

Biyolojik ve Tıbbi Açıdan
RADYOAKTİF MADDELER
Halk Sağlığına Etkileri ve Korunma Yolları



Editörler

Doç. Dr. Bahri GÜR - Prof. Dr. Mustafa CENGİZ



Biyolojik ve Tıbbi Açıdan
RADYOAKTİF MADDELER
Halk Sağlığına Etkileri ve Korunma Yolları

EDİTÖRLER

Doç. Dr. Bahri GÜR

Prof. Dr. Mustafa CENGİZ



*Biyolojik Ve Tıbbi Açıdan Radyoaktif Maddeler
Halk Sağlığına Etkileri Ve Korunma Yolları
Editörler: Doç. Dr. Bahri GÜR, Prof. Dr. Mustafa CENGİZ*

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Sayfa Tasarımı: Duvar Design

Baskı: Eylül 2024

Yayıncı Sertifika No: 49837

ISBN: 978-625-6069-87-9

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

ÖNSÖZ

Bilim ve teknolojinin hızlı ilerleyişi, insanlığın önüne yeni fırsatlar sunduğu kadar, çözülmesi gereken karmaşık sorunları da beraberinde getirmektedir. Radyoaktif maddeler, tıp, enerji üretimi ve sanayi gibi birçok alanda kritik bir rol oynamakla birlikte, yanlış kullanıldığında veya yeterli önlemler alınmadığında biyolojik, tıbbi ve çevresel açıdan ciddi riskler oluşturabilmektedir.

Bu kitap, radyoaktif maddelerin hücresel yapılar üzerindeki etkilerini, halk sağlığı üzerindeki muhtemel tehlikelerini ve bu tehlikelerden korunma yollarına dair kapsamlı bir bilgi sunmayı hedeflemektedir. Radyoaktif maddelerle ilgili sunulan bu eser, konuya bilimsel bir bakış açısıyla yaklaşırken bu maddelerin güvenli bir şekilde kullanılmasına dair de pratik öneriler sunmaktadır.

Kitap, radyoaktif maddelerin insan vücudunda nasıl etkileşimde bulunduğunu ve bu etkileşimlerin tıbbi sonuçlarını derinlemesine incelemeyi içermektedir. Ayrıca, radyasyona maruz kalmanın kısa ve uzun vadeli etkileri, olası hastalıklar, genetik mutasyonlar ve bu etkilerin önlenmesi için alınması gereken iş sağlığı ve güvenliği tedbirleri üzerinde durulmuştur. Hem uzmanlara hem de bu alana ilgi duyan geniş bir kitleye hitap eden bu çalışma, bilimsel temellere dayanan bilgileri anlaşılır bir dille sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca bu kitabın diğer bir amacı radyoaktif maddelerle çalışmada sağlık ve güvenlik risklerinin değerlendirilmesi amacıyla tıp ve mühendislik alanında temel araştırma ve uygulama çalışmaları yapan araştırmacılarımıza kapsamlı bir bilgi sağlamak ve onları bu alanda yenilikçi çalışmalar yapmaya teşvik etmektir.

Kitabın siz değerli okuyuculara, radyoaktif maddeler ve radyasyon güvenliği konusunda farkındalık kazandıracaklarını ve bu alandaki bilgi eksikliğini gidermede önemli bir kaynak olacağını ümit ediyoruz. Geleceğin daha güvenli ve sağlıklı olması için bilimin ışığında hareket etmek hepimizin sorumluluğundadır. Araştırma çalışmaları ve yoğun emekleriyle bu amaca katkı sağlayan alanında uzman çok değerli yazarlarımıza da gönülden teşekkür ediyoruz.

Saygılarımızla.

Editörler

Doç. Dr. Bahri GÜR, Prof. Dr. Mustafa CENGİZ

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1.....	6
Radyoaktif Maddelerin Kimyası	
<i>Doç. Dr. Tuğba BAYRAKTUTAN</i>	
Bölüm 2.....	38
Radyoaktif Maddelerin Terapötik Uygulamaları	
<i>Prof. Dr. Mustafa CENGİZ, Doç. Dr. Canan VEJSELOVA SEZER</i>	
Bölüm 3.....	76
Radyoaktif Maddelere Maruziyetin Organizmaya Etkileri	
<i>Prof. Dr. Mustafa CENGİZ, Doç. Dr. Canan VEJSELOVA SEZER</i>	
Bölüm 4.....	104
Gebelik Döneminde Radyasyon Maruziyetinin Fetüse Etkileri	
<i>Uzm. Dr. Celal CENGİZ</i>	
Bölüm 5.....	123
Radyoprotektif Bitkiler ve Radyasyondan Korunmadaki Potansiyel Uygulamaları	
<i>Prof. Dr. Ahmet Zafer TEL, Doç. Dr. Muhittin KULAK</i>	
Bölüm 6.....	174
Radyoaktif Maddelerin Biyokimyasal Parametrelere Etkileri	
<i>Doç. Dr. Abdülmelik ARAS</i>	
Bölüm 7.....	188
Radyoaktif Maddelerle Çalışmada İş Sağlığı ve Güvenliği	
<i>Doç. Dr. Alpaslan BAYRAKDAR</i>	

Bölüm 8	204
Radyoaktif Maddelere Maruziyetin Önlenmesi Amacıyla Zırhlama	
<i>Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Raci AYDIN</i>	
Bölüm 9	228
Radyoaktif Maddelerden Korunmada Sanal Gerçeklik	
<i>Dr. Serap BUZTEPE</i>	
Bölüm 10	244
Radyoaktif Maddelerle Çalışmada Atık Yönetimi	
<i>Lütfü GÜR, Doç. Dr. Bahri GÜR</i>	
Bölüm 11	269
Radyoaktif Maddelerin Farmasötik Uygulamaları	
<i>Dr. Öğr. Üyesi Faysal SELİMOĞLU</i>	
Bölüm 12	334
Radyoaktif Malzemelerin Nano Uygulamaları	
<i>Doç. Dr. Muhammed Emre AYHAN</i>	

BÖLÜM 1

Radyoaktif Maddelerin Kimyası

Tuğba BAYRAKTUTAN¹

GİRİŞ

Radyoaktif maddeler, kimyasal olarak diğer maddelerle aynı özelliklere sahiptir; ancak, radyoaktif özellikleri nedeniyle, çekirdeklerindeki kararsızlık sonucu radyasyon yayabilirler. Bu nedenle, radyoaktif maddelerin kimyası, genel kimya prensiplerinden farklı değildir, ancak çekirdek özelliklerine dikkat edilir. Radyoaktif maddelerin kimyasal özellikleri, özellikle radyasyonun etkisi altında değişebilir. Yüksek enerjili radyasyon, moleküllerde çeşitli kimyasal değişikliklere neden olabilir. Radyoaktif maddelerin kullanım alanları oldukça geniştir. Tıbbi görüntüleme, kanser tedavilerine, enerji üretiminden, gıda sterilizasyonuna kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar. Ancak, radyasyonun insan sağlığına ve çevreye zarar verebileceği bilinciyle, radyoaktif maddelerin kullanımı ve depolanması dikkatli bir şekilde yönetilmelidir.

1.1. Radyoaktivite nedir?

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin radyasyon yayarak enerji kaybettiği bir süreçtir (Gruppen et al., 2016). Bu olgu ilk olarak 1896 yılında Henri Becquerel tarafından keşfedilmiş ve Marie ve Pierre Curie tarafından da araştırılmıştır (Califano & Califano, 2012). Radyoaktif maddeler aşırı enerjiye sahip kararsız atomlar içerir ve bu da onların kendiliğinden nükleer dönüşümler geçirmesine yol açar.

Radyoaktif bozunmanın üç ana türü vardır (Magill & Galy, 2005):

Alfa bozunumu: kararsız bir atom çekirdeğinin iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı salmasıyla gerçekleşir. Bu bozunma sonucunda, çekirdeğin atom numarası iki, kütle numarası ise dört birim azalır.

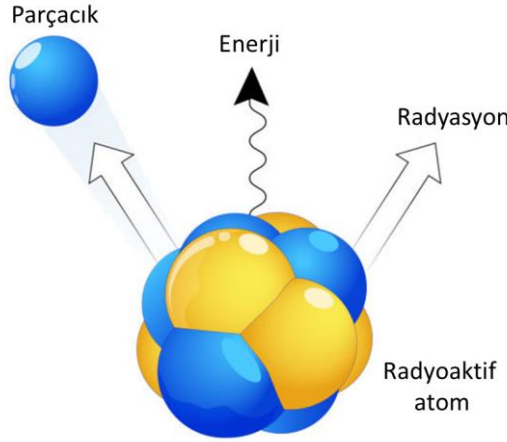
Beta bozunumu: çekirdek içinde bulunan bir nötron, protona dönüşür ve bu dönüşüm sırasında bir elektron (beta parçacığı) ve bir antinötrino (nötronun

¹ Doç. Dr. Tuğba Bayraktutan, İğdir Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyokimya Bölümü
tugba.bayraktutan@igdir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-9314-776X

karşıt parçacığı) salınır. Bu süreç sonucunda atomun kütle numarası sabit kalırken, atom numarası bir birim artar, yani elementin periyodik tablodaki yeri değişir.

Gama bozunumu, yüksek enerjili ışınlar olan gama fotonlarının salınmasıyla gerçekleşir. Bu bozunma genellikle alfa veya beta bozunmasının ardından meydana gelir ve çekirdekteki fazla enerjinin atılmasını sağlar. Gama bozunmasında atomun çekirdek yapısında proton veya nötron sayısı değişmez; yalnızca enerji seviyeleri azalır, bu da çekirdeğin daha kararlı bir duruma geçmesine yardımcı olur.

