



FİZİK ALANINDA BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Osman ARMAĞAN

yaz
yayınları

Fizik Alanında Bilimsel Araştırmalar

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Osman ARMAĞAN

yaz
yayınları

2026

Fizik Alanında Bilimsel Araştırmalar

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Osman ARMAĞAN

© 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 978-625-8574-38-8

Mart 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

Dijital Çağda Lens Teknolojileri ve Otomatik Odaklamalı Gözlükler.....	1
<i>Selin ÖZDEN</i>	
Dijitalleşme ve Yapay Zekâ Destekli Ölçüm Sistemlerinin Optisyenlik Uygulamalarına Etkisi.....	18
<i>Selin ÖZDEN</i>	
Grafen Katkılı PVA Arayüzeyli Metal-Polimer-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Radyasyon Etkilerinin ve Elektriksel Özelliklerinin İncelemesi.....	32
<i>Özlem ABAY, Sema BİLGE OCAK</i>	
Karbonlu Kondritler ve FTIR Spektroskopi Çalışmaları.....	52
<i>Çisem ALTUNAYAR ÜNSALAN, Ozan ÜNSALAN</i>	
Determination of Radiosensitization Effects of Nanoparticles by Monte Carlo Simulations.....	68
<i>Reyyan KAVAK YÜRÜK</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."

DİJİTAL ÇAĞDA LENS TEKNOLOJİLERİ VE OTOMATİK ODAKLAMALI GÖZLÜKLER

Selin ÖZDEN¹

1. GİRİŞ

Gözün odak uyum yeteneğinin ilerleyici kaybı nedeniyle 45 yaşından sonra çoğu insanda kırma kusurları gelişmektedir. Odak uyumu, gözün kristalin merceğinin farklı uzaklıklardaki nesnelere odaklanabilmek için optik gücünü değiştirebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Uyum kaybı şiddetli olduğunda, doğru optik gücü sağlamak için reçeteli gözlükler kullanılmaktadır. Ancak gözlükler herhangi bir uyum yeteneğine sahip değildir; bu nedenle tek bir reçeteli gözlük belirli bir nesne uzaklığında net görüntü oluşturabilirken, diğer uzaklıklarda bulanık görüntüye neden olabilmektedir (Hasan ve ark., 2018). Multifokal ve progresif gözlükler, merceği farklı güç bölgelerine ayırarak veya kademelendirerek bu sorunun bir kısmını hafifletmektedir; ancak bunun karşılığında net görüş alanında azalma meydana gelmektedir (Hasan ve ark., 2018).

Artırılmış gerçeklik, kullanıcıların “sanal dünya” görüntülerini gerçek dünya çevreleriyle üst üste bindirilmiş ve bütünleşmiş şekilde gördükleri bir sanal gerçeklik biçimidir. Birçok uzmana göre sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik, gelecekte dizüstü bilgisayarların ve cep telefonlarının yerini alabilecek kitlesel pazar platformu olacaktır. Son yıllarda, göze yakın ekran yaklaşımları hızla gelişmekte ve gelecekte pratik ve konforlu deneyimler vaat etmektedir (Chakravarthula, 2025). Ancak, bu tür gözlük biçimindeki artırılmış gerçeklik

¹ Doç. Dr., Kırklareli Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-3860-8444.

sistemlerinin gerçeğe dönüşebilmesi için birçok tasarım ve hesaplama zorluğunun aşılması gerekmektedir (Chakravarthula ve ark., 2018). Başa takılan ekranlar ve hesaplamalı gözlük teknolojileri son yıllarda ilgi çekici bir araştırma alanı olmuştur. Sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklikte yaygın uygulamalar bulunmasına rağmen, araştırmacılar bu teknolojilerin görme bozukluklarını azaltmak ya da görmeyi iyileştirmek amacıyla kullanımını incelemektedir (Itoh ve ark., 2019).

Görme bozukluklarının en yaygın biçimleri kırılma kusurlarıdır; özellikle miyopi (uzağı görememe), hipermetropi (yakını görememe), presbiyopi ve astigmatizma bu gruba girmektedir. Kırılma kusurlarının korneanın şekli, kasların zayıf çalışması veya yaşı bağlı olarak göz içindeki merceğin sertleşerek esnekliğini yitirmesi gibi birden fazla nedeni bulunmakla birlikte, bu nedenlerin azaltılması için yaygın olarak geleneksel optik gözlükler kullanılmaktadır. Ancak özellikle presbiyopiden etkilenen bireylerin tüm mesafelerde odaklanabilmek için bifokal lenslere ihtiyaç duyması, görüş alanının daralmasına neden olmakta ve bu lenslere alışmak zaman almaktadır. Bu nedenle bazı kişiler, kullanım bağlamına bağlı olarak farklı gözlükler bulundurmayı tercih etmektedir. Mevcut araştırmalar, otomatik odaklamalı optiklere sahip gözlüklerin bu sorunun üstesinden gelebileceğini göstermektedir (Padmanaban ve ark., 2018).

2. GÖZLÜKLERİN TARİHİ GELİşİMİ

Cisimlerin gerçek boyutlarından daha büyük görünmesine neden olan büyütme olgusu, antik çağlardan beri bilinmektedir. Keşfin, suyla doldurulmuş küresel bir cam kaptan bakıldığında küçük nesnelerin büyümüş görünmesi gibi rastlantısal bir gözlem sonucunda ortaya çıktığı düşünölmektedir. Bu açıklama, konuya ilişkin Roma yazılarına dayanmaktadır. Milattan sonra ikinci

yüzyılda astronom, coğrafyacı ve matematikçi olan Ptolemaios (Claudius Ptolemaeus), o dönemde bilinen optik olaylar üzerine bir inceleme yazmıştır. Optika adlı bu incelemede, suyla doldurulmuş cam küreler ve belirli şekillerdeki cam parçaları aracılığıyla büyötmeyi ele almıştır. Bu bilgiye rağmen, cam merceklerin kullanılmaya başlanması için bin yıldan fazla zaman geçmiştir.

Bilimdeki ilerleme, milattan sonra ikinci yüzyıldan sonra neredeyse durma noktasına gelmiş ve on altıncı yüzyıla kadar bu şekilde kalmıştır. Avrupa'daki Karanlık Çağ sırasında, Elhazen, kırılan ışık ve kırılmaya bağılı büyötmeye üzerine yaptığı çalışmalarla optiğe önemli katkılarda bulunmuştur. On üçüncü yüzyılın İngiliz bilgini Roger Bacon, merceklerle deneyler yapmış ve bunların görmeye yardımcı olacağını sonucuna varmıştır. Yaklaşık 1300 yılı civarında ilk gözlükler, kimliği bilinmeyen bir mucit tarafından üretilmiştir. Bu buluş çoğu zaman Alessandro della Spina'ya ya da Salvino degli Armati'ye atfedilse de, bu iddiaları destekleyen herhangi bir kanıt yoktur. Gözlüklere ilişkin en -kesin kanıt yazılı bir kayıt değil, İtalyan ressam Tommaso da Modena'nın 1352 yılında yaptığı bir resimde bulunmaktadır. Gözlüklere ilişkin yazılı kayıtlar on dördüncü yüzyılın sonlarındadır (Bardell, 1981).

3. GÖZLÜK CAMLARINDA KULLANILAN MALZEMELER

Polimerik ya da plastik malzemelerin kullanılmaya başlanmasına kadar gözlük camları yalnızca camdan yapılmaktaydı. I. Dünya Savaşı'ndan sonra polimer teknolojisindeki gelişmeler yeni plastik türlerinin ortaya çıkmasına yol açmış; optik endüstrisi açısından en önemli gelişme ise 1930'larda polimerize metil metakrilatın (PMMA) icadı olmuştur. İyi optik özelliklere sahip olması nedeniyle bu

malzeme, 1940'lara kadar gözlük camı üretiminde kullanılmıştır (Bruneni, 1997). Bu dönemde, allil diglikol karbonattan oluşan bir akrilik reçine olan CR-39 geliştirilmiştir. Cam hâlâ yaygın biçimde kullanılmakla birlikte, CR-39'un optik mercek olarak seri üretimi ve işlenmesi 1946'da başlamıştır. Bununla birlikte, Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi'nin (FDA) 1972'de cam mercekler için getirdiği güvenlik gereklilikleri ve daha büyük çerçeve boyutlarının yaygınlaşması, cam merceklerin kalınlığını ve ağırlığını artırmış; bu durum plastik merceklerin popülerliğini yükseltmiştir (Benjamin ve Pensyl, 2006; Pillay ve ark., 2020).

Cam malzemeler, özelliklerinin optik kullanım için neredeyse ideal olması nedeniyle yüzyıllar boyunca gözlük camı üretiminde kullanılmıştır. Yüksek derecede saydam bir malzemedir; çoğu kimyasala karşı dirençlidir, zamanla renk değiştirmmez ve çizilmeye karşı görece dayanıklıdır. Geleneksel olarak gözlük camları, iyonların rastgele düzenlendiği, nispeten yapısız bir malzeme olan taç tipi camdan yapılmıştır. Bu cam; kum, soda ve kireç karışımından oluşur, 1.523 kırılma indisine sahiptir ve kromatik sapması düşüktür (Pillay ve ark., 2020).



Şekil 1. Geçmişte kullanılan çeşitli gözlük ve cam modelleri (Rosenthal, 1996).

1800'lü yıllarda kullanılan çeşitli gözlük ve cam modelleri Şekil 1'de gösterilmiştir. 1880 yılında cam karışımına baryum

oksit eklenmesi, daha yüksek kırılma indisli bir malzemenin elde edilmesini sağlamıştır. 1973 yılına gelindiğinde ise çinko oksit ve titanyum dioksit gibi alkali metal oksitler kullanılarak, kimyasal direnci iyi olan ve yüksek kırılma kusurlarının düzeltilmesinde estetik açıdan avantaj sağlayan daha ince, yüksek kırılma indisli lensler üretilmiştir. Ancak bu malzemeler kromatik sapmaya neden olmakta ve daha yüksek özgül ağırlıkları lenslerin ağırlığını artırmaktadır (Faulstich ve ark., 1980).

Plastik gözlük camları; birçok birbirine bağlı dal veya çapraz bağ içeren uzun zincirli moleküllerden (polimerlerden) oluşur. Bu yapı, cama göre daha fazla esneklik ve daha iyi darbe direnci sağlar. CR-39 gözlük camı üretiminde yaygın olarak kullanılsa da, polikarbonat ve Trivex® gibi daha yeni malzemeler daha az çapraz bağ içerir ve benzersiz darbe dayanımı sunar. Yüksek kırılma indisli plastik lensler genellikle poliüretan reçinelerden üretilir; bu da daha düşük yoğunluk ve daha hafif lens malzemesi elde edilmesini sağlar. Yakın zamanda geliştirilen bir yenilik olan MR-174™, evresel açıdan sürdürülebilir üretim ve işleme teknikleri kullanılarak üretilen, biyolojik temelli yüksek kırılma indisli plastik bir lens malzemesidir (Pillay ve ark., 2020).

Polikarbonat, 380 nanometrenin (nm) altındaki tüm ultraviyole (UV) ışınlarını soğurur; bu özelliğiyle ta camı ve CR-39'dan ayrılır, çünkü bu malzemelerin UV koruması sağlayabilmesi için ayrıca işlem görmesi gerekir. UV soğurucuların eklenmesi, aynı zamanda lens malzemesinin hava koşullarına bağlı bozulmasını ve kırılğan hâle gelmesini de önler. Her ne kadar tek parça renkli cam lensler 1600'l yılların ortalarından itibaren üretiliyor olsa da, kısa dalga boylu ışık ile göz duyarlılığı arasındaki ilk belgelenmiş ilişki 1885 yılında Theodore-Edouard Fieuzal tarafından ortaya konmuştur. Bunun ardından gözleri parlak güneş ışığından korumak amacıyla renkli

veya soğurucu lenslerin kullanılması önerilmiştir (Pillay ve ark., 2020).

Uyarlanabilir lensler, kırılma kusurlarını kırılma indisinin veya lens geometrisinin geri dönüşümlü olarak değiştirilmesi yoluyla düzelten gelişmiş optik sistemlerdir. Bu yaklaşım, özellikle presbiyopi gibi yaşa bağlı görme problemlerinin giderilmesinde önemli bir yenilik sunmaktadır. Bu alandaki en dikkat çekici teknolojilerden biri sıvı kristal tabanlı lens tasarımlarıdır. Sıvı kristaller, hem kristal katıların düzenli moleküler yapısını hem de sıvıların akışkan özelliklerini bir arada bulundurur. Katı durumda sıvı kristal molekülleri düzenli ve sabit bir konfigürasyonda bulunurken, kontrollü bir elektrik alan uygulanmasıyla moleküler yönelim değişir. Bu değişim, lensin kırılma indisinin ve dolayısıyla odak uzaklığının ayarlanmasını sağlar (Bailey ve ark., 2018).

Sıvı kristalli gözlük lensleri genellikle varsayılan olarak uzak görme düzeltmesi sunar. Çerçeve sapına yerleştirilen bir sensörün etkinleştirilmesiyle lensin alt nazal bölgesindeki sıvı kristal katmanı devreye girer ve sistem yakın okuma odaklı bir optik güce geçiş yapar. Bu mekanizma, sap ucunda bulunan yeniden şarj edilebilir bir pil ile beslenmektedir. Ticarileştirilmiş “omnifokal” lens teknolojisinde, indiyum-kalay oksit kaplı iki cam tabaka arasında yer alan bir sıvı kristal katmanı bulunmaktadır. Çerçeveye entegre kızılötesi sensörler, kullanıcının göz bebekleri arası mesafesini ölçerek gömülü işlemciye iletir. Ardından uygulanan elektrik akımı, sıvı kristal moleküllerinin yeniden hizalanmasını sağlayarak bakılan mesafeye uygun dinamik odaklama gerçekteştirir. Bu sistem, progresif eklemeli lenslerde görülen sınırlı okuma alanına kıyasla geniş ve kesintisiz bir yakın görüş alanı sunmaktadır. Sıvı kristal tabanlı teknolojiler yalnızca görme düzeltmesiyle sınırlı değildir. Sıvı kristal güneş gözlüklerinde, çerçeve sensörlerinin algıladığı ortam ışığına bağlı olarak lens rengi otomatik biçimde değişir.

Böylece kullanıcı hem kısa dalga boylu hem de uzun dalga boylu görünür ışığın olumsuz etkilerine karşı korunur (Black ve Kupershmidt, 1992; Okada ve ark., 1988; Pillay ve ark., 2020).

Presbiyopi tedavisine yönelik olarak PMMA tabanlı sıvı kristalli kontakt lens prototipleri geliştirilmiş olsa da, güncel araştırmalar daha yüksek biyouyumluluk sağlayan hidrojel temelli ve gömülü sıvı kristal katmanlı yapılara yönelmektedir. Uzak ve yakın görüş arasında geçişin sağlanabilmesi için ise harici elektronik kontrol sistemleri gereklidir. Bu kontrol; göz kırpmaya algılama, göz yakınsamasının izlenmesi, pupil çapındaki değişimlerin belirlenmesi veya yakınlık sensörleri gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir (Pillay ve ark., 2020).

4. TEMEL TEKNOLOJİLER

Artırılmış gerçeklik, gerçek dünya ortamını nesneler veya konumlar üzerine dijital bilgiler bindirerek zenginleştiren bir teknolojidir. Sanal gerçekliğin aksine artırılmış gerçekliğin amacı, tamamen sanal bir ortam oluşturmak yerine gerçek ve bilgisayar üretimi nesneleri birleştiren etkileşimli içeriklerle kullanıcı deneyimini geliştirmektir (Carmigniani ve Furht, 2011).

Artırılmış gerçekliğin ortak bileşenleri giriş aygıtları, izleme sistemleri, hesaplama birimleri ve görüntüleme sistemleridir (Carmigniani ve ark., 2011). Kullanıcıların giriş aygıtları aracılığıyla sanal içerikle etkileşim kurabilmesi gerekmektedir. Giriş aygıtı basit bir uzaktan kumanda, etkileşimli bir eldiven, kablosuz bir bileklik ya da parmak/el izleme kamerası şeklindedir. Sanal içeriğin kullanıcının gördüğü görüntüyle eşleşmesi için bu aygıtlar gerçek nesnelerin konum bilgisini hesaplama birimine iletmektedir. Bu aygıtlar dijital kameralar, optik sensörler, GPS, ivmeölçerler, katı hâl pusulaları ve kablosuz sensörler olabilir. Sanal sahnenin oluşturulması ve sanal içeriğin gerçek nesnelerle doğru biçimde hizalanması için artırılmış

gerçeklik cihazlarının güçlü hesaplama birimlerinden yararlanması gerekir. Bu birimler, gerçek zamanlı işlem gereksinimlerini karşılamak amacıyla genellikle CPU ve GPU'larla donatılmıştır (Carmigniani ve Furht, 2011). Kullanıcının hem gerçek sahneyi hem de sanal içeriği algılayabilmesi için bir görüntüleme yönteminin bulunması gerekmektedir. Artırılmış gerçeklik sistemlerinde başa takılan ekranlar (HMD), elde taşınan ekranlar ve mekânsal görüntüleme sistemleri olmak üzere üç temel görüntüleme ekipmanı kullanılmaktadır (Carmigniani ve Furht, 2011).

Artırılmış gerçeklikte başa takılan ekranlar, dijital içeriği gerçek dünyayla bütünleştirmeyi amaçlayan görüntüleme sistemleridir. Başa takılan ekranlar kamera aracılı ya da optik geçişli türünde olabilir. Kamera aracılı sistemlerde kullanıcı başına yerleştirilen iki kamera aracılığıyla gerçek ortam görüntüsü elde edilir ve artırılmış sahnenin hem gerçek bileşenleri hem de sanal nesneleri bu görüntülerin işlenmesiyle oluşturulur. Optik geçişli sistemlerde ise, kullanıcının gerçek dünyayı doğrudan gözleriyle görmesine izin veren optik bileşenler kullanılır ve grafiksel bilgiler bu görüntünün üzerine bindirilir. Bu nedenle sahne ve çevre, ekran çözünürlüğüyle sınırlı kalmadan daha doğal bir biçimde algılanır (Kress ve Starner, 2013). Optik geçişli sistemler, kullanıcının hem gerçek dünyayı optik bir sistem aracılığıyla doğrudan görebilmesi hem de sanal içeriği algılayabilmesi nedeniyle daha üstün bir yapı olarak kabul edilmektedir. Bu sistemler, optik birleştiricilerin hem geçirgenlik hem de yansıtıcılık özelliklerinden yararlanmaktadır (Rolland ve Cakmakci, 2005).

Günümüzde miyopinin düzeltilmesine yönelik geliştirilen cihazlar önemli ilerlemeler sunmakla birlikte bazı kısıtlılıklara sahiptir. Özellikle kendi kendine ayarlanabilen gözlükler, kırma kusurunu yalnızca belirli bir aralıkta düzeltebilmekte ve astigmatizmayı düzeltememektedir. Bu gözlüklerde kırma

kusurunun hatalı ayarlanma oranı düşük olsa da, yetersiz miyopi düzeltmesinin hastalığın ilerlemesini hızlandırabildiği; buna karşılık düzeltmenin akomodasyonu artırarak astenopi riskini yükseltebildiği bilinmektedir. Ayrıca miyopi derecesi gözlüğün ayarlanabilir aralığı içinde kaldığında birey görmesini kendi ayarıyla netleştirebildiği için miyopi ilerlemesi fark edilemeyecektir (Ramamurthy ve ark., 2024). Bu nedenle otomatik odaklamalı gözlüklerin de sınırlılıklarının iyi anlaşılması ve göz sağlığı üzerindeki uzun dönem etkilerinin daha kapsamlı araştırmalarla ortaya konması gerekmektedir.

2025 yılında IXI adlı teknoloji şirketi tarafından dünyanın ilk otomatik odaklı gözlük geliştirmek için çalışmalarına devam ettiğini ve modelin başarılı olması durumunda görme kusuru alanında büyük bir yenilik getireceği yönünde açıklama yapılmıştır. Bu modelde, gözlük camlarındaki lensler dinamik olarak odak gücünü otomatik ayarlayabilme özelliğine sahiptir (<https://ixiwear.com/>).

