radyonüklidlerin çevreye salınımı ve halk sağlığına etkilerinin izlenmesi, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde güçlü kurumlar tarafından yürütülmektedir. Türkiye’de bu görev başlıca Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) tarafından üstlenilirken, küresel ölçekte United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) gibi kuruluşlar koordineli risk değerlendirme ve izleme faaliyetleri yürütmektedir.

Radyoaktivitenin sadece çevrede ölçülen bir "Bq/kg" değerinden ibaret olmadığı, bu izotopların organizmaya girdikten sonra hücresel ve atomik düzeyde (DNA kırıkları, serbest radikal zincir reaksiyonları) yarattığı tahribatın neden incelenmesi gerektiği kuramsal olarak açıklanmalıdır.

Bu kitap bölümü, çevresel radyoaktivitenin kaynaklarını ve çevreyle ilgili taşınım mekanizmalarını incelemeyi, radyonüklidlerin biyomoleküllerle (DNA, protein) olan etkileşim süreçlerini moleküler düzeyde açıklamayı ve bu etkileri analiz etmekte kullanılan güncel deneysel/simülasyon yöntemlerini bütüncül bir perspektifle sunmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, hem uluslararası dozimetri standartları ele alınacak hem de Türkiye ve Dünya genelindeki radyoaktivite dağılımı karşılaştırmalı olarak tartışılacaktır.

2. RADYOAKTİF İZOTOPLARIN ÇEVRESEL DAVRANIŞI

Doğal izotoplar (örneğin ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) jeolojik süreçlerle çevreye yayılırken, yapay izotoplar (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I) nükleer kazalar, endüstriyel faaliyetler ve tıbbi uygulamalar sonucu çevreye karışır. Bu izotopların toprak, su ve atmosferdeki taşınım mekanizmaları, biyoyararlanabilirlikleri ve gıda zincirine geçiş süreçleri araştırma açısından kritik öneme sahiptir (Kaya 2025; Tiwari ve diğ., 2024).

2.1. Yarı Ömür Kavramları

Radyoaktif elementlerin yarı ömrü ($T_{1/2}$), elinizde bulunan radyoaktif bir maddenin atom sayısının (veya kütesinin) radyoaktif bozunma yoluyla tam yarıya inmesi için geçen süre anlamına gelir. Her yarı ömürde kalan miktar sürekli ikiye bölündüğü için azalarak devam eder. Elementin miktarı ne kadar çok ya da az olursa olsun, yarıya inmesi için geçen süre o elemente özeldir ve hiç değişmez. Bazı elementlerin yarı ömrü saniyenin milyonda biri kadarken (örneğin ^{212}P), bazılarınınki milyarlarca yıl (örneğin ^{238}U) sürebilir.

Bu kavram, arkeolojide fosillerin yaşını tayin etmekte (Karbon-14 tarihlendirmesi) veya nükleer atıkların ne kadar süre güvenli saklanması gerektiğini hesaplamakta kullanılır.

Radyoaktif elementler için üç tür yarı ömür tanımlaması yapılmaktadır. Bunlar;

Fiziksel Yarı Ömür (T_f veya $T_{1/2}$): Radyoaktif bir izotopun çekirdeğinin kendiliğinden bozunarak başlangıç miktarının yarısına inmesi için geçen fiziksel süredir.

Biyolojik Yarı Ömür (T_b): Alınan radyoaktif elementin metabolik süreçlerle (idrara, terleme vb.) vücuttan atılarak miktarının yarıya düşmesi için geçen süredir.

Etkin Yarı Ömür (T_{eff}): İzotopun vücuttan atılma hızı ile radyoaktif bozunma hızının birleşimi olan, vücutta kalma süresini belirleyen toplam değerdir (Haman Bayarı ve diğ., 2023). Etkin yarı ömür formül olarak:

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_f \times T_b}{T_f + T_b} \text{ şeklindedir.} \quad (1)$$

UNSCEAR, ICRP ve WHO gibi kuruluşlar yarı ömür kavramlarını doz hesaplamaları ve risk değerlendirmelerinde temel parametre olarak kullanmaktadır. Örneğin, ICRP (2007) etkin yarı ömrü klinik doz hesaplamalarında kritik bir değişken olarak tanımlar.

Örnek olarak ^{131}I için etkin yarı ömür hesaplaması yapalım. İyot için fiziksel yarı ömür (T_f) 8 gün ve biyolojik yarı ömür (T_b) 7 gün olduğundan etkin yarı ömür:

$T_{\text{eff}} = (T_f \times T_b)/(T_f + T_b) = 8 \times 7/(8+7) = 56/15=3.7$ gün olarak bulunur.

Bu sonuç ^{131}I 'in etkin yarı ömrü yaklaşık 3.7 gün olduğunu ve bu değer hem bozunma hem de metabolik atılım için birlikte dikkate alınır. Basitçe, ^{131}I vücuda girdikten sonra biyolojik süreçlerle parçalanarak veya dışarı atılarak uzaklaştırılması 3.7 gün sürer anlamına gelmektedir.

Radyoiyot tedavisinde etkin yarı ömür, hastaya verilen dozun tiroid dokusunda ne kadar süreyle etkili olacağını belirler. Bu nedenle tedavi planlamasında kritik bir parametredir. Çernobil kazası sonrası ^{131}I 'in süt ve sebzeler yoluyla tiroid dokusunda birikimi, etkin yarı ömür üzerinden yapılan risk değerlendirmeleriyle analiz edilmiştir. Böylece çevresel maruziyetin halk sağlığı üzerindeki etkisi daha doğru biçimde modellenmiştir (Haman Bayarı ve diğ., 2023).

Tablo 1. Doğal ve yapay izotopların yarı ömürleri, çevresel yayılım yolları, biyolojik hedef dokuları

İzotop	Kökene	Yarı Ömür	Çevresel Yayılım Yolu	Biyolojik Hedef Doku / Organ
İyot-131	Yapay (Fisyon)	8.02 gün	Süt, su ve yapraklı sebzeler (besin zinciri)	Tiroid bezi
Sezyum-137	Yapay (Fisyon)	30.1 yıl	Toprak, su, bitkiler ve et/süt ürünleri	Kas dokusu, tüm vücut
Stronsiyum-90	Yapay (Fisyon)	28.8 yıl	Topraktan bitkilere, süt ve süt ürünleri	Kemikler, dişler (Kalsiyum analogu)
Uranyum-238	Doğal (Cevher)	4.47 milyar yıl	Kayaçlar, toprak, içme suları ve maden tozları	Böbrekler, kemikler, akciğerler
Radyum-226	Doğal (Bozunma)	1600 yıl	Yeraltı suları, toprak ve yapı malzemeleri (Radon)	Kemikler, dişler
Tritium (H-3)	Doğal / Yapay	12.3 yıl	Atmosferik su buharı, yağışlar ve yüzeysel sular	Tüm vücut sıvıları
Karbon-14	Doğal / Yapay	5730 yıl	Atmosfer (CO ₂), fotosentez ile besin zinciri	Yağ dokusu, kaslar ve tüm organik moleküller
Plütonyum-239	Yapay (Transuranik)	24100 yıl	Havada asılı tozlar, solunum ve kontamine su	Kemikler, karaciğer, akciğerler

Tablonun oluşturulmasında, “F.P.W. Winteringham, This is No. 4 in the series: What Can Radio isotopes Do for Man? Food and Environmental Quality Protection, Erişim adresi: <https://www.iaea.org/sites/default/files/17505681425.pdf> Erişim tarihi: 21.06.2026” kaynağından yararlanılmıştır.

Bu tablo, doğal ve yapay izotopların yarı ömürleri ile çevresel yayılım yolları ve biyolojik hedef dokular arasındaki ilişkiyi özetlemektedir. Fiziksel yarı ömür, izotopun doğasında sabit bir parametre iken; biyolojik yarı ömür, metabolik atılım süreçlerine bağlı olarak bireyler arasında değişkenlik gösterebilir. Etkin yarı ömür ise bu iki sürecin birleşimini temsil ederek hem

linik doz hesaplamalarında hem de çevresel risk değerlendirmelerinde kritik bir rol oynar. Çernobil sonrası İyot-'in süt ve sebzeler yoluyla tiroid dokusunda birikimi veya ^{131}Cs ve ^{137}C 'nin uzun süreli çevresel kalıcılığı gibi örnekler, bu parametrelerin halk sağlığı açısından önemini ortaya koymaktadır.

2.2. Toprak–su–bitki zincirinde izotop transfer katsayıları

Toprak-su-bitki zincirinde izotop transfer katsayıları, ağır metaller veya radyonüklidlerin (Örn. (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{235}U , ^{238}U)) topraktan bitkiye taşınma oranlarını belirleyen temel ekolojik parametrelerdir. Bu katsayılar:

$$\text{TF} = \frac{A_{\text{Bitki}}}{A_{\text{Toprak}}} \quad (2)$$

formülü ile hesaplanır.

Burada A_{Bitki} bitkide ölçülen aktivite, A_{Toprak} toprakta ölçülen radyoaktivite değerleridir.

Bitkiler için transfer katsayıları, kirliliklerin besin zincirine ve insan sağlığına geçiş riskini yönetmede kritik bir rol oynar.

Transfer katsayısını (TF) etkileyen başlıca faktörler:

Toprak özellikleri: Toprağın pH derecesi, organik madde miktarı ve kil içeriği, izotopların bitki kökleri tarafından alınabilirliğini doğrudan etkiler. Örneğin, asidik topraklarda transfer katsayıları genellikle daha yüksektir. **Elementin Kimyasal Yapısı:** Radyoaktif izotopların veya elementlerin kimyasal formları (özellikle değerlik durumları) hareketliliklerini belirler.

Bitki Türü ve Fizyolojisi: Bitkilerin kök yapısı, terleme hızları ve büyüme döngüleri, farklı elementleri seçici olarak almalarına neden olur. Yapraklı sebzeler (Örn. marul, lahana)

genellikle kök bitkilere göre daha yüksek transfer katsayılarına sahiptir.