Radyoaktif bozunma, rastgele gerçekleşen bir süreçtir ve bir radyoaktif maddenin miktarının yarısının bozunması için geçen süreye yarı ömür denir. Yarı ömür, maddenin radyoaktif çekirdeklerinin belirli bir zaman diliminde ne kadarının kararsız yapıdan kararlı bir yapıya geçtiğini belirler ve her radyoaktif izotop için sabit bir değerdir(Saha & Saha, 2010). Radyoaktif elementlerin yarı ömürleri, saniyenin çok küçük dilimlerinden milyonlarca yıl gibi çok uzun süreler arasında değişiklik gösterebilir.



Şekil 1. Radyoaktif Bozunma (<https://www.istockphoto.com/>)

Radyoaktif malzemeler tıp (örn. tıbbi görüntüleme ve kanser tedavileri), endüstri (örn. kalınlık ve yoğunluk ölçümü) ve enerji üretimi (örn. nükleer enerji santralleri) dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, iyonlaştırıcı radyasyonla ilişkili potansiyel tehlikeler nedeniyle radyoaktif malzemelerin dikkatli bir şekilde kullanılması ve yönetilmesi çok önemlidir.

1.2. Radyoaktif Elementler

Radyoaktif elementler radyoaktivite gösteren kimyasal elementlerdir, yani kendiliğinden radyasyon yayarlar. Bu süreç, kararsız atom çekirdeklerinin bozunarak enerji ve parçacık yaymasıyla gerçekleşir. Bozunma sırasında çekirdek, fazla enerjisini serbest bırakırken çeşitli parçacıklar ortaya çıkar. Şu anda 38 radyoaktif element bulunmaktadır. Bu elementler, kararsız atom çekirdeklerine sahip olup, kendiliğinden alfa parçacıkları, beta parçacıkları ve gama ışınları şeklinde radyasyon yayar. Bu radyasyon yayılımı, çekirdeğin kararsız yapısını düzeltme ve daha kararlı bir hale geçme sürecinin bir sonucudur. Birçok element radyoaktif izotoplara sahip olabilirken, özellikle radyoaktif elementler olarak kabul edilenler, izotoplarının önemli bir kısmı radyoaktif olanlardır (Thoennessen, 2016).

Radyoaktif elementler hem doğal hem de yapay (veya sentetik) olabilirler. Doğal radyoaktif elementler, doğada var olan ve radyoaktif izotoplara sahip olan elementlerdir. Doğada bulunan bazı radyoaktif elementler arasında uranyum (U), toryum (Th), radyum (Ra), radon (Rn), polonyum (Po) ve bizmut (Bi) yer alır. Bu elementler, doğada kendiliğinden radyoaktif bozunmaya uğrayarak çevreye radyasyon yayarlar. Yapay radyoaktif elementlere örnek olarak Teknesyum (Tc), Amerikyum (Am), Prometyum (Pm), Astatin (At), Plütonyum (Pu) ve Kaliforniyum (Cf), Küriyum (Cm) ve Aynştaynyum (Es) verilebilir (Gurin et al., 2022). Yapay veya sentetik radyoaktif elementler, genellikle laboratuvarlarda veya nükleer reaktörlerde insan yapımı süreçlerle oluşturulan elementlerdir. Bu elementler tipik olarak nükleer reaksiyonları tetiklemek için kararlı çekirdeklerin parçacıklarla bombardıman edilmesiyle üretilir. Doğal ve yapay radyoaktif elementler arasındaki ayrımın radyoaktif özelliklerinden ziyade nasıl oluştuklarına dayandığını belirtmek önemlidir. Her iki radyoaktif element türü de radyoaktif bozunmaya uğrayarak zaman içinde radyasyon yayar. Doğal ve yapay olarak en çok bilinen ve uygulama alanı daha çok olan bazı radyoaktif elementler sonraki bölümde daha detaylı incelenecektir.

1.3. Doğal Radyoaktif Elementler

1.3.1. Uranyum

1.3.1.1. Uranyumun Kimyasal Özellikleri ve Uygulama Alanları

Uranyum, kimyasal sembolü U olan ve atom numarası 92 olan bir elementtir. Aktinitler grubuna ait olan uranyum, doğada az miktarda bulunur ve radyoaktif özelliklere sahiptir. Oda sıcaklığında uranyum gümüşü beyaz, yoğun, dövülebilir

ve reaktif bir metaldir. Uranyumun çeşitli izotopları vardır ve tüm uranyum izotopları radyoaktiftir. Uranyumun en önemli iki izotopu uranyum-238 (U-238) ve uranyum-235'tir (U-235). Uranyum-238, doğal uranyumun yaklaşık %99,3'ünü oluşturan ve en bol bulunan izotoptur. Uranyum-235 (U-235): U-235 çok daha nadir bulunan bir izotoptur ve doğal uranyumun sadece %0,7'sini oluşturur (Canbula, 2020). U-238'in yaklaşık 4,5 milyar yıl gibi çok uzun bir yarılanma ömrü vardır, bu da Dünya'nın yaşıyla kıyaslanabilir. Bu uzun yarılanma ömrü, doğadaki bolluğuna katkıda bulunur. U-235 yaklaşık 700 milyon yıl gibi daha kısa bir yarılanma ömrüne sahiptir. U-238 bölünebilir olmadığı için tipik olarak zenginleştirilmez. Ancak, bölünebilir plütonyum-239 üretmek için ıslah reaktörlerinde kullanılır. U-235, uranyum zenginleştirme işlemlerinde ilgi çeken izotoptur. Daha yüksek U-235 konsantrasyonuna sahip zenginleştirilmiş uranyum, nükleer reaktörlerde yakıt olarak ve nükleer silah malzemesi olarak kullanılır (Reed, 2012). Aynı zamanda U-238 ve U-235 izotopik oranları jeolojik çalışmalarda güçlü araçlardır ve kayaçları tarihlendirmek, magmatik süreçleri anlamak, çevresel kirlenmeyi izlemek ve Dünya'nın tektonik ve termal geçmişi hakkında bilgi edinmek için bir araç sunar (Sahoo et al., 2002; Tissot et al., 2017). Bu uygulamalar, jeolojik zaman ölçeklerinde Dünya'nın kabuğunu şekillendiren dinamik süreçlerin detaylı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunur. Özellikle uranyum-238'in radyoaktif bozunma süreci, yer kabuğundaki yaş belirleme ve jeolojik tarihlerin incelenmesinde önemli bir rol oynar.

1.3.1.2. Uranyumun GBF bilgileri

Güvenlik Bilgi Formu (GBF), bir kimyasal maddenin özellikleri, tehlikeleri ve güvenli kullanımı hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. GBF'de yer alan bilgiler, maddenin güvenli bir şekilde taşınması, depolanması ve bertaraf edilmesini sağlamak için çok önemlidir. Uranyum için bir GBF'de bulunan tipik bilgiler Tablo 1'de özetlenmiştir

Tablo 1. Uranyum meteline ait GBF bilgileri

Tehlike Sınıflandırması				
OSHA tehlikeleri: Solunması halinde oldukça toksiktir. Yutulması halinde oldukça toksiktir.		Hedef organlar: Böbrek, karaciğer, akciğerler, beyin		
GHS (Küresel Uyumlaştırılmış Sınıflandırma ve Kimyasalların Etiketlenmesi Sistemi) Sınıflandırması				
Akut toksisite, Oral (Kategori 2)	Akut toksisite, Soluma (Kategori 2)	Spesifik hedef organ toksisitesi (Kategori 2)	Kronik ve akut sucül toksisite (Kategori 2)	Tekrarlanan maruz kalma (Kategori 2)
Tehlike beyan(lar)				
H300 + H330 Yutulması veya solunması halinde öldürücüdür	H373 Organlarda hasara yol açabilir	H411 Sucül ortamda uzun süre kalıcı, toksik etki	H250 Havaya maruz kaldığında kendiliğinden alev alır.	
Önem beyan(lar)				
P220 Giysilerden/yanıcı malzemelerden uzak tutun.	P260 Tozunu/dumanını /gazını/sisini/buharını solumayın.	P284 Solunum koruması kullanın	P264 İşlemden sonra ellerinizi iyice yıkayın.	P310 Derhal Zehir Merkezini veya doktoru arayın
Diğer Tehlikeler				
Radyoaktif				
İlk Yardım Tedbirleri				
Soluma: Temiz havaya çıkarın.	Yutma: Kişinin bilinci yerindeyse ağzını suyla yıkayın.	Gözlerle temas: En az 20 dakika boyunca bol miktarda su ile yıkayın.	Ciltle temas: Cildi derhal sabun ve bol miktarda su ile yıkayın.	
Maruz Kalma Sınırları				
0.2 mg/m ³ OSHA TWA		0.6 mg/m ³ OSHA STEL		
Daha detaylı bilgi için: https://www.energy.gov/nnsa/articles/sds-uranium-metal .				

1.3.1.3. Uranyumun Sağlık Üzerine Etkileri

Uranyum, öncelikle radyoaktif bozunma ürünleri nedeniyle potansiyel sağlık etkileri olan, doğal olarak oluşan, radyoaktif ağır bir metaldir. Uranyumla ilgili birincil endişe radyoaktif özellikleridir. Uranyum radon gazına ve diğer radyoaktif izotoplara bozunarak alfa, beta ve gama radyasyonu yayar. Uranyum tozunun veya radon gazının solunması önemli bir maruziyet yoludur. Özellikle radon, yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu bilinen bir akciğer kanserojenidir. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) uranyumu insanlar için Grup 1 kanserojen olarak sınıflandırmış olsa da birincil endişe bozunma ürünleri, özellikle de radon gazı ile ilgilidir (Bersimbaev & Bulgakova, 2015).