4.1. İnsan görme davranışı ve otomatik odaklanma göstergeleri

Vision Research dergisi 1960 yılında yayımlanmaya başladığında, insan görsel gelişimi henüz bilimsel bir alan olarak neredeyse mevcut değildi (Braddick ve Atkinson, 2011). İlk araştırma Tronick ve Clanton'un bebeklerin bakış örüntülerini inceleyen çalışmasıyla ortaya çıkmıştır (Tronick ve Clanton, 1971). İnsan görsel sistemi doğum anında yapısal olarak mevcut olsa da işlevsel açıdan tam olgunluğa ulaşmış değildir. Yaşamın ilk aylarından itibaren görme keskinliği, kontrast duyarlılığı, kırma özellikleri, akomodasyon kapasitesi ve binoküler etkileşimler hızla gelişmektedir. Bu gelişim yalnızca gözün optik bileşenlerindeki değişimlerle sınırlı olmayıp retina, talamus ve özellikle görsel korteks düzeyinde gerçekteşen sinirsel olgunlaşma süreçleriyle yakından ilişkilidir. Bu nedenle görsel

gelişim, periferik duyusal yapılar ile merkezi sinir sistemi organizasyonunun eř zamanlı ilerlediği bütüncül bir nörogelişimsel süreç olarak ele alınmalıdır.

1970’li yıllardan itibaren geliştirilen davranışsal ve elektrofizyolojik yöntemler, bebeklerde görsel kapasitenin nesnel biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Teller keskinlik kartları, sweep görsel uyarılmış potansiyel testi, foto-refraksiyon ve video-refraksiyon teknikleri günümüzde klinik değerlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ölçümler, yaşamın ilk yılı içinde özellikle ilk altı ayda görme keskinliği ve kontrast duyarlılığında belirgin artışlar olduğunu göstermektedir. Buna karşılık şekil, hareket ve küresel örüntü algısı gibi daha üst düzey görsel süreçlerin gelişimi çocukluk dönemine kadar uzanan daha uzun bir zaman dilimine yayılmaktadır. Görsel sistem olgunlaşıkça yalnızca temel duyusal işlevler değil, aynı zamanda karmaşık görsel-bilişsel süreçler de gelişmektedir. Yaşamın ilk yılında retina, lateral genikulat çekirdek ve görsel korteks arasındaki bağlantılar güçlenir. Sinaptik budanma, miyelinizasyon ve aę düzeyinde yeniden organizasyon süreçleri sinirsel iletim hızını artırarak daha kararlı görmeyi mümkün kılar. Aynı dönemde akomodasyon, verjans ve pupiller refleks gibi okülomotor mekanizmalar da olgunlaşarak net retinal görüntünün sürdürülmesine katkı sağlar. Böylece duyusal girdi ile motor çıktıyı bütünleştiren geniş ölçekli beyin ağları oluşur.

İnsan görsel işlevinin gelişimi; optik yapıların olgunlaşması, sinirsel plastisite, görsel-motor entegrasyon ve bilişsel süreçlerin karşılıklı etkileşimiyle şekillenen çok katmanlı bir süreçtir. Erken görsel deneyim hem normal görmenin kazanılması hem de gelişimsel bozuklukların önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

4.2. Düşük görme düzeyi için simülatörler

Başa takılan ekranlar, hastalığa özgü olarak uyarlandıklarında önemli oftalmik hastalıklar için etkili ve pratik çözümler hâline gelebilmektedir. Görme bozukluklarının ileri evrelerinde bu tür özel düzenlemeler gerekse de; kontrast duyarlılığında azalma, görme alanı kaybı ve görme keskinliğinde düşüş yaşayan genel az gören bireyler için daha kapsamlı tasarımlar yaygın biçimde kullanılabileceği belirtilmiştir (Satgunam ve ark., 2012). Piyasada kullanıma hazır çeşitli düşük görme düzeyi için simülatörler bulunmaktadır (<https://www.lowvisionsimulators.com/>). Artırılmış gerçeklikte başa takılan ekranlar retinitis pigmentosa ve gece körlüğü için de yararlı olabileceği düşünölmektedir. Görme bozukluklarının ele alınabilmesi, hedef popölasyonun nicel olarak anlaşılmasını gerektirmektedir. Ateş ve arkadaşları tarafından, katarakt, glokom, renk körlüğü gibi görme bozukluklarını simüle edebilen; geniş açılı kamera kullanan düşük maliyetli, optik geçişli bir simölasyon aracı sunmuştur. Bu tasarım, düşük çözünürlüğü ve göz izleme modöllerinin bulunmaması bazı sınırlamalar getirse de, özellikle obeziteye bağlı diyabetik retinopati veya katarakt gibi önlenabilir hastalıklar konusunda toplumsal farkındalığı artırma potansiyeline sahiptir (Ateş ve ark., 2015).

Düşük görme düzeyli bireylerin görsel algısını anlamaya yönelik bir diğer çalışma Zhao ve arkadaşları tarafından, katarakt, glokom, retinitis pigmentosa veya diyabetik retinopatinin erken evrelerine sahip bireylerle gerçekteştirilmiştir. Araştırmacılar, optik geçişli ekranlar aracılığıyla az gören bireylerin hangi tür sanal öğeleri algılayabildiğini, sonuçları sağlıklı kontrol grubuyla karşılaştırarak incelemiştir. Çalışmada, Epson Moverio BT-200 gözlükleri kullanılarak hem durağan hem de hareketli koşullarda şekil ve metin algısı değerlendirilmiştir. Bulgular, az gören bireylerin şekilleri daha kolay tanıyabildiğini ve beyaz, sarı ile yeşil renkleri kırmızıya göre daha iyi algıladığını göstermiştir. Bu

avantajlar sayesinde düşük görme düzeyli katılımcıların, hareketlilik gerektiren görevlerde artırılmış gerçeklik g z lklerinden sağlıklı bireylere benzer biçimde yararlanabildiği rapor edilmiştir (Zhao ve ark., 2017).

Microsoft HoloLens uyarlaması, Kinateder ve arkadaşları tarafından, özellikle görme kaybı neredeyse tam olan bireylerde kullanılabilirliğe odaklanan mesafe tabanlı bir görsel artırma uygulamasını gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu uygulama, gerçek dünyadaki mekânsal bilgiyi artırılmış gerçeklik görünümüne aktarırken farklı uzaklıklardaki nesneler arasında yüksek kontrastlı kenarlar oluşturmaktadır. Bulgular, kenar belirginleştirme yoluyla görsel sahnenin sadeleştirilmesinin görme bozukluğu olan bireyler için yararlı olduğunu göstermiştir (Kinateder ve ark., 2018).

Stearns ve arkadaşları, Microsoft HoloLens kullanarak bir artırılmış gerçeklik büyütme yardımcısı geliştirmiştir. Bu sistem, akıllı telefon kamerası veya parmağa takılan bir kamera aracılığıyla elde edilen fiziksel dünya görüntüsü üzerine 3 boyutlu sanal içeriği yansıtılmaktadır. Çalışmaya katılan bireyler, diğer büyütme ekipmanlarına kıyasla gelişmiş hareketlilik, mahremiyet ve kullanıma hazır olması nedeniyle memnun kalmıştır. Bununla birlikte dar görüş alanı, düşük kontrastlı hologramlar ve bozulmuş renkler geliştirmeye açık yönler olarak belirtilmiştir (Stearns ve ark., 2018).

Tüm görme düzeltme araçları fiziksel dünyadan alınan girdilere bağlıdır. Bu durum, gelişmiş mikroleşemcilere ve uzun pil ömrüne duyulan gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca bu cihazların performansı büyük  l de bilgisayarlı görüş tekniklerinin düzeyiyle belirlenmektedir.

5. SONUÇ

Görme kusurlarının düzeltilmesine yönelik yaklaşımlar büyük ölçüde ilerleme kaydetmiştir. Bu gelişim yalnızca klinik uygulamalarla sınırlı kalmamış; aynı zamanda gözlük üretiminde kullanılan malzeme bilimi, tasarım yaklaşımları ve imalat teknolojilerindeki yeniliklerle de desteklenmiştir. Son yıllarda gerçekleşen önemli ilerlemeler dikkate alındığında, gelişmekte olan teknolojilerin gelecekte görme düzeltme yöntemlerinin şekillenmesinde kritik bir rol oynayacağı düşünülmektedir. Gelecekte optik, biyomedikal mühendisliği ve yapay zekâ temelli görüntüleme teknolojilerinin bütünleşmesiyle, görme düzeltme yaklaşımlarının daha akıllı, uyarlanabilir ve erişilebilir hâle gelmesi beklenmektedir. Geliştirilecek teknolojilerin uygun maliyetli, kullanıcı dostu, güvenilir ve uzun süreli kullanılabilir olması gibi özellikleri, klinik ve toplumsal kabul açısından belirleyici olacaktır.

KAYNAKÇA

- Ates, H. C., Fiannaca, A., & Folmer, E. (2015). Immersive simulation of visual impairments using a wearable see-through display. In Proceedings of the ninth international conference on tangible, embedded, and embodied interaction (225-228).
- Bailey, J., Morgan, P. B., Gleeson, H. F., & Jones, J. C. (2018). Switchable liquid crystal contact lenses for the correction of presbyopia. *Crystals*, 8(1), 29.
- Bardell, D. (1981). Eyeglasses and the discovery of the microscope. *The American Biology Teacher*, 43(3), 157-159.
- Benjamin, W. J., & Pensyl, C. D. (2006). Ocular motility. *Borish's clinical refraction*, 2nd edn. Elsevier, Butterworth Heinemann. Inc, St. Louis, 385-386.
- Black, M., & Kupersmidt, V. (1992). U.S. Patent No. 5,114,218. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Braddick, O., & Atkinson, J. (2011). Development of human visual function. *Vision research*, 51(13), 1588-1609.
- Bruneni, J. L. (1997). More than meets the eye: the stories behind the development of plastic lenses. PPG Industries, Pittsburgh.
- Carmigniani, J., & Furht, B. (2011). Augmented reality: an overview. *Handbook of augmented reality*, 3-46.
- Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E., & Ivkovic, M. (2011). Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia tools and applications*, 51(1), 341-377.

- Chakravarthula, P. (2025). Present and Future of Everyday-Use Augmented Reality Eyeglasses. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 45(1), 56-66.
- Chakravarthula, P., Dunn, D., Akşit, K., & Fuchs, H. (2018). Focusar: Auto-focus augmented reality eyeglasses for both real world and virtual imagery. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(11), 2906-2916.
- Faulstich, M., Geiler, V., & Gliemeroth, G. (1980). U.S. Patent No. 4,213,787. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Hasan, N., Karkhanis, M., Ghosh, C., Khan, F., Ghosh, T., Kim, H., & Mastrangelo, C. H. (2018). Lightweight smart autofocusing eyeglasses. In *Proceedings of SPIE--the International Society for Optical Engineering* (Vol. 10545, p. 1054507).
- <https://ixieyewear.com/>
- <https://www.lowvisionsimulators.com/>
- Itoh, Y., Langlotz, T., Zollmann, S., Iwai, D., Kiyoshi, K., & Amano, T. (2019). Computational phase-modulated eyeglasses. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 27(3), 1916-1928.
- Kinateder, M., Gualtieri, J., Dunn, M. J., Jarosz, W., Yang, X. D., & Cooper, E. A. (2018). Using an augmented reality device as a distance-based vision aid—promise and limitations. *Optometry and Vision Science*, 95(9), 727-737.
- Kress, B., & Starner, T. (2013). A review of head-mounted displays (HMD) technologies and applications for consumer electronics. *Photonic Applications for Aerospace, Commercial, and Harsh Environments IV*, 8720, 62-74.

- Okada, T., Nakamura, T., Nishioka, K., Yamamoto, H., Kouchi, T., & Tomabeche, H. (1988). U.S. Patent No. 4,756,605. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Padmanaban, N., Konrad, R., & Wetzstein, G. (2018). Autofocals: gaze-contingent eyeglasses for presbyopes. In ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies (pp. 1-2).
- Pillay, R., Hansraj, R., & Rampersad, N. (2020). Historical development, applications and advances in materials used in spectacle lenses and contact lenses. *Clinical Optometry*, 157-167.
- Ramamurthy, D., Srinivasan, S., Chamarty, S., Velappan, T., Verkicharla, P. K., & Samuel Paulraj, A. K. (2024). Smart devices in optometry: Current and future perspectives to clinical optometry. *Clinical Optometry*, 169-190.
- Rolland, J. P., & Cakmakci, O. (2005). The past, present, and future of head-mounted display designs. In *Optical Design and Testing II* (Vol. 5638, pp. 368-377). SPIE.
- Rosenthal, J. W. (1996). *Spectacles and other vision aids: a history and guide to collecting*. Norman Publishing.
- Satgunam, P., Woods, R. L., Luo, G., Bronstad, P. M., Reynolds, Z., Ramachandra, C., ... & Peli, E. (2012). Effects of contour enhancement on low-vision preference and visual search. *Optometry and vision science*, 89(9), E1364-E1373.
- Stearns, L., Findlater, L., & Froehlich, J. E. (2018). Design of an augmented reality magnification aid for low vision users. In *Proceedings of the 20th international ACM SIGACCESS conference on computers and accessibility* (pp. 28-39).

- Tronick, E., & Clanton, C. (1971). Infant looking patterns. *Vision Research*, 11(12), 1479-1486.
- Zhao, Y., Hu, M., Hashash, S., & Azenkot, S. (2017). Understanding low vision people's visual perception on commercial augmented reality glasses. In *Proceedings of the 2017 CHI conference on human factors in computing systems* (pp. 4170-4181).

DİJİTALLEŞME VE YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ ÖLÇÜM SİSTEMLERİNİN OPTİSYENLİK UYGULAMALARINA ETKİSİ

Selin ÖZDEN¹

1. GİRİŞ

Yapay zekâ, bilgisayarların ve makinelerin insanın öğrenme, anlama, problem çözme, karar verme ve hatta yaratıcılık ile özerklik gibi yetilerini taklit etmesini sağlayan bir teknolojidir (Hunt, 2014). Yapay zekâ, özellikle derin öğrenme, doğal dil işleme, görüntü tanıma ve konuşma tanıma gibi görevlerde yaygın biçimde uygulanmış; böylece iş gücü ve maddi kaynak tasarrufu sağlamıştır (Sheng ve ark., 2024). Bilim ve teknolojiadaki ilerlemelerle birlikte yapay zekâ, tıbbi uygulamalarda dikkate değer bir etkinlik göstermiştir; bu durum özellikle oküler hastalıkların taranması ve tanısında belirginleşmektedir (Li ve ark., 2025; Wong ve ark., 2024).

Görme, tüm duyular arasında en önemlisi olarak kabul edilmektedir. Göz hastalıkları, gözü ve ilişkili dokuları etkileyen geniş bir patoloji yelpazesini kapsamaktadır ve kalıcı görme kaybına yol açabilen göz hastalıkları mevcuttur. Hastalık insidansına ilişkin güncel eğilimler büyük ölçüde metabolik ve yaşa bağlı faktörlerle ilişkilidir (Bourne ve ark., 2021). Bu göz hastalıklarının erken tanısı, görme kaybının önlenmesi için kritik öneme sahiptir. Özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde; personel yetersizliği, finansal kısıtlılıklar ve zaman sınırlamaları, geniş ölçekli toplum temelli tarama programlarının

¹ Doç. Dr., Kırklareli Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-3860-8444.

uygulanmasını ve sürdürülebilirliğini engelleyebildiğinden, göz hastalıklarına yönelik bakım kalitesinin geliştirilmesi gerekmektedir (Bourne ve ark., 2017).

Dijital teknolojilerin ortaya çıkışı, sağlık sektörü için acil sorunlardan bazılarına potansiyel çözümler sunarak yeni fırsatlar yaratmıştır. Tanısal destek açısından görüntüleme incelemelerinin kritik rol oynadığı göz sağlığı alanında, yapay zekâ önemli bir potansiyel taşımaktadır. Yapay zekâ teknolojisine artan ilgi, bu teknolojinin göz hastalıklarının taranması ve tanısında daha yaygın kullanılmasını hızlandırmıştır. Yapay zekâ teknolojisi, göz muayenelerinden elde edilen büyük veri miktarını hızlı ve doğru biçimde analiz edebilmekte; yüksek duyarlılık ile göz hastalığına işaret edebilecek anormal durumları belirleyebilmektedir (Haug ve Drazen,2023; Lin ve ark., 2025). Sürecin denetlenmesi için eğitimli personele gereksinim duyulması, performansın her zaman kusursuz olmaması ve bunun tanı atlanmalarına yol açabilmesi gibi sınırlılıklara rağmen, yapay zekâ tabanlı tarama; hızlı görüntü almanın gerekli olduğu ya da sağlık hizmeti sunucularının yetersiz olduğu durumlarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, göz hastalığı taramasında yapay zekâ teknolojisinin küresel ölçekte mevcut durumu ve tarama hizmetleri üzerindeki etkisi hâlen belirsizliğini korumaktadır (Haug ve Drazen,2023; Lin ve ark., 2025).

Bu nedenle, göz hastalığı tarama hizmetlerinin iyileştirilmesinde bir araç olarak yapay zekâ potansiyelinin anlaşılması ve buna bağlı süreç yeniden yapılandırmaları ile sağlık sistemi dönüşümünün gerekliliği ve uygulanabilirliğinin araştırılması büyük önem taşımaktadır.

2. YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ

Yapay Zekâ terimi ilk kez 1956 yılında John McCarthy tarafından ortaya atılmıştır (Rahmanipour ve ark., 2025). Bu

teknoloji, minimum düzeyde insan müdahalesiyle akıllı davranışı taklit etmek için hesaplamalı sistemler kullanmaktadır. Yapay zekâ kullanımının, sağlık sistemine kapsamlı tıbbi verileri analiz etme, hastalıkları nleme, örüntüleri ortaya çıkarma, doğru tanıda bulunmayı kolaylaştırma ve kişiselleştirilmiş tedavi planlarının oluşturulmasına yardımcı olma gibi çeşitli konularda destek sağlayacağı dşnlmektedir (Rahmanipour ve ark., 2025).

Yapay zekâ, bağımsız ve akıllı biçimde işlev görebilen herhangi bir sistemin oluşturulmasıyla ilgilenen bilgisayar biliminin geniş bir alanıdır. Yapay zekâ teknolojisi; otonom sürüşe sahip araçlar ve dama oynayabilen bilgisayarlar gibi farklı alanlarda uygulanmıştır. Makine ğrenmesi ise yapay zekânın bir alt dalı olup, bilgisayarlara veri kümelerinden öğrenerek görevleri otonom biçimde tamamlama yetisi kazandırmayı amaçlamaktadır. Makine ğrenmesi algoritmaları, her biri belirli hastalar veya gözler gibi benzersiz özneleri temsil eden örneklerden oluşan büyük veri kümelerine gereksinim duymaktadır. Bu rnekler; yaş, cinsiyet veya göz içi basıncı gibi klinik değişkenler ya da piksel, piksel kümeleri veya voksel (piksellerin üç boyutlu karşılığı) gibi görüntü bileşenleri ile tanımlanır. Örnekler, birbiriyle ilişkili diyabetik hastalar, normal bireyler gibi örneklerin oluşturduğu sınıflar içinde kategorize edilmektedir (Stilgoe, 2018).

Göz hastalıklarının tanı ve tedavisinde en yaygın kullanılan yapay zekâ algoritması, sinir ağı olarak adlandırılmaktadır. Sinir ağlarında, birinci düzey nöronlar tek bir örneğe ait tekil değişkenlerle temsil edilmektedir. Algoritmadaki her nöron, kendisinden sonra gelen tüm nöron kümesine bağlıdır ve bu bağlantılar değişken ağırlıklarla tanımlanmaktadır. Böylece her birinci düzey nöron, ikinci düzey nöronların değerini kendine özgü biçimde artırabilir ya da azaltabilir. Her ikinci düzey nöronun değeri, tüm birinci düzey nöronların değerlerinin toplamı ile belirlenmektedir. Sonuç olarak, nihai çıktı katmanı

veri kümesinde önceden tanımlanmış sınıfları temsil etmektedir (Armstrong ve Lorch, 2020).

Yapay zekâ modelleri arasında, görme alanı testleri, optik koherens tomografi ve retina görüntüleri gibi yapılandırılmış veriler makine öğrenmesi modellerinin uygulanmasını uygun hâle getirmektedir. Makine öğrenmesinin bir alt dalı olan derin öğrenme modeli ise, görüntüleri analiz etmek ve öz-öğrenme algoritmaları aracılığıyla hastalık ilerlemesini tahmin etmek için evrişimli sinir ağlarını kullanmaktadır (Akkara ve Kuriakose, 2019; Du ve ark., 2018). Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks, CNN), görüntü tanıma alanında yaygın olarak kullanılan bir sinir ağı alt türüdür. Birden fazla evrişim katmanı kullanarak hem basit hem de karmaşık özellikleri (kenarlar, çizgiler, renkler, şekiller vb.) işleyebilirler. Güncel CNN örnekleri arasında AlexNet, GoogleNet ve ResNet bulunmaktadır (Sendak ve ark., 2020; Taribagil ve ark., 2023).