Suyun Rolü (Evapotranspirasyon): Toprak suyu, elementlerin kök yüzeyine taşınmasında (kütlesel akış ve difüzyon) çözücü ve taşıyıcı ortam görevi görür. Suyun bitki tarafından tüketim hızı, izotop alımını tetikler. Bu katsayılar, tarımsal yönetim stratejileri (kireçleme veya organik gübre kullanımı gibi) geliştirilirken radyasyon güvenliği ve gıda sağlığı standartlarını belirlemek için temel oluşturur. Çevresel risk analizleri için genellikle IAEA tarafından sağlanan güncel veri tabanları ve modellemeler referans alınır.

3. MOLEKÜLER ETKİLEŞİM MEKANİZMALARI

İyonlaştırıcı radyasyon, biyomoleküllerle doğrudan veya dolaylı etkileşimlere girer.

3.1. Doğrudan etkileşim: DNA bazlarının iyonlaşması ve çift zincir kırıkları

İyonlaştırıcı radyasyonun DNA üzerindeki en kritik doğrudan etkisi çift zincir kırıklarıdır (double-strand breaks, DSBs). Bu hasar, radyasyonun doğrudan DNA'nın fosfat-şeker omurgasına veya baz çiftlerine enerji aktararak kimyasal bağları koparması sonucu ortaya çıkar. Çift zincir kırıkları, hücre için en ölümcül hasar türlerinden biridir çünkü tamir edilmediğinde mutasyonlara, kromozom yeniden düzenlenmelerine ve nihayetinde hücre ölümüne yol açabilir. Bu tür hasarlar, özellikle yüksek lineer enerji transferine (LET) sahip radyasyon türlerinde (örneğin alfa parçacıkları) daha sık gözlenmektedir. Literatürde, çift zincir kırıklarının onarım mekanizmalarının yetersiz kaldığı durumlarda kanserojen süreçlerin tetiklendiği ve genetik instabilitenin arttığı rapor edilmiştir (Hall & Giaccia, 2012; Ward, 1995). Dolayısıyla, çevresel radyoaktivitenin moleküler düzeyde

incelenmesi, DNA hasarının doğrudan etkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

3.2. Dolaylı etkileşim

Su moleküllerinin iyonlaşması sonucu serbest radikal oluşumu ve oksidatif stres. Bu süreçler mutasyon, protein yapısında bozulma ve hücre zarında geçirgenlik değişikliklerine yol açar. Moleküler dinamik simülasyonlar, bu etkileşimlerin atomik düzeyde modellenmesine olanak sağlar.

İyonlaştırıcı radyasyonun DNA üzerindeki dolaylı etkileri, su moleküllerinin iyonlaşması sonucu oluşan serbest radikaller aracılığıyla gerçekleşir. Radyasyon enerjisi hücre içindeki su moleküllerini parçalayarak hidroksil ($\bullet\text{OH}$) ve süperoksit ($\text{O}_2\bullet^-$) gibi yüksek reaktif radikaller üretir. Bu radikaller DNA bazlarına ve fosfat-şeker omurgasına saldırarak tek zincir kırıkları, baz modifikasyonları ve çapraz bağlanmalar meydana getirir. Dolaylı etki, hücrede oksidatif stresin artmasına ve biyomoleküllerin yapısal bütünlüğünün bozulmasına yol açar. Literatürde, dolaylı hasarın özellikle düşük LET radyasyon türlerinde (Örneğin X-ışınları ve gama ışınları) baskın olduğu, bu nedenle çevresel radyoaktivitenin uzun vadeli biyolojik etkilerinde kritik rol oynadığı belirtilmektedir (Hall & Giaccia, 2012; Ward, 1995). Dolaylı etki mekanizmalarının anlaşılması, çevresel dozların biyolojik sonuçlarının doğru değerlendirilmesi açısından büyük önem taşır.

Lipid peroksidasyonu, hücre zarı geçirgenliğinin değişimi ve protein denatürasyonu, biyokimyasal olarak birbiriyle bağlantılı oksidatif hasar süreçleridir. Serbest radikallerin neden olduğu bu zincirleme etkiler, hücresel bütünlüğü bozar ve yaşlanma, inflamasyon ve dejeneratif hastalıklar gibi patolojik süreçlerde kritik rol oynar (Balakrishnan ve Kenworthy, 2024).

Ayrıntılı mekanizmalar ve hücresel sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

1. Lipid Peroksidasyonu Mekanizması

Hücre zarı fosfolipitlerinde bulunan çoklu doymamış yağ asitlerinin (PUFA), reaktif oksijen türleri (ROS) tarafından enzimatik veya serbest radikal aracılı oksidatif yıkımıdır. Süreç üç ana basamakta gerçekleşir (Zheng ve diğ., 2024):

Başlama (Initiation): Hidrojen koparma enerjisi yüksek olan serbest radikaller (örn. hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$), doymamış yağ asitlerinin karbon zincirleri arasından bir hidrojen atomu koparır. Bu durum, yağ asidi üzerinde kararsız bir karbon merkezli lipit radikali ($\bullet\text{L}$) oluşturur.

Yayıma (Propagation): Kararsız lipit radikali ortamdaki moleküler oksijen (O_2) ile hızla reaksiyona girerek peroksi radikaline ($\text{LOO} \bullet$) dönüşür. Bu peroksi radikali, komşu doymamış yağ asitlerinden hidrojen çalarak zincirleme reaksiyonu sürdürür ve kendisi lipit hidroperoksite (LOOH) dönüşür. Bu döngü otokatalitik olarak devam eder.

Sonlanma (Termination): Ortamdaki antioksidanlar (Örn. E vitamini) veya radikallerin birbirleriyle birleşmesiyle reaksiyon durur ve istikrarlı, reaktif olmayan ürünler oluşur (Valgimigli, 2023).

2. Hücre Zarı Geçirgenliğinin Değişimi

Zar lipidlerinin oksitlenmesi, fosfolipit yapısında konformasyonel değişikliklere neden olur (Wong-Ekkabut ve diğ., 2007). Bu durum kendini iki şekilde gösterir. Bunlar:

1. **Hidrofobik Bozulma:** Okside olmuş lipitlerin polar kuyruk kısımları bükülerek su fazına doğru yönelir. Bu durum lipit çift tabakasının ortalama yüzey alanını artırır ve kalınlığını azaltır.
2. **Akışkanlık ve Por Oluşumu:** Zardaki düzenli yapı bozulur ve membran akışkanlığı düşer. Okside lipidlerin birikmesi sonucunda zarda uzun ömürlü su

porları ve geçirgenlik defektleri meydana gelir. Bu yapısal yıkım, hücre zarının iyon ve madde geçiş bariyeri işlevini kaybetmesine yol açar (Wong-Ekkabut ve diğ., 2007; Repetto ve diğ., 2012).

3. Protein Denatürasyonu Biyokimyası

Lipid peroksidasyonu sırasında açığa çıkan ikincil ürünler (malondialdehit - MDA, 4-hidroksinonenal - 4-HNE gibi reaktif aldehytler) proteinler üzerinde yıkıcı etkilere sahiptir (Balakrishnan ve Kenworthy, 2024). Bu durum kendini iki şekilde gösterir. Bunlar:

1. Karbonilasyon ve Çapraz Bağlanma: Reaktif aldehytler, proteinlerdeki spesifik amino asit yan zincirleriyle (özellikle lizin, sistein ve arjinin) kovalent bağlar oluşturur. Bu durum proteinlerin karbonilasyonuna neden olur. Çapraz bağlanan proteinler agregat (küme) oluşturarak fonksiyonlarını yitirir ve yapısal bütünlükleri bozulur (denatürasyon).
2. Enzimatik İnhibisyon: Membran bütünlüğünün ve protein yapısının bozulması, zar üzerinde yer alan reseptörlerin ve iyon pompalarının (örn. Na^+ / K^+ ATPaz) inaktivasyonuna yol açar (Balakrishnan ve Kenworthy, 2024; El-Sappah ve diğ., 2022).

4. DENEYSEL VE ANALİTİK YÖNTEMLER

Çevresel radyoaktivite araştırmalarında kullanılan başlıca yöntemler aşağıda verilmiştir.

4.1. Spektroskopi Türleri ve Özellikleri

4.1.1. Gamma Spektroskopisi

Gamma ışınları, çekirdeklerin uyarılmış enerji seviyelerinden daha düşük seviyelere geçişi sırasında yayılan

elektromanyetik radyasyondur. Yüksek penetrasyon gücüne sahiptir; santimetrelerce kalınlıktaki malzemeleri geçebilir.

Gamma Spektroskopisinde iki tip dedektör kullanılır.

1. HPGe (High-Purity Germanium) dedektörleri yüksek enerji çözünürlüğü sayesinde izotopların karakteristik gamma enerjilerini ayırt edebilirler.
2. NaI(Tl) sintilatör dedektörleri daha düşük çözünürlük yanında daha yüksek verimlilik sağlarlar.

Bu dedektörler çevresel örneklerde (toprak, su, gıda) izotopların enerji spektrumları incelenerek tanımlamalar yapılır. Örneğin, ^{137}Cs için 662 keV, ^{40}K için 1460 keV gamma piki ölçülür.

4.1.2. Alfa Spektroskopisi

Alfa parçacıkları, ağır çekirdeklerin (örneğin 238U, 226Ra) bozunması sırasında yayılan helyum çekirdekleridir. Düşük penetrasyon gücüne sahiptir; birkaç mikrometre kalınlığındaki malzemeyi geçemez.

Alfa Spektroskopisinde Silisyum yüzey bariyer dedektörleri kullanılır. Bu dedektörler Alfa parçacıklarının enerjilerini hassas şekilde ölçer. Genellikle Radon ve Uranyum serisi izotoplarının analizi için kullanılır. Çevresel radyoaktivite çalışmalarında özellikle içsel solunum risklerinin belirlenmesinde önemlidirler.

4.1.3. Beta Spektroskopisi

Beta parçacıkları, çekirdeklerdeki nükleonların dönüşümü sırasında yayılan elektron veya pozitronlardır. Orta penetrasyon gücüne sahiptir; birkaç mm kalınlığındaki malzemeyi geçebilir.