Uranyum maruziyetinin sağlık üzerindeki etkileri, kısa vadeli ve uzun vadeli etkiler olarak kategorize edilebilir (Brugge et al., 2005; Busby, 2010).

Kısa vadeli sağlık etkileri şunları içerebilir:

Cilt tahrişi: Uranyum bileşenleriyle doğrudan temas ciltte tahriş, kızamık ve döküntülere neden olabilir.

Solunum sorunları: Uranyum tozları veya aerosollerinin solunması öksürük, hırıltılı solunum ve nefes darlığı gibi solunum problemlerine yol açabilir (Özbakır, 2024).

Uzun vadeli sağlık etkileri

Böbrek hasarı: Kronik uranyum maruziyeti böbrek taşı ve böbrek fonksiyonlarında bozulma dahil olmak üzere böbrek hasarına yol açabilir. Uranyum çözünebilir bir formda olduğunda ve kan dolaşımına karıştığında risk daha yüksektir.

Akciğer kanseri: Uranyum tozu veya aerosollerinin solunması akciğer kanseri riskini artırabilir.

Kemik kanseri: Uranyum kemiklerde birikme eğilimindedir ve kronik maruziyet kemikle ilgili sağlık sorunlarına yol açabilir. Bununla birlikte, kemikte uranyum birikiminin sağlık üzerindeki etkileri hala bir araştırma ve tartışma alanıdır.

Genetik etkiler: Uranyum maruziyeti genetik mutasyonlar ve kromozomal anormalliklerle ilişkilendirilmiştir. Uranyum maruziyetinin üreme ve gelişimsel etkileri olabileceğini gösteren bazı kanıtlar vardır (Guan & Piao, 2011).

1.3.1.4. Uranyumdan Korunma Yöntemleri

Uranyum maruziyetine karşı korunmak, özellikle radyoaktif özellikleri olmak üzere potansiyel sağlık tehlikeleri nedeniyle çok önemlidir. İster uranyumla ilgili bir sektörde çalışıyor olun, ister maruziyetin mümkün olduğu bir bölgede yaşıyor olun, etkili korunma yöntemlerinin uygulanması çok önemlidir. Uranyum maruziyetine karşı korunmak için bazı temel yöntemler aşağıda listelenmiştir.

- Uranyum tozu veya aerosollerinin havaya salınımını en aza indirmek için mühendislik kontrollerini kullanılmalıdır. Bu, yerel egzoz havalandırma sistemlerinin uygulanmasını, süreçlerin kapatılmasını ve toz bastırma tekniklerinin kullanılmasını içerebilir.
- Cilt temasını azaltmak ve uranyumun solunmasını veya yutulmasını önlemek için uygun KKD kullanılmalıdır. Bu, solunum koruması (uygun filtrelili solunum maskeleri), koruyucu giysi, eldiven ve göz korumasını içerebilir.
- Havada uranyum partiküllerinin bulunabileceği alanlarda çalışırken solunum koruması kullanılmalıdır. Özel koşullara ve havadaki uranyum konsantrasyonuna bağlı olarak uygun solunum cihazı tipi seçilmelidir.
- Çalışanlara uranyuma maruz kalmanın tehlikeleri, güvenli taşıma uygulamaları ve KKD'nin doğru kullanımı hakkında kapsamlı eğitim verilmelidir. Çalışanların risklerin farkında olduğundan ve belirlenmiş güvenlik prosedürlerini takip ettiğinden emin olunmalıdır.
- Uranyuma maruz kalmanın mümkün olduğu alanlarda geçirilen süre en aza indirilmelidir. Maruz kalma süresinin sınırlandırılması genel emilim ve alım riskini azaltır.
- Uranyum tozu ve aerosol oluşumunu en aza indirmek için güvenli taşıma uygulamaları uygulanmalıdır. Güvenli elleçleme için tasarlanmış alet ve ekipmanlar kullanılmalı ve uranyum içeren malzemelere gereksiz temastan kaçınılmalıdır.
- Özellikle uranyumun işlendiği veya elleçlendiği alanlarda uranyum konsantrasyonları için çevre düzenli olarak izlenmelidir. Hava, su ve toprak kalitesini değerlendirmek için izleme programları uygulanmalıdır.
- Potansiyel uranyum maruziyeti olan bir işte çalışıyorsanız, uranyum maruziyetiyle ilgili herhangi bir sağlık sorunu belirtisi olup olmadığını izlemek için düzenli sağlık kontrollerinden geçilmelidir.
- Kazara dökülmeler, salınımlar veya beklenmedik olaylar durumunda acil durum müdahale planları geliştirin ve düzenli olarak uygulayın. Çalışanlar tahliye prosedürlerine aşina olmalı ve gerektiğinde nasıl tıbbi yardım isteyeceklerini bilmelidir.
- Uranyumla ilgili iş güvenliği ve çevre yönetmeliklerine uyulmalıdır. İzin verilen maruz kalma sınırlarının farkında olunmalı ve geçerli yönetmeliklere uyumu sağlamak için güvenlik yönergeleri izlenmelidir.
- Uranyuma maruz kalma ile ilgili yeni gelişmeler, araştırmalar ve güvenlik önlemleri hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Yeni bilgilere dayanarak güvenlik protokolleri düzenli olarak güncellenmelidir.

- Koruma yöntemlerinin özel koşullara ve risk düzeyine göre uyarlanması gerektiği unutulmamalıdır. Özel rehberlik iş güvenliği uzmanlarına veya bölgenizdeki ilgili makamlara danışılmalıdır.

1.3.2. Toryum

1.3.2.1. Toryumun Kimyasal Özellikleri ve Uygulama Alanları

Toryum, Th sembolüne ve 90 atom numarasına sahip kimyasal bir elementtir. Aktinit element serisine aittir ve tipik olarak doğada eser miktarda bulunur. Oda sıcaklığında toryum katı ve reaktif bir metaldir. Toryum, en kararlı ve yaygın olanı Th(III) ve Th(IV) olmak dahil olmak üzere çeşitli oksidasyon durumları sergiler (Hak et al., 2022). Toryum zayıf radyoaktiftir ve kararlı kurşuna ulaşılan kadar bir dizi radyoaktif izotop aracılığıyla bozunur (Karabash, 1958). En bol ve uzun ömürlü toryum izotopu, alfa bozunmasına uğrayan Th-232'dir. Diğer önemli izotoplar arasında Th-230 ve Th-234 bulunur. Toryum, nötron emilimi ve ardından bozunma yoluyla bölünebilir malzemeye (U-233) dönüştürülebilir. Bu süreç, gelişmiş nükleer reaktörlerde uygulanan geleneksel uranyum yakıt çevrimleri için potansiyel bir yakıt ve bir alternatif olarak araştırılmaktadır. Mevcut ticari reaktörlerde yaygın olarak kullanılmamakla birlikte, toryum bazlı nükleer yakıt döngülerine ilişkin araştırmalar devam etmektedir. Toryumun, Toryum dioksit (ThO_2) formu yüksek erime ve kaynama noktalarına sahiptir, bu nedenle yüksek sıcaklık seramiklerinde ve refrakter malzemelerde kullanım alanı bulmuştur (Cunzeman & Schubert, 2009). Toryum oksit, akkor haline gelme ve parlak bir ışık üretme kabiliyeti nedeniyle tarihsel olarak fenerler için gaz mantolarının üretiminde kullanılmıştır (Abu-Jarad & Aksoy, 2001). Toryum, magnezyum gibi diğer metallerle alaşım haline getirilebilir. Toryum-magnezyum alaşımları havacılık ve uzay uygulamalarında ve akkor ampuller için tungsten-toryum filamentler gibi belirli aydınlatma uygulamalarında kullanılmaktadır (Hunter & Budinger, 1991). Bütün bunlara ek olarak Toryum bileşikleri ve izotoplarının potansiyel uygulamalarını tam olarak anlamak için koordinasyon kimyası ve nükleer fizik çalışmaları da dahil olmak üzere bilimsel araştırmalarda önemli bir yer tutmaya devam etmektedir.

1.3.2.2. Toryumun GBF bilgileri

Toryum için bir GBF'de bulunan tipik bilgiler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Toryum metaline ait GBF bilgileri

Tehlike Sınıflandırması				
OSHA tehlikeleri: Solunduğunda, yutulduğunda, cilt tarafından emildiğinde toksiktir, kansere neden olabilir.			Hedef organlar: Kan, böbrekler, karaciğer, akciğerler, kemik iliği, üreme sistemi.	
GHS (Küresel Uyumlaştırılmış Sınıflandırma ve Kimyasalların Etiketlenmesi Sistemi) Sınıflandırması				
Akut toksite, Oral (Kategori 3)	Akut toksite, Soluma (Kategori 3)	Spesifik hedef organ toksisitesi (Kategori 2)	Akut toksite, Dermal (Kategori 3)	Kanserojen (Kategori 1B)
Tehlike beyan(lar)ı				
H314 Ciddi cilt yanıklarına ve göz hasarına neden olur				
Önlem beyan(lar)ı				
P264 Elleçlemeden sonra ellerinizi iyice yıkayın.	P260 Tozunu/dumanını/gazını/sisini/buharını solumayın.	P280 Koruyucu eldiven/koruyucu kıyafet kullanın.	P302 + P352 Deri ile temas halinde ise: Bol sabun ve su ile yıkayın.	P271 Yalnızca açık havada veya iyi havalandırılmış bir alanda kullanın.
İlk Yardım Tedbirleri				
Soluma: Temiz havaya çıkarın.	Yutma: Kişinin bilinci yerindeyse ağzını suyla yıkayın.	Gözlerle temas: Bol miktarda su ile yıkayın.	Ciltle temas: Cildi derhal sabun ve bol miktarda su ile yıkayın.	
Maruz Kalma Sınırları				
ALInih: 0,0009 µCi				
Daha detaylı bilgi için: https://www.energy.gov/nnsa/articles/sds-thorium-229-amount-content-and-isotopic-reference				

1.3.2.3. Toryumun Sağlık Üzerine Etkileri

Toryum, doğal olarak oluşan radyoaktif bir elementtir ve maruziyetin olması durumunda önemli sağlık riskleri oluşturabilir. Bunlardan en önemli başlık radyasyona maruz kalmadır. Toryuma maruz kalma seviyeleri yeterince yüksekse kanser de dahil olmak üzere çeşitli sağlık sorunları riskini artırabilir. Toryum toksiktir ve uzun süreli maruziyet karaciğer, kemikler ve böbrekler gibi iç organlarda hasara neden olabilir. (Sharma et al., 2023). Aynı zamanda, akciğer kanseri (radon solunması nedeniyle) ve kemik kanseri (radyum emilimi nedeniyle) dahil olmak üzere çeşitli kanser türlerinin gelişme riskini artırır. (Harley, 1980; Schatz et al., 2022).