3. TARAMA VE TANIYA YÖNELİK YAKLAŞIMLAR

Tarama ve tanıya yönelik geliştirilen yapay zekâ uygulamaları en yoğun biçimde retina alanına odaklanmıştır. Diyabetik retinopati ve yaşa bağlı makula dejenerasyonu için mevcut yapay zekâ algoritmalarının hem kalitesi hem de sayısı açısından önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Ayrıca prematüre retinopatisi alanında da erken dönemde kayda değer gelişmeler görülmüştür. Retinanın incelenmesine olanak tanıyan fundus kameraları ve optik koherens tomografi gibi çok sayıda yüksek kaliteli görüntüleme yönteminin bulunması; buna ek olarak hastalıkların küresel yükünün yüksek ve görmeyi tehdit edici nitelikte olması, bu alandaki araştırmaları hızlandıran temel etkenler arasında yer almaktadır. Diyabetik retinopati tarama programları, özellikle yönlendirme gerektiren diyabetik

retinopatinin saptanmasına odaklanmakta olup, yapay zekâ temelli yaklaşımlar bu alanda yüksek doğruluk oranları göstermektedir. Büyük veri kümeleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda %90'ın üzerinde duyarlılık ve özgüllük değerleri elde edilmiş, gerçek yaşam uygulamalarında da benzer biçimde yüksek duyarlılık rapor edilmiştir. Karşılaştırmalı bulgular, yapay zekâ sistemlerinin diyabetik retinopati saptamada yüksek performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır (Abramoff ve ark., 2016; Armstrong ve Lorch, 2020).

Refraksiyon kusurunun tanı ve yönetimi geleneksel olarak yapılan kapsamlı göz muayenelerine dayanmıştır; ancak dünyanın birçok bölgesinde bu uzmanlaşmış hizmetlere erişim sınırlı kalmıştır. Bu bağlamda yapay zekâ, refraksiyon kusurunun tanı ve yönetimini dönüştürme konusunda büyük bir potansiyel göstermektedir. İmplant edilebilir kollamer lensler ve ortokeratoloji lensleri gibi tedavilerde yapay zekâ modelleri, lens-kornea arası mesafe boyutunun tahmini ve en uygun lens uyumunun yüksek doğrulukla belirlenmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca yapay zekâ, refraktif cerrahi işlemler için cerrahi planlamanın ve sonuçların optimize edilmesinde umut verici bir potansiyel göstermiştir. Yapay zekâ ile entegre edilen teletıp, akıllı telefon uygulamaları ve sanal gerçeklik gibi gelişen dijital teknolojiler, refraksiyon kusuru taraması için yeni olanaklar sunmaktadır. Bununla birlikte, yaygın klinik uygulamaya geçilmeden önce sınırlı doğrulama veri setleri, veri standardizasyonu eksikliği, görüntü kalitesi sorunları, popülasyon heterojenliği, pratik uygulama zorlukları ve hasta gizliliğine ilişkin etik hususlar gibi temel sorunların ele alınması gerekmektedir (Nguyen ve ark., 2025).

Glokom, dünya genelinde geri dönüşümsüz körlüğün önde gelen nedenlerinden biri olup bu nedenle yapay zekâ araştırmalarında önemli bir odak noktası hâline gelmiştir. Çeşitli görüntüleme ve klinik test verilerini kullanan yapay zekâ

algoritmaları, glokomlu ve normal gözleri yüksek duyarlılık ve özgüllikle ayırt edebilmektedir. Klinik değişkenler, görme alanı testleri ve optik koherens tomografi verileriyle eğitilen bir modelde %98'in üzerinde tanısai doğruluk bildirilmiştir. Bununla birlikte, çok sayıda klinik değişkene gereksinim duyan bu tür algoritmaların, geniş ölçekli toplum taramalarından ziyade klinik uygulama ortamlarında daha uygun olduğu değerlendirilmektedir (Haleem ve ark., 2018; Armstrong ve Lorch, 2020).

Retina hastalıklarında yapay zekâ tabanlı tarama ve tanı teknolojilerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmakla birlikte, ön segment patolojilerinde de dikkat çekici gelişmeler görülmektedir. Ancak katarakt gibi yaygın ön segment hastalıklarının standart biçimde sık görüntülenmemesi ve retina fundus görüntülerine kıyasla standart ön segment görüntüleme yöntemlerinin daha sınırlı olması, büyük ölçekli eğitim ve doğrulama veri setlerinin oluşturulmasını zorlaştırmaktadır.

Katarakt, dünya genelinde körlüğün en önde gelen nedenidir. Yarıklı lamba fotoğraflarına dayalı olarak geliştirilen otomatik nükleer katarakt nicelendirme algoritması, uzman değerlendiricilerin klinik tanısıyla karşılaştırıldığında %81,8 duyarlılık ve %80,7 özgüllük ile katarakt şiddetini derecelendirebilmiştir (Cheung ve ark., 2011). Makine öğrenmesi algoritmaları; fundus görüntüleri, ultrason görüntüleri ve görünür dalga boyu göz görüntülerinden katarakt tanısı koymak ve evreleme yapmak amacıyla kullanılmaktadır (Toro ve ark., 2021; Rampat ve ark., 2021). Araştırmacılar günümüzde derin öğrenme modellerini kullanarak yaşa bağlı katarakt tanısı koyabilmektedir (Gao ve ark., 2015; Rampat ve ark., 2021). Pediatrik katarakt, çocukluk çağı körlüğünün başlıca nedenlerinden biridir. Pediatrik kataraktın sınıflandırılması ve derecelendirilmesi için CNN tabanlı bilgisayar destekli tanı modeli geliştirilmiş ve yapay zekâ ajanının entegre edildiği bulut tabanlı bir platform oluşturulmuştur (Long ve ark., 2020). Önerilen bu yöntemler,

geniş nüfus taramaları bağlamında katarakt tanısının klinik iş akışını iyileştirmeye katkı sağlamakta ve diğer oküler görüntüleme alanlarına da ışık tutmaktadır.

Diyabetik retinopati, glokom, yaşa bağlı makula dejenerasyonu ve katarakta ek olarak yapay zekâ, diğer göz hastalıklarının tanısında da kullanılmaktadır. Yapay zekâ algoritmaları; Scheimpflug görüntüleme verileri kullanılarak keratokonusun saptanması ve erken evrelerinin belirlenmesi, miyopik refraktif cerrahi sonrası korneal gücün değerlendirilmesi, şaşılık cerrahisi planlaması ve polipoidal koroidal vask lopatide pigment epitel dekolmanının tespiti amacıyla uygulanabilmektedir (Rampat ve ark., 2021).

4. MEVCUT KISITLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Makine  ğrenmesi algoritmaları, doğru sınıflandırılmış ve yeterince yüksek c z n rl kl  görüntüler içeren yüksek kaliteli ve büyük hacimli veri setlerinin varlığıyla sınırlıdır. Klinik uygulamada çok sayıda fundus görüntüsü elde edilmesine rağmen, nadir hastalıklara ait geniş veri setlerinin oluşturulması güçtür. Ayrıca  n segment hastalıklarının rutin olarak görüntülenmemesi, bu hastalıklara yönelik veri setlerinin yetersiz kalmasına yol açmaktadır.

Oftalmik Ultrasonografi olanaklarının geliştirilmesi ve standartlaştırılmış, yüksek kaliteli  n segment görüntüleme teknolojilerinin oluşturulması; tarama, tanı ve prognoz öngörüsü için yeni ve klinik açıdan yararlı makine öğrenmesi algoritmalarının geliştirilmesini sağlayabilir. Sağlık hizmetlerinde yapay zekâ uygulamalarına ilişkin bir diğer gelecek zorluğu, iş gücünde beceri kaybı riskidir. Bilgisayar destekli tanı sistemlerinin hatalı çıktılarının, radyologların mamografide kanser saptama oranını azaltabildiği; benzer şekilde hatalı

bilgisayar yorumlarının, asistan hekimlerin elektrokardiyogram tanı doğruluğunu düşürdüğü gösterilmiştir. Bu nedenle, klinik tıpta makine öğrenmesinin sınırlılıklarının ve potansiyel yanlışlıklarının farkında olunması, geleceğin uzmanlarının beceri kaybı ve önyargı risklerini azaltmaya yönelik önlemler alması açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, otomatik yapay zekâ temelli tarama ve tanı uygulamalarına yönelik hasta güveninin kazanılması da önemli bir engel olarak görülmektedir. Araştırmalar, birçok hastanın tıpta makine öğrenmesi uygulamalarını benimsemeye istekli olduğunu gösterse de, bilgisayar destekli tanıya güvenmeyen ve yüz yüze oftalmolojik muayeneyi tercih eden hasta grupları bulunmaktadır (Keel ve ark., 2018).

Yapay zekâ modellerinin değerlendirilmesi ve sonuçlarının raporlanması için küresel ölçekte çeşitli değerli kılavuzlar bulunmaktadır. Bir yapay zekâ uyarlaması olan CONSORT-AI, yapay zekâ içeren klinik araştırmaların değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. CONSORT-AI; şeffaflığı artırmayı, çalışma tasarımının titizlikle incelenmesini sağlamayı, girdi verilerinin kalitesini ve veri işleme süreçlerini kontrol etmeyi ve performans hatalarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Tanısal doğruluk çalışmalarının raporlanmasına yönelik STARD-AI ve bireysel prognoz veya tanı için çok değişkenli tahmin modellerinin şeffaf raporlanmasına yönelik TRIPOD-AI kılavuzları, tanısal doğruluk ya da prognostik model çalışmalarının değerlendirilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu raporlama kılavuzları, klinik yapay zekâ araştırmalarının farklı aşamalarında şeffaf raporlama ve sistematik bir çerçeve sunmaktadır. Geliştirme ile uygulama arasındaki boşluğu azaltmayı amaçlayan yeni bir kılavuz olan DECIDE-AI ise karar destek sistemlerinin erken klinik değerlendirilmesine yönelik raporlama rehberliği sağlamak üzere tasarlanmıştır. Her ne kadar bu kılavuzların tümü mükemmel

raporlama önerileri sunsa da, klinik yapay zekâ çözümlerinin tedarikinden sorumlu son kullanıcılar ve yerel personel için yeterince erişilebilir değildir. Klinik iş akışlarına başarılı entegrasyonu desteklemek amacıyla, makine öğrenmesi modeline ilişkin açık iletişim materyallerinin sağlanması gerekmektedir (Tarıbagil ve ark., 2023).

Yapay zekânın klinik iş akışlarına entegrasyonundaki çekincelerin bir kısmı, model açıklanabilirliğinin sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır. Günümüzde derin öğrenme modelleri sıklıkla “kara kutu” olarak tanımlanmaktadır. Bilgisayar bilimlerindeki bu kavram, girdi ile çıktı arasındaki bağlantıların doğrudan görülememesi ya da anlaşılamaması durumunu ifade etmektedir. Sinir ağları çok sayıda gizli katman içerdiğinden, karmaşık bağlantıları ve örüntü tanıma süreçleri yeterli olarak açıklanamamaktadır (Srivastav 2023; Tarıbagil ve ark., 2023).

Klinik olarak doğrulanmış yapay zekâ modelleri ve bunları destekleyen iş stratejileri mevcut olsa bile, kullanıcı kabulünü sağlamakta zorluklar yaşanabilmektedir (Singh ve ark., 2020). Tıbbi açıdan bakıldığında, bir derin öğrenme modelinin çıktıya nasıl ulaştığını anlamak; algoritmaya duyulan güveni, şeffaflığı ve kabulü artırabilecektir. Açıklanabilir yapay zekâ, klinisyenlerin daha hızlı benimsemesini kolaylaştırabilecektir. Hasta perspektifinden bakıldığında, açıklanabilir tanı süreçleri hastaların kendilerini daha güvenli hissetmelerini sağlayarak ortak karar verme sürecini destekleyecektir. Ayrıca açıklanabilir yapay zekâ, potansiyel etik, hukuki ve düzenleyici kaygıların azaltılmasına da katkı sağlayabilecektir. Bu yaklaşım, özellikle sağlık hizmetlerinde güvenilir yapay zekâ ortamının oluşturulmasına ve etkili modellerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Yapay zekâ, girdi ile hedeflenen çıktı arasında bağlantılar kurmaya odaklanmaktadır. Bu nedenle, yapay zekâ modellerinin karmaşık faktörler yerine gerçekten ilgili

değişkenlerin hedeflendiğinden emin olunması önemlidir. İdeal bir girdi; yüksek görüntü çözünürlüğü ve veri doğruluğu sağlamalı, gözlemciler arası değişkenlik ise en düşük düzeyde olmalıdır.

5. SONUÇ

Geniş ölçekli tarama programlarının uygulanması ve sürdürülmesi çoğu zaman lojistik ve finansal açıdan güçlükler içermektedir. Bilgisayarlar, insanlara kıyasla çok daha büyük veri miktarlarını hızlı biçimde analiz edebilmekte; makine öğrenmesi ise emek, zaman ve uzmanlık gerektiren tarama faaliyetlerini otomatikleştirebilmektedir. Bu nedenle, göz hastalıklarını tarayabilen yapay zekâ programları, tarama girişimlerinde iş gücü gereksinimini ve maliyeti azaltırken, uygun şekilde yönlendirilen hasta sayısını artırma potansiyeline sahiptir. Yapay zekâ sistemlerinin tanısai yeteneklerine ilişkin kapsamlı çalışmalar bulunsa da, bu teknolojinin klinik süreçlere uzun vadeli entegrasyonu ile yaygınlaştırılması için etik ve düzenleyici kısıtlamaların ele alınması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Abràmoff, M. D., Lou, Y., Erginay, A., Clarida, W., Amelon, R., Folk, J. C., & Niemeijer, M. (2016). Improved automated detection of diabetic retinopathy on a publicly available dataset through integration of deep learning. *Investigative ophthalmology & visual science*, 57(13), 5200-5206.
- Akkara, J. D., & Kuriakose, A. (2019). Role of artificial intelligence and machine learning in ophthalmology. *Kerala Journal of Ophthalmology*, 31(2), 150-160.
- Armstrong, G. W., & Lorch, A. C. (2020). A (eye): a review of current applications of artificial intelligence and machine learning in ophthalmology. *International ophthalmology clinics*, 60(1), 57-71.
- Bourne, R. R., Flaxman, S. R., Braithwaite, T., Cicinelli, M. V., Das, A., Jonas, J. B., ... & Zheng, Y. (2017). Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, 5(9), e888-e897.
- Bourne, R., Steinmetz, J. D., Flaxman, S., Briant, P. S., Taylor, H. R., Resnikoff, S., ... & Tareque, M. I. (2021). Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study. *The Lancet global health*, 9(2), e130-e143.
- Cheung, C. Y. L., Li, H., Lamoureux, E. L., Mitchell, P., Wang, J. J., Tan, A. G., ... & Wong, T. Y. (2011). Validity of a new computer-aided diagnosis imaging program to quantify nuclear cataract from slit-lamp photographs. *Investigative ophthalmology & visual science*, 52(3), 1314-1319.

- Du, X. L., Li, W. B., & Hu, B. J. (2018). Application of artificial intelligence in ophthalmology. *International journal of ophthalmology*, 11(9), 1555.
- Gao, X., Lin, S., & Wong, T. Y. (2015). Automatic feature learning to grade nuclear cataracts based on deep learning. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(11), 2693-2701.
- Haleem, M. S., Han, L., Hemert, J. V., Li, B., Fleming, A., Pasquale, L. R., & Song, B. J. (2018). A novel adaptive deformable model for automated optic disc and cup segmentation to aid glaucoma diagnosis. *Journal of medical systems*, 42(1), 20.
- Haug, C. J., & Drazen, J. M. (2023). Artificial intelligence and machine learning in clinical medicine. *New England Journal of Medicine*, 388(25), 2398-2399.
- Hunt, E. B. (2014). *Artificial intelligence*. Academic Press.
- Keel, S., Lee, P. Y., Scheetz, J., Li, Z., Kotowicz, M. A., MacIsaac, R. J., & He, M. (2018). Feasibility and patient acceptability of a novel artificial intelligence-based screening model for diabetic retinopathy at endocrinology outpatient services: a pilot study. *Scientific reports*, 8(1), 4330.
- Li, H., Jiang, Z., Guan, Z., Bao, Y., Liu, Y., Hu, T., ... & Jia, W. (2025). Large language models for diabetes training: a prospective study. *Science Bulletin*, 70(6), 934-942.
- Lin, S., Zhang, J., Jan, C., Li, L., Peng, Y., Qian, D., ... & Zou, H. (2025). Impact of artificial intelligence on the availability, accessibility, acceptability and quality of ophthalmic disease screening services: a scoping review. *British Journal of Ophthalmology*.

- Long, E., Chen, J., Wu, X., Liu, Z., Wang, L., Jiang, J., ... & Liu, Y. (2020). Artificial intelligence manages congenital cataract with individualized prediction and telehealth computing. *NPJ digital medicine*, 3(1), 112.
- Nguyen, T., Ong, J., Jonnakuti, V., Masalkhi, M., Waisberg, E., Aman, S., ... & Lee, A. G. (2025). Artificial intelligence in the diagnosis and management of refractive errors. *European Journal of Ophthalmology*, 35(4), 1456-1480.
- Rahmanipour, E., Afazel, S., Ashrafi, S., Sadeghi, E., Ghorbani, M., Zarranz-Ventura, J., & Chhablani, J. (2025). Artificial intelligence in ophthalmology clinical trials: a narrative review. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 1-17.
- Rampat, R., Deshmukh, R., Chen, X., Ting, D. S., Said, D. G., Dua, H. S., & Ting, D. S. (2021). Artificial intelligence in cornea, refractive surgery, and cataract: basic principles, clinical applications, and future directions. *The Asia-Pacific Journal of Ophthalmology*, 10(3), 268-281.
- Sendak, M. P., D'Arcy, J., Kashyap, S., Gao, M., Nichols, M., Corey, K., ... & Balu, S. (2020). A path for translation of machine learning products into healthcare delivery. *EMJ Innov*, 10, 19-00172.
- Sheng, B., Guan, Z., Lim, L. L., Jiang, Z., Mathioudakis, N., Li, J., ... & Jia, W. (2024). Large language models for diabetes care: Potentials and prospects. *Science bulletin*, 69(5), 583-588.
- Singh, R. P., Hom, G. L., Abramoff, M. D., Campbell, J. P., & Chiang, M. F. (2020). Current challenges and barriers to real-world artificial intelligence adoption for the healthcare system, provider, and the patient. *Translational Vision Science & Technology*, 9(2), 45-45.

- Srivastav, P. (2023). Artificial Intelligence and Public Governance. *Supremo Amicus*, 33, 1.
- Stilgoe, J. (2018). Machine learning, social learning and the governance of self-driving cars. *Social studies of science*, 48(1), 25-56.
- Taribagil, P., Hogg, H. J., Balaskas, K., & Keane, P. A. (2023). Integrating artificial intelligence into an ophthalmologist's workflow: obstacles and opportunities. *Expert Review of Ophthalmology*, 18(1), 45-56.
- Toro, M. D., Brezin, A. P., Burdon, M., Cummings, A. B., Evren Kemer, O., Malyugin, B. E., ... & Rejdak, R. (2021). Early impact of COVID-19 outbreak on eye care: insights from EUROCOVCAT group. *European journal of ophthalmology*, 31(1), 5-9.
- Wong, T. Y., Tham, Y. C., Guan, Z., Li, J., Cheung, C., Zheng, Y., ... & Sheng, B. (2024). An integrated image-based deep learning and language models for diabetic retinopathy: a multi-stage development, testing and prospective comparative study. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 65(7), 4925-4925.

GRAFEN KATKILI PVA ARAYÜZEYLİ METAL-POLİMER-YARIİLETKEN SCHOTTKY DİYOTLARDA RADYASYON ETKİLERİNİN VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Özlem ABAY¹

Sema BİLGE OCAK²

1. GİRİŞ

Yoğun madde fiziğı, sahip olduğı konu çeşitliliğı ve geniş uygulama alanları bakımından günümüz fiziğinin en kapsamlı alanlardan biri olarak kabul edilmektedir. Yoğun madde fiziğinin temel amacı, yoğun maddelerin davranışını ve özelliklerini klasik mekanik, kuantum mekaniğı, elektromanyetik teori, istatistiksel mekanik ve alan teorisi gibi çeşitli fizik yasaları aracılığıyla incelemektir. Malzeme teknolojisi, yoğun madde fiziğinin ilgi gören araştırma dallarından biri haline gelmiştir. Malzeme teknolojisi, yarıiletken malzemelerin üretimini kolaylaştırarak, bu malzemelerin elektronik devrelerde etkin bir şekilde kullanılmasını ve geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Yarıiletken malzeme teknolojisi, yarıiletkenlerin elektronik uygulamalarda yaygın kullanımı sayesinde büyük bir sanayi sektörü olmuş ve bu alanda önemli teknolojik ilerlemeler kaydetmiştir.