Bu sistemde plastik sintilatörler ve gaz dolu dedektörler kullanılarak beta parçacıklarının enerjileri ölçülür. Özellikle 90Sr ve 14C gibi izotopların çevresel analizinde tercih edilir. Beta

spektroskopisi, sürekli enerji spektrumları nedeniyle gamma kadar net pikler vermez, fakat maksimum enerji değerleri ile izotop tanımlamasında etkilidirler.

Tablo 2. Spektroskopi türlerinin karşılaştırması

Spektroskopi Türü	Radyasyon Tipi	Penetrasyon Gücü	Tipik Dedektör	Çevresel Kullanım
Gamma	Elektromanyetik	Yüksek	HPGe, NaI(Tl)	Toprak, su, gıda izotop analizi
Alfa	Helyum çekirdeği	Çok düşük	Silisyum dedektör	Radon, uranyum serisi ölçümleri
Beta	Elektron/pozitron	Orta	Sintilatör, gaz dedektör	Stronsiyum-90, karbon-14 analizi

Bu tablo, çevresel radyoaktivite araştırmalarında kullanılan gamma, alfa ve beta spektroskopisi yöntemlerini karşılaştırmaktadır. Gamma spektroskopisi yüksek penetrasyon gücü sayesinde toprak, su ve gıda örneklerinde izotopların tanımlanmasında kullanılırken; alfa spektroskopisi düşük penetrasyonlu radon ve uranyum serisi ölçümlerinde önemlidir. Beta spektroskopisi ise özellikle 90Sr ve 14C gibi izotopların analizinde tercih edilmektedir. Böylece her spektroskopi türü, farklı radyasyon tipleri ve çevresel örnekler için tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

4.2. Moleküler biyoloji teknikleri ile radyasyonun biyolojik etkilerinin incelenmesi

4.2.1. PCR yöntemi

PCR (Polimeraz Zincir Reaksiyonu), laboratuvar ortamında mikroskobik boyuttaki çok az miktardaki DNA dizisinin kopyalanarak milyonlarca kez çoğaltılmasını sağlayan temel bir moleküler biyoloji tekniğidir. Bu işlem, genetik

analizlerin yapılabilmesi için hedef DNA bölgesini görünür ve incelenebilir hale getirir.

PCR işlemi, "Termal Döngü" (Thermal Cycler) adı verilen cihazlarda, belirli sıcaklık artış ve azalışlarıyla gerçekleştirilir. Döngü temel olarak üç aşamadan oluşur: Denatürasyon (İplikli Ayrılma): Yaklaşık 95°C'de çift zincirli DNA, ısıtılarak tek zincir haline getirilir. Annealing (Bağlanma): Sıcaklık düşürülerek (50-65°C), "primer" adı verilen kısa DNA parçacıkları hedef DNA bölgesine bağlanır. Extension (Uzatma): Sıcaklık yaklaşık 72°C'ye çıkarılır ve DNA polimeraz enzimi (Taq polimeraz) devreye girerek primerlerden itibaren yeni DNA zincirini sentezler (Yorgancı ve diğ., 2016)..

4.2.2. Jel Elektroforezi

Jel elektroforezi, DNA, RNA ve protein gibi yüklü biyolojik molekülleri elektrik akımı kullanarak boyutlarına veya elektrik yüklerine göre ayıran ve inceleyen standart bir laboratuvar tekniğidir. DNA parçaları boyutlarına göre ayrılır.

4.2.3. Biyomarker Analizi

Biyomarker (biyobelirteç) analiz, vücuttaki normal süreçleri, hastalıkları veya tıbbi tedavilere verilen yanıtları ölçmek ve değerlendirmek amacıyla kan, idrar veya doku örneklerinde yapılan laboratuvar testleridir. Hastalıkların teşhisini, tedavi planlamasını ve süreç takibini kişiye özel hale getirir.

Biyomarker analizi ile DNA hasarı ve hücresel yanıt belirteçleri ölçülür. Biyomarkerlar, radyasyonun biyolojik etkilerini gösterecek moleküler belirteçlerdir.

Tablo 3. DNA inceleme tekniklerinin karşılaştırması

Teknik	İncelenen Etki	Avantaj	Sınırlılık
PCR	Mutasyonların çoğaltılması ve analizi	Spesifik gen bölgeleri incelenebilir	DNA hasarı çok ileri düzeydeyse amplifikasyon zorlaşır
Jel Elektroforezi	DNA parçalanması ve kırıkların görselleştirilmesi	Basit ve hızlı	Bant desenleri niteliksel, kantitatif analiz sınırlı
Biyomarker Analizi	DNA hasarı, tamir yanıtı, oksidatif stres	Hücre sel yanıtı doğrudan gösterir	Spesifik biyomarker seçimi gerekir

PCR, jel elektroforezi ve biyomarker analizinin radyasyonun DNA üzerindeki etkilerini incelemede kullanılan başlıca yöntemler olduğunu göstermektedir. PCR mutasyonların çoğaltılıp analiz edilmesini sağlarken; jel elektroforezi DNA parçalanmalarını görselleştirir. Biyomarker analizi ise DNA hasarı, tamir yanıtı ve oksidatif stres gibi hücre sel süreçleri doğrudan ortaya koyar. Böylece her teknik, farklı düzeylerde bilgi sağlayarak çevresel radyoaktivitenin biyolojik etkilerinin bütüncül değerlendirilmesine katkıda bulunur.

4.3. Modelleme: Monte Carlo Simülasyonları ve Kuantum Kimyası Hesaplamaları

4.3.1. Monte Carlo Simülasyonları

Monte Carlo yöntemi, rastgele sayı üretimine dayalı istatistiksel bir simülasyon tekniğidir. Radyasyonun madde içindeki etkileşimlerini modellemek için kullanılır.

Gerçek deneylerin zor veya imkânsız olduğu durumlarda radyasyonun moleküler düzeyde davranışını tahmin etmeye olanak sağlar. Örnek olarak, DNA çift sarmalı üzerinde gama fotonlarının etkileşim olasılıklarının simülasyonu ile çift zincir kırığı oluşma ihtimalinin hesaplanmasını verebiliriz.

4.3.2. Kuantum Kimyası Hesaplamaları

Moleküler düzeyde radyasyonun etkilerini anlamak için elektron yoğunluğu, bağ enerjileri ve moleküler orbitallerin hesaplanmasıdır.

Atomik ve moleküler düzeyde radyasyonun kimyasal sonuçlarını öngörür. Örnek olarak, Kuantum kimyası hesaplamaları ile hidroksil radikalının DNA bazlarına bağlanma enerjisinin tahminini verebiliriz.

Tablo 4. DNA inceleme yöntemlerinin karşılaştırmalı

Yöntem	İncelenen Etki	Avantaj	Sınırlılık
Monte Carlo	Radyasyonun madde içindeki etkileşimleri, doz dağılımı	Gerçekçi doz simülasyonu, istatistiksel güvenilirlik	Yüksek hesaplama gücü gerektirir
Kuantum Kimyası	Moleküler düzeyde bağ enerjileri, radikal oluşumu	Atomik hassasiyet, kimyasal mekanizmaların açıklığı	Karmaşık sistemlerde modelleme zorluğu

Radyasyonun DNA üzerindeki etkilerini incelemede kullanılan modelleme yöntemlerini karşılaştırmaktadır. Monte Carlo simülasyonları, doz dağılımı ve enerji transferini istatistiksel olarak tahmin ederek gerçekçi doz analizleri sağlar. Kuantum kimyası hesaplamaları ise atomik ve moleküler düzeyde bağ enerjilerini ve radikal oluşumlarını açıklığa kavuşturur. Her iki yöntem birlikte kullanıldığında, çevresel radyoaktivitenin biyolojik sonuçlarının daha kapsamlı ve çok ölçekli değerlendirilmesine olanak tanır.

5. ÇEVRESEL VE SAĞLIK ETKİLERİ

Radyoaktif maddeler gıda zincirine geçerek insan ve hayvan sağlığını etkiler. Örneğin, ¹³⁷Cs bitkilerde birikirken, ⁹⁰Sr kemik dokusunda yoğunlaşır. Moleküler düzeyde bu

izotoplar DNA hasarı, mutasyon ve kanser riskini artırır. Uluslararası kuruluşlar (UNSCEAR, ICRP, WHO) bu etkileri dozimetri ve risk değerlendirme modelleriyle standartlaştırır. Uluslararası dozimetri ve risk değerlendirmesi yapan kuruluşlar aşağıda Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. Uluslararası Dozimetre ve Risk Değerlendirmesi yapan kuruluşlar

Uluslararası dozimetri ve risk değerlendirmesi yapan kuruluşlar tarafından yürütülen çalışmalar belirlenen risk alanları ve insan sağlığı açısından belirlenen sınır değerleri aşağıda Tablo 5 de verilmiştir.

Tablo 5. Uluslararası dozimetri ve risk değerlendirme standartları

Kuruluş	Temel Odak	Yıllık Doz Limiti (mSv)	Modelleme Yaklaşımı	Risk Değerlendirme Kapsamı
UNSCEAR	Küresel radyasyon düzeylerinin bilimsel değerlendirmesi	Belirli bir limit tanımlamaz; ölçüm ve raporlama odaklıdır	İstatistiksel analiz, çevresel dozimetri	Doğal ve yapay kaynaklardan alınan dozların küresel ortalaması
ICRP	Radyasyon korunma ilkeleri ve doz limitleri	1 mSv/yıl (genel halk), 20 mSv/yıl (işçiler, 5 yıllık ortalama)	Lineer no-threshold (LNT) modeli	Kanser riskleri, genetik etkiler, mesleki maruziyet
WHO	Halk sağlığı ve çevresel risk yönetimi	1 mSv/yıl (genel halk için önerilen sınır)	Epidemiyolojik modelleme, sağlık etkisi tahmini	Gıda, su ve hava yoluyla alınan radyasyonun sağlık etkileri

5.1. Radyoaktif İzotopların Çevresel Davranışı

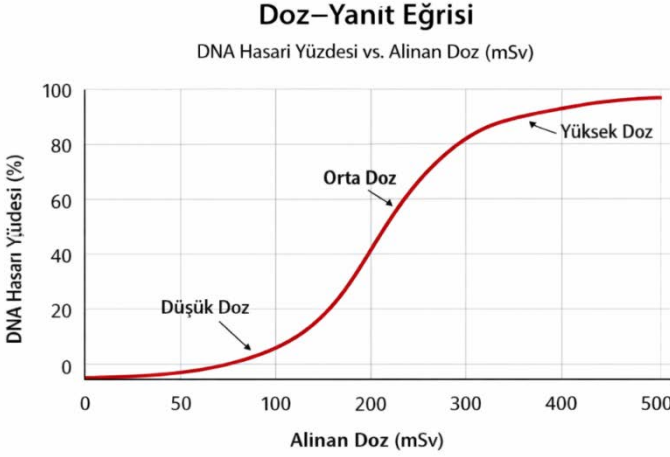
Radyoaktif izotopların çevresel davranışı; kararsız atom çekirdeklerinin toprak, su, hava ve canlılar (besin zinciri) arasında taşınma, birikme ve bozunma süreçlerini inceler. Doğal veya insan kaynaklı bu izotoplar, çevre şartlarına bağlı olarak hareket eder ve yayılır. Doğal ve yapay izotopların özellikleri aşağıda Tablo 6 da verilmiştir.