Toryumun sağlık üzerinde etkilerine ikinci olarak radyasyon yanıkları ve radyasyon hastalığı verilebilir. Toryum veya bozunma ürünlerinden kaynaklanan yüksek radyasyon seviyelerine doğrudan maruz kalmak ciltte ve diğer dokularda radyasyon yanıklarına, bulantı, kusma, ishal, yorgunluk ve ateş gibi semptomları içeren radyasyon hastalığına neden olabilir (Rump et al., 2023). Şiddetli radyasyon hastalığı vakaları hayatı tehlike içerir.

Her radyoaktif element gibi toryumda genetik hasar verebilir. Toryum ve bozunma ürünlerinden kaynaklanan radyasyona maruz kalmak üreme hücrelerinde genetik mutasyonlara neden olabilir ve potansiyel olarak yavrularda doğum kusurlarına yol açabilir (Littlefield et al., 1997).

Sağlık risklerini en aza indirmek için toryum ve bozunma ürünlerine maruz kalmayı sınırlamak çok önemlidir. Olumsuz sağlık etkilerini önlemek için toryumla çalışırken koruyucu önlemler ve uygun kullanım şarttır.

1.3.2.4. Toryumdan Korunma Yöntemleri

Toryumdan korunma öncelikle radyoaktif bozunma ürünlerine maruz kalmayı en aza indirmeyi içerir; bu ürünler yutulduğunda, solunduğunda veya deri yoluyla emildiğinde sağlık riskleri oluşturabilir. Bireyleri toryuma maruz kalmaktan ve buna bağlı sağlık risklerinden korumak için uygun havalandırma, izleme ve radyolojik koruma protokolleri en önemli başlıklar olarak karşımıza çıkmaktadır.

- Toryumun bulunduğu alanlarda radyasyon seviyelerini ölçmek ve izlemek için dozimetrelere ve radyasyon dedektörleri gibi radyasyon izleme cihazları kullanılmalıdır. Ayrıca, bu yakıtta maruziyetten kaynaklanan iç dozu değerlendirmek için dışkı örneklerinde toryum analizinin önemi vurgulanmaktadır (Edwards et al., 2013).

- Toryum maruziyetinden korunma yöntemleri arasında toryum içeren toz hava konsantrasyonlarının yüksek olduğu işyerlerinde havalandırmanın iyileştirilmesi (Edwards et al., 2013) ve Toryum akciğer yüklerinin izlenmesi gereklidir (Xing-an & Yong-e, 2008).
- Toryumla çalışan veya toryumun bulunduğu ortamlarda çalışan işçiler, radyoaktif parçacıkların ciltle temasını, solunmasını ve yutulmasını en aza indirmek için eldiven, maske, koruyucu giysi ve göz koruması dahil olmak üzere uygun KKD giyilmelidir.
- Toryuma mesleki maruziyet potansiyelini en aza indirmek için çalışma prosedürleri, eğitim programları ve maruziyet sınırları gibi idari kontroller oluşturulmalıdır.

1.3.3. Radyum

1.3.3.1. Radyumun Kimyasal Özellikleri ve Uygulama Alanları

Radyum, Ra sembolüne ve 88 atom numarasına sahip kimyasal bir elementtir. Toprak alkali metal grubunun bir üyesidir ve yüksek derecede radyoaktiftir. Radyum, 1898 yılında Marie ve Pierre Curie tarafından uranyumun bozunma ürünü olarak keşfedilmiştir (Mould, 1998). Radyum, yaklaşık 1.600 yıllık yarı ömrü ile oldukça radyoaktiftir (Aniebone et al., 2020). İki proton ve iki nötrondan oluşan helyum çekirdekleri olan alfa parçacıkları yayarak bozunur. Radyum [Rn] $7s^2$ elektron konfigürasyonuna sahiptir. Bu, en dış enerji seviyesinde (7s orbitali) iki elektrona sahip olduğu anlamına gelir. Radyum, kalsiyum ve baryum gibi diğer toprak alkali metallere benzer şekilde oldukça reaktiftir. Bileşikler oluşturmak için hava, su ve diğer elementlerle kolayca reaksiyona girer. En dıştaki iki elektronunu kaybederek +2 iyonu oluşturduğu iyonik bileşikler oluşturur. Radyum, radyum klorür ($RaCl_2$), radyum bromür ($RaBr_2$) ve radyum iyodür (RaI_2) dahil olmak üzere çeşitli kimyasal bileşikler oluşturur (Lew, 2009). Bu bileşikler oldukça radyoaktiftir ve tıbbi tedavilerde kullanılır. Radyum-226 (Ra-226) radyumun en kararlı ve bol bulunan izotopudur. Uranyum-238'in bozunma ürünü olarak oluşur. Radyumun kullanım alanı bulan diğer izotoplarına Radyum-223 (Ra-223), Radyum-224 (Ra-224), Radyum-225 (Ra-225) ve Radyum-228 (Ra-228) örnek verilebilir. Bu izotopların hepsi toryumun ve uranyumun bozunma ürünleri olarak karşımıza çıkar.

Radyum uzun yıllardır tıpta, özellikle de kanser tedavisinde kullanılmaktadır. Radyumun radyoaktif özellikleri onu kanser hücrelerini yok etmek ve tümörleri küçültmek için yararlı kılmaktadır. Radyumun radyoaktif bir izotopu olan

Radyum-223, kemiklere yayılmış prostat kanserini tedavi etmek için hedefe yönelik alfa terapisinde kullanılır (Poeppel et al., 2018). Aynı zamanda radyum çevresel izleyici ve kimya alanında kullanım bulmaktadır. Radyum, çevresel sistemlerde radyoaktif maddelerin göçünü incelemek için çevresel izlemede bir izleyici olarak kullanılır. Mineral ve su kaynaklarında doğal olarak oluşan radyum izotoplarını izleyerek, kaynak konumunu, kalma süresini ve çevredeki radyonüklidlerin konsantrasyonlarını belirlemek mümkündür (Iyengar, 1990). Radyum, analitik kimyada diğer elementlerin ve bileşiklerin varlığını ve konsantrasyonunu belirlemek için kullanılır. Örneğin, radyum-226 mineral örneklerinde uranyum ve toryum analizinde kullanılır (Roessler et al., 1979). Radyumun endüstriyel uygulamalarında da saatlerde ve alet kadranlarında kullanılan ışıklı boyalar da kullanılmıştır (Moghissi, 1975). Ancak, radyuma maruz kalma ile ilişkili sağlık riskleri nedeniyle bu uygulamalarda radyum kullanımı büyük ölçüde durdurulmuştur.

1.3.3.2. Radyumun GBF bilgileri

Radyum için bir GBF'de bulunan tipik bilgiler Tablo 3'de özetlenmiştir

Tablo 3. Radyum metaline ait GBF bilgileri

Tehlike Sınıflandırması					
OSHA tehlikeleri: Solunduğunda, yutulduğunda, cilt tarafından emildiğinde tahriş edicidir, kansere neden olabilir.			Hedef organlar: Kan, kemik, kemik iliği, üreme sistemi.		
GHS (Küresel Uyumlaştırılmış Sınıflandırma ve Kimyasalların Etiketlenmesi Sistemi) Sınıflandırması					
Ciddi Göz Hasarı/Tahrişi (Kategori 1)			Cilt Aşınması/Tahrişi (Kategori 1B)		
Tehlike beyan(lar)					
H314 Ciddi cilt yanıklarına ve göz hasarına neden olur					
Önem beyan(lar)					
P264 Eleçlemeden sonra ellerinizi iyice yıkayın.	P260 Tozunu/dumanı/gazını/sisini/buharını solumayın.	P280 Koruyucu eldiven/kıyafet kullanın.	P305+P330+P331 Su ile birkaç dakika dikkatlice durulayın	P301+ P330+ P331 Ağzınızı çalkalayın. Kusturmaya çalışmayın	P303+ P361+ P353 Kirlenmiş tüm giysilerinizi derhal çıkarın
İlk Yardım Tedbirleri					
Soluma: Temiz havaya çıkarın. oksijen verin	Yutma: Kişinin bilinci yerindeyse ağzını suyla yıkayın.	Gözlerle temas: 15 dk saf su ile yıkayın.	Ciltle temas: Cildi derhal sabun ve bol miktarda su ile yıkayın		
Maruz Kalma Sınırları					
ALIng: 2 µCi or 74 kBq			ALInh: 0.6 µCi or 22.2 kBq		
Daha detaylı bilgi için: https://tsapps.nist.gov/srmext/msds/4969-MSDS.pdf					

1.3.3.3. Radyumun Sağlık Üzerine Etkileri

Radyumun yüksek derecede radyoaktif bir element olduğunu ve dikkatli kullanılması gerektiğini unutmamak önemlidir. Radyuma maruz kalmak, kanser ve radyasyonla ilgili diğer hastalıklar da dahil olmak üzere ciddi sağlık risklerine yol açabilir. Radyumun kemik dokusunda birikerek kemik hücrelerine zarar verebileceği ve özellikle osteosarkom olmak üzere kemik kanserine, kafatasında bulunan sinüslerde ve mastoid hava hücrelerinde kanser riskine yol açabileceği bilinmektedir (Stebbing, 2001). Aynı zamanda yüksek düzeyde radyum maruziyeti kemik dokusunun zayıflamasına neden olmakta ve kırık riskinin artmasına yol açabilmektedir. Radyuma maruz kalma lösemi ve tiroid kanseri riskinin artışıyla ilişkilendirilmiştir (Stebbing, 2001), ancak bu hastalıkların radyumun kendisinden ziyade radyasyona maruz kalmanın yan etkileri olarak da göz önünde bulundurulması önemlidir. Yüksek düzeyde radyum maruziyeti doğurganlığın bozulması ve diğer üreme etkileriyle ilişkilendirilmiştir (Stebbing, 2001).