¹ Dr., Türkiye Enerji Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, ORCID: 0000-0002-4978-0015

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, İleri Teknolojiler ABD, ORCID: 0000-0002-0590-7555.

Bir metalin, bir yarıiletken yüzeyine buharlaştırılarak büyütölmesi ile elde edilen metal-yarıiletken (MS) kontakların tarihçesi 18. yüzyılın sonlarına kadar uzanır. MS diyot çalışmaları 1874 yılında demir, bakır ve kurşun sülfür gibi kristaller üzerine metalik kontak yapıldığı Braun'un (Braun, 1874), nokta kontak metal yarıiletken doğrultucular ve dedektörleri uygulamaya girmesiyle başlamıştır. Giderek önemli bir araştırma alanı haline gelen MS diyotlar üzerine yapılan teorik çalışmalar, genellikle teknolojik uygulamaların gelişmesinden sonra ortaya çıkmıştır. İlk olarak Schottky, metal vakum sistemlerde imaj kuvvet etkisi nedeniyle potansiyel engel alçalması olduğunu keşfetti (Schottky, 1939).

Metal ile yarıiletkenin kontak edilmesiyle arayüzeyinde potansiyel engelin olduğu Schottky tarafından keşfedildiği için bu kontaklar Schottky diyotlar (SDs) olarak adlandırılmaktadır. 1930'lu yıllarda, bu potansiyel engelden taşıyıcı difüzyonunu esas alan doğrultma teorisi Schottky ve Spence tarafından geliştirilmiştir (Bethe, 1942). 1931 yılında Wilson, kuantum mekaniksel tünelleme teorisini Schottky kontaklar için geliştirmiş ve bu teoriyi doğrultma işlemi için ters polariteyi açıklamak amacıyla kullanmıştır. Yine Schottky 1940'lı yıllarda, difüzyon teorisini geliştirirken, aynı yılda Bethe de termoiyonik emisyon teorisini geliştirmiştir (Rideout, 1978). Crowell ve Sze, bu iki teoriyi birleştirerek ideal Schottky diyotlar için akım iletim mekanizmasını termoiyonik difüzyon emisyon teorisi olarak sunmuşlar ve MS diyotlar üzerine yapılan teorik çalışmaların hızla gelişmesine öncölük etmişlerdir (Cowley ve Sze, 1965).

Schottky diyotlarda elektriksel özellikleri değiştirmek amacıyla, MS arasına doğal ya da sonradan yapay olarak büyütölerek oluşturulan arayüzey yalıtkan veya polimer tabakası oluşturulmuştur. Oluşturulan bu arayüzey yalıtkan/polimer tabakalı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya metal-polimer-yarıiletken (MPS) yapılar kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde elektronik uygulamalarda MS arasına SiO₂, TiO₂ ve SnO₂ gibi geleneksel olarak kullanılan yalıtkan arayüzey tabakası yerine özellikle üretimi kolay, maliyeti ucuz ve esnek olmaları nedeniyle polimer malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Polimerler yalıtkan malzemeler olması nedeniyle grafen, kobalt (Co), nikel (Ni) ve çinko (Zn) gibi iletken malzemelerle uygun oranlarda katkılanması ile elektriksel iletkenlikleri artırılır ve iletken polimerler meydana gelir. Buradaki amaç, daha yüksek dielektrik sabitine sahip bir polimer üreterek yapıda daha fazla yük ve enerji depolanmasını sağlamaktır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, metal ile yarıiletken arasına yerleştirilen, özellikle yüksek dielektrik sabitli arayüzey malzemelerinin; arayüzey durum yoğunluğunu ve seri direnci azaltarak geliştirilen elektronik aygıtların performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. MPS yapıların performansı; büyütülen filmin homojenliği, üretim yöntemi, arayüzeyde oluşan arayüzey durum yoğunluğu, seri direnç ve uygulanan frekans gibi birçok parametreye bağılı olarak değişmektedir. Ayrıca katkılama işlemi, polimerin kimyasal yapısını, kristalleşme derecesini ve elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Wöhrle ve Meissner, 1991; Güneş ve ark., 2007). Bu nedenle, polimer arayüzey malzemesine eklenecek katkı maddesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri büyük önem taşımaktadır.

Ayrıca iletken polimer malzemelerin esnek olmaları nedeniyle özel uygulamalara göre malzemelerin özelliklerinin istenildiği şekilde ayarlanabilmesi, düşük maliyetli olması nedeniyle ucuz teknoloji ile üretilebilmeleri, üretim süreçlerinin kolay olması, üretim sürecinin çevreye zarar vermemesi nedeniyle elektronik ve opto-elektronik cihaz üretiminde kullanılmaktadır (Söylemez, 2016; Ukah ve ark., 2011; Taşçıoğlu ve ark., 2017). Bu malzemeler Schottky engel diyot (SBD), ışık yayan diyot (LED), ışık yayan organik diyot (organik ince film tabakalı LED (OLED)), güneş pilleri gibi aygıtların üretiminde

elektriksel, optik ve dielektrik özelliklerinin uygun olması nedeniyle kullanılmaktadır (Baraz ve ark., 2017).

Yarıiletken malzemeler, radyasyon etkisi altında geçici ve kalıcı olmak üzere iki temel etkiye sahiptir. Geçici etkiler, genellikle elektron-deşik çiftlerinin oluşumu veya rekombinasyonu gibi süreçlerden kaynaklanır ve malzemenin elektriksel özelliklerinde kısa süreli değişimlere yol açar. Kalıcı etkiler ise malzemenin kristal yapısında meydana gelen bozulma, sarkan bağlar, arayüzeyde oluşan tuzaklar ve yeniden kristalizasyon gibi değişiklikleri içerir. Bu tür kusurlar, ısınlanmış numunelerin elektriksel ve dielektrik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir ve cihaz güvenilirliği ile ömrünü doğrudan etkilemektedir (Güllü ve ark., 2008; Badila ve ark., 2001). Dolayısıyla, radyasyon etkilerinin anlaşılması ve kontrolü, özellikle elektronik ve uzay teknolojileri gibi kritik uygulamalarda büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen avantajlar göz önünde bulundurularak, MPS yapılı Schottky diyotlar (SDs) üretimi ve elektriksel karakterizasyonunun radyasyon altında değişimi üzerine araştırma yapılmıştır. Bu özellikler göz önünde bulundurularak, birincil malzeme olarak polivinil alkol (PVA) ve katkı maddesi olarak %5 oranında grafen kullanılmıştır.

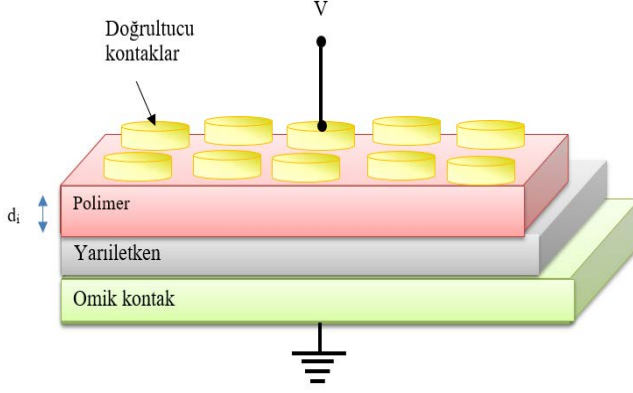
2. MATERYAL VE METOD

Yapılan bu çalışmada MPS yarıiletken yapıların elektriksel özelliklerinin radyasyona bağlı değişiminin detaylı olarak incelemek için elektro-eğirme yöntemiyle Au/organik iletken PVA/n-Si (MPS) yapısı üretilmiştir.

Üretim sürecinin ilk aşaması olarak (100) yönelimli, 2 inch (5,08 cm) çaplı, 350 µm kalınlığa sahip, 0,50 Ω.cm öz dirençli ve Silisyum içine fosfor ($4,3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$) katkılı n tipi

Silisyum alttaş kullanıldı. Yapının istenen kalitede olabilmesi için n-Si yüzeyinin hem organik hem de mekanik kirlerden tamamen arındırılması gerekmektedir. Yüzeydeki organik kirlerin giderilmesi amacıyla kimyasal temizleme yöntemi kullanıldı. Öncelikle n-Si alttaş ultrasonik titreştiricide 5 dakika süreyle metil alkol ve aseton karışımında kimyasal temizleme işlemi ile temizlendi. Her teknik solvent temizleme işleminden sonra n-Si alttaş deiyonize su (18 M Ω) içerisinde çalkalanarak yıkandı. n-Si alttaşın arka yüzeyine omik kontak oluşturmak amacıyla, yüksek vakumlu ($\sim 10^{-6}$ Torr) metal buharlaştırma sisteminde, akım verilen tungsten flaman yardımıyla yüksek saflıkta (%99,995) altın (Au) büyütüldü. Düşük dirençli omik kontak elde etmek için n-Si yarıiletken, nitrojen (N₂) gazı ile yaklaşık 500 °C’ de 3 dakika boyunca tavlandı. Bu işlem sayesinde, altın n-Si alttaşın mat yüzeyine homojen şekilde büyütölerek arka omik kontak oluşturuldu. Arayüzey yalıtkan tabakayı oluşturmak için; ağırlıkça %8’lik PVA özeltisi hazırlamak amacıyla PVA tozu 3 saat boyunca 80 °C sıcaklıkta ultra saflıkta deiyonize su içinde manyetik karıştırıcı içinde karıştırılarak PVA özeltisi elde edildi ve karışım oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Ağırlıkça %1,6 grafen çözeltisi hazırlamak için çözücü olarak N-dimethylformamide kullanıldı. Grafen ve çözücü 2 gün boyunca 25 kHz frekansta sonik dalgalara maruz bırakılarak grafen çözeltisi hazırlanmış oldu. Elde edilen PVA ve grafen çözeltisi oda sıcaklığında karıştırılarak arayüzey çözeltisi elde edildi. Elektro-eğirme (Electrospinning) işlemi için, n-Si alttaşın parlak yüzeyi öne gelecek şekilde malzeme tutucusu üzerine yapıştırıldı ve 0,05 Gr: PVA özeltisi 10 dakika boyunca nano boyutlu fiberler halinde n-Si alttaşın parlak yüzeyine büyütüldü. Son olarak 1 mm çapında delikleri olan maske kullanılarak saf altın arayüzey katmanının (0,05 Gr: PVA) üzerine metal buharlaştırma sisteminde 10^{-6} Torr basınç altında büyütölerek doğrultucu kontaklar oluşturuldu. Böylece MPS tipi Schottky diyotlar üretim

işlemi tamamlandı. şekil 1’de elde edilen MPS yapısı verilmektedir.



şekil 1. Metal/Polimer/Yarıiletken (MPS) yapının şematik gösterimi

3. BULGULAR VE TARTIşMA

Bu çalışmada polimer (%5 grafen katkılı PVA) arayüzey tabakasına sahip Schottky bariyer diyotlarının elektriksel özelliklerinin radyasyona bağlı değişimi incelenmiştir. İlk olarak MPS yapısına ait radyasyondan önce ve sonra akım-voltaj (I-V) ölçümleri karanlık ortamda, 1 MHz frekansında ve $\pm 4V$ voltaj aralığında Keithley 2400 marka ölçüm cihazı kullanılarak alınmıştır. Radyasyon kaynağı olarak saatteki doz hızı 22mGy olan ^{90}Sr (Stronsiyum-90) beta (β) radyasyon kaynağı kullanılmıştır.

Termiyonik emisyon (TE) teorisi MPS yapısına ait temel elektriksel parametreleri belirlemede kullanılan metotlardan biridir. TE teorisinde, pozitif voltaj bölgesinde akım (I) ve gerilim (V) arasındaki ilişki Eşitlik 1 ile ifade edilir (Ersöz ve ark., 2017):

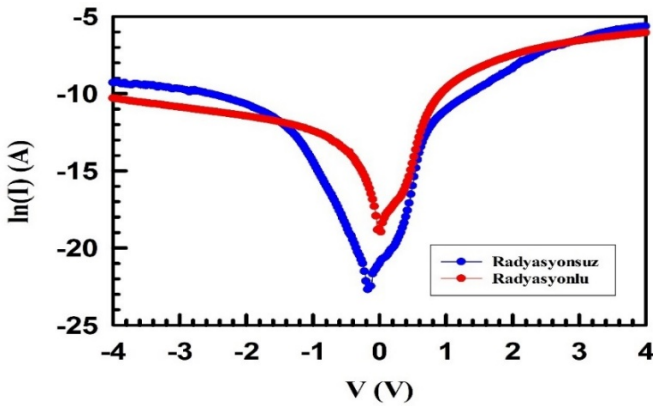
$$I(V) = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

k ($=1,38 \times 10^{-23}$ J/K) Boltzmann sabiti, V uygulanan voltaj, T ($=300$ K) Kelvin cinsinden sıcaklık ve IR_s seri dirençte oluşan voltajdır. IR_s terimi, düşük ve orta gerilim bölgesinde diyota uygulanan gerilimin yanında küçük bir terim oluşu için ihmal edilir. I_0 ters doyum akımı Eşitlik 2 ile ifade edilir;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left(\frac{-q\Phi_{BO}}{kT} \right) \quad (2)$$

burada A doğrultucu kontak alanı, Φ_{BO} sıfır beslem bariyer yüksekliği ve A^* (n-Si için $112 \text{ A/K}^{-2} \text{ cm}^{-2}$) Richardson sabitidir.

Şekil 2’de MPS yapısı için elde edilen radyasyondan önce ve sonra $\ln(I)$ -V grafiğı verilmiştir.



Şekil 2. MPS Schottky Bariyer diyotların yarı logaritmik I-V grafiğı

şekil 2'den $\ln(I)$ - V eğrisinin pozitif voltaj bölgesindeki lineer bölgesinin (0,15V ile 0.35V arası) uzantısının akım eksenin kestiği noktadan ters doyum akımı (I_0) ile lineer bölgenin eğimi ($\tan\theta$) Eşitlik 3'de yerine yazılarak idealite faktörü (n) hesaplanır (Sze, 1981; Ersöz ve ark., 2017):

$$n = \frac{q}{kT} \left[\frac{d(V)}{d(\ln I)} \right] = \frac{q}{kT} \left[\frac{1}{\tan\theta} \right] \quad (3)$$

Ters doyum akımı (I_0) radyasyon yokken $0,04 \times 10^{-8} \text{A}$ ve radyasyon uygulandığında $1,03 \times 10^{-8} \text{A}$ olarak elde edilirken, n değeri radyasyon yokken 5,14 ve radyasyon uygulandığında 7,41 olarak elde edilmiştir. Radyasyon etkisi ile I_0 ve n değerinde bir artış gözlenmiştir.

Ters doyum akımı (I_0) değeri Eşitlik 4 kullanılarak sıfır voltajdaki bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) değeri bulunur (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams, 1988);

$$\Phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4)$$

MPS yapısı için, hesaplanan temel elektriksel parametre değerler (I_0 , n , Φ_{B0}) Tablo1'de verilmiştir.

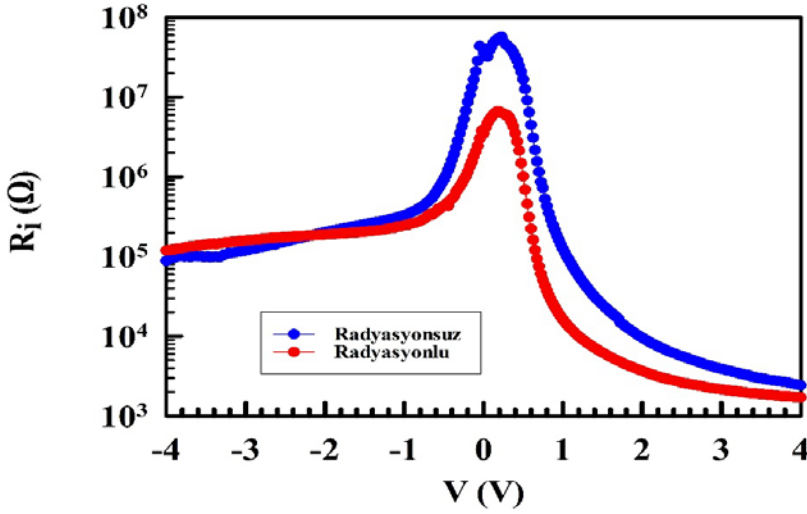
Tablo 1'de radyasyon etkisi altında idealite faktörlerinde ve ters doyma akımlarında artış, Φ_{B0} değerlerinde ise azalma meydana gelmiştir. Ters doyum akımındaki artış derin seviye

tuzaklarının rekombinasyon merkezi olarak davranmasıyla ilişkilendirilmektedir (Mamor, 2007). Ayrıca, bariyer yüksekliğindeki azalma ters doyum akımlarında artışa neden olabilir (Teffahi ve ark., 2016). Akımlarındaki artış, radyasyon etkisi ile daha fazla sayıda yük taşıyıcısının oluşmasından kaynaklanmaktadır. İdeal durumda n değerin 1 'e yakın olması beklenir ancak MPS yapısı için n değeri 1 'den büyük elde edilmiştir. Elde edilen bu yüksek n değeri standart termiyonik emisyon (TE) teorisin ile birlikte diğer akım/iletim mekanizmalarının varlığından kaynaklandığı yani standart termiyonik emisyon (TE) teorisinden sapmanın bir göstergesidir. Radyasyon uygulandığında MPS yapısının arayüzeyinde meydana gelen kusurlar, rekombinasyon merkezleri ve arayüzey tuzakları olarak davranmaktadır. Radyasyon dozunun artması ile birlikte bu kusurların yoğunluğunun artması, arayüzeyde homojensizliğe yol açarak idealite faktörünün artmasına neden olur. İdealite faktöründe gözlenen artış; rekombinasyon, imaj kuvveti etkisi ve tünelleme gibi akım iletim mekanizmaların varlığına atfedilir (Krishnan ve ark., 2008). MPS yapısına radyasyon uygulandığında Φ_{B0} değerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum araştırmacılar tarafından, radyasyonun yarıiletkenin yüzeyinde yasak bant aralığında kusurların oluşması nedeniyle serbest taşıyıcı yoğunluğunu etkilemesiyle açıklanır. Bu durum, bariyer yüksekliğinde radyasyon uygulanması ile azalışa neden olur (Fonash ve ark., 1981; Grusell ve ark., 1980).

Tablo 1. MPS yapısına radyasyonsuz ve radyasyon uygulandığında I-V verilerinden elde edilen temel elektriksel parametreler

MPS yapısı	Radyasyonsuz			Radyasyonlu		
	n	I_0 (A)	Φ_{B0} (eV)	n	I_0 (A)	Φ_{B0} (eV)
	5,14	$0,04 \times 10^{-8}$	0,82	7,41	$1,03 \times 10^{-8}$	0,74

Radyasyon kaynaklı yapısal bozulmaların (kusurların) incelenmesinde, MPS yapısına ilişkin direnç parametrelerinin incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla radyasyondan önce ve sonraki direnç değerleri (R_i) voltaja bağlı grafiği Ohm yasasından (Şekil 3) elde edilir. Şekil 3'te R_i yarı-logaritmik olarak alınır ve R_s değeri +4 V'a karşılık gelen direnç değeri iken R_{sh} değerleri de -4 V'a karşılık gelen direnç değeridir.



Şekil 3. MPS yapısının yarı logaritmik R_i -V grafiği

Yine diyot kalitesinin bilinmesinde önemli parametrelerden biri de diyotun doğrultma oranıdır ($RR=I_F/I_R$). Bu oran ileri beslem akımının (I_F) ters beslem akımına (I_R) bölünmesiyle elde edilir.