Tablo 6. Doğal ve yapay izotopların özellikleri

İzotop	Yarı Ömür	Kaynak	Çevresel Yayılım	Biyolojik Hedef
⁴⁰ K	1.25 milyar yıl	Doğal (mineraller, gıda)	Toprak, bitki	Kas dokusu
²³⁸ U	4.5 milyar yıl	Doğal (jeolojik)	Toprak, su	Kemik dokusu
¹³⁷ Cs	30 yıl	Nükleer kazalar	Toprak, su, bitki	Kas dokusu
⁹⁰ Sr	28 yıl	Nükleer kazalar	Toprak, su	Kemik dokusu
¹³¹ I	8 gün	Tıbbi uygulamalar	Atmosfer, su	Tiroid bezi

Bu tablo, izotopların yarı ömürleri ile çevresel kalıcılık arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

İnsan vücuduna giren radyasyon miktarı ile vücuttaki hücrelerin göreceği zararı gösteren doz-yanıt eğrisi aşağıda grafik olarak verilmiştir (Hall & Giaccia (2012); Ward (1995); UNSCEAR (2000); IAEA (2020).



Grafik 1. Doz–yanıt eğrisi (DNA hasarı yüzdesi vs. alınan doz mSv)

Grafik, alınan radyasyon dozu (mSv) arttıkça DNA hasarı yüzdesi sigmoid bir artış göstermektedir. Düşük dozlarda hücresel tamir mekanizmaları etkili olurken, orta dozlarda hasar hızla artmakta ve yüksek dozlarda hücre ölümüne veya genetik instabiliteye yol açacağını göstermektedir.

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE LİTERATÜR KARŞILAŞTIRMALARI

Bölgesel çalışmalar (örneğin Doğu Karadeniz'deki doğal radyoaktivite seviyeleri) dünya ortalamalarıyla

karşılaştırıldığında farklılıklar ortaya çıkar. Bu karşılaştırmalar, çevresel koşulların moleküler düzeyde biyolojik etkileri nasıl değiştirdiğini anlamak için önemlidir. Literatürde moleküler biyomarker analizleri, çevresel radyoaktivitenin uzun vadeli etkilerini ortaya koymaktadır.

Tablo 7. Çevresel koşulların moleküler düzeyde biyolojik etkileri

Çevresel Koşul	Moleküler Mekanizması	Etki Biyolojik Sonuç	Örnek İzotop / Radyasyon Türü	Kaynak
Sıcaklık artışı	HücreSEL metabolizmanın hızlanması, serbest radikal üretiminin artması	DNA oksidasyonu, protein denatürasyonu	⁴⁰ K, doğal gama	Hall & Giaccia (2012)
Nem oranı yüksekliği	Su moleküllerinin iyonlaşmasıyla dolaylı DNA hasarı	Tek zincir kırıkları, baz modifikasyonu	¹³⁷ Cs, gama	Ward (1995)
pH değişimi (asidik ortam)	DNA bazlarının protonlanması, enzim aktivitesinin bozulması	Mutasyon oranında artış	⁹⁰ Sr, beta	ICRP (2007)
Oksijen konsantrasyonu	Oksidatif stresin artması, ROS (reaktif oksijen türleri) oluşumu	Lipid peroksidasyonu, DNA hasarı	²³⁸ U, alfa	WHO (2016)
Radyasyon türü (yüksek LET)	Doğrudan enerji transferiyle çift zincir kırığı	Hücre ölümü, genetik instabilite	Alfa parçacıkları	UNSCEAR (2020)
Radyasyon türü (düşük LET)	Dolaylı etkiyle serbest radikal oluşumu	Kronik DNA hasarı, tamir mekanizması aktivasyonu	Gama ışınları	Nikjoo ve diğ. (2012)

Tablo ya göre; yüksek sıcaklık ve nem, dolaylı etkiyi artırarak oksidatif stres yoluyla DNA hasarını güçlendirir. pH ve oksijen seviyesi, hücreSEL tamir mekanizmalarının etkinliğini

belirler. Radyasyon türü, doğrudan veya dolaylı etki mekanizmasının baskınlığını değiştirir.

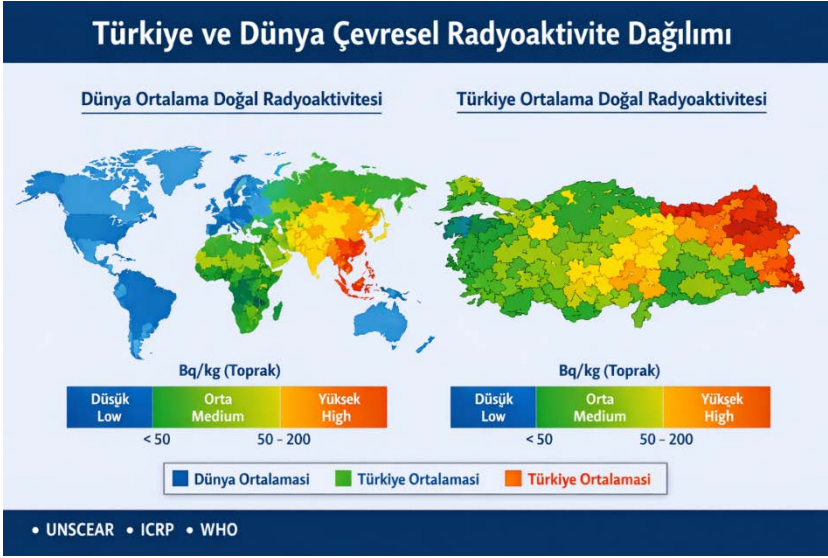
Doğal ve yapay radyoaktivite değerlerinin Türkiye ve dünya ortalamaları aşağıda Tablo 8 da verilmiştir.

Tablo 8. Doğal ve yapay radyoaktivite değerlerinin Türkiye ve dünya ortalamaları

Radyoizotop	Dünya Ortalama Aktivite (Bq/kg, toprak)	Türkiye Ortalama Aktivite (Bq/kg, toprak)	Kaynak
^{40}K	400–500	300–450	UNSCEAR (2000); TAEK (2013)
^{238}U serisi (ör. ^{226}Ra)	30–40	25–35	UNSCEAR (2000); Turhan & Şahin (2010)
^{232}Th	35–45	25–40	UNSCEAR (2000); TAEK (2013)
^{137}Cs (yapay)	5–20 (Çernobil sonrası Avrupa'da)	2–15 (Karadeniz bölgesinde daha yüksek)	UNSCEAR (2000); TAEK (2013)

Türkiye’de doğal radyoaktivite değerleri dünya ortalamalarıyla büyük ölçüde uyumludur, ancak Karadeniz bölgesinde ^{137}Cs seviyeleri Çernobil etkisi nedeniyle daha yüksektir. ^{40}K hem Türkiye’de hem dünyada en baskın doğal radyoizotoptur. Uranium ve Thorium serisi izotoplar Türkiye’de özellikle Doğu Karadeniz ve İç Anadolu bölgelerinde ölçülmüştür.

Türkiye ve dünya da radyasyon dağılımı ortalamalarıyla karşılaştırmalı renk skalası aşağıda verilmiştir.



Şekil 2. Türkiye’de doğal radyoaktivite dağılımı, dünya ortalamalarıyla karşılaştırmalı renk skalası (IAEA, 2020)

Sol tarafta dünya haritası, UNSCEAR verilerine dayalı ortalama doğal radyoaktivite dağılımı (Bq/kg toprak). Sağ tarafta Türkiye haritası, TAEK (2013) ve bölgesel çalışmaların ortalamaları. Özellikle Doğu Karadeniz bölgesinde (Çernobil etkisiyle) daha yüksek değerler kırmızı-turuncu tonlarda gösteriliyor.

Radyoizotopların gıda zincirindeki tipik birikim ve geçiş katsayıları aşağıda tablolar halinde özetlenmiştir.

1. Karasal Gıdalarda Transfer Katsayıları

Karasal gıdalar için izotop transfer faktörü değerleri, gıdadaki radyoaktivite konsantrasyonunun (Bq/kg) topraktaki konsantrasyona (Bq/kg kuru toprak) oranını gösterir (IAEA, 2010).

Tablo 9. Karasal gıdalar için izotop transfer faktörlerinin minimum ve maksimum değerleri (IAEA. 2010).

Gıda Türü	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³¹ I
Tahıllar (Buğday, Pirinç)	0.01 - 0.5	0.1 - 1.0	0.05 - 0.2
Yeşil Sebzeler	0.02 - 0.2	0.2 - 2.5	0.1 - 0.5
Kök Sebzeler (Patates vb.)	0.01 - 0.1	0.05 - 0.5	0.02 - 0.1

Bu tablo, çevresel radyoaktiviteye ilişkin parametrelerin biyolojik etkilerle nasıl ilişkilendirildiğini göstermektedir. Veriler, farklı izotopların çevredeki davranışlarını ve insan sağlığı üzerindeki olası sonuçlarını karşılaştırmalı biçimde ortaya koyarak, hem ekolojik risk değerlendirmeleri hem de radyasyon güvenliği açısından temel bir referans sunmaktadır.