1.3.3.4. Radyumdan Korunma Yöntemleri

Radyuma maruz kalmanın, kirlenmiş toprak, su ve hava dahil olmak üzere çeşitli kaynaklar yoluyla gerçekleşebileceğini unutmamak önemlidir. Buna ek olarak, radyum çimento ve boya gibi yapı malzemelerinde bulunabilir ve bu da soluma veya yutma yoluyla maruziyete yol açabilir. Radyuma maruz kalmayla ilişkili sağlık risklerini en aza indirmek için radyum kaynaklarına maruz kalmayı sınırlandırmak ve radyoaktif maddelerle çalışırken uygun güvenlik kurallarına uymak önemlidir. Radyum maruziyetine karşı korunmak için bazı temel önlemler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Radyumun yüksek derecede radyoaktif olduğunu ve uygun koruyucu önlemler alınmadan kullanılmasının tehlikeli olduğu unutmamalıdır. Sadece eğitimli profesyoneller tarafından kontrollü bir ortamda kullanılmalıdır.
- Radyum kontaminasyonunun yayılmasını önlemek ve personelin maruziyetini en aza indirmek için çeker ocaklar, eldiven kutuları ve muhafaza cihazları gibi mühendislik kontrollerini kullanılmalıdır.
- Radyum kaynaklarından gelen radyasyonu azaltmak için kurşun veya beton gibi koruyucu malzemeler kullanılmalıdır.
- Genel radyasyon maruziyetini azaltmak için radyum kaynaklarıyla çalışma süresini sınırlandırılmalıdır. Maruziyeti dağıtmak ve bireysel dozları en aza indirmek için çalışanlar arasında görev dağılımı yapılmalıdır.

- Radyum seviyelerinin düzenli olarak izlenmesi gereklidir. Bu, toprak, su ve havadaki radyum seviyelerinin izlenmesinin yanı sıra işyerindeki radyum seviyelerinin izlenmesini de içerebilir.
- Radyum kaynaklarının güvenli bir şekilde kullanılmalı ve bertaraf edilmelidir. Bu, radyumla kirlenmiş malzemelerin uygun şekilde taşınması ve bertaraf edilmesini de içerir.
- Radyum kontaminasyonunun yayılmasını önlemek için kontaminasyon kontrol önlemleri uygulanmalıdır. Bu, uygun maddelerle yüzey temizliği gibi dekontaminasyon prosedürlerini ve radyoaktif partikülleri yakalamayı sağlayan cihazların kullanımını içerebilir.
- Dökülme, sızıntı veya personel kontaminasyonu prosedürleri de dahil olmak üzere radyum içeren olaylar için acil müdahale planları geliştirilmeli ve uygulanmalıdır. Çalışanların acil durum protokollerine aşina olmalarını ve bir kaza durumunda nasıl etkili bir şekilde müdahale edeceklerini bildiklerinden emin olunmalıdır.

1.4. Yapay Radyoaktif Elementler

1.4.1. Teknesyum

1.4.1.1. Teknesyumun Kimyasal Özellikleri ve Uygulama Alanları

Teknesyum (Tc), atom numarası 43 olan kimyasal bir elementtir ve geçiş metallerinin en hafifidir. Yerkabuğunda doğal olarak bulunmayan sentetik bir elementtir ve ilk olarak 1937 yılında yapay olarak üretilmiştir (Icenhower et al., 2010). Teknesyum radyoaktif bir elementtir ve radyoaktif bozunma sırasında beta parçacıkları ve gama ışınları yayar (Perrier & Segrè, 1947). Teknesyumun elektron konfigürasyonu $[Kr] 4d^5 5s^2$ şeklindedir. Bu, en dış enerji seviyesinde (4d orbitali) beş elektrona ve bir sonraki en dış enerji seviyesinde (5s orbitali) iki elektrona sahip olduğu anlamına gelir. Teknesyum +7, +5, +4, +3, +2 ve -1 dahil olmak üzere çeşitli oksidasyon basamaklarına sahiptir. Teknesyumun en kararlı oksidasyon hali, perteknetat iyonunda (TcO_4^-) bulunan +7'dir (Kusumkar et al., 2021). Teknesyum kimyasal davranış açısından renyum ve manganez gibi diğer geçiş metallerine benzer. Pozitif bir iyon oluşturmak için en dış elektronlarını kaybettiği iyonik bileşikler oluşturur. Teknesyum, teknesyum dioksit (TcO_2), teknesyum trioksit (TcO_3) ve teknesyum heptaoksit (Tc_2O_7) dahil olmak üzere çeşitli kimyasal bileşikler oluşturur. Teknesyumun, en kararlı izotopu, 211.000 yıllık bir yarı ömre sahip olan teknesyum-99'dur. Teknesyum-99, nükleer reaktörlerde üretilen ve çeşitli hastalıkların teşhisi için tıbbi görüntüleme

kullanılan uzun ömürlü bir radyoaktif izotoptur (A Osso et al., 2012). Teknesyumun diğer izotopları arasında 20 saatlik bir yarı ömre sahip olan teknesyum-95 (Roy et al., 2003) ve 90 günlük bir yarı ömre sahip olan teknesyum-97 bulunur (Srivastava & Richards, 2019). Bu izotopların çoğu nükleer reaksiyonlarda veya daha ağır elementleri içeren bozunma zincirlerinde ara ürün olarak üretilir. Ancak bunlardan sadece birkaçının pratik uygulamaları vardır ve Teknesyum-99m, uygun bozunma özellikleri nedeniyle nükleer tıpta tanısai görüntüleme amacıyla en yaygın kullanılanıdır.

1.4.1.2. Teknesyumun GBF bilgileri

Teknesyum için bir GBF'de bulunan tipik bilgiler Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Teknesyum-99'a ait GBF bilgileri

Tehlike Sınıflandırması				
OSHA tehlikeleri: Radyoaktif		Hedef organlar: Embriyo/fetus		

↓

GHS (Küresel Uyumlaştırılmış Sınıflandırma ve Kimyasalların Etiketlenmesi Sistemi) Sınıflandırması		
Ciddi Göz Hasarı/Tahrişi (Kategori 1)	Cilt Aşınması/Tahrişi (Kategori 1B)	Gebelikte (Kategori C)

↓

Tehlike beyan(lar)ı
H305, Yutulması ve solunum yollarına girmesi halinde zararlı olabilir H313, Cilt ile teması halinde zararlı olabilir. H317, Alerjik cilt reaksiyonuna neden olabilir.

↓

Önlem beyan(lar)ı				
Yutmaktan, solumaktan, cilt ve göz temasından kaçının.	Malzemeyi kurşun bir kaptaki saklayın	P280 Koruyucu eldiven/ kıyafet kullanın.	Doğrudan kullanımdan kaçının.	Elleçleme sırasında göz koruması kullanın

↓

İlk Yardım Tedbirleri			
Göz teması Derhal bol su ile yıkayın	Soluma Kişiyi temiz havaya çıkarın	Cilt teması Kirlenmiş cildi bol su ile yıkayın	Yutma Ağzınızı suyla yıkayın

↓

Maruz Kalma Sınırları	
ALIng: 80000 µCi	ALInh: 20000 µCi

↓

Daha detaylı bilgi için: https://www.bracco.com/sites/default/files/2023-04/choletec-sds-1-jan-2023.pdf
--

1.4.1.3. Teknesyumun Sağlık Üzerine Etkileri

Teknesyum radyoaktif bir elementtir ve izotoplarına maruz kalmak potansiyel sağlık riskleri oluşturabilir. Teknesyum izotoplarına maruz kalmayla ilişkili sağlık riskleri, izotopun türü, maruz kalma yolu, maruz kalma süresi ve maruz kalma miktarı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Arama sonuçlarına göre, teknesyum izotoplarına maruz kalmayla ilişkili belirli sağlık riskleri hakkında sınırlı bilgi mevcuttur. Bununla birlikte, radyoaktif maddelere maruz kalmanın kanser ve diğer sağlık sorunları riskini artırabileceği bilinmektedir. Örneğin, Irak'ın Kürdistan bölgesindeki Erbil şehrinde yaygın olarak kullanılan yapı malzemeleri nedeniyle doğal radyoaktivite ve radyolojik risk değerlendirmesi üzerine yapılan bir çalışmada, yapı malzemelerindeki radyum ve diğer radyoaktif maddelere maruz kalmanın kanser ve diğer sağlık sorunları riskini artırabileceği bulunmuştur (Othman et al., 2022). Benzer şekilde, radyum izotoplarının kimyası ve çevresel izleme, analitik ve tıbbi kullanımlara uygulanması üzerine yapılan bir incelemede, alfa parçacık bozunmasının in vivo olarak oldukça zarar verici olduğu ve yeni, terapötik radyofarmasötik ilaçlar hazırlamak için alfa yayan radyonüklidlerin kullanılmasına olan ilginin arttığı belirtilmiştir (Gott et al., 2016).