Yukarda verilen denklemler kullanılarak hesaplanan temel diyot parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. MPS yapısına radyasyonsuz ve radyasyon uygulandığında R_i -V grafiğinden elde edilen direnç ve doğrultma oranı parametreler

Radyasyonsuz			Radyasyonlu		
R_{sh} (k Ω) (-4 V)	R_s (k Ω) (+4 V)	RR $\pm$ 4V	R_{sh} (k Ω) (-4 V)	R_s (k Ω) (+4 V)	RR $\pm$ 4V
88	25	39	119	6	70

MPS yapısına radyasyon uygulandığında kısa devre direncinde (R_{sh}) artma, seri direnç (R_s) değerinde azalma MPS yapısında iyileşmenin bir göstergesidir ki bu durum doğrultma oranı (RR) değeri 1,8 kat artması bu sonucu kanıtlar niteliktedir (Güllü ve ark., 2008).

Ayrıca Cheung fonksiyonları ile n , Φ_{B0} ve R_s değerleri ikinci bir yöntem kullanılarak hesaplamak mümkündür. Bunun için Eşitlik 5 ve Eşitlik 6 kullanılır (Cheung ve Cheung, 1986):

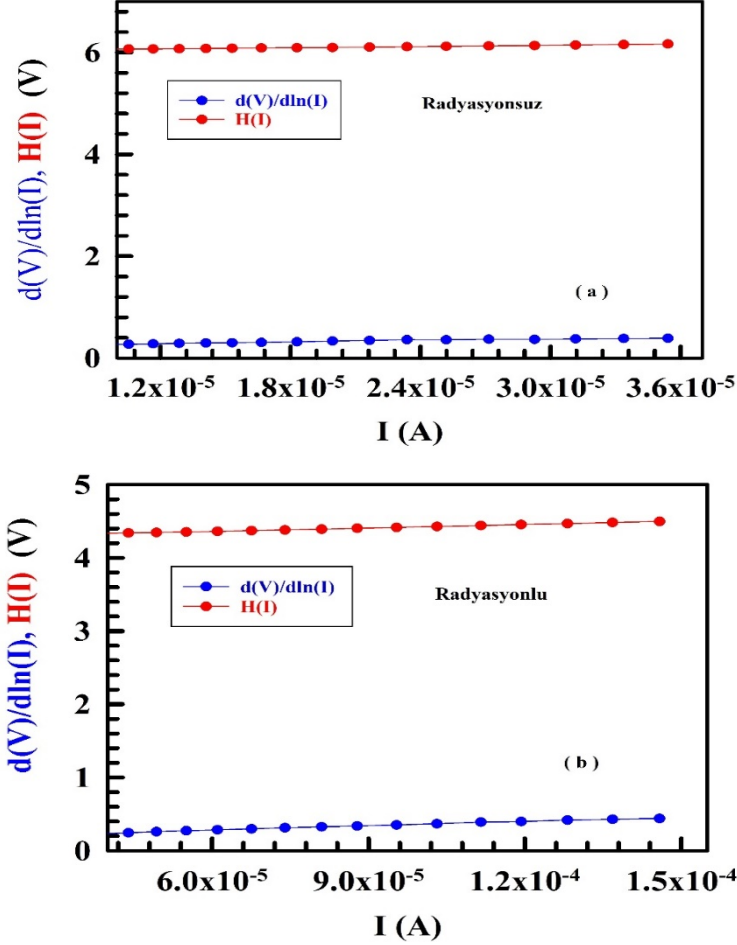
$$\frac{dV}{d\ln(I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (5)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \left[\ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \right] = n\Phi_{B0} + IR_s \quad (6)$$

Yarı logaritmik I-V grafiğinin doğru beslem bölgesinde doğrusallıktan saptığı kısmın verileri için düz bir çizgi verir. Eşitlik-5 $d(V)/d(\ln I)$ -I (Cheung-1 fonksiyonu) grafiğinde doğrusal bölgenin y eksenini kestiği noktadan idealite faktörü (n) ve eğimi ile R_s değeri hesaplanır. Benzer şekilde Eşitlik-6 $H(I)$ -I (Cheung-2 fonksiyonu) grafiğinde doğrusal bölgenin y

eksenini kestiği noktasından Φ_{B0} ve eğimi ile R_s değerleri hesaplanmaktadır.

Şekil 4.a ve Şekil 4.b radyasyonsuz ve radyasyon uygulandığında $dV/d\ln(I)$ -I ile $H(I)$ -I Cheung fonksiyonları grafiklerini göstermektedir. Elde edilen n , Φ_{B0} ve R_s değerleri Tablo 3’de verilmektedir.



Şekil 4. MPS yapısının $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri

R_s ve Φ_{B0} değerlerini üçüncü bir yöntem olarak Norde yöntemi ile hesaplanır. Bunun için Eşitlik-7’den faydalanılır;

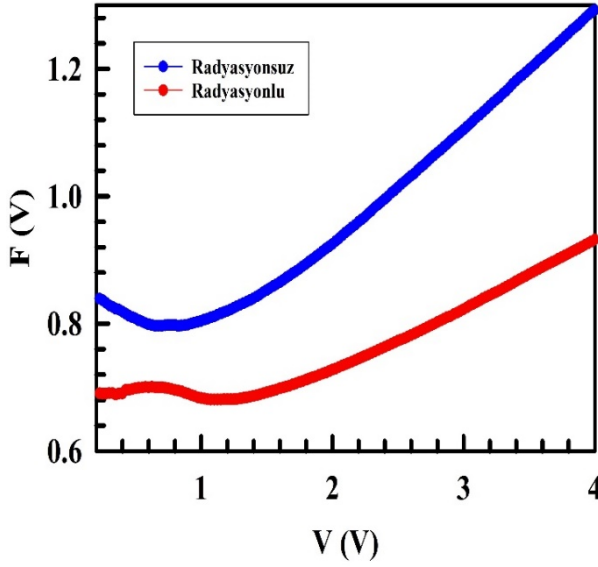
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \left[\ln \left(\frac{I(V)}{A^*AT^2} \right) \right] \quad (7)$$

γ değeri, I-V karakteristiklerinden hesaplanan n değeriinden büyük olan ve $1 < n < \gamma$ koşulunu sağlayan boyutsuz bir tamsayıyı ifade etmektedir.

$$\Phi_{B0} = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (8)$$

$$R_s = \left(\frac{kT}{q} \right) \left(\frac{\gamma - n}{I_{\min}} \right) \quad (9)$$

burada $F(V)$ – V grafiğindeki minimum noktaya karşılık gelen değeri $F(V_{\min})$ olup, $V_{\min}$ ve $I_{\min}$ bu noktadaki gerilim ve akım değeriini temsil etmektedir.



Şekil 5. MPS yapısının $F(V)$ - V grafikleri

MPS yapısı için radyasyonsuz ve radyasyon uygulandığında $F(V)$ - V grafiğinden (Şekil 5) elde edilen Φ_{B0} ve R_s değerleri hesaplanarak Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Cheung fonksiyonları, Norde ve Termoiyonik emisyonundan (TE) elde edilen n , Φ_{B0} ve R_s diyot parametreleri

	Cheung-I		Cheung-II		Norde		Ln(I)-V (TE)		
	n	R_s (k Ω)	Φ_{B0} (eV)	R_s (k Ω)	Φ_{B0} (eV)	R_s (k Ω)	n	R_s (k Ω)	Φ_{B0} (eV)
Radyasyonsuz	5,64	4,93	0,66	4,88	0,77	8,63	5,14	25,0	0,82
Radyasyonlu	7,89	3,99	0,72	3,52	0,75	8,59	7,41	6,0	0,74

Norde ve Cheung fonksiyonları karşılaştırıldığında, Cheung metodu ile bulunan R_s değerlerinin daha küçüktür. Bu durum Cheung fonksiyonları akım grafiğinin ileri pozitif voltaj bölgesinde akımın bükülmeye başladığı noktadan itibaren hesaplanırken, Norde fonksiyonu tüm ileri beslem akım değerleri göz önünde bulundurularak hesaplanması ile açıklanabilir (Norde, 1979; Cheung ve Cheung, 1986). Cheung fonksiyonlarından hesaplanan Φ_{B0} değerleri, $\ln(I)$ - V ve Norde yöntemleri kullanılarak elde edilen değerden daha kktr. Bunun sebebi kullanılan hesaplama yönteminin niteliği ile açıklanır.

Sonuç olarak diyot parametrelerindeki farklılıklar, hesaplamaların farklı voltaj bölgelerinden hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Temel elektriksel parametrelerin belirlenmesinde yalnızca kullanılan ölçüm veya hesaplama yönteminin değil, aynı zamanda seçilen voltaj bölgesinin de dikkate değer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, hesaplamalarda voltaj bölgesi mutlaka dikkate alınmalı; aksi takdirde, farklı koşullar nedeniyle elde edilen veriler arasında farklılıklar ortaya çıkabilmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, elektro eğirme yöntemi ile üretilen PVA'ya %5 grafen katkılı arayüzey polimer tabakasına sahip MPS yapısının radyasyondan önce ve sonra 1 MHz frekansında, karanlık ortamda alınan I - V lmleri alınmıştır. Bu ölçümlerden yararlanılarak radyasyondan önce ve sonra seri direnç (R_s), kısa devre direnci (R_{sh}), doğrultma oranı (RR), ters doyum akımı (I_0), idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) gibi elektriksel parametreler hesaplandı.

MPS yapısına radyasyon uygulandığında R_s değerinde azalış, R_{sh} ile RR değerlerinde artış meydana gelmesi kullanılan polimer tabakasının radyasyona karşı dirençli olduğunu

göstermiştir. R_s , n ve Φ_{B0} değerleri Cheung fonksiyonları aracılığı ile ikinci bir yöntemle belirlenirken, R_s ve Φ_{B0} parametreleri Norde yöntemi kullanılarak üçüncü bir yöntemle hesaplanmıştır. Elde edilen bu diyot parametre değerlerinde farklılıklar olduğu görölmüştür. Elde edilen bu farklılıklar parametrelerin belirlenmesinde yalnızca kullanılan ölçüm veya hesaplama yönteminin değil, aynı zamanda seçilen voltaj bölgesinin seçiminde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Genel olarak bakıldığında üretilen MPS yapısı radyasyona maruz bırakıldığında belirgin bir radyasyon tepkisi göstermesine karşın bozulma eğilimi sergilememiştir. Arayüzey malzemesi olarak kullanılan polimer tabakasının esnek, hafif, düşük maliyetli, basit üretim yöntemiyle elde edilmesi nedeniyle geleneksel yalıtkan arayüzey malzemesi yerine tercih edilebilmektedir.

KAYNAKÇA

- Badila, M., Godignon, P., Millan, J., Berberich, S., Brezeanu, G., (2001). The electron irradiation effects on silicon gate dioxide used for power MOS Devices. *Microelectronics Reliability*, 41(7), 1015–1018. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(01\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(01)00060-9)
- Baraz, N. B., Yücedağ, İ., Azizian Kalandaragh, Y., Ersöz, G., Orak, İ., Altındal, Ş., Akbari, B., Akbari, H. (2017). Electric and dielectric properties of Au/ZnS-PVA/n-Si (MPS) structures in the frequency range of 10–200 kHz. *Journal of Electronic Materials*, 46(7), 4276–4286. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5363-6>
- Bethe, H. A. (1942). Theory of the boundary layer of crystal rectifiers (MIT Radiation Laboratory Report No. 43-12). Radiation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- Braun, F. (1874). On the current conduction through metal sulphides. *Annalen der Physik und Chemie*, 153(4), 556–563. <https://doi.org/10.1002/andp.18752291207>
- Cheung, S. K., Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current–voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85–87. <https://doi.org/10.1063/1.97359>
- Cowley, A. M., Sze, S. M. (1965). Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212–3220. <https://doi.org/10.1063/1.1702952>
- Ersöz G, Yücedağ İ, Bayrakdar S, Altındal Ş, Gümüş A, 2017. Investigation of photo-induced effect on electrical properties of Au/PPy/n-Si (MPS) type Schottky barrier diodes. *Journal of Materials Science: Materials in*

Electronics, 28(9), 6413-6420.
<https://doi.org/10.1007/s10854-016-6326-z>

Fonash, S. J., Ashok, S., Singh, R. (1981). Effect of ion-beam sputter damage on Schottky barrier formation in silicon. *Applied Physics Letters*, 39(5), 423–425.
<https://doi.org/10.1063/1.92738>

Grusell, E., Berg, S., Andersson, L. P. (1980). Electrical defects in silicon introduced by sputtering and sputter-etching. *Journal of the Electrochemical Society*, 127(7), 1573–1576. <https://doi.org/10.1149/1.2129953>

Güllü, Ö., Demir, F., Cimilli, F. E., Biber, M. (2008). γ -irradiation induced changes in the electrical characteristics of Sn/p-Si Schottky contacts. *Vacuum*, 82(8), 789–793.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2007.11.006>

Güneş, S., Neugebauer, H., Sarıçiftçi, N. S. (2007). Conjugated polymer-based organic solar cells. *Chemical Reviews*, 107(4), 1324–1338. <https://doi.org/10.1021/cr050149z>

Krishnan, S., Sanjeev, G., Pattabi, M. (2008). Electron irradiation effects on the Schottky diode characteristics of p-Si. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(4), 621–624.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.11.049>

Mamor, M., Sellai, A., Bouziane, K., Al Harthi, S. H., Al Busaidi, M., Gard, F. S. (2007). Influence of He-ion irradiation on the characteristics of Pd/n-Si_{0.90}Ge_{0.10}/Si Schottky contacts. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(5), 1351–1356. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/5/007>

Norde, H. (1979). A modified forward I–V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied*

Physics, 50(7), 5052–5053.
<https://doi.org/10.1063/1.325607>

Rhoderick, E. H., Williams, R. H. (1988). Metal–semiconductor contacts (2nd ed.). Clarendon Press.

Rideout, V. L. (1978). A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers. *Thin Solid Films*, 48(3), 261–291. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(78\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0040-6090(78)90007-X)

Schottky, W. (1939). Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht- und Spitzengleichrichter. *Zeitschrift für Physik*, 113(5-6), 367–414. <https://doi.org/10.1007/BF01340116>

Söylemez, E. (2016). Polivinil alkol-polietilenimin (PVA-PEI) kompozit nanoliflerin elektrospinleme yöntemi ile üretimi, karakterizasyonu ve çeşitli kullanım alanlarına uygulanması. Yüksek lisans tezi, Kimya Bölümü, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye.

Sze, S. M. (1981). *Physics of semiconductor devices* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Taşcıoğlu, İ., Tüzün Özmen, Ö., Şağban, H. M., Yağlıoğlu, E., Altındal, Ş. (2017). Frequency dependent electrical and dielectric properties of Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si Schottky barrier diode. *Journal of Electronic Materials*, 46(4), 2379–2386. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5294-2>

Teffahi, A., Hamri, D., Mostefa, A., Saidane, A., Al Saqri, N., Felix, J. F., Henini, M. (2016). Effect of ⁶⁰Co γ-ray irradiation on electrical properties of Ti/Au/GaAs_{1-x}N_x Schottky diodes. *Current Applied Physics*, 16(8), 850–858. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2016.05.003>

Ukah, N. B., Granstrom, J., Sanganna Gari, R. R., King, G. M., Guha, S. (2011). Low-operating voltage and stable

organic field-effect transistors with poly(methyl methacrylate) gate dielectric solution deposited from a high dipole moment solvent. *Applied Physics Letters*, 99(24), 243302. <https://doi.org/10.1063/1.3669696>

Wilson, A. H. (1932). A note on the theory of rectification. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 136(830), 487–498. <https://doi.org/10.1098/rspa.1932.0097>

Wöhrle, D., Meissner, D. (1991). Organic solar cells. *Advanced Materials*, 3(3), 129–138. <https://doi.org/10.1002/adma.19910030303>

KARBONLU KONDRİTLER VE FTIR SPEKTROSKOPİ ÇALIşMALAR

Çisem ALTUNAYAR ÜNSALAN¹

Ozan ÜNSALAN²

1. GİRİş

Karbonlu kondritler, serbest karbon (elmas ve grafit) dışında önemli miktarda karbonlu madde içermesiyle karakterize edilen bir grup taşı meteorittir (Mason, 1963). Bu kondritler, erken güneş sistemi tarihinin yorumlanmasında merkezi bir rol oynar ve aynı zamanda güneş öncesi süreçlerin gözlemlenmesi için bir imkan oluşturlar. Karbonlu kondritlerin C tipi asteroitlerin ve/veya kuyruklu yıldızların örnekleri oldukları düşünülmektedir. Karbonlu kondritlerin çoğu kondrit grubu, güneş sistemindeki en eski korunmuş katı cisimler gibi görünen ve genellikle güneş öncesi nükleosentez izleri taşıyan refrakter inklüzyonlar içermektedir. Karbonlu kondritlerin çoğu minimal termal metamorfizmaya uğramıştır. Bu nedenle güneş öncesi elmas, grafit ve silisyum karbür tanelerini korumaktadırlar. Karbonlu kondrit gruplarının çoğunu diğer tüm meteoritlerden ayıran bir özelliğı, düşük sıcaklıklarda su ile kimyasal reaksiyonu gösteren bol miktarda sulu fazın, özellikle filosilikatların varlığıdır (Clayton ve Mayeda, 1999).

Karbonlu kondritlerin sayıları az olmasına karşın, meteorit ve gezegen modellemesi çalışmalarında önemli bir yere

¹ Doç. Dr., Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ORCID: 0000-0001-6479-4223.

² Prof. Dr., Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, ORCID: 0000-0001-5736-7530.

sahiptir. Güneş sistemindeki en ilkel malzemeler arasındadırlar, ancak hepsi bir dereceye kadar fiziksel değişime uğramıştır (Kallemeyn ve Wasson, 1981). Karbonlu kondritler olarak gruplandırılan meteoritler arasında, (uçucu maddeler hariç) Güneş'inkine çok benzeyen en ilkel elementel bileşimlere sahip CI'ler (Ivuna benzeri: "CI") gibi meteoritler bulunur ve bunlar belki de güneş sisteminde oluşan en erken malzemelerin yapısı ve bileşimine dair en iyi bakış açısını sunmaktadır (Macke vd., 2011).

Karbonlu kondritler esasen kozmik tortullardır ve mineralojik olarak benzer bileşenlerin değişen oranlarda bir araya gelmesiyle oluşurlar. Bu bileşenler inklüzyon matrisi, kondrüller, inklüzyonlar, izole olivin ve piroksen taneleri ve opak minerallerdir. Karbonlu kondritler için bağlayıcı madde görevi gören matris, ağırlıklı olarak ince taneli (0,1-2,0 µm) ferromagnezyen likit faz karışımlarından oluşur ve daha az miktarda organik polimer, manyetit ve Fe ve/veya Ni içeren sülfürler ve oksisülfürler içerir (McSween, 1979).

Fourier dönüşüm infrared (FTIR) spektroskopisi, çeşitli malzemelerin moleküler yapılarını analiz etmek için kullanışlı bir tekniktir. Özellikle bu yöntem, organik fonksiyonel grupların (C-H, C=O, C=C bağları vb.) IR spektrumlarında görünen parmak izi absorpsiyonundan tanımlanabilmesi nedeniyle organik moleküllerin yapısını belirlemek için temel bir analitik tekniktir. O-H bağının büyük dipol momentini nedeniyle sulu bileşenler de hassas bir şekilde tespit edilebilir. Hidrojen atomlarının konumuna ilişkin doğrudan bilgi, X-ışını kırınım (XRD) analizi veya transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile elde edilemez. Bu nedenle, IR spektroskopisi, minerallerdeki sulu bileşimin türleşmesi için güçlü bir araçtır. Ayrıca, FTIR spektroskopisi, O-Si-O bağının titreşimlerinden kaynaklanan güçlü absorpsiyon bantları göstererek silikat minerallerini hassas bir şekilde tespit edebilir. Bu yöntem Jeoloji ve Mineraloji alanlarında da yaygın

olarak kullanılmaktadır. Örneğin, IR spektroskopik analizi, minerallerde sulu mikrofazları analiz etmek için uygulanabilmektedir (Osawa vd., 2005).