2. Hayvansal Ürünler Transfer Katsayısı

Hayvansal ürünler için izotop transfer faktörü katsayıları, hayvanın günlük tükettiği yemdeki toplam radyoaktivitenin (Bq/gün) ne kadarının ürüne (Bq/L veya Bq/kg) geçtiğini ifade eder (IAEA. 2010).

Tablo 10. Hayvansal ürünler için izotop transfer faktörlerinin minimum ve maksimum değerleri

Hayvansal Ürün	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³¹ I
Süt (İnek)	0.005 - 0.01	0.001 - 0.003	0.003 - 0.01
Et (Sığır)	0.01 - 0.05	0.0003 - 0.001	0.002 - 0.005
Et (Koyun/Keçi)	0.05 - 0.1	0.001 - 0.005	0.01 - 0.03

Bu tablo, çevresel radyoaktiviteye ilişkin parametrelerin biyolojik sistemler üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Veriler, farklı izotopların çevredeki taşınım mekanizmaları ve hücresel düzeyde oluşturdukları riskleri ortaya koyarak, hem ekolojik güvenlik hem de halk sağlığı açısından kritik değerlendirmeler yapılmasına olanak tanımaktadır.

3. Su Ürünlerinde Transfer Katsayıları

Su ürünleri için izotop transfer faktörü değerleri, sudaki canlı organizmadaki radyoaktivite konsantrasyonunun (Bq/kg taze ağırlık) sudaki konsantrasyona (Bq/L) oranını gösterir (IAEA, 2004).

Tablo 11. Su ürünleri için izotop transfer faktörlerinin minimum ve maksimum değerleri

Su Tipi / Canlı	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³¹ I
Deniz Balıkları	10 - 50	1 - 10	10 - 20
Tatlı Su Balıkları	500 - 2000	30 - 100	15 - 40
Kabuklu Deniz Canlıları	10 - 30	5 - 20	50 - 100

Bu tablo, çevresel radyoaktivitenin incelenmesinde kullanılan farklı deneysel ve analitik yöntemlerin karşılaştırmasını sunmaktadır. Spektroskopi teknikleri izotopların doğrudan ölçümünü sağlarken; moleküler biyoloji yöntemleri DNA hasarı ve hücrel yanıtı ortaya koyar. Modelleme yaklaşımları ise radyasyonun madde ve biyomoleküllerle etkileşimlerini simüle ederek deneysel verileri tamamlar. Böylece yöntemler birlikte kullanıldığında, hem çevresel hem de biyolojik etkilerin daha kapsamlı değerlendirilmesine olanak tanır.

Tarımsal verimliliğin artırılması ve nükleer/kimyasal kirlilik durumlarında insan sağlığının korunması amacıyla oluşturulan risk analiz modellerinde temel veri kaynağı olarak kullanılan gıda zincirinde radyoaktif madde transfer katsayıları aşağıda Tablo 12’de verilmiştir (Thien ve diğ., 2020).

Tablo 12. Gıda zincirinde radyoaktif madde transfer katsayıları

İzotop	Bitki	Süt	Balık
¹³⁷ Cs	0.05	0.10	0.20
⁹⁰ Sr	0.03	0.15	0.05
⁴⁰ K	0.20	0.25	0.30

Bu tablo, çevresel radyoaktiviteye ilişkin parametrelerin karşılaştırmalı değerlendirilmesini sunmaktadır. Veriler, farklı izotopların çevredeki taşınım süreçleri ve biyolojik sistemler üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, hem ekolojik risk analizleri hem de halk sağlığı açısından kritik bir referans sağlamaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, çevresel radyoaktivitenin yalnızca ölçülen aktivite değerlerinden ibaret olmadığını, aynı zamanda biyomoleküler düzeyde DNA ve protein yapılarında kalıcı hasarlara yol açtığını ortaya koymaktadır. Doğal ve antropojenik kaynaklı radyonüklidlerin ekosistem ve halk sağlığı üzerindeki etkilerinin doğru değerlendirilmesi için çevresel izleme sistemleri ile moleküler biyoloji yöntemlerinin entegrasyonu zorunludur. Ulusal ve uluslararası kuruluşların (NDK, UNSCEAR, IAEA, WHO) koordineli çalışmaları, sürdürülebilir ekolojik denge ve halk sağlığının korunması açısından kritik öneme sahiptir.

Çevresel radyoaktivite araştırmalarında moleküler düzeyde yaklaşım, hem biyolojik hasarın mekanizmalarını anlamak hem de çevresel riskleri azaltmak için kritik öneme sahiptir. Gelecekte nanoteknoloji tabanlı biyosensörler, ileri spektroskopi yöntemleri ve moleküler simülasyonlar bu alanda yeni araştırma ufukları açacaktır. Ayrıca çevre politikaları ve halk sağlığı stratejilerinde bu bilimsel verilerin kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Avcı, H., & Uluc, L. (2025). Investigation of radiological effects in surface soil samples taken from the surroundings of Konya Beyşehir Lake. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 334(2), 1523–1532. <https://doi.org/10.1007/s10967-024-09921-9>
- Boryło A. Romańczyk G. Skwarzec B. 2017. Lichens and mosses as polonium and uranium biomonitors on Sobieszewo Island. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 311:1
- Büyükvardar, A. 2020 Radyasyonun Biyolojik Etkileri, Bitirme Tezi, İstanbul Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesi
- Chandrasekaran A., Ravisankar, R., Senthilkumar, G., Thillaivelavan, K., Dhinakaran, B., Vijayagopal, P., Bramha, S.N. and Venkatraman, B. (2014) Spatial Distribution and Lifetime Cancer Risk Due to Gamma Radioactivity in Yelagiri Hills, Tamilnadu, India. *Egyptian Journal of Basic Sciences*, 24, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2014.02.001>
- El-Sappah AH, Rather SA, Wani SH, Elrys AS, Bilal M, Huang Q, Dar ZA, Elashtokhy MMA, Soaud N, Koul M, Mir RR, Yan K, Li J, El-Tarabily KA and Abbas M (2022) Heat Stress-Mediated Constraints in Maize (*Zea mays*) Production: Challenges and Solutions. *Front. Plant Sci.* 13:879366. doi: 10.3389/fpls.2022.879366
- Gökoğlan E., Ekinci M., Özgenç E., Özdemir D. İ., Aşıkoğlu M., (2020). Radyasyon ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri, *Anadolu Kliniği Tıp Bilimleri Dergisi*, Eylül 2020; Cilt 25, Sayı 3
- Hall, E. J., & Giaccia, A. J. (2012). *Radiobiology for the radiologist* (7th ed.). Lippincott Williams & Wilkins

- Balakrishnan M, and Kenworthy AK. (2024) Lipid peroxidation drives liquid-liquid phase separation and disrupts raft protein partitioning in biological membranes. *J Am Chem Soc.* 3;146(2):1374–1387. doi: 10.1021/jacs.3c10132
- Haman Bayarı S., Akın S., and Tuncel M. (2023) Bilgisayarlı tomografi, pozitron emisyon tomografisi ve nükleer manyetik rezonans görüntüleme temel kavram ve ilkeler. *Med J West Black Sea.* 7(3):269-278.
- Huston, D. L., & Gutzmer, J. (2023). *Isotopes in Economic Geology, Metallogenesis and Exploration.* https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-27897-6_5
- IAEA 2004. International Atomic Energy Agency. (2004). *Sediment distribution coefficients and concentration factors for radionuclides in the marine environment (Technical Reports Series No. 422).* IAEA. iaea.org
- IAEA 2010. International Atomic Energy Agency. (2010). *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments (Technical Reports Series No. 472).* IAEA. iaea.org
- IAEA 2014. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2014). *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments (Technical Reports Series No. 472).* IAEA.
- IAEA 2020. International Atomic Energy Agency. (2020). *IAEA annual report 2020.* Vienna: IAEA. Retrieved from <https://www.iaea.org/publications/reports/annual-report-2020>
- ICRP. 2007, International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2007). *The 2007 Recommendations*

of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP, 37(2–4).

Kaya, A. (2025). Gümüşhane İli İçme Suyunun Spektrofotometrik Analizi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, GUFBD / GUJS (2025) 15(1): 210-220 doi: 10.17714/gumusfenbil.1601843

Kaya, A., & Vural, A. (2020). Investigation of Natural (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) and Artificial (^{137}Cs) Radioactivity Concentrations of Kırkpavli and Hazine Mağara Ore Deposits (Gümüşhane). In 5.Uluslararası Sağlık Bilimleri ve Yönetimi Kongresi. Kırşehir, Türkiye

Kaya A., (2026) Distribution and radiological risk assessment of natural and artificial radionuclides in soils from the Aktutan hydrothermal alteration zone, Türkiye. Radiation Physics and Chemistry, V. 247, 247, Ekim 2026, 113953. ISSN 0969-806X, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2026.113953>

Kurnaz, A., Küçükömeroğlu, B., Keser, R., Okumusoglu, N. T., Korkmaz, F., Karahan, G., & Çevik, U. (2007). Determination of radioactivity levels and hazards of soil and sediment samples in Fırtına Valley (Rize, Turkey). Applied Radiation and Isotopes, 65(11), 1281–1289. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.06.001>

Nikjoo, H., Uehara, S., & Emfietzoglou, D. (2012). Interaction of radiation with matter. CRC Press.