1.4.1.4. Teknesyumdan Korunma Yöntemleri

Teknesyum elementi için koruma yöntemleri, radyonüklidlere mesleki iç maruziyeti değerlendirmek için uygun izleme yöntemlerinin ve doz katsayılarının kullanılmasının yanı sıra biyokinetik ve dozimetrik modellerin kullanılmasını içerir. Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP) etkin doz hesaplamasını etkileyen değişiklikler getirmiş ve izleme programlarının tasarımı ve mesleki iç dozların geriye dönük değerlendirilmesi için yeni biyokinetik modeller, doz katsayıları, izleme yöntemleri ve biyoassay verileri sağlamıştır (Meléndez-Alafort et al., 2019). Radyoaktif maddeleri dikkatli bir şekilde kullanmak ve maruziyeti en aza indirmek için güvenlik kurallarına uymak önemlidir. Bu, koruyucu giysi, eldiven ve göz koruması giymenin yanı sıra radyasyona maruz kalmayı sınırlamak için zırhlama kullanmayı içermelidir.

1.4.2. Plütonyum

1.4.2.1. Plütonyumun Kimyasal Özellikleri ve Uygulama Alanları

Plütonyum, atom numarası 94 olan sentetik bir radyoaktif elementtir ve periyodik tablodaki en ağır elementlerden biridir. Kendisini diğer elementler arasında benzersiz kılan çok çeşitli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip radyoaktif

bir metaldir. Plütonyumun en dikkate değer fiziksel özelliklerinden biri, bir elementin farklı kristal yapılarıya sahip farklı formlarda veya fazlarda var olma yeteneğini ifade eden allotropisidir (Lord, 1963). Plütonyum, oda sıcaklığı ile erime noktası olan 640 santigrat derece arasında en az altı allotropik modifikasyona sahiptir. Bu allotroplar farklı yoğunluklara, erime noktalarına ve basit bir yüz merkezli kübik yapıdan karmaşık bir gövde merkezli kübik yapıya kadar değişen kristal yapılarıya sahiptir. Alfa-plutonyumun özgül ısısı da alışılmadık derecede yüksektir, termal iletkenliği ise metalik bir element için son derece düşüktür (Ball et al., 1960). Plütonyum ayrıca oldukça reaktiftir ve oksijen, nitrojen ve karbon gibi diğer elementlerle çeşitli bileşikler oluşturabilir. Plütonyum oksit (PuO_2), plütonyumun en önemli bileşiklerinden biridir ve nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılır. Son çalışmalar, çevresel göç şemalarında ve gelişmiş nükleer enerji sistemlerinde plütonyumun davranışına dair içgörüler sağlayabilecek PuO_2 nanopartiküllerinin sentezine ve çok ölçekli özelliklerine odaklanmıştır (Virot et al., 2022).

Plütonyum izotopları arasında en önemlileri Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242 ve Pu-244 bulunur. Bu izotopların çekirdeklerinde farklı sayıda nötron bulunur ve bu da kararlılıklarında, radyoaktivitelerinde ve özelliklerinde değişikliklere yol açar. Pu-239, nükleer reaktörler ve silahlardaki önemi nedeniyle plütonyumun en iyi bilinen izotoplarından biridir (Mustafa & Amin, 2024). Pu-238, yüksek ısı çıkışı nedeniyle uzay görevleri için radyoizotop termoelektrik jeneratörlerinde (RTG'ler) kullanılır (Jiang, 2013). Pu-240, nükleer reaktörlerin performansını etkileyebilen yüksek spontane fisyon oranı nedeniyle nükleer yakıt döngülerinde önemli bir izotoptur (Kim & Taiwo, 2010). Pu-241 radyoizotop termoelektrik jeneratörlerinde kullanılır ve nükleer silahlarda uygulamaları vardır. Pu-242, 375.000 yıl yarı ömrü ile diğer izotoplara kıyasla daha uzun yarılanma ömrüne sahiptir. Bu izotoplar enerji üretimi, uzay araştırmaları ve nükleer teknolojiler de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda önemli roller oynamaktadır. Ayrıca plütonyumun iki izotopu da (Pu-239 ve Pu-244) doğal kökenli olarak bulunabilir. Doğal Pu-239, doğada uranyum cevheri kütlelerinde meydana gelen nükleer süreçlerle üretilir ve Pu-244'ün çok küçük izleri, ilkel yıldız nükleosentezinin kalıntıları olarak doğada mevcuttur (Katz, 2007). Plütonyum elementi nükleer endüstride nükleer silah, nükleer yakıt, radyoizotop termoelektrik jeneratörleri ve nükleer reaktörler için grafit üretimi de dahil olmak üzere çeşitli uygulamaları vardır. Ayrıca nükleer atık depolarının uzun vadeli performans değerlendirmesinde de önemli bir rol oynamaktadır (Kurniawan et al., 2022).

1.4.2.2. Plütonyumun GBF bilgileri

Plütonyum için bir GBF'de bulunan tipik bilgiler Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 5. Plütonyuma ait GBF bilgileri

Tehlike Sınıflandırması			
OSHA tehlikeleri: Solunum yoluyla toksiktir. Yanıcı katı.		Hedef organlar: Böbrekler	

↓

GHS (Küresel Uyumlaştırılmış Sınıflandırma ve Kimyasalların Etiketlenmesi Sistemi) Sınıflandırması			
Kansere neden olan bir madde (kanserojen) veya zamanla hasara neden olan (kronik veya uzun vadeli sağlık tehlikesi) solunum, üreme ve organ toksisitesine sahip bir madde. Suya veya havaya maruz kaldığında kendiliğinden tutuşabilen (piroforik) veya yanıcı gaz çıkaran yanıcı madde.			

↓

Tehlike beyan(lar)ı		
Uzun süreli veya tekrarlı maruz kalma sonucu böbreklerde hasara neden olabilir (Kategori 1)	Toz veya toz, ısıya veya alevde maruz kaldığında yanıcı veya patlayıcıdır (Kategori 1)	Hava ve neme maruz kaldığında piroforik ürünler oluşturabilir (Kategori 1)

↓

Önem beyan(lar)ı			
Bu ürünü kullanırken yemek yemeyin, içmeyin veya sigara içmeyin	Tozu solumayın	Isıdan/kıvılcımdan/açık alevden/sıcak yüzeylerden uzak tutun	Maruz kalırsa tıbbi yardım alın

↓

Diğer Tehlikeler			
Radyoaktif			

↓

İlk Yardım Tedbirleri			
Solunma: Temiz hava alan kısıtlı bir alana çıkarın.	Yutma: ağız çalkalanmalı, çalkalama suyu yutulmamalı.	Gözlerle temas: Göz kapaklarını kaldırarak (yaklaşık 15 dk) iyice yıkayın.	Ciltle temas: Giysileri ve ayakkabıları derhal çıkarın.

↓

Maruz Kalma Sınırları	
ALI _{inh} : 0.006 µCi veya 0.222 kBq	ALI _{ing} : 0.8 µCi veya 29.6 kBq

↓

Daha detaylı bilgi için: https://www.energy.gov/nnsa/articles/sds-plutonium-metal
--

1.4.2.3. Plütonyumun Sağlık Üzerine Etkileri

Plütonyum, yutulması veya solunması halinde ciddi sağlık etkilerine yol açabilen oldukça zehirli ve radyoaktif bir maddedir. Plütonyuma maruz kalmayla ilişkili ana risk akciğer kanseridir; plütonyum alfa parçacıklarına maruz kalmayla ilişkili risk, akciğerlere emilen aynı doz için harici gama maruziyetiyle ilişkili riskten yaklaşık 15-22 kat daha fazladır (Parinov et al., 2023). Kanser riskine ek olarak, özellikle karaciğeri ve böbrekleri etkileyen sağlık etkileri olabilir ve bu etkiler vücuda büyük miktarlarda plütonyum alındığında ortaya çıkabilir (Scott & Peterson, 2003). Yapılan çalışmalarda, artan plütonyum atılımının kardiyovasküler hastalıklar ve karaciğeri etkileyen diğer hastalıklar da dahil olmak üzere daha ciddi kronik hastalıklarla ilişkili olduğu bulunmuştur. Plütonyuma maruz kalmanın sağlık üzerindeki etkilerinin maruz kalma yoluna, maruz kalma miktarına ve süresine ve yaş, cinsiyet ve genel sağlık durumu gibi bireysel faktörlere bağlı olarak değişebileceğini unutmamak önemlidir. Bu nedenle, plütonyuma maruz kalmayı önlemek veya en aza indirmek için uygun önlemlerin alınması ve maruz kalan bireylerde olası sağlık etkilerinin izlenmesi ve yönetilmesi esastır.