Bu kitap bölümünün amacı, karbonlu kondritlerin mineralojik ve kimyasal bileşimini infrared spektroskopi verileri ışığında bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmek ve özellikle FTIR yönteminin bu erken Güneş Sistemi kökenli meteoritlerin kökeni, alterasyon süreçleri ve yapıtaşı minerallerinin tanımlanmasındaki ayırt edici rolünü ortaya koymaktır. Bu kapsamda, karbonlu kondritlerin sınıflandırılması ve petrografik özelliklerine ilişkin bir genel çerçeve sunulduktan sonra, FTIR spektrumlarında yaygın olarak gözlenen olivin kaynaklı karakteristik titreşim bantlarının yapısal ve mineralojik anlamları ayrıntılı biçimde aktarılacaktır. Bölümün ilerleyen kısımlarında ise, literatürde rapor edilmiş FTIR tabanlı çalışmalar derlenmiş, farklı karbonlu kondrit grupları arasındaki spektral benzerlikler ve ayrışmalar karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiş, böylece FTIR tekniğinin meteoritik malzemelerin köken, alterasyon derecesi ve mineral faz dağılımının yorumlanmasındaki katkısı eleştirel bir çerçevede ortaya konmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Karbonlu Kondritler

Karbonlu kondritlerin, Güneş Sistemi'nin erken dönemlerinde oluşan ilkel asteroitlerin örnekleri oldukları bilinmekte ve bu nedenle Güneş Sistemi'nin erken tarihine dair bilgiler sağlamaktadırlar. Çeşitli dünya dışı kimyaları ve bol miktarda hidratlı mineralleri nedeniyle, Güneş Sistemi'nin erken dönemlerinde karasal gezegen oluşum bölgesine su ve organik madde taşınmasını anlamak için çok önemlidirler. Diğer kondritler gibi, karbonlu kondritler de çeşitli derecelerde sulu değişim, termal metamorfizm, breşleşme veya bunların bir

kombinasyonu gibi çok çeşitli süreçlerden geçmişlerdir (Kerraouch vd., 2022).

Karbonlu kondrit grubunun bir elemanın isminin ardından, petrolojik geçmişlerine (yani, ana gövdede sulu ve/veya termal alterasyonla meteoritin mineralojik veya dokusal modifikasyon derecesine) göre bir numara verilir. Burada tip 1 kondritler düşük sıcaklıkta sulu alterasyonla en çok değişime uğrayanları, tip 3 ise en az sulu alterasyona uğrayanları temsil etmektedir. Petrografik tipler 4 ile 6, artan termal alterasyona sahip karbonlu kondritleri ifade etmektedir. Karbonlu kondritler, genellikle %2 ile %5 ağırlık oranında karbon içeren, çoğunluğu organik maddeden gelen çok ilkel bir meteorit sınıfını temsil etmektedir. Organik karbonun %70'inden fazlası, yapısal olarak karmaşık olan çözünmeyen kerojen benzeri bir makromolekül biçimindedir, geri kalan çözücüyle ekstre edilebilen organik karbon ise amino asitleri içeren karmaşık bir organik karışımdan oluşmaktadır (Glavin vd., 2011).

Karbonlu kondritler, güneş sistemimizin en bozulmamış kaya örneklerini temsil etmektedir. Bunlar, CI, CM, CR, CO, CV, CK, CH ve CB kondritleri olmak üzere bileşimsel gruplara ayrılır. Ayırt edici özellikler arasında, kondrüller ve Ca-Al açısından zengin refrakter inklüzyonlar (CAI'ler), opak fazlar ve ince taneli matris gibi yüksek sıcaklık bileşenlerinin belirgin bolluğu ve toplam kondritin değişim derecesi yer alır (Braukmüller vd., 2018).

CI karbonlu kondritler, hidratlı ferromagnezyen silikatlardan oluşan ince taneli bir matristen oluşur ve kondrül içermez. CM kondritler, ince taneli hidratlı ferromagnezyen silikatlardan oluşan bir matristen ve bazı küçük (<0,5 mm) kondrüllerden oluşur. CO kondritler, küçük (<0,5 mm), sıkıca paketlenmiş kondrüllerden ve az miktarda ferromagnezyen silikatlardan (çoğunlukla olivin) oluşan ara matristen oluşur. CV

kondritler, daha büyük (ancak değişken) miktarlarda ince taneli ferromagnezyen matris malzemesi ve daha büyük (0,5-2 mm) kondrüller içerir. Ayrıca, genellikle boyutları >1 mm olan bol miktarda refrakter (Ca-Al açısından zengin) inklüzyonlar içerirler (Kallemeyn ve Wasson, 1981).

Demirce zengin olivin, karbonlu kondritlerde matris malzemesinin büyük kısmını oluşturmaktadır. Olivince zengin matrislerin bileşimleri, yaklaşık Fo₄₈₋₅₂ olivin bileşimlerini (Fo:Forsterit) göstermektedir. Bu mineral, farklı matris malzemeleri arasında birincil yoğunlaşma için en olası adaydır. Olivin muhtemelen, değişim sırasında karmaşık oksisülfidler ve manyetize edilmiş mineraller üreten küçük metal ve sülfür mineralleriyle birlikte yoğunlaşmıştır. Milimetre boyutunda yuvarlağımsı ve elips şeklindeki nesneler olan kondrüller, genellikle silikat eriyiğinin soğutulmuş damlacıkları olarak kabul edilir ve birçok karbonlu kondritin önemli bir bileşenidir. Dört geniş kompozisyonel kondrül grubu tanımlanmıştır. Bunlar, tip I, granüler Mg açısından zengin olivin (Fo₉₀₋₁₀₀) ± piroksen ± spinel + renksiz camsı mezostaz; tip II, porfiritik veya ubuklu Fe açısından zengin olivin (Fo₅₀₋₈₉) ± Cr açısından zengin hersinit kahverengi camsı mezostaz; tip III, eksantroradyal piroksen (En₉₀₋₁₀₀) + cam; ve tip IV, anortit, spinel, diopsit, melilit ± cam. Daha düzensiz şekilli parçalar, bazı karbonlu kondrit türlerinde yaygın olup, kondrüllerin kırık kalıntıları olabilmektedir. Bunların bazıları, kondrül mezostaz camının değişimi sonucu oluşabilecek, filosilikat malzeme ile gevşekçe bağlanmış kristal agregatlardır. Düzensiz şekilli inklüzyonlar, bazı karbonlu kondritlerde önemli bir bileşen olarak bulunur. Amoeboid olivin inklüzyonları, mikron boyutlu olivin tanelerinin agregatlarından oluşur ve değişken bileşimlere sahiptir. Bunlara ek olarak piroksen, nefelin, sodalit ve perovskit bulunur. Daha yaygın olarak bilinenler ise Ca, Al açısından zengin inklüzyonlardır (CAI). Bunlar hem ince taneli hem de iri taneli çeşitlerde bulunur.

İri taneli CAI genellikle melilit, spinel, perovskit, piroksen (fassaite veya diopsit) ve anortitten oluşur. Bu inklüzyonlar daha az sıklıkla nefelin, sodalit, hibonit, grosüler, olivin, kordiyerit, vollastonit, rhönit, andradit, molibdenit ve Pt metal alaşımları içerir. İnce taneli CAI esas olarak feldispatoid minerallerden, grüsüler, spinelden ve piroksenden veya diopsit ile çevrili spinel ve hibonitten oluşur (McSween, 1979).

Bu türden ilk meteorit, 15 Mart 1806'da Fransa'nın Alais yakınlarına düşmüştür. Bu olay, gökyüzünden taş düşmesi gerçeğinin bilim insanları tarafından kabul edilmesinden kısa bir süre sonra gerçekleşmiştir. Kimyasal analiz için Berzelius'a gönderildiğinde, bileşiminin o zamana kadar bilinen tüm diğer meteoritlerden oldukça farklı olması nedeniyle bunun bir meteorit olduğundan şüphe duyulmuştur. İkincisi 1824'te İtalya'nın Renazzo kentine, üçüncüsü ise 1838'de Güney Afrika'nın Cold Bokkeveld kentine düşmüştür. Bu meteorit türü çoğu diğer tüm meteoritlerden kendine özgü özellikleriyle kolayca ayırt edilebilmektedir. Bunlar; mat siyah renk, kırılganlık, genellikle düşük yoğunluk, serbest nikel-demir eksikliği veya neredeyse tamamen yokluğu olup bunlar sadece niteliksel özelliklerini ifade etmektedir (Mason, 1963).

En çok incelenen üç karbonlu kondrit şunlardır: 1969'da Avustralya'ya düşen Murchison (>100 kg), 1969'da Meksika'ya düşen Allende (>2000 kg) ve 1950'de ABD'ye düşen Murray (>12,6 kg). Çok ilginç bir karbonlu kondrit ise 18 Ocak 2000'de Kanada'da Tagish Gölü'nün donmuş yüzeyine düşen Tagish Gölü meteoritidir. Bu dört meteorit, bileşimleri bakımından o kadar farklıdır ki hepsinin aynı ana gövdeden kaynaklanması çok düşük bir olasılıktır. Bu nedenle yıllar boyunca olası ana gövdeler için birçok farklı öneri ortaya atılmıştır (Anderson ve Haack, 2005).

Karbonlu kondritler bir grup olarak, diğerkondritlerden Mg'ye göre refrakter litofil bolluklarıyla ayırt edilirler. Karbonlu kondritlerin refrakter litofil/Mg bolluk oranları (CI'ye normalize edilmiş) ≥ 1 iken, sıradan (OC) ve enstatit kondritlerin refrakter litofil/Mg oranları < 1 'dir (Macke vd., 2011).

2.2. Olivinin IR Davranışı

Karbonlu kondritlerde analiz edilen kondr l n temel bileşeni olarak belirlenen olivin, kondr l n mineralojik ve yapısal yorumlanmasında merkezi bir rol oynamaktadır. Bu nedenle bu ilerleyen değerlendirmelere referans teşkil etmesi amacıyla öncelikle olivinin kızılötesi (IR) davranışı kısaca ele alınmaktadır.

Olivinler Me_2SiO_4 formülüyle tanımlanabilir ($\text{Me} = \text{Mg}^{2+}$, Fe^{2+} , Mn^{2+} ve Ca^{2+}). Me, izole silikat u  üyeleriyle altı katlı koordinasyona sahiptir. Mg açısından zengin u   ye forsterit, Fe açısından zengin u   ye fayalit olarak adlandırılmaktadır. Bu ana u  üyelerin katyonları Ca ile değiştirilmektedir (CaMgSiO_4 monticellit, CaFeSiO_4 kirschsteinit). Mangan u   ye tefroit olarak adlandırılmaktadır. Metal iyonları kristal yapıda 2 pozisyonda (M1, M2) bulunur ve simetrilerini belirlemektedir. Genel olarak Fe^{2+} iyonları M1 bölgesini tercih etmektedir. Mg-Fe olivinler, meteoritlerden, Mars'ın gezegen yüzeylerinden ve yıldızlararası tozlardan, ayrıca yer kabuğu ve manto kayalarından tespit edilmiştir.

Olivinlerin titreşim modları 3 ana banttan meydana gelmektedir: 1) $850\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ Si-O asimetrik gerilme titreşimleri (SiO_4 'te ν_3 modu), 2) 825 cm^{-1} civarındaki özellik ν_1 modu (simetrik gerilme) ve 3) $460\text{--}620\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde üç veya dört  zellik ν_4 . Genel olarak, IR bantları olivinlerdeki katyon oranına göre kaymaktadır. IR titreşimleri dipol moment (μ), iyon yarıçapı ve merkezi katyonların atom sayısı tarafından belirlenmektedir. IR aktif bantları asimetrik titreşim sergileyen

bantlardır. Eğer olivinin demir içeriği artarsa, IR bantlarının dalga sayısı azalır; bu da SiO₄ tetrahedronuna bağlanan ikame edici kationun yarıçapı ve kütlesinin artmasından kaynaklanmaktadır, çünkü Mg, Fe'den daha küçüktür. Sonuç olarak, kation ikamesi IR bant kaymalarına ve göreceli şiddetlerinde değişikliklere neden olur. Fe²⁺ kationunun boyutu Mn'den daha büyüktür, bu da silikat kafesindeki oktahederi bozmaktadır. 955-960 cm⁻¹ civarındaki pik (v₃ modu), olivinin demir içeriği arttıkça daha güçlü hale gelmektedir. Fe bakımından zengin olivinlerde, Fe kationları Mn ve Cr ile de ikame edilebilmektedir. Mn içeriği genellikle olivinlerin Fe içeriğiyle artmaktadır. Mn, olivin kafesinin M1 pozisyonunu işgal ederek kristal yapının daha iyi düzenlenmesini sağlamaktadır. Artan Mn içeriği, v₄ bant pozisyonlarının azalmasına neden olur (460–620 cm⁻¹), oysa titreşim modları v₁ ve v₃, demir içeriğinin artmasından etkilenmektedir. v₃'ün ana bandı (859–865 cm⁻¹) 4 kompozisyon grubunu belirlemektedir: Fo₀₋₂₅, Fo₃₅₋₃₉, Fo₅₄₋₆₈ ve Fo₉₀₋₉₂. Buna karşılık v₁ modu (839–837 cm⁻¹) 2 kompozisyon grubuna izin vermektedir: Fo₀₋₅₄ ve Fo₆₀₋₉₂ (Kereszturi vd., 2015).

3. SONUÇ

Bu sonuç bölümünde, karbonlu kondritlere yönelik FTIR temelli literatür çalışmaları sistematik bir ereve içinde ele alınmış ve farklı kondrit grupları üzerinde yürütölmüş araştırmalar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, olivin ve ilişkili silikat fazlarına ait karakteristik titreşim bantlarının literatürde nasıl yorumlandığı, bant konumları ve bağlı şiddetlerindeki değişimlerin alterasyon süreçleri ve termal geçmiş ile nasıl ilişkilendirildiği tartışılmıştır. Ayrıca, FTIR verilerinin petrografik ve mineralojik bulgularla birlikte kullanımının sağladığı olanaklar ve yöntemin sınırlılıkları literatür örnekleri üzerinden ortaya konulmuştur.

Matrajt ve ark. (2004), Tagish Gölü karbonlu kondritinin 6 parçasını FTIR spektroskopisi yöntemiyle incelemiştir. Hidratlı silikat, 1017 cm^{-1} (Si-O gerilimi), 3668 cm^{-1} (yapısal hidroksil özelliği) ve 1615 cm^{-1} (smektitteki su) absorpsiyon özellikleriyle temsil edilmiştir. Karbonat, 1450 cm^{-1} 'de merkezlenmiş geniş bir bantla temsil edilir ve 1424 , 1466 ve 1503 cm^{-1} 'de küçük pik özellikleri göstermektedir. $679\text{-}880\text{ cm}^{-1}$ bölgesinin genişletilmiş bir spektrumu göz önüne alındığında, zayıf pikler, karbonatlardan kaynaklanan absorpsiyon özellikleri veya alifatiklerin absorpsiyon özellikleri olarak yorumlanmış olup düzlem dışı C-H bükülme modlarına karşılık gelen bantlar aynı zamanda bu bölgede bulunduğundan, aromatik bileşikler olarak da yorumlanmıştır. $2700\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde üç ana pik bulunmakta olup bunlar alifatik hidrokarbon gerilme özelliklerine karşılık gelir. Öte yandan, 2865 cm^{-1} 'de dördüncü, daha küçük bir pik ayırt edilebilmektedir. 2922 ve 2851 cm^{-1} 'deki pikler alifatik bir hidrokarbondaki CH_2 'nin asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerine karşılık gelir. 2958 ve 2865 cm^{-1} 'deki pikler ise alifatik bir hidrokarbondaki CH_3 'ün asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerini oluşturur. Alifatik hidrokarbonların C-H bükülme titreşimleri ~ 1466 ve $\sim 1379\text{ cm}^{-1}$ 'deki pikler ve karbonat pikinin omuzları olarak $1266\text{-}1353\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki küçük pikler ile temsil edilir. $1500\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde (1624 cm^{-1} 'de) C=C gerilme özelliğine karşılık gelen zayıf bir aromatik pik bulunmaktadır ve $650\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde de aromatlara (düzlem dışı C-H bükülme deformasyonları) karşılık gelen birkaç zayıf pik mevcuttur ki bu durum aromatiklerin mevcut olabileceğini düşündürmüştür. Yaklaşık 1700 cm^{-1} 'de C=O gerilme titreşimine karşılık gelen zayıf pik, 1624 cm^{-1} civarında merkezlenmiş geniş bandın omuzu olarak yer almaktadır (Matrajt vd., 2004).

Kebukawa ve ark. (2009), çalışmalarında Tagish Gölü, Murchison ve Moss meteoritlerinin infrared absorpsiyon

spektrumlarını incelemiştir. Tagish Gölü meteoriti göz önüne alındığında, 3400 cm^{-1} 'de geniş bir O-H gerilme bandının ve 1630 cm^{-1} 'de bir H-O-H bükölme bandının görölmesi, minerallere absorbe olan su moleküllerinden ve filosilikatlardaki ara katman moleköler sudan kaynaklanmaktadır. 3650 ve 3400 cm^{-1} bantları serpantin ve saponit minerallerine karşılık gelmektedir. 1450 cm^{-1} 'deki bandın ise karbonatlardan kaynaklanabileceği ortaya atılmıştır. 2963 ve 2875 cm^{-1} bantları sırasıyla alifatik CH_3 'ün asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerinden, 2940 cm^{-1} bandı ise alifatik CH_2 titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. 1262 cm^{-1} bandı Si- CH_3 bükölme titreşimine karşılık gelmektedir. Murchison meteoriti göz önüne alındığında, 3400 cm^{-1} 'de gözlenen bant O-H gerilme bandına ve 1640 cm^{-1} 'de gözlenen bant ise H-O-H bükölme bandına karşılık gelmektedir. 2963 ve 2871 cm^{-1} bantları alifatik CH_3 'ten, 2940 cm^{-1} bandı alifatik CH_2 'den ve 1262 cm^{-1} 'deki bant ise Si- CH_3 'ten kaynaklanmaktadır. Moss meteoriti göz önüne alındığında ise, $4000\text{-}2500\text{ cm}^{-1}$ ve $1800\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ spektral bölgelerinde belirgin bir bant görölmemiş olup, bu bölgelerde görölün gürölütü atmosferik su buharından kaynaklanmaktadır (Kebukawa vd., 2009).

King ve ark. (2015), CI ve CI benzeri Ivuna, Orgueil, Y-82162 ve Y-980115 meteoritlerini orta infrared bölgesinde inceledikleri çalışmalarında, Ivuna ve Orgueil örneklerinde $9,9\text{ }\mu\text{m}$ 'de bir pik ve $23\text{ }\mu\text{m}$ 'de ise ikiye ayrılmış bir pik (Si-O gerilme ve bükölme modlarından kaynaklanan) gözlenmekte olup, bu pikler bu örneklerde bol miktarda bulunan filosilikatlara karşılık gelmektedir. $10\text{ }\mu\text{m}$ 'de bulunan pik ise saponit standartı ile örtüşmektedir. Öte yandan, Ivuna ve Orgueil örneklerinde karasal sülfatlardan kaynaklanan $8,5\text{ }\mu\text{m}$ 'de gözlenen bir pik meydana gelmiştir. Y-82162 ve Y-980115 örnekleri göz önüne alındığında ise, $9,9\text{ }\mu\text{m}$ 'de bu kez biraz daha geniş bir pik gözlenmekte olup, $23\text{ }\mu\text{m}$ 'de görölün ayrırmış iki pikin ise çok az belirgin olduğu

saptanmıştır. Ayrıca, 11,2, 16,5 ve 19,5 μm 'de görülen piklerin olivinin varlığını desteklediği ortaya konulmuştur. Oda sıcaklığında ve 300 $^{\circ}\text{C}$ 'de analiz edilen Ivuna ve Orgueil  rnekleri 3 μm 'de farklılık göstermektedir. Oda sıcaklığında 2,7 ile 3,5 μm arasındaki spektral bölgede, 2,71 μm 'de keskin bir pik görülmekle birlikte, bu bölge karasal absorbe su, smektitlerdeki ara katman H_2O ve CI kondritlerindeki Fe-(oksi)hidroksitlerle ilişkili sulu bileşenlerinin bir kombinasyonuna karşılık gelmektedir. Örnekler 300 $^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtıldığında karasal kontaminasyon ve dünya dışı ara katman H_2O 'da ortadan kalkmakta olup, sadece 2,71 μm 'deki pik görülmektedir. Bu pik, OH gerilme modundan kaynaklanmakta olup, filosilikatlar ve Fe-(oksi)hidroksitler içinde yapısal olarak bağlı hidroksil iyonlarına karşılık gelmektedir. Y-82162 ve Y-980115 örneklerinde ise 2,71 μm 'deki pik neredeyse hiç görülmemektedir. Bu pikin şiddetinin azalması termal değişime uğramış karbonlu kondritlerin ortak özelliğini göstermektedir (King vd., 2015).