Parlak, Y., Uysal, B., Kıraç, F. S., Kovan, B., Demir, M., Ayan, A., Poyraz, L., Alıç Özaslan, İ., Köseoğlu, K., Yeyin, N., Dönmez, S., & TNTD Radyasyon Güvenliği ve Kalite Kontrol Çalışma Grubu Üyeleri, v. (2020). Radyasyon Güvenliği Kılavuzu: Genel Tanımlar ve Nükleer Tıp

Uygulamalarında Radyasyondan Korunma Kuralları. Nuclear Medicine Seminars, 6(2), 71-89. <https://doi.org/10.4274/nts.galenos.2020.0009>

- Ravisankar, R., Chandramohan, J., Chandrasekaran, A., Prince Prakash Jebakumar, J., Vijayalakshmi, I., Vijayagopal, P., & Venkatraman, B. (2015). Assessments of radioactivity concentration of natural radionuclides and radiological hazard indices in sediment samples from the East coast of Tamilnadu, India with statistical approach. Marine Pollution Bulletin, 97(1-2), 419-430. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.058>
- Repetto, M., Semprine, J., & Boveris, A. (2012). Lipid Peroxidation: Chemical Mechanism, Biological Implications and Analytical Determination. In Lipid Peroxidation. InTech. <https://doi.org/10.5772/45943>
- Singh, K. P., Chandra, S., Prasad, M., Panwar, P., Joshi, A., Sharma, S., ve diğ. (2025). Measurement of natural radionuclides and health risk assessment in soil samples of the Main Central Thrust region in Garhwal Himalaya, India. Environmental Monitoring and Assessment, 197(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13569-z>
- Şekeroğlu Z. A., ve Şekeroğlu V., (2011) Genetik Toksikite Testleri, TÜBAV Bilim 4(3) 221-229
- Thien B. N., Ngoc Ba V., Thao Vy N. T., Loan T. T. H., (2020). Estimation of the soil to plant transfer factor and the annual organ equivalent dose due to ingestion of food crops in Ho Chi Minh city, Vietnam, Chemosphere, Volume 259, 127432, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127432>.

- TAEK 2013. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK). (2013). Türkiye Çevresel Radyoaktivite Atlası. Ankara: TAEK Yayınları.
- Tiwari, S.N., Raj, S.S., Kumar, D., Gocher, A.K. (2024). Assessment of Radionuclide Transfer in Terrestrial Ecosystem. In: Aswal, D.K. (eds) Handbook on Radiation Environment, Volume 1. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2795-7_5
- Turhan, Ş., & Şahin, L. (2010). Natural radioactivity in the soil samples of Gümüşhane province, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(2), 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.09.004>
- UNSCEAR 2020. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2020). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2020 Report. United Nations.
- UNSCEAR 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I. United Nations. <https://www.unscear.org/docs/reports/2000/2000ReportVolI.pdf>
- Uzun Duran, S. (2025). Current state of natural and artificial radiation in the Eastern Black Sea Coast of Türkiye (Trabzon–Rize–Artvin) 38 years after Chernobyl. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 334(3), 2417–2434. <https://doi.org/10.1007/s10967-025-10008-2>
- Valgimigli L. Lipid Peroxidation and Antioxidant Protection. *Biomolecules*. 2023 Aug 24;13(9):1291. doi:

10.3390/biom13091291. PMID: 37759691; PMCID: PMC10526874.

- Vural A. ve Kaya A., (2026) Natural (226Ra, 232Th, 40K) and Artificial (137Cs) Radioactivity Assessment of Kırkpavli and Hazine Cave Ore Deposits, Gümüşhane (Türkiye): Radiological Risk and Material Utilization Perspective, Applied Radiation and Isotopes, V. 235, 112708, ISSN 0969-8043,
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2026.112708>.
- Vural A., Kaya A., (2021). Initial Evaluations Of Natural (226Ra, 232Th And 40K) And Artificial (137Cs) Radioactivity of Eskiköy Mineralization Area (Gümüşhane, Türkiye), Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences, Volume (8), Issue (18), Year (2021), S. 133-150, Geliş Tarihi: 20.10.2021 Kabul Tarihi: 23.11.2021, DOI: 10.38065/euroasiaorg.798, ISSN 2667-6702
- Vural, A., & Kaya, A. (2023). Investigation of the Natural and Artificial Radioactivity Levels in the Demirkaynak (Koza) Gold Mine Area (Gumushane, Türkiye) from the Perspectives of Environmental Geochemistry and Medical Geology. Journal of Engineering Research and Applied Science, 12(2), 2401-2413. Retrieved from <https://journaleras.com/index.php/jeras/article/view/325>
- Yalçın, C., Günay, O., & Güray, R. T. (2025). Radioactivity levels and radiological risk assessment in west Antalya beach sands. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 334(1), 275–283.
<https://doi.org/10.1007/s10967-024-09816-9>
- Zheng Y, Sun J, Luo Z, Li Y, Huang Y. Emerging mechanisms of lipid peroxidation in regulated cell death and its physiological implications. Cell Death Dis. 2024 Nov

26;15(11):859. doi: 10.1038/s41419-024-07244-x. PMID: 39587094; PMCID: PMC11589755.

Zinicovscaia, I., Chaligava, O., Grozdov, D., Noskov, M., Nosov, D., Maksimova, B., ve diğ. (2025). Determination of the level of natural radionuclides and ¹³⁷Cs in soil samples in the Kemerovo region, Russia: assessment of the health risk. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 334(1), 891–898. <https://doi.org/10.1007/s10967-024-09814-x>

Ward, J. F. (1995). DNA damage produced by ionizing radiation in mammalian cells: identities, mechanisms of formation, and reparability. *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*, 35, 95–125.

WHO 2016. Ionizing radiation, health effects and protective measures. World Health Organization.

Wong-Ekkabut J, Xu Z, Triampo W, Tang IM, Tieleman DP, Monticelli L. (2007). Effect of lipid peroxidation on the properties of lipid bilayers: a molecular dynamics study. *Biophys J*. 2007 Dec 15;93(12):4225-36. doi: 10.1529/biophysj.107.112565.

**CRYSTAL STRUCTURE AND
SPECTROSCOPIC CHARACTERIZATION OF
BIS{2-ETHOXY-6-[(E)-(4-BROMOPHENYL)
IMINOMETHYL]PHENOLATO-κN,κO}
COPPER(II)**

Başak KOŞAR KIRCA¹

Çiğdem ALBAYRAK KAŞTAŞ²

1. INTRODUCTION

Schiff base metal complexes have attracted considerable interest in coordination chemistry due to their versatile coordination behavior and diverse applications in catalysis, magnetism, and materials science [1, 2]. They are readily synthesized by condensation of primary amines with carbonyl compounds. Among these, o-hydroxy Schiff bases are particularly valuable ligands because deprotonation of the phenolic OH generates a phenolate anion that, together with the adjacent imine nitrogen, provides a bidentate N,O-donor chelating unit capable of forming stable five-membered chelate rings [3].

Copper(II) is one of the most thoroughly studied metal centers in Schiff base coordination chemistry. Its preference for square planar or distorted square planar geometries in the presence of N,O-donor ligands, combined with the biological relevance of copper and the rich spectroscopic properties of

¹ Profesör, Sinop Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik Ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, ORCID: 0000-0001-7754-9059.

² Profesör, Sinop Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, ORCID: 0000-0001-7928-0647.

Cu(II) complexes, has made this combination a central theme in inorganic chemistry [4]. Bis-chelate copper(II) complexes incorporating two bidentate N,O-Schiff base ligands adopt well-defined square planar coordination environments that are readily characterized by single-crystal X-ray diffraction [3, 5, 7].

Beyond the molecular geometry, the three-dimensional arrangement of molecules in the crystal lattice is governed by non-covalent interactions. In complexes bearing aromatic rings and halogen substituents, $\pi\cdots\pi$ stacking, C-H $\cdots\pi$ contacts, and halogen \cdots carbon interactions are commonly encountered as the dominant packing forces [6]. Understanding these interactions is essential for the field of crystal engineering.

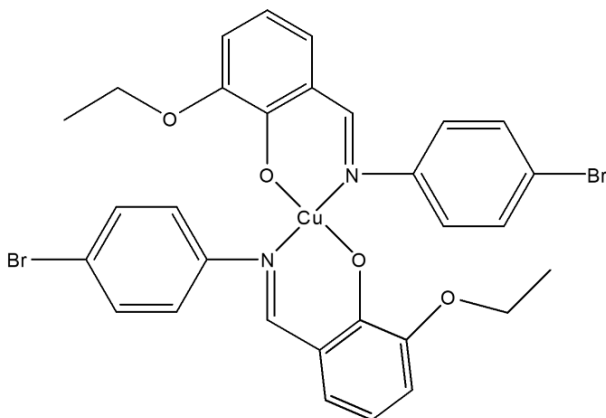
In this study, we report the synthesis, single-crystal X-ray structure determination, and spectroscopic characterization (FT-IR and UV-Vis) of bis{2-ethoxy-6-[(*E*)-(4-bromophenyl)iminomethyl]phenolato- κ N, κ O} copper(II). The molecular structure is depicted in Figure 1 and the crystal structure is analyzed with particular attention to coordination geometry and intermolecular interactions that govern crystal packing.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Materials and Synthesis

The solution of 3-ethoxy-2-hydroxybenzaldehyde (0.78 g; 4.67 mmol) and ethanol (20 ml) was added to the solution of 4-bromoaniline (0.8 g; 4.67 mmol) and ethanol (20 ml). After the mixture was refluxed by stirring for 1 h, the orange solid was filtered, washed and dried. The (*E*)-2-ethoxy-6-[(4-bromophenylimino)methyl]phenol was purified using ethyl alcohol (EtOH). 0.63 g (1.96 mmol) of the synthesized Schiff base ligand dissolved in 20 ml of ethanol was added to 0.196 g

(0.98 mmol) of copper(II) acetate monohydrate dissolved in 20 ml water/ethyl alcohol and stirred for 1 hour at 50 °C. The brown precipitate was filtered, washed and dried (yield: 84%). Suitable crystals of bis{2-ethoxy-6-[(E)-(4-bromophenyl)iminomethyl]phenolato- κ N, κ O} copper(II) for XRD were obtained by slow evaporation of methyl alcohol. This study was supported by Sinop University Scientific Research Coordination Unit, Project Number: FEF-1901-21-006.



Scheme 1. Molecular structure of bis{2-ethoxy-6-[(E)-(4-bromophenyl)iminomethyl]phenolato- κ N, κ O} copper(II).

2.2. Physical Measurements

The ATR FT-IR spectrum of the complex was recorded in the range of 500–4000 cm^{-1} using a Shimadzu IR Spirit spectrometer. UV-Vis absorption spectrum was measured in ethanol solution using a Thermo Scientific BioGenesis spectrophotometer over the 200–800 nm range.