1.4.2.4. Plütonyumdan Korunma Yöntemleri

Plütonyum, solunduğunda veya yutulduğunda insan sağlığına önemli ölçüde zarar verebilecek oldukça zehirli ve radyoaktif bir elementtir. Bu nedenle, plütonyuma maruz kalmayı önlemek için etkili koruma yöntemlerine sahip olmak çok önemlidir. Plütonyuma maruz kalmaya karşı korunmanın birincil yöntemlerinden biri, solunum maskeleri, eldivenler ve koruyucu giysiler gibi kişisel koruyucu ekipmanların (KKE) kullanılmasıdır. Özellikle solunum maskeleri, havadaki plütonyum partiküllerine maruz kalabilecek çalışanların korunması için gereklidir. Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü (NIOSH), N95 veya P100 solunum maskeleri gibi plütonyum partiküllerinin bulunduğu ortamlarda kullanım için onaylanmış solunum maskelerinin kullanılmasını önermektedir (Özbakir et al., 2017; Samuels & Leggett, 2023). Plütonyuma maruz kalmaya karşı korunmanın bir diğer önemli yöntemi de uygun taşıma ve depolama prosedürlerinin kullanılmasıdır. Plütonyum, havadan bulaşma riskini en aza indirmek için, kontrollü bir ortamda kullanılmalıdır. Ayrıca, plütonyum radyasyonuna maruz kalmayı önlemek için uygun radyasyon kalkını ile güvenli bir yerde saklanmalıdır (Broggio et al., 2015). Plütonyum içeren bir dökülme veya kaza durumunda, maruz kalmayı en aza indirmek için bir müdahale planının olması çok önemlidir. Bu, dökülmeyi kontrol altına almak için emici malzemelerin kullanımının yanı sıra plütonyum seviyelerini

tespit etmek ve ölçmek için özel ekipman kullanımını da içerebilir. Buna ek olarak, temizliğe katılan işçiler uygun dekontaminasyon prosedürleri ve uygun KKD kullanımı konusunda eğitilmelidir (Ilin et al., 2022). Bu koruma yöntemlerine ek olarak, çalışanların plütonyuma maruz kalma seviyelerini izlemek ve değerlendirmek önemlidir. Bu, vücuttaki plütonyum varlığını tespit etmek için idrar testleri gibi biyolojik testler kullanılarak yapılabilir. Ayrıca, akciğerlerde tutulan aktiviteyi değerlendirmek için in vivo akciğer sayımı kullanılabilir (Lamart et al., 2019). Plütonyumun fizikokimyasal formunun biyolojik dağılımını ve toksisitesini etkileyebileceğine dikkat etmek de önemlidir. Örneğin, plütonyumun çözünür formları vücuda daha kolay emilebilir ve çözünmeyen formlara göre daha fazla zarara neden olabilir. Bu nedenle, koruma yöntemleri geliştirilirken plütonyumun fizikokimyasal formunun dikkate alınması önemlidir (Morishita et al., 2018).

1.4.3. Amerikyum

1.4.3.1. Amerikyumun Kimyasal Özellikleri ve Uygulama Alanları

Amerikyum (Am), atom numarası 95 olan sentetik bir kimyasal elementtir ve periyodik tablodaki aktinid serisinin bir parçasıdır. Doğal olarak oluşmayan radyoaktif bir metaldir ve plütonyum-241'in yüksek enerjili alfa parçacıklarıyla bombardıman edilmesiyle üretilir Amerikyumun kimyasal özellikleri diğer aktinidler ve lantanidlerinkine benzer, ancak bazı benzersiz özelliklere sahiptir. Örneğin, benzersiz kristal yapısı nedeniyle amerikyumun atomik hacmi, komşu elementler olan plütonyum ve küriyumdan önemli ölçüde daha büyüktür. Bu anormallik, kristal kafesin oluşumuna katkıda bulunan 5f elektronlarının varlığına atfedilmiştir (Johansson, 2000).

Amerikyum, gümüşü beyaz bir görünüme sahiptir ve özellikle sıvı haldeyken oldukça reaktiftir. Amerikyum oksijen, halojenler, sülfür ve diğer ametallerle kolayca bileşikler oluşturur. Ayrıca plütonyum ve küriyum gibi diğer metallerle de alaşımlar oluşturur. Amerikyumun en dikkate değer kimyasal özelliklerinden biri, +3, +4 ve +5 dahil olmak üzere çoklu oksidasyon durumlarında var olma yeteneğidir. +3 durumu en kararlı olanıdır, +4 ve +5 durumları ise daha az yaygın ve daha reaktiftir. Amerikyumun farklı oksidasyon durumları, farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip çeşitli bileşiklerin oluşmasına yol açabilir amerikyum, kimyasal özelliklerinin yanı sıra radyoaktif özellikleriyle de bilinir. Amerikyumun Am-239, Am-240, Am-241, Am-242 ve Am-243 gibi çeşitli izotopları vardır. Bu izotoplar birkaç saat ile birkaç yüz yıl arasında değişen farklı yarı ömürlere sahiptir (Higgins, 1952). 432,6 yıllık yarı ömrü ile uzun ömürlü bir alfa yayıcı olan

Am-241, en yaygın olarak çalışılan amerikyum izotopudur. Yaklaşık 432,2 yıl gibi uzun bir yarılanma ömrüne sahiptir, bu da onu duman dedektörleri ve araştırma ve endüstriyel amaçlar için radyoaktif kaynaklar gibi çeşitli uygulamalarda yararlı kılar.

Amerikyum elementinin endüstrideki uygulamaları öncelikle radyoaktif özellikleriyle ilgilidir. nemli bir uygulama, elementin hava partiküllerini iyonize etmek için bir radyasyon kaynağı olarak kullanıldığı ve dedektörün dumanı algılamasını sağlayan duman dedektörleridir (Chmielewski et al., 2019). Bu uygulama, konutlarda ve ticari binalarda yangın güvenliği için çok önemlidir. Ayrıca amerikyum, ölçümler için bir iyonlaştırıcı radyasyon kaynağı gerektiren belirli endüstriyel gösterge ve cihaz türlerinde kullanılır. Bu cihazlar imalat, madencilik ve nükleer enerji santralleri gibi endüstrilerde bulunabilir (Hennig et al.). Ayrıca, uzun yarı ömrü ve kararlı izotopları nedeniyle, amerikyum araştırma ve endüstriyel ortamlarda çeşitli radyasyon algılama cihazları için bir kalibrasyon kaynağı olarak kullanılır (Williamson & Preston, 2020). Bu, radyasyonla ilgili süreçlerde doğru ölçümler ve kalite kontrolü sağlar.

1.4.3.2. Amerikyumun GBF bilgileri

Amerikyum için bir GBF'de bulunan tipik bilgiler Tablo 4'te özetlenmiştir

Tablo 6. Amerikyuma ait GBF bilgileri

Tehlike Sınıflandırması			
OSHA tehlikeleri: Radyolojik Tehlike		Hedef organlar: Kemik yüzeyi	

↓

GHS (Küresel Uyumlaştırılmış Sınıflandırma ve Kimyasalların Etiketlenmesi Sistemi) Sınıflandırması		
Akut Toksikite	Germ Hücrenin Mutajenliği	Kanserojenlik

↓

Tehlike beyan(lar)ı		
A – seviye (yüksek tehlike): > 10 μCi	B – seviye (orta derecede tehlike): > 0,2 μCi , < 10 μCi	C – seviye (düşük tehlike): 0,2 μCi 'ye kadar

↓

Önem beyan(lar)ı			
eldiven, laboratuvar önlüğü ve koruyucu gözlük kullanın.	Tozu solumayın.	tozları yakalamak için çeker ocakta çalışın.	Eldivenleri sık sık değiştirin.

↓

Diğer Tehlikeler
Radyoaktif

↓

İlk Yardım Tedbirleri			
Solunma: Temiz hava alan kısıtlı bir alana çıkarın.	Yutma: ağız çalkalanmalı, çalkalama suyu yutulmamalı.	Gözlerle temas: Göz kapaklarını kaldırarak (yaklaşık 15 dk) iyice yıkayın.	Ciltle temas: Giysileri ve ayakkabıları derhal çıkarın.

↓

Maruz Kalma Sınırları	
ALI_{inh} : 0.006 μCi veya 0.222 kBq	ALI_{ing} : 0.8 μCi veya 29.6 kBq

↓

Daha detaylı bilgi için: https://ehs.stanford.edu/wp-content/uploads/Am-241-RSDS.pdf ; https://www.rapiscansystems.com/assets/RMA/04109094%20MSDS%20AMERICIUM-241.pdf

1.4.3.3. Amerikyumun Sağlık Üzerine Etkileri

Amerikyum maruziyetinin sağlık üzerindeki etkileri plütonyum maruziyeti kadar kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir. Bununla birlikte, amerikyumun bir alfa yayıcı olduğu ve solunduğunda veya yutulduğunda hem akciğer kanseri hem de kemik kanserine neden olabileceği bilinmektedir (Harley, 1980). Amerikyumdan kaynaklanan radyasyon, olumsuz sağlık etkilerinin birincil nedenidir ve vücuda girdikten sonra, amerikyum kemiklerde yoğunlaşır ve burada uzun süre kalır. Kemik hücrelerinin genetik materyaline zarar verebilir ve özellikle nispeten yüksek düzeyde amerikyum içeren kemik bölgelerinde kansere yakalanma olasılığını artırabilir (Fabritius, 2017). Amerikyum tarafından yayılan radyasyon, özellikle elementin yutulması veya solunması halinde iç organlara zarar verebilir. Kronik olarak amerikyuma maruz kalmak, genetik mutasyon riskinin artması ve diğer ciddi sağlık sorunları da dahil olmak üzere uzun vadeli sağlık sonuçlarına yol açabilir (Nénot & Stather, 2013).