Gilmour ve ark. (2019), Tagish Gölü meteoritinin 5 parçasını (TL5b, TL11h, TL11i, TL4, ve TL10a) infrared spektroskopi tekniği ile incelemiştir. 11,2, 16,5 ve 19,5 μm 'de görülen bantlar olivine (forsterit) karşılık gelmektedir. 10 μm 'de filosilikat Si-O gerilme modu ortaya çıkmaktadır. TL11h ve TL11i örneklerinde 22 μm 'de görülen bandın saponite karşılık geldiği düşünülmüştür. 7 μm 'de karbonatın varlığının tespit edilmesi ile birlikte, karbonatın 7, 9,4, 11,4 ve 14,7 μm 'de oluşan dört C-O titreşimi bulunmaktadır. Karbonat mineral referansları göz önüne alındığında, 7 μm 'deki karbonatın konumu için TL11i kalsiti, diğer dört örnek ise dolomiti göstermektedir. 3 μm 'deki hidrasyon bandı sulu değişimin bir özelliği olup, bu özellik karbonlu kondritlerdeki filosilikatların varlığıyla ilişkilidir (Gilmour vd., 2019).

Dixit ve ark. (2022), Mukundpura CM kondritini ATR-FTIR spektroskopisi ile incelemiştir. Yaklaşık 3434 cm^{-1} (2,85

μm)’deki bant, filosilikatların varlığını gösteren Mg-OH gerilme bandına karşılık gelmektedir. 10 μm civarında gözlenen bant, iki banda ayrılmış olup bunlar sırasıyla 9,43 μm (1054 cm^{-1}) ve 10,4 μm (959 cm^{-1})’de gözlenmektedir ve Si-O bağının gerilmesine karşılık gelir ve filosilikat fazlarını destekler. Daha yüksek dalga boylu mod, Mukundpura meteoritinde bulunan cronstedtite karşılık gelir iken, daha düşük dalga boylu mod ise, silikon levhalaradaki magnezyumca zengin serpantin veya Si-O gerilmesinden kaynaklanıyor olabilmektedir. 6,12 μm ’de görülen pik su moleküllerinin varlığını göstermekte olup, 7,19 μm ’deki pik bu meteorit örneğinde karbonatın varlığını ortaya koymaktadır. 2500-3000 cm^{-1} arasındaki spektral bölge de organik CH-CH ve CH₂-CH₂ gerilmelerine karşılık gelmektedir. Mukundpura rneğinin FTIR spektrumu incelendiğinde 11,2 μm ’de gözlenen olivine karşılık gelen pik görülmediği saptanmıştır. 469 cm^{-1} ’deki pik hidroksil grubunun bklme titreşimine, 619 cm^{-1} ’deki pik ise H₂O absorpsiyon bandına, Al-O ve düzlem dışı Si-O’ya karşılık gelmektedir (Dixit vd., 2022).

Sonuç olarak, karbonlu kondritlerin mineralojik ve organik bileşenlerinin FTIR spektroskopisi ile incelenmesi, bu meteoritlerin hem erken dönem Güneş Sistemi koşullarını hem de prebiyotik kimyasal evrim süreçlerini anlamada kritik bir analitik yaklaşım sunmaktadır. Literatürde rapor edilen çalışmalar, özellikle hidratlı silikatlar, karbonat fazları, organik fonksiyonel gruplar ve silikat bantlarının sistematik değerlendirilmesinin, meteoritlerin alterasyon geçmişi ve kozmokimyasal evrimi hakkında önemli bilgiler sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, farklı karbonlu kondrit grupları arasında karşılaştırmalı ve yüksek znrlkl spektral veri setlerinin arttırılması, bant atamalarının daha tutarlı şekilde standartlaştırılması ve FTIR verilerinin Raman, XRD ve elektron mikroskopi gibi tamamlayıcı tekniklerle bütüncül olarak değerlendirilmesi, gelecekteki çalışmalar için önemli bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu bağlamda, FTIR spektroskopisi yalnızca bir karakterizasyon aracı değil, aynı zamanda karbonlu kondritlerin oluşum, alterasyon ve prebiyotik potansiyellerinin anlaşılmasında çok boyutlu bir yorumlama platformu olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Anderson, A.C., Haack, H. (2005) Carbonaceous chondrites: tracers of the prebiotic chemical evolution of the Solar System, *International Journal of Astrobiology*, 4(1), 13–17.
- Braukmüller, N., Wombacher, F., Hezel, D.C., Escoube, R., Münker, C. (2018) The chemical composition of carbonaceous chondrites: Implications for volatile element depletion, complementarity and alteration, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 239, 17–48.
- Clayton, R.N., Mayeda, T.K. (1999) Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13/14), 2089–2104.
- Dixit, A., Tripathi, R.P., Kumar, S., Ansari, M.A. Sreenivas, K. (2022) Characterizing the degree of aqueous alteration in a fresh sample of Mukundpura CM chondrite fall using ATR-FTIR and TGA, *Meteoritics & Planetary Science*, 57(9), 1628–1640.
- Gilmour, C.M., Herd, C.D.K., Beck, P. (2019) Water abundance in the Tagish Lake meteorite from TGA and IR spectroscopy: Evaluation of aqueous alteration, *Meteoritics & Planetary Science*, 54(9), 1951–1972.
- Glavin, D.P., Callahan, M.P., Dworkin, J.P., Elsila, J.E. (2011) The effects of parent body processes on amino acids in carbonaceous chondrites, *Meteoritics & Planetary Science*, 45(12), 1948–1972.
- Kallemeyn, G.W., Wasson, J.T. (1981) The compositional classification of chondrites-I. The carbonaceous chondrite groups*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 1217–1230.

- Kebukawa, Y., Nakashima, S., Otsuka, T., Nakamura-Messenger, K., Zolensky, M.E. (2009) Rapid contamination during storage of carbonaceous chondrites prepared for micro FTIR measurements, *Meteoritics & Planetary Science*, 44(4), 545–557.
- Kereszturi, A., Gyollai, I., Szabó, M. (2015) Case study of chondrule alteration with IR spectroscopy in NWA 2086 CV3 meteorite, *Planetary and Space Science*, 106, 122–131.
- Kerraouch, I., Kebukawa, Y., Bischoff, A., Zolensky, M.E., Wölfer, E., Hellmann, J.L., Ito, M., King, A., Trieloff, M., Barrat, J.A., Schmitt-Kopplin, P., Pack, A., Patzek, M., Hanna, R.D., Fockenberg, T., Marrocchi, Y., Fries, M., Mathurin, J., Dartois, E., Duprat, J., Engrand, C., Deniset, A., Dazzi, A., Kiryu, K., Igisu, M., Shibuya, T., Wakabayashi, D., Yamashita, S., Takeichi, Y., Takahashi, Y., Ohigashi, T., Kodama, Y., Kondo, M. (2022) Heterogeneous nature of the carbonaceous chondrite breccia Aguas Zarcas – Cosmochemical characterization and origin of new carbonaceous chondrite lithologies, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 334, 155–186.
- King, A.J., Solomon, J.R., Schofield, P.F., Russell, S.S. (2015) Characterising the CI and CI-like carbonaceous chondrites using thermogravimetric analysis and infrared spectroscopy, *Earth, Planets and Space*, 67, 198.
- Macke, R.J., Consolmagno, G.J., Britt, D.T. (2011) Density, porosity, and magnetic susceptibility of carbonaceous chondrites, *Meteoritics & Planetary Science*, 46(12), 1842–1862.
- Mason, B. (1963) The carbonaceous chondrites, *Space Science Reviews*, 1, 621–646.

- Matrajt, G., Borg, J., Raynal, P.I., Djouadi, Z., d'Hendecourt, L., Flynn, G., Deboffle, D. (2004) FTIR and Raman analyses of the Tagish Lake meteorite: Relationship with the aliphatic hydrocarbons observed in the Diffuse Interstellar Medium, *Astronomy&Astrophysics*, 416, 983–990.
- McSween Jr., H.Y. (1979) Are carbonaceous chondrites primitive or processed?, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 17(5), 1059–1078.
- Osawa, T., Kagi, H., Nakamura, T., Noguchi, T. (2005) Infrared spectroscopic taxonomy for carbonaceous chondrites from speciation of hydrous components, *Meteoritics & Planetary Science*, 40(1), 71–86.

DETERMINATION OF RADIOSENSITIZATION EFFECTS OF NANOPARTICLES BY MONTE CARLO SIMULATIONS

Reyyan KAVAK YÜRÜK¹

1. INTRODUCTION

Ionizing radiotherapy is one of the most frequently used modalities in cancer treatment; however, the therapeutic window between tumor and normal tissue remains limited. One of the strategies developed to increase the local tumor dose while sparing healthy tissues is the concomitant use of high-Z nanoparticles with radiation. Nanoparticles fabricated from elements such as gold (Au), platinum (Pt), bismuth (Bi), gadolinium (Gd), silver (Ag), and hafnium (Hf) enhance the photoelectric effect particularly in low- and medium-energy photon fields, leading to local dose escalation and consequently radiosensitization (Retif et al., 2015; Her S. et al., 2017; He et al., 2025).

In this field, both in vitro/in vivo experimental studies and numerous Monte Carlo-based numerical investigations have been conducted. Monte Carlo methods have become indispensable for the mechanistic understanding of nanoparticle-radiation interactions, the determination of dose distributions, and the identification of optimization parameters (size, concentration, coating, energy, beam type), owing to their ability to model complex geometries and matter-radiation interactions with high

¹ Assistant Professor, Dicle University, Atatürk Vocational School of Health Services, Medical Imaging Techniques, ORCID: 0000-0002-6637-6954.

accuracy (Jones & Yakovlev, 2016; Paro et al., 2016; Chithrani & Stewart, 2020).

The use of high atomic number (high-Z) nanoparticles (NPs) in combination with ionizing radiation has emerged as a powerful strategy for selective tumor dose escalation, particularly in photon and particle radiotherapy. Nanoparticles based on gold, platinum, bismuth, gadolinium, silver, and hafnium induce radiosensitization at both physical and biological levels via photoelectric interactions, Auger and secondary electron production, modulation of linear energy transfer (LET), water radiolysis, and DNA damage dynamics. Monte Carlo simulations have become the primary tool for quantitatively elucidating these multiscale processes. In this chapter, Monte Carlo approaches used to determine the radiosensitization effects of nanoparticles are presented, with a focus on physical mechanisms, simulation codes (Geant4/Geant4-DNA, MCNP/MCNPX, EGSnrc, PENELOPE, TOPAS-nBio, FLUKA), dose enhancement factor (DEF), DNA damage yields, and clinical translation outcomes. The influence of parameters such as energy, size, concentration, subcellular localization, and beam type is discussed in the context of reported literature data.

2. FUNDAMENTALS OF NANOPARTICLE-BASED RADIOSENSITIZATION

2.1. Physical mechanisms

The main physical mechanisms underlying radiosensitization induced by high-Z nanoparticles in a radiation field can be summarized as follows (McMahon et al., 2011; Jain et al., 2012):

Enhancement of the photoelectric effect: The photoelectric cross section scales approximately as Z^n/E^3 ($n \approx 4-5$). Therefore, for elements such as gold ($Z = 79$), platinum ($Z = 78$), and bismuth ($Z = 83$), many more interactions occur at photon energies in the keV range compared with surrounding soft tissues. These interactions result in the production of photoelectrons, Auger electrons, and characteristic X-rays.

Secondary electron production and nano-dosimetry: High-Z nanoparticles generate high-dose “hot spots” on the order of a few nanometers around them. In these regions, low-energy (eV–keV) electrons and Auger electrons form dense ionization clusters in DNA and other critical biomolecules (McMahon & Prise, 2019).

LET and micro-dosimetric modifications: The increased density of secondary electrons and delta rays around nanoparticles elevates the local LET, thereby amplifying the biological effect; this is particularly pronounced when combined with low-energy protons and heavy ions (Porcel et al., 2014; D’Souza et al., 2018).

Energy spectrum and K-edge effects: The K-edge energies of different elements (approximately 80.7 keV for Au, 50.2 keV for Gd, 90.5 keV for Bi) define the optimal photon energy windows, within which the photoelectric effect and thus dose enhancement reach their maximum (Alqathami et al., 2013; Lechtman et al., 2013).

2.2. Chemical and biological mechanisms

Chemical and biological processes following the initial physical interactions also contribute to radiosensitization:

Water radiolysis and reactive oxygen species (ROS): Ionization of water molecules in an aqueous environment by radiation generates species such as $\cdot\text{OH}$, e^-_{aq} , and $\text{H}\cdot$, whose

G-values have been modeled in detail with Geant4-DNA and similar codes (Shin et al., 2021; Karamitros et al., 2014).

DNA damage: Depending on their intracellular localization (in the nucleus, cytoplasm, or near the membrane), nanoparticles increase direct and indirect DNA damage (single-strand breaks, double-strand breaks, complex lesions) (Butterworth et al., 2010; McMahon et al., 2011; Sakata et al., 2018b).

Cell cycle and apoptosis: Nanoparticles may modulate molecular pathways such as the DNA damage response (DDR), p53, ATM/ATR, and caspases, thereby enhancing radiosensitization (Retif et al., 2015; Liu et al., 2017).

3. TYPES OF NANOPARTICLES USED IN RADIOTHERAPY

3.1. Gold nanoparticles (AuNPs)

Gold nanoparticles are the most extensively investigated radiosensitizers owing to their high Z, biocompatibility, facile functionalization, and broad synthesis/coating landscape (Jain et al., 2012; Retif et al., 2015; Her S. et al., 2017). In vitro and in vivo studies have focused on intratumoral equivalent concentrations of 1–20 mg/mL and size ranges between 2 and 100 nm (McMahon et al., 2011; Chithrani & Stewart, 2020).

3.2. Platinum- and bismuth-based nanoparticles

Nanoparticles based on platinum ($Z = 78$) and bismuth ($Z = 83$) can provide pronounced dose enhancement for low- and medium-energy X-rays owing to their high K-edge energies and strong photoelectric cross sections (Paro et al., 2016; Ricketts et al., 2018). Bismuth oxide nanoparticles, in particular, have attracted attention with high-DEF values in intraoperative

radiotherapy and kilovoltage X-ray applications (Cheong et al., 2010; Zhao et al., 2019).

3.3. Gadolinium- and hafnium-based nanoparticles

Gadolinium (Gd)-containing ultrasmall nanoparticles such as AGuIX are used both as magnetic resonance imaging (MRI) contrast agents and as radiosensitizers (Kotb et al., 2016; Lux et al., 2019). Hafnium oxide-based NBTXR3 is a radioenhancer that has progressed to clinical phase II/III, activated by local injection followed by high-energy photon irradiation (Bonvalot et al., 2017; Sargos et al., 2019).

3.4. Silver and other nanoparticles

Silver nanoparticles have been investigated for their radiosensitization potential in addition to their antibacterial properties (Geng et al., 2011; Zhao et al., 2019). Furthermore, iron oxide (Fe_3O_4) nanoparticles have been evaluated in combined radiosensitization strategies that exploit both magnetic targeting and hyperthermia (Retif et al., 2015; Espinosa et al., 2016).

4. QUANTITATIVE METRICS OF RADIOSENSITIZATION

4.1. Dose enhancement factor (DEF)

The physical dose enhancement induced by nanoparticles is commonly expressed in terms of the dose enhancement factor (DEF). DEF is defined as the ratio of the absorbed dose in a nanoparticle-containing medium to that in a reference medium without nanoparticles (Mesbahi, 2010):

$$DEF = \frac{D_{NP}}{D_{ref}} \quad (1)$$

Monte Carlo simulations are used to compute the function DEF(r, E, C, d), i.e., its dependence on radiation energy (E), nanoparticle concentration (C), size (d), and spatial position (r) (McMahon et al., 2011; Paro et al., 2016; Gray et al., 2021).

4.2. Sensitizer enhancement ratio (SER) and biological endpoints

At the biological level, the sensitizer enhancement ratio (SER) is defined from cell survival curves:

$$SER = \frac{D_{0,control}}{D_{0,NP}} \quad (2)$$

Here, D_0 denotes the dose corresponding to a specific survival level (e.g., 10% or 37%) (Butterworth et al., 2010; Jain et al., 2012). Monte Carlo simulations, combined with DEF, DNA damage yields (SSBs, DSBs, complex lesions), LET distributions, and G-values of chemical species, allow for the refinement of radiobiological model parameters (e.g., LQ, MK models) (Karamitros et al., 2014; Schuemann et al., 2019).

5. MONTE CARLO SIMULATION CODES AND APPROACHES

The main Monte Carlo codes used to model nanoparticle–radiation interactions are summarized in Table 1.

Table 1. General characteristics of Monte Carlo codes commonly used in radiosensitization simulations.

Monte code	Carlo	Minimum energy threshold	Physics models	Chemical stage	DNA damage modeling	Ease of use
Geant4-DNA		<10 eV	Track structure	Yes (G-values)	Yes (SSB/DSB)	Moderate
MCNP/ MCNPX		1 keV	Condensed history	No	No	Difficult
EGSnrc		1 keV	Condensed history	No	No	Moderate
PENELOPE		100 eV	Mixed	No	No	Moderate
TOPAS-nBio		<10 eV	Track structure	Yes (G-values)	Yes (SSB/DSB)	Easy
FLUKA		100 eV	Mixed	Limited	No	Difficult

Table 1 summarizes the energy thresholds, physics models, chemical stage capabilities, and DNA damage modeling features of Geant4-DNA, TOPAS-nBio, EGSnrc, MCNP/MCNPX, PENELOPE, and FLUKA (Kawrakow et al., 2011; Sarrut et al., 2017; Schuemann et al., 2019; Akar et al., 2020; Shin et al., 2021).

5.1. Geant4 and Geant4-DNA

Geant4 is a general-purpose Monte Carlo toolkit widely used in high-energy physics and medical physics (Allison et al., 2016). The Geant4-DNA extension enables modeling of nanometer-scale energy deposition, water radiolysis, and DNA damage down to the eV regime via track-structure models (Karamitros et al., 2014; Kyriakou et al., 2018). In nanoparticle simulations, nanoparticle geometry (spherical, clustered, heterogeneous distributions), cell and nucleus geometries, water radiolysis, and diffusion of chemical species can be modeled in detail (McMahon et al., 2011; Shin et al., 2021).

5.2. MCNP/MCNPX and EGSnrc

MCNP/MCNPX and EGSnrc are widely used in macroscopic dosimetry and clinical radiotherapy geometries and energies (Mesbahi, 2010; Gray et al., 2021). In phantoms containing nanoparticles, dose profiles, DEF values, and energy spectra are calculated to provide predictions under conditions close to clinical setups (Mesbahi, 2010; Paro et al., 2016; Gray et al., 2021).

5.3. TOPAS-nBio and other biological extensions

TOPAS-nBio is a platform built on Geant4-DNA that focuses on radiobiological modeling at the cell and tissue scales (Schuemann et al., 2019). It enables calculation of SSB and DSB yields as a function of nanoparticle intracellular localization by integrating detailed geometries of the DNA double helix,

chromatin organization, and the chemical stage (McMahon et al., 2011; Schuermann et al., 2019).

5.4. Advanced Monte Carlo techniques

Track-structure simulations model radiation interactions on an event-by-event basis to compute energy deposition at the nanometer scale. Geant4-DNA is one of the most advanced tools for track-structure simulations and can follow electron transport in liquid water and other biological materials down to 7.4 eV (Moradi et al., 2022; Sakata et al., 2018a).

Sakata et al. (2018) developed gold-specific discrete physics models for Geant4-DNA and demonstrated that these models can describe electron transport down to 10 eV. The new discrete physics models yielded results similar to existing Geant4 Livermore and Penelope models in terms of backscattering coefficients; however, in submicron volumes, only the discrete models were able to reproduce the high backscattering that is still expected to occur around gold nanoparticles at these length scales (Sakata et al., 2018a).

Significant differences (often exceeding a factor of 2) were observed between new and existing Geant4 models in terms of radial dose distributions and secondary particle outputs. Further investigation is required to determine the extent to which these differences arise from intrinsic limitations of condensed-history models or from discrepancies in the underlying scattering cross sections.

6. MONTE CARLO MODELING OF WATER RADIOLYSIS AND ROS PRODUCTION

The presence of nanoparticles affects water radiolysis and the spatiotemporal distribution of reactive oxygen species (ROS). In this context, Geant4-DNA, through Monte Carlo simulations

that include the chemical stage, computes the formation and reactions of species during the initial physical interactions, the pre-chemical stage (10^{-15} – 10^{-12} s), and the chemical stage (10^{-12} – 10^{-6} s) (Karamitros et al., 2014; Shin et al., 2021).