2.3. Single-Crystal X-Ray Diffraction

Intensity data were collected on a STOE IPDS 2 two-circle diffractometer equipped with an image-plate detector using graphite-monochromated Mo $K\alpha$ radiation ($\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$) at 293(2) K. Data collection, cell refinement, and data reduction

were carried out with STOE X-AREA and X-RED32 software (STOE & Cie GmbH, Darmstadt). Absorption correction was applied by numerical integration based on crystal face-indexing data. The structure was solved by direct methods and refined by full-matrix least-squares on F^2 using SHELXL-2018/3 (Sheldrick, 2015). All non-hydrogen atoms were refined with anisotropic displacement parameters. Hydrogen atoms were placed at calculated positions and refined using a riding model (C–H = 0.93–0.97 Å) with $U_{\text{iso}}(\text{H}) = 1.2 \times U_{\text{eq}}$ for aromatic and methylene H, and $1.5 \times U_{\text{eq}}$ for methyl H. Crystal data and structure refinement details are summarized in Table 1.

Table 1. Crystal data and structure refinement parameters.

Parameter	Value
Empirical formula	$\text{C}_{30}\text{H}_{26}\text{Br}_2\text{CuN}_2\text{O}_4$
Formula weight (g mol^{-1})	701.90
Temperature (K)	293(2)
Crystal system	Triclinic
Space group	P -1
a (Å)	13.6576(8)
b (Å)	14.9623(8)
c (Å)	18.5466(11)
α (°)	103.314(4)
β (°)	99.024(5)
γ (°)	111.882(4)
V (Å ³)	3296.5(3)
Z	4
Z'	2
D^{calc} (g cm^{-3})	1.502
μ (mm^{-1})	2.546
F(000)	1508

Radiation	Mo K α ($\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$)
Reflections collected	26606
Independent reflections	13613
Reflections with $I > 2\sigma(I)$	6492
$R_1 [I > 2\sigma(I)]$	0.1165
w R_2 (all data)	0.3131
Goodness-of-fit (F^2)	1.064
No. of parameters refined	703

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Crystal Structure Analysis

The title compound crystallizes in the triclinic crystal system, space group $P-1$ (No. 2), with unit cell parameters $a = 13.6576(8) \text{ \AA}$, $b = 14.9623(8) \text{ \AA}$, $c = 18.5466(11) \text{ \AA}$, $\alpha = 103.314(4)^\circ$, $\beta = 99.024(5)^\circ$, $\gamma = 111.882(4)^\circ$, and $V = 3296.5(3) \text{ \AA}^3$. With $Z = 4$ and the centrosymmetric space group $P-1$, the asymmetric unit contains two crystallographically independent molecules ($Z' = 2$), denoted Molecule 1 (Cu1) and Molecule 2 (Cu2). The molecular structure is shown in Figure 1.

In both independent molecules, the copper(II) center is coordinated by two bidentate Schiff base ligands, each binding through the deprotonated phenolate oxygen and the imine nitrogen to form a five-membered Cu–O–C–C–N chelate ring. The resulting N_2O_2 donor set defines the coordination plane, and the geometry around each Cu(II) center is best described as *distorted square planar*. Selected bond lengths and angles are listed in Table 2.

Table 2. Selected bond lengths (Å) and angles (°) for both independent molecules.

Bond	Distance (Å)	Bond	Distance (Å)
Cu1–O73	1.892(7)	Cu2–O69	1.883(7)
Cu1–O1	1.905(7)	Cu2–O71	1.892(6)
Cu1–N68	1.971(9)	Cu2–N5	1.951(9)
Cu1–N1	1.979(9)	Cu2–N66	1.972(9)
Angle	Value (°)	Angle	Value (°)
O73–Cu1–O1	89.1(3)	O69–Cu2–O71	91.7(3)
O73–Cu1–N68	93.1(3)	O69–Cu2–N66	93.9(3)
O1–Cu1–N1	94.4(3)	O71–Cu2–N5	93.7(3)
O73–Cu1–N1	149.0(4)	O69–Cu2–N5	149.0(4)
O1–Cu1–N68	150.0(4)	O71–Cu2–N66	144.3(4)
N68–Cu1–N1	98.9(3)	N5–Cu2–N66	99.3(4)

For Molecule 1 (Cu1), the Cu–O phenolate bond lengths are Cu1–O73 = 1.892(7) Å and Cu1–O1 = 1.905(7) Å, and the Cu–N imine distances are Cu1–N68 = 1.971(9) Å and Cu1–N1 = 1.979(9) Å. The two phenolate oxygens are mutually cis with O73–Cu1–O1 = 89.1(3)°. Each Schiff base ligand occupies a pair of adjacent coordination sites, with chelate bite angles of O73–Cu1–N68 = 93.1(3)° and O1–Cu1–N1 = 94.4(3)°, typical for five-membered ring formation. The trans arrangement places each phenolate O trans to the imine N of the second ligand: O73–Cu1–N1 = 149.0(4)° and O1–Cu1–N68 = 150.0(4)°. The deviation of ca. 30° from the ideal 180° confirms the distorted nature of the square planar geometry.

For Molecule 2 (Cu2), the corresponding bond lengths are Cu2–O69 = 1.883(7) Å, Cu2–O71 = 1.892(6) Å, Cu2–N5 = 1.951(9) Å, and Cu2–N66 = 1.972(9) Å. The trans angles O69–Cu2–N5 = 149.0(4)° and O71–Cu2–N66 = 144.3(4)° are slightly

smaller than those observed for Molecule 1, indicating a marginally greater distortion that may reflect different local crystal environments for the two independent molecules. The overall Cu–O (1.883–1.905 Å) and Cu–N (1.951–1.979 Å) bond length ranges are in good agreement with values reported for analogous square planar Cu(II) bis(Schiff base) complexes [3, 5, 7].

The Schiff base ligand adopts the *E* (trans) configuration about the C=N imine bond in both independent molecules. The bromophenyl substituents at the para positions are directed away from the coordination plane, and the C–Br bond lengths (C19–Br3 = 1.892(13) Å, C30–Br4 = 1.875(12) Å, C80–Br1 = 1.883(14) Å, C83–Br2 = 1.901(12) Å) are consistent with typical aryl C–Br distances.

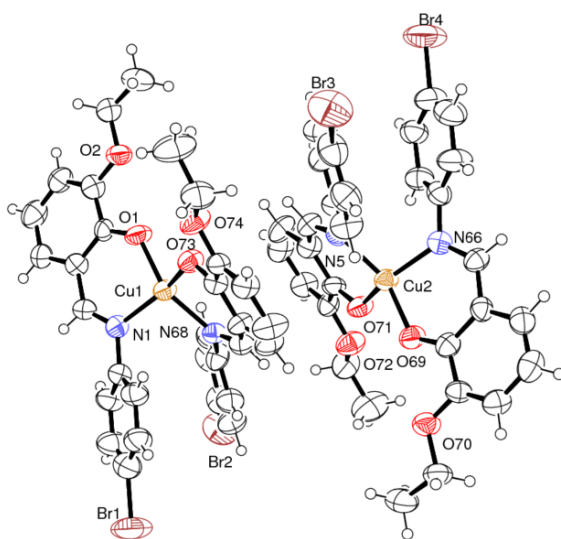


Figure 1. ORTEP diagram showing the two crystallographically independent molecules of the title compound present in the asymmetric unit. Only Cu, O, N, and Br atoms are labeled; C and H atom labels are omitted for clarity. Thermal displacement ellipsoids are drawn at the 50% probability level. H atoms are omitted.

3.2. Molecular and Intermolecular Interactions

The crystal packing of the title compound is stabilized by a network of C–H $\cdots\pi$ contacts, $\pi\cdots\pi$ aromatic stacking, and weak C \cdots Br halogen contacts. No classical N–H \cdots O or O–H \cdots O hydrogen bonds are present, which is consistent with the complete deprotonation of the phenolate OH upon metal coordination and the absence of N–H donors in the Schiff base framework.

Within the asymmetric unit, short C \cdots C contacts between aromatic ring carbons of the two crystallographically independent molecules are observed: C7 \cdots C69 = 3.291 Å, C112 \cdots C66 = 3.270 Å, and C17 \cdots C76 = 3.318 Å (symmetry operation: x, y, z). These distances fall within the range characteristic of aromatic $\pi\cdots\pi$ stacking interactions (< 3.40 Å, sum of C van der Waals radii), suggesting face-to-face or slipped-parallel ring overlap between aromatic fragments of the two independent molecules within the asymmetric unit.

Centrosymmetric intermolecular $\pi\cdots\pi$ stacking contacts are also present: C12 \cdots C22 = 3.203 Å and C12 \cdots C31 = 3.389 Å (symmetry $-x, -y, -z$), and C81 \cdots C87 = 3.372 Å (symmetry $-x, 1-y, 1-z$), linking inversion-related molecular pairs along the stacking direction.

C–H $\cdots\pi$ type contacts are evidenced by H \cdots C distances below the sum of van der Waals radii of H and C (2.90 Å): C10 \cdots H25 = 2.778 Å and C28 \cdots H33B = 2.766 Å (symmetry $-x, -y, -z$), where aromatic ring carbons act as π -acceptors. Ethoxy methylene hydrogens also participate: H33A \cdots C78 = 2.834 Å and H33A \cdots C79 = 2.863 Å (symmetry $1+x, y, z$), reflecting a C–H $\cdots\pi$ interaction between an ethoxy CH₂ group and the phenolate ring of a translationally related molecule. An additional contact C81 \cdots H87 = 2.885 Å ($-x, 1-y, 1-z$) completes the C–H $\cdots\pi$ network.

Weak halogen contacts involving the bromophenyl substituents are also identified: C25...Br2 = 3.549 Å (1+x, 1+y, z) and Br1...C89 = 3.485 Å (x, -1+y, z). Both fall at or within the sum of van der Waals radii of Br and C (~3.55 Å), suggesting weak but geometrically relevant Br...C(aryl) interactions. Collectively, these non-covalent interactions stabilize the crystal packing in the absence of strong hydrogen bonds. Selected intermolecular contacts are listed in Table 3.