1.4.3.4. Amerikyumdan Korunma Yöntemleri

Radyoaktif bir element olan Amerikyuma maruz kalmak, radyoaktivitesi nedeniyle ciddi sağlık etkilerine yol açabilir. Amerikyuma maruz kalma öncelikle vücudu sindirim, soluma veya deri yoluyla emilim yoluyla etkiler. Rutin izleme programlarının uygulanması, amerikyum gibi radyonüklidlere anormal veya beklenmedik maruziyetleri tespit etmek için çok önemlidir. Bu programlar, çalışanların doz alımlarının değerlendirilmesine ve operasyonel ve düzenleyici kontrollere uygunluğun sağlanmasına yardımcı olur (Roberts & Bull, 2020). Kontaminasyon ve maruziyetin önlenmesi için amerikyumun uygun şekilde muhafaza edilmesi ve taşınması esastır. Bu, uygun koruyucu ekipmanların kullanılmasını ve maruz kalma riskini en aza indirmek için sıkı güvenlik prosedürlerinin izlenmesini içerir. Solunan amerikyum bileşiklerinin emilim kinetiğini karakterize ederek birleştirilmiş amerikyumun dozimetrisini iyileştirmek daha iyi radyasyon korumasına katkıda bulunabilir. Solunan amerikyum bileşiklerinin emilim kinetiğini değerlendirmek için dozimetri yöntemlerinin geliştirilmesi, dahili maruziyet risklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayabilir ve potansiyel maruziyet olaylarının daha etkili bir şekilde yönetilmesine yardımcı olabilir (Lamart et al., 2019).

Bu güvenlik önlemlerini takip ederek, amerikyumla çalışan veya potansiyel olarak amerikyuma maruz kalan bireyler, radyoaktivitesiyle ilişkili riskleri azaltabilir ve kendilerini zararlı sağlık etkilerinden koruyabilirler.

1.5. Sonuç ve Öneriler

Radyoaktif elementlerle çalışmak, çalışanların ve çevrenin sağlık risklerini en aza indirmek için güvenlik protokollerine sıkı sıkıya bağlı kalınmasını gerektirir.

Radyoaktif elementlerle çalışanlar, radyasyona maruz kalma riski altındadır; bu da radyasyon hastalığı, radyasyon yanıkları, kanser ve genetik hasar gibi akut ve kronik sağlık etkilerine yol açabilir. Bu sağlık risklerinin ciddiyeti doz, maruz kalma süresi ve maruz kalma yolu gibi faktörlere bağlıdır. Aynı zamanda radyoaktif elementler, uygun muhafaza önlemlerine uyulmaması halinde yüzeyleri, ekipmanı ve çevreyi kirletebilir. Kontaminasyon çalışanlar ve halk için sağlık riskleri oluşturabilir ve toprağı, suyu ve vahşi yaşamı etkileyerek çevresel kirlenmeye yol açabilir. Bu temel nedenlerden dolayı radyoaktif elementlerle çalışırken yasalarla ve yönetmeliklerle belirlenen güvenlik prosedürlerine ve korunma programlarına uymak önemlidir. Rutin izleme, her türlü mesleki radyasyondan korunma programının temel bir unsurudur. Uygulamadaki korumanın etkinliğinin belirlenmesine yardımcı olur, normal çalışma koşulları hakkında bilgi sağlar ve anormal veya beklenmedik maruziyetleri tespit eder. Radyasyon izleme, radyasyon dedektörleri, dozimetreler ve diğer izleme cihazlarının kullanımını içerebilir. İkinci temel unsur, uygun şekilde muhafaza etme ve taşınmadır ki kontaminasyonu ve bundan kaynaklı maruziyeti önlemek için çok önemli parametrelerdir. Bu, uygun koruyucu ekipmanların kullanılmasını ve sıkı güvenlik prosedürlerinin izlenmesini içerir. Diğer önemli faktör acil durum hazırlığıdır. Dökülme, sızıntı veya personel kontaminasyonuna yönelik prosedürler de dahil olmak üzere radyoaktif unsurları içeren olaylar için acil müdahale planları geliştirmek ve uygulamak önemlidir. Radyoaktif elementlerle çalışan personele radyasyon güvenliği, uygun taşıma teknikleri, acil durum prosedürleri ve kişisel koruyucu ekipman (KKE) kullanımı hakkında talimatlar da dahil olmak üzere kapsamlı eğitim ve öğretim sağlamak, önemli unsurlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Akut radyasyon hasarı durumunda, mağdurları tedavi etmekle karşı karşıya kalan klinisyenler için tıbbi yönetim kılavuzlarının oluşturulması da çok önemlidir. Kuruluşlar bu tavsiyelere uyararak radyoaktif elementlerle çalışmanın getirdiğı riskleri en aza indirebilir ve çalışanların, halkın ve çevrenin güvenliğini sağlayabilirler.

Kaynaklar

- A Osso, J., F Catanoso, M., Barrio, G., P Brambilla, T., Teodoro, R., RBR Dias, C., & N Suzuki, K. (2012). Technetium-99m—New production and processing strategies to provide adequate levels for SPECT imaging. *Current Radiopharmaceuticals*, 5(3), 178-186.
- Abu-Jarad, F., & Aksoy, A. (2001). Alpha Auto-Radiography of Gas Lantern Mantles.
- Aniebone, A., Chukwu-Okeah, V., & Adegbe, G. (2020). Radionuclide Actions, Processes and Presence in Water and Sediments, a Review. *Int. J. Gr. Sediment Water*, 10, 559-571.
- Ball, J. G., Lee, J. A., Mardon, P. G., & Robertson, J. A. L. (1960). DETERMINATION OF SOME PHYSICAL PROPERTIES OF PLUTONIUM METAL.
- Bersimbaev, R. I., & Bulgakova, O. (2015). The health effects of radon and uranium on the population of Kazakhstan. *Genes Environ*, 37, 18.
- Broggio, D., Lechaftois, X., & Franck, D. (2015). Uncertainty induced by chest wall thickness assessment methods on lung activity estimation for plutonium and americium: a large population-based study. *J Radiol Prot*, 35(1), 63-73.
- Brugge, D., de Lemos, J. L., & Oldmixon, B. (2005). Exposure pathways and health effects associated with chemical and radiological toxicity of natural uranium: a review. *Rev Environ Health*, 20(3), 177-193.
- Busby, C. (2010). The Health Effects of Exposure to Uranium and Uranium Weapons Fallout.
- Califano, S., & Califano, S. (2012). Radioactivity. *Pathways to Modern Chemical Physics*, 135-166.
- Canbula, D. (2020). Döteron ile İndüklenmiş Uranyum İzotoplarının Tesir Kesiti Hesaplamaları.
- Chmielewski, A. G., Smoliński, T., & Rogowski, M. (2019). Radiotracers and Nucleonic Control Systems Applied in Industry—Polish Case. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 9(2), 27-66.
- Cunzeman, K., & Schubert, P. J. (2009). Survey of Ultra-High Temperature Materials for Applications Above 2000 K.
- Edwards, G. W. R., Priest, N. D., & Richardson, R. B. (2013). Inhalation radiotoxicity of irradiated thorium as a heavy water reactor fuel.
- Fabritius, A. J. (2017). The sequestration of americium and plutonium to bone: human environmental exposure and. *chemistry*, 274(40), 28514-28520.
- Gott, M., Steinbach, J., & Mamat, C. (2016). The Radiochemical and Radiopharmaceutical Applications of Radium. *Open Chemistry*, 14, 118 - 129.

- Gruppen, C., Rodgers, M., Gruppen, C., & Rodgers, M. (2016). *What are radioactivity and radiation?* Springer.
- Guan, H., & Piao, F. (2011). Maternal and fetal exposure to uranium in Dalian, China. *Acta Obstet Gynecol Scand*, 90(8), 924-925.
- Gurin, A. N., Chakrova, Y. T., Medvedeva, Z. V., & Soloninkina, S. G. (2022). Prospects For The Development Of Nuclear Medicine In The Republic Of Kazakhstan: Reactor Isotopes Of Rare Earth Elements For Therapy. *Nnc Rk Bulletin*.
- Hak, C. R. C., Januri, Z., Mustapha, I., & Mahat, S. (2022). Extraction of Thorium Oxide (ThO₂) from Malaysian Monazite through Alkali Digestion: Physical and Chemical Characterization Using X-Ray Analysis. *Key Engineering Materials*, 908, 509 - 514.
- Harley, N. H. (1980). Potential Health Effects of Man-Made Actinides Compared with Natural Radionuclides. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 27, 682-688.
- Hennig, C., Hennig, C., Funke, H., Reich, T., & Roßberg, A. Besides plutonium, the long-lived isotopes of americium and curium play a crucial role for long-term performance assessment of nuclear waste.
- Higgins. (1952). An Investigation Of The Isotopes Of Americium And Curium (Thesis).
- Hunter, S. R., & Budinger, A. B. (1991). Starting Processes and the Influence of the Radioactivity of Thorium on the Statistical Lag Time in Metal Halide Lamps.
- Icenhower, J. P., Qafoku, N. P., Zachara, J. M., & Martin, W. J. (2010). The biogeochemistry of technetium: a review of the behavior of an artificial element in the natural environment. *American Journal of Science*, 310(8), 721-752.
- Ilin, L. A., Samoilov, A. S., Tsovyanov, A. G., Shinkarev, S. M., Shandala, N. K., Gantsovsky, P. P., Karev, A. E., Kukhta, B., Simakov, A. V., Klochkov, V. N., Korenkov, I. P., Lyaginskaya, A. M., Parinov, O. V., Ivanov, V. K., Chekin, S. Y., Menyailo, A. N., Tumanov, K. A., Solomatin, V. M., & Izmestyev, K. (2022). Radiation-Hygienic Investigations of Experimental Production of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel at JSC SChC. Part 2: Doses and Risks. *Medical Radiology And Radiation Safety*.
- Iyengar, M. (1990). The natural distribution of radium. *The environmental behaviour of radium*, 1