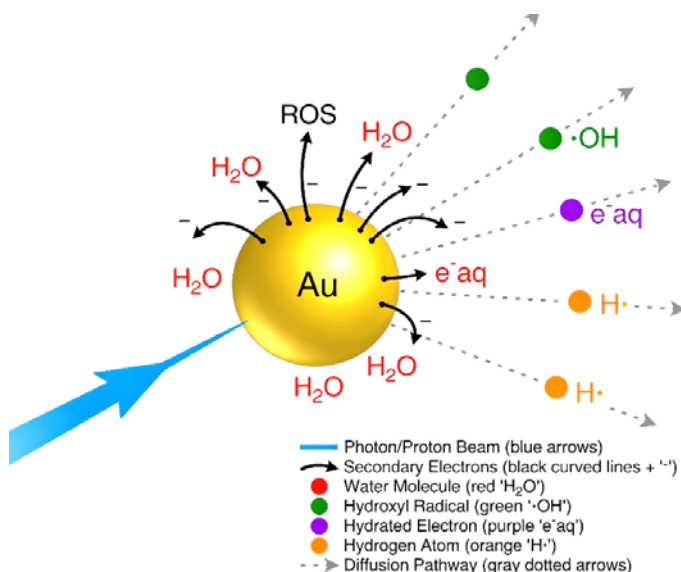


Figure 1. Schematic illustration of water radiolysis and formation of reactive oxygen species (ROS) around a gold nanoparticle under ionizing radiation. The incident photon/proton beam interacts with the nanoparticle and generates secondary electrons; these electrons radiolyze water molecules, leading to the formation of reactive species such as ·OH, e⁻aq, and H·. This mechanism represents the chemical stage of nanoparticle-based radiosensitization (Karamitros et al., 2014; Shin et al., 2021).

Using Geant4-DNA, Shin et al. (2021) showed that the G-value of ·OH decreases from 1 ps to 1 μs, whereas that of H₂O₂ increases over time; this dynamic is important for understanding long-term oxidative stress around nanoparticles.

7. DNA DAMAGE MODELING AND THE EFFECT OF NANOPARTICLES

7.1. Calculation of SSB and DSB yields

In Monte Carlo modeling of DNA damage, the following components are typically considered (Karamitros et al., 2014; Kyriakou et al., 2018; Schuemann et al., 2019):

Geometric model: Geometric representation of the DNA double helix, nucleosomes, and chromatin fibers.

Physical energy deposition: Spatial mapping of energy depositions at the eV scale.

Chemical interactions: Reaction probabilities between radicals such as $\cdot\text{OH}$ and DNA.

In the presence of nanoparticles, increased densities of secondary electrons and ROS near DNA enhance both SSB and DSB yields. Butterworth et al. (2010) observed approximately a two-fold increase in SSB and DSB yields when X-rays were delivered in combination with gold nanoparticles; Porcel et al. (2011) reported a marked increase in the DSB/SSB ratio for carbon ions combined with Pt NPs.

7.2. Complex DNA damage and biological consequences

Monte Carlo-based studies indicate that nanoparticles increase not only the total numbers of SSBs/DSBs but also the frequency of complex damage regions (multiple breaks within the same few-nanometer volume) (McMahon et al., 2011; Sakata et al., 2018b). Such damage is more difficult for cellular repair mechanisms to resolve and is more likely to result in apoptosis or mitotic catastrophe.

8. DOSE ENHANCEMENT FACTORS: SUMMARY OF LITERATURE DATA

Many studies have quantified nanoparticle-mediated radiosensitization by comparing Monte Carlo simulation results with experimental data. Gray et al. (2021) used MCNP6.2 to show that, under an 18 MV photon beam and for 30 and 100 nm gold nanoparticles at mass concentrations of 1–1.3%, DEF lies in the range 1.01–1.02, in good agreement with experimental observations. Retif et al. (2015), using GATE/Geant4 at 6 MV, reported DEF values of approximately 1.015–1.053 for Fe_3O_4 and Au nanoparticles at 1% concentration. Paro et al. (2016) calculated $DEF \approx 2.0$ and 3.7 for 2% mass concentrations of Au and Bi, respectively, at around 90 keV using EGSnrc.

Roeske et al. (2007) reported DEF values greater than 2 for 7 mg/g Au at approximately 50 kVp, whereas Mesbahi (2010) and Gray et al. (2021) showed that DEF remains as low as 1.01–1.02 in the 6–18 MV range. These findings indicate that physical dose enhancement is limited in clinical megavoltage photon fields but can be much more pronounced at low photon energies (e.g., brachytherapy, orthovoltage).

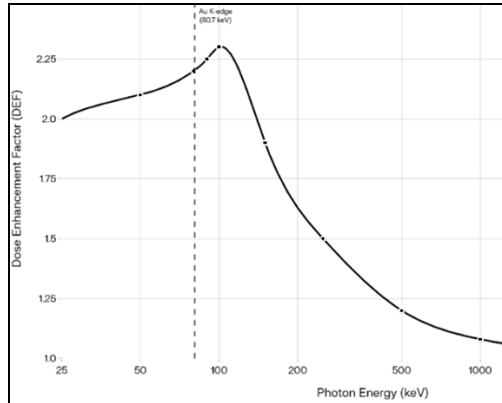


Figure 2. Dependence of the dose enhancement factor (DEF) on photon energy for gold nanoparticles at a concentration of 7 mg/g (Roeske et al., 2007; Mesbahi, 2010; Gray et al., 2021).

9. EFFECTS OF ENERGY, SIZE, AND CONCENTRATION

9.1. Energy dependence

As emphasized in Figure 2, radiosensitization is maximal in the kilovoltage range (particularly around the K-edge) because of the dominance of the photoelectric effect (Roeske et al., 2007; Alqathami et al., 2013). Although physical DEF is limited at megavoltage photon energies, increases in SER can still be observed through biological effects such as DNA damage, ROS generation, and modulation of signaling pathways (McMahon et al., 2011; Jain et al., 2012).

9.2. Nanoparticle size

Dallan et al. (2015) and Chithrani & Stewart (2020) demonstrated that, within the 10–100 nm range, AuNP size significantly affects cellular uptake, endocytosis, and subcellular distribution, with sizes around 50 nm yielding more efficient internalization in most cell types. Monte Carlo studies have shown that size modifies the structure of the secondary electron cloud via changes in both interaction probability and surface-to-volume ratio (McMahon et al., 2011; Gray et al., 2021).

9.3. Concentration effects

Monte Carlo simulations indicate that DEF increases approximately linearly with concentration, but saturation and screening effects may occur at very high concentrations (e.g., >20 mg/g) (Mesbahi, 2010; Paro et al., 2016). Experimental studies show that clinically achievable concentrations are lower due to cellular toxicity and pharmacokinetic constraints (Jain et al., 2012; Kotb et al., 2016).

Furthermore, Monte Carlo studies have revealed that subcellular localization (e.g., clustering near the nuclear

membrane) can substantially alter DEF and DNA damage yields (McMahon et al., 2011; Sakata et al., 2018b).

10. CLINICAL STUDIES

The most prominent examples of clinical translation of nanoparticle-based radiosensitization strategies are hafnium oxide-based NBTXR3 and gadolinium-based AGuIX nanoparticles. NBTXR3 is a radioenhancer composed of crystalline hafnium oxide nanoparticles administered intratumorally. In an international phase II/III trial in soft tissue sarcomas, the addition of NBTXR3 to preoperative radiotherapy significantly increased the pathological complete response rate compared with the control arm (Bonvalot et al., 2017). Phase I/II trials in head and neck squamous cell carcinomas have evaluated the safety and efficacy profile of NBTXR3 in frail elderly patients who are unsuitable for standard cisplatin or cetuximab regimens, reporting no dose-limiting toxicities and early efficacy signals (Sargos et al., 2019).

AGuIX consists of ultrasmall theranostic nanoparticles containing gadolinium and is designed to function both as an MRI contrast agent and as a radiosensitizer. In phase I trials in patients with brain metastases, the recommended phase II dose was determined as 100 mg/kg, with no significant additional toxicity attributable to the Gd-based formulation (Kotb et al., 2016; Lux et al., 2019). Phase I/II studies (NANO-GBM) investigating AGuIX in combination with radiotherapy and temozolomide in glioblastoma multiforme have shown an acceptable early safety profile. Its combination with stereotactic radiosurgery is being explored in randomized phase II protocols in high-risk brain metastasis subgroups (Thivat et al., 2023; Bennett et al., 2024).

Monte Carlo simulations play a crucial role in predicting the expected DEF and ROS profiles of these nanoparticles under

clinical dose and energy conditions (Lux et al., 2019; McMahon & Prise, 2019).

11. FUTURE DIRECTIONS AND CHALLENGES

Although Monte Carlo simulations have greatly advanced our understanding of nanoparticle-mediated radiosensitization, several challenges and needs remain:

Realistic biological geometry: Integration of high-resolution 3D models of cells, tissues, and the tumor microenvironment (Schuermann et al., 2019; Shin et al., 2021).

Multiscale modeling: Development of multiscale Monte Carlo–biological frameworks that link nanoscale (DNA), cellular, tissue, and organ levels (McMahon & Prise, 2019).

Inter-code comparisons and standards: Systematic intercomparisons and reference scenarios among codes such as Geant4-DNA, EGSnrc, MCNP, PENELOPE, and FLUKA (Ding et al., 2015; Akar et al., 2020).

Clinical validation: Extensive validation of simulation predictions against in vitro, in vivo, and clinical datasets, particularly in the context of megavoltage photon and proton therapy (McMahon & Prise, 2019; Chithrani & Stewart, 2020).

New materials and combination therapies: Development of modeling frameworks for bismuth, selenium, tellurium, radionuclide-carrying nanoparticles, and combinations with immunotherapy (Porcel et al., 2014; Retif et al., 2015; Nan et al., 2021).

12. CONCLUSION

Nanoparticle-based radiosensitization represents a promising strategy for increasing tumor selectivity and widening the therapeutic window in radiotherapy. Monte Carlo simulations play a central role in elucidating and optimizing this strategy at physical, chemical, and biological levels. The literature and discussion compiled in this work demonstrate that high-Z metal nanoparticles (Au, Bi, Pt, Gd, Ag, Hf, etc.) can achieve substantial dose enhancement in suitable energy regimes, although this effect is strongly dependent on both energy and biological context.

From a physical standpoint, DEF values can reach 2 or higher in kilovoltage photon energy ranges (particularly around the K-edge) owing to the dominance of the photoelectric effect; by contrast, in megavoltage photon fields, macroscopic DEF values typically remain limited to increases of about 1–2%. Nevertheless, local energy deposition at nano- and microscale, clustering of secondary electrons, and formation of complex DNA damage regions can lead to biologically significant radiosensitization even in the megavoltage regime. This underscores the necessity of adopting an integrated assessment framework that accounts not only for physical dose enhancement but also for biological parameters such as ROS production, suppression of DNA repair, and cell cycle dynamics.

Monte Carlo studies have clearly shown that nanoparticle size, shape, concentration, surface coating, and subcellular localization are determining factors for radiosensitization. In particular, nanoparticles that accumulate near the cell nucleus or nuclear membrane, or that are targeted to DNA or mitochondria, have been shown to yield higher DSB rates and higher sensitizer enhancement ratios (SER) at the same total dose. This finding highlights the necessity of incorporating realistic biodistribution

modeling (e.g., intracellular clustering, endosomal/lysosomal accumulation, heterogeneous intratumoral distribution) as an integral component of both Monte Carlo simulations and experimental design.

From a clinical translation perspective, the advancement of systems such as hafnium oxide-based NBTXR3 and gadolinium-based AGuIX to phase I–III trials provides strong evidence that nanoparticle-based radiosensitization can move beyond a theoretical concept toward tangible clinical implementation. However, current human data are still limited to specific patient cohorts, tumor types, and centers, and there remains a need for large-scale randomized studies and long-term safety data. Moreover, it is essential to further elucidate, through both experimental and simulation-based approaches, how factors such as heterogeneous vascularization, hypoxia, necrotic cores, and stromal barriers in the real tumor microenvironment modulate nanoparticle accumulation and radiosensitization.

REFERENCES

- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Arce, P., Asai, M., Aso, T., ... & Yoshida, H. (2016). Recent developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 835, 186–225.
- Alqathami, M., Blencowe, A., & Yeo, U. J. (2013). Gold nanoparticle-based dose enhancement in radiotherapy: A review. *International Journal of Nanomedicine*, 8, 2729–2743.
- Akar, A., Mesbahi, A., & Abbasi, S. (2020). Assessment of FLUKA, PENELOPE and MCNP6 Monte Carlo codes for high-Z nanoparticles in megavoltage radiotherapy. *Radiation Physics and Chemistry*, 167, 108266.
- Alexis, F., Pridgen, E., Molnar, L. K., & Farokhzad, O. C. (2014). Factors affecting the clearance and biodistribution of polymeric nanoparticles. *Molecular Pharmaceutics*, 11(10), 3543–3558.
- Bennett, S., Verry, C., Kaza, E., Miao, X., Dufort, S., Boux, F., ... & Sudhyadhom, A. (2024). Quantifying gadolinium-based nanoparticle uptake distributions in brain metastases via magnetic resonance imaging. *Scientific reports*, 14(1), 11959.
- Bonvalot, S., Rutkowski, P. L., Thariat, J., Carrère, S., Ducassou, A., Sunyach, M. P., ... & Mir, L. M. (2017). NBTXR3, a first-in-class radioenhancer hafnium oxide nanoparticle, for soft-tissue sarcoma. *Clinical Cancer Research*, 23(4), 908–917.
- Butterworth, K. T., Wyer, J. A., Brennan-Fournet, M., Latimer, C. J., Shah, M. B., Currell, F. J., & Hirst, D. G. (2010). Variation of strand break yield for plasmid DNA

- irradiated with high-LET α particles. *Radiation Research*, 174(3), 324–331.
- Cabral, H., & Kataoka, K. (2014). A new era of nanomedicine for cancer therapy: From passive targeting to active targeting using polymeric nanomaterials. *Chemical Society Reviews*, 43(12), 5051–5065.
- Chithrani, B. D., & Stewart, J. (2020). Nano-radiosensitizers: Gold nanoparticles and their potential in radiotherapy. *Cancers*, 12(3), 795.
- D'Souza, S., Hufnagel, M., & Schuemann, J. (2018). Metallic nanoparticles irradiated by low-energy protons for radiosensitization: A Monte Carlo study. *Medical Physics*, 45(7), 3317–3326.
- Ding, G. X., & Coffey, C. W. (2015). Radiation dose enhancement for brain tumour therapy using high-Z nanoparticles: Monte Carlo study. *Physics in Medicine & Biology*, 60(7), 2755–2773.
- Espinosa, A., Di Corato, R., Kolosnjaj-Tabi, J., Flaud, P., Pellegrino, T., & Wilhelm, C. (2016). Magnetic nanoparticle heating efficiency modulated by cell medium viscosity: Implications for cancer hyperthermia. *Scientific Reports*, 6, 34535.
- Geng, F., Song, K., Xing, J. Z., Yuan, C., Yan, S., Yang, Q., ... & Kong, B. (2011). Thio-glucose bound gold nanoparticles enhance radio-cytotoxic targeting of ovarian cancer. *Nanotechnology*, 22(28), 285101.
- Gray, M., et al. (2021). A detailed experimental and Monte Carlo analysis of gold nanoparticle mediated dose enhancement in megavoltage photon beams. *Medical Physics*, 48(5), 2342–2355.

- Her, S., Mahajan, U., & Ghandehari, H. (2017). Gold nanoparticles for applications in cancer radiotherapy: Mechanisms and recent advancements. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 109, 84–101.
- Jain, S., Coulter, J. A., Hounsell, A. R., Butterworth, K. T., McMahon, S. J., Hyland, W. B., ... & Currell, F. J. (2012). Cell-specific radiosensitization by gold nanoparticles at megavoltage radiation energies. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 79(2), 531–539.
- Karamitros, M., et al. (2014). Modeling radiation chemistry in the Geant4 toolkit. *Progress in Nuclear Science and Technology*, 4, 795–800.
- Kawrakow, I., Mainegra-Hing, E., & Rogers, D. W. O. (2011). NRC user codes for EGSnrc. *NRC Report PIRS-702*.
- Kotb, S., Detappe, A., Lux, F., Appaix, F., Barbier, E. L., Tran, V. L., ... & Sancey, L. (2016). Gadolinium-based nanoparticles and radiation therapy for multiple brain melanoma metastases: proof of concept before phase I trial. *Theranostics*, 6(3), 418.
- Kyriakou, I., et al. (2018). Geant4-DNA physics models for electrons in liquid water: Extension to very low energies. *Physics in Medicine & Biology*, 63(10), 105014.
- Lechtman, E., Chattopadhyay, N., Cai, Z., Mashouf, S., & Reilly, R. M. (2013). Elemental high-Z nanoparticle radiosensitizers for radiation therapy of cancer. *Nanomedicine*, 8(9), 1601–1614.
- Liu, P., et al. (2017). Radiosensitization of cancer cells by gold nanoparticles: Mechanisms and applications. *Frontiers in Chemistry*, 5, 84.
- Lux, F., Tran, V. L., Thomas, E., Dufort, S., Rossetti, F., Martini, M., ... & Tillement, O. (2019). AGuIX® from bench to

- bedside—Transfer of an ultrasmall theranostic gadolinium-based nanoparticle to clinical medicine. *The British journal of radiology*, 92(1093), 20180365.
- He, M., Chen, S., Yu, H., Fan, X., Wu, H., Wang, Y., ... & Yin, X. (2025). Advances in nanoparticle-based radiotherapy for cancer treatment. *Iscience*, 28(1).
- McMahon, S. J., Mendenhall, M. H., Jain, S., & Currell, F. J. (2011). Radiotherapy in the presence of contrast agents: A general figure of merit and its application to gold nanoparticles. *Physics in Medicine & Biology*, 56(15), 4631–4647.
- McMahon, S. J., & Prise, K. M. (2019). Mechanistic Monte Carlo simulations in nanoparticle enhanced radiotherapy. *Cancer Nanotechnology*, 10(1), 1–19.
- Mesbahi, A. (2010). A review on gold nanoparticles radiosensitization effect in radiation therapy of cancer. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, 15(6), 176–180.
- Moradi, F., Jalili, M., Saraee, K. R. E., Khandaker, M. U., & Bradley, D. A. (2022). Geant4 track structure simulation of electron beam interaction with a gold nanoparticle. *Radiation Physics and Chemistry*, 200, 110278.
- Paro, A. D., et al. (2016). Monte Carlo simulation of dose enhancement due to silver and bismuth nanoparticles in kilovoltage x-ray radiotherapy. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 351–357.
- Porcel, E., Li, S., Usami, N., Remita, H., Furusawa, Y., Kobayashi, K., & Le Sech, C. (2014). Radiosensitization by gold nanoparticles irradiated with proton beams. *Nanotechnology*, 25(36), 365101.

- Retif, P., et al. (2015). Nanoparticles for radiation therapy enhancement: The key parameters. *Theranostics*, 5(9), 1030–1044.
- Roeske, J. C., et al. (2007). Characterization of the theoretical radiation dose enhancement from nanoparticles. *Technology in Cancer Research & Treatment*, 6(5), 395–401.
- Sakata, D., Kyriakou, I., Okada, S., Tran, H. N., Lampe, N., Guatelli, S., ... & Incerti, S. (2018a). Geant4-DNA track-structure simulations for gold nanoparticles: the importance of electron discrete models in nanometer volumes. *Medical physics*, 45(5), 2230-2242.
- Sakata, D., et al. (2018b). Multiscale Monte Carlo simulations of gold nanoparticle radiosensitization at the DNA level. *Scientific Reports*, 8, 1–11.
- Sargos, P., et al. (2019). First-in-human study testing a new radioenhancer using NBTXR3 nanoparticles activated by radiotherapy. *Clinical Cancer Research*, 25(1), 13–21.
- Schuemann, J., et al. (2019). TOPAS-nBio: An extension to the TOPAS simulation toolkit for cell-scale and DNA damage simulations. *Physics in Medicine & Biology*, 64(4), 045012.
- Shin, W. G., et al. (2021). Geant4-DNA simulation of the pre-chemical stage of water radiolysis at ultra-high dose rates. *Radiation and Environmental Biophysics*, 60(3), 365–381.
- Thivat, E., Casile, M., Moreau, J., Molnar, I., Dufort, S., Seddik, K., ... & Biau, J. (2023). Phase I/II study testing the combination of AGuIX nanoparticles with radiochemotherapy and concomitant temozolomide in

patients with newly diagnosed glioblastoma (NANO-GBM trial protocol). *BMC cancer*, 23(1), 344.

Zhao, J., et al. (2019). Monte Carlo simulation of dose enhancement due to silver nanoparticles in radiotherapy. *Radiation Physics and Chemistry*, 165, 108430.

**FİZİK ALANINDA
BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR**

yaz
yayınları

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