Table 3. Selected intermolecular contacts (Å).

Atom 1	Atom 2	Symmetry operation	Distance (Å)
C7	C69	x, y, z	3.291
C112	C66	x, y, z	3.270
C17	C76	x, y, z	3.318
C12	C22	-x, -y, -z	3.203
C12	C31	-x, -y, -z	3.389
C81	C87	-x, 1-y, 1-z	3.372
C10	H25	-x, -y, -z	2.778
C28	H33B	-x, -y, -z	2.766
C78	H33A	-x+1, y, z	2.834
C79	H33A	-x+1, y, z	2.863
C81	H87	-x, 1-y, 1-z	2.885
C25	Br2	1+x, 1+y, z	3.549
Br1	C89	x, -1+y, z	3.485

Van der Waals radii used: $r(H) = 1.20$, $r(C) = 1.70$, $r(Br) = 1.85$ Å (Bondi, 1964).

3.3. FT-IR Analysis

The FT-IR spectrum of the complex (Figure 2) provides direct evidence for the characteristic functional groups of the

coordinated Schiff base ligand and is consistent with the coordination mode established by X-ray crystallography.

Broad absorption bands in the 3500–3570 cm^{-1} region are attributed to O–H stretching vibrations of adventitious moisture adsorbed on the sample surface during preparation, a common observation in ATR-FTIR spectra of metal complexes that bear no free O–H or N–H donors. A band at 1637 cm^{-1} is assigned to the O–H bending mode of adsorbed water. The absence of free phenolic O–H in the compound is consistent with the crystallographic result showing full deprotonation of both phenolate ligands upon coordination. The dominant absorption in the spectrum, the C=N imine stretching vibration, is observed at 1599 cm^{-1} . Coordination of the imine nitrogen to the copper(II) center is known to shift this vibration to lower wavenumbers relative to the free ligand (typically $\Delta 15\text{--}30 \text{ cm}^{-1}$) [8], confirming *N*-coordination as established by the X-ray structure.

Aromatic C–H stretching vibrations are observed at 3106 and 3045 cm^{-1} . Aliphatic C–H stretching vibrations from the methylene and methyl groups of the ethoxy substituents appear at 2975, 2925, and 2867 cm^{-1} , with the corresponding CH_2 bending vibration at 1440 cm^{-1} . Aromatic ring C–C stretching vibrations appear at 1578 and 1541 cm^{-1} . The overall spectral pattern is fully consistent with the molecular structure established by X-ray crystallography.

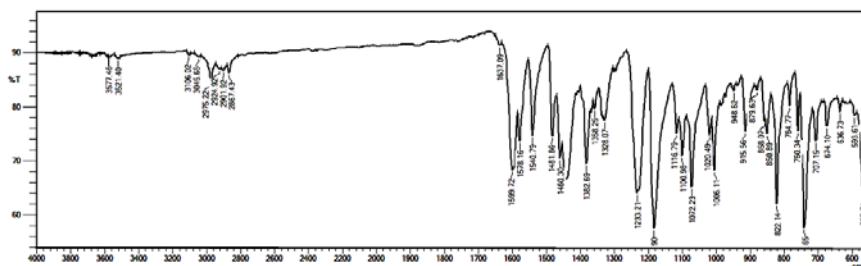


Figure 2. FT-IR spectrum of bis{2-ethoxy-6-[(E)-(4-bromophenyl)iminomethyl]phenolato- $\kappa\text{N},\kappa\text{O}$ }copper(II).

3.4. UV-Vis Analysis

The UV-Vis absorption spectrum of the complex recorded in ethanol solution (Figure 3) exhibits three absorption bands, each assignable to well-defined electronic transitions within the coordinated Schiff base–copper framework.

The two high-energy bands at 214 and 271 nm are assigned to $\pi \rightarrow \pi^*$ transitions of the conjugated imine–phenolate aromatic chromophore. These transitions are ligand-centered and arise from the extended π -conjugation of the 2-ethoxy-N-(4-bromophenyl)Schiff base framework. Similar $\pi \rightarrow \pi^*$ bands in comparable wavelength ranges have been reported for related Schiff base copper(II) complexes [4].

The third band at 380 nm is assigned to a ligand-to-metal charge transfer (LMCT) transition, corresponding to electron density transfer from the phenolate oxygen donor to the Cu(II) d -orbital manifold. LMCT transitions in copper(II) phenolate complexes are characteristically observed in the 350–450 nm range [4], and the position at 380 nm is consistent with this assignment. The presence of this band provides additional confirmation of Cu–O(phenolate) coordination, in full agreement with the X-ray structure data (Cu–O: 1.883–1.905 Å). Spin-forbidden $d-d$ transitions of square planar Cu(II) are expected as weak, broad absorptions around 600–800 nm but are not clearly resolved in the present spectrum, which is typical for complexes with intense charge-transfer bands that dominate the visible region.

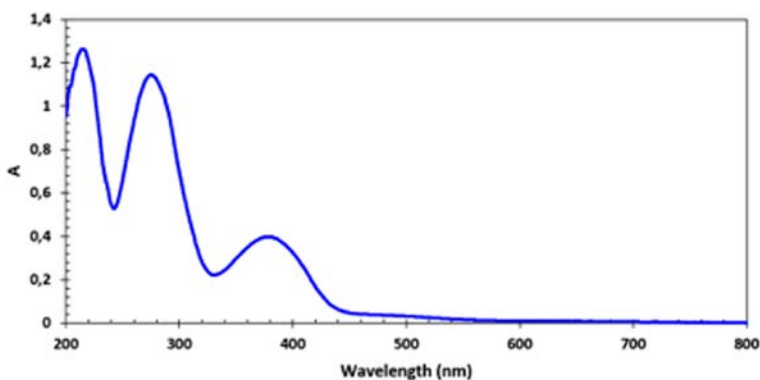


Figure 3. UV-Vis absorption spectrum of the complex in ethanol solution.

4. CONCLUSION

The bis{2-ethoxy-6-[(*E*)-(4-bromophenyl)iminomethyl]phenolato- κ N, κ O}copper(II) complex was successfully synthesized and comprehensively characterized by single-crystal X-ray diffraction, FT-IR, and UV-Vis spectroscopy. The crystal structure determination (space group $P-1$, $Z = 4$, $Z' = 2$) reveals two crystallographically independent mononuclear Cu(II) molecules in the asymmetric unit. Both molecules adopt a distorted square planar geometry (N_2O_2 donor set) with Cu–O distances of 1.883–1.905 Å and Cu–N distances of 1.951–1.979 Å, typical for this class of complexes. The deviation of trans angles (144–150°) from the ideal 180° quantifies the distortion from ideal square planar geometry. Crystal packing is governed by C–H $\cdots\pi$ interactions, $\pi\cdots\pi$ aromatic stacking, and weak Br \cdots C halogen contacts; no classical hydrogen bonds are present. The ATR FT-IR spectrum confirms N-coordination through the C=N stretch at 1599 cm^{-1} , and the UV-Vis spectrum in ethanol is consistent with ligand $\pi\rightarrow\pi^*$ transitions at 214 and 271 nm and an LMCT band at 380 nm from phenolate-to-Cu(II) charge transfer. These results provide a

complete structural and spectroscopic characterization of the title compound.

REFERENCES

1. Vigato, P. A., & Tamburini, S. (2004). The challenge of cyclic and acyclic Schiff bases and related derivatives. *Coordination Chemistry Reviews*, 248(17-20), 1717-2128.
2. Soroceanu, A., & Bargan, A. (2022). Advanced and biomedical applications of Schiff-base ligands and their metal complexes: A review. *Crystals*, 12(10), 1436. <https://doi.org/10.3390/cryst12101436>
3. Wang, X., Kan, J., Zhang, Y., Yang, L., & Gao, L. (2019). Crystal structure of bis((E)-2-ethoxy-6-(((2-hydroxyethyl)imino)methyl)phenolato- κ^2 N,O)copper(II), C₂₂H₂₈N₂CuO₆. *Zeitschrift für Kristallographie – New Crystal Structures*, 234(2), 365-366. <https://doi.org/10.1515/ncrs-2018-0367>
4. Yusuf, T. L., Oladipo, S. D., Zamisa, S., Kumalo, H. M., & Lawal, I. A. (2021). Design of new Schiff-base copper(II) complexes: Synthesis, crystal structures, DFT study, and binding potency toward cytochrome P450 3A4. *ACS Omega*, 6(21), 13704-13718. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00906>
5. Shahverdizadeh, G. H., Ng, S. W., Tiekink, E. R. T., & Mirtamizdoust, B. (2012). Bis{4-bromo-2-[(naphthalen-1-ylimino)methyl]phenolato- κ^2 N,O}copper(II). *Acta Crystallographica Section E*, 68(3). <https://doi.org/10.1107/S1600536812004989>
6. Desiraju, G. R. (1995). Supramolecular synthons in crystal engineering—a new organic synthesis. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 34(21), 2311-2327. <https://doi.org/10.1002/anie.199523111>

7. Cai, B.-H. (2009). Bis[4-bromo-2-(cyclopentylimino-methyl)phenolato]copper(II). *Acta Crystallographica Section E*, 65(3), m339. <https://doi.org/10.1107/S1600536809006606>
8. Kovacic, J. E. (1967). The CN stretching frequency in the infrared spectra of Schiff's base complexes. Copper complexes of salicylidene anilines. *Spectrochimica Acta Part A*, 23, 183-187. [https://doi.org/10.1016/0584-8539\(67\)80219-8](https://doi.org/10.1016/0584-8539(67)80219-8)
9. Bondi, A. (1964). van der Waals volumes and radii. *The Journal of Physical Chemistry*, 68(3), 441-451. <https://doi.org/10.1021/j100785a001>
10. Sheldrick, G. M. (2015). Crystal structure refinement with SHELXL. *Acta Crystallographica Section C*, 71(1), 3-8. <https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>

FİZİK ALANINDA
AKADEMİK TARTIŞMALAR

yaz
yayınlari

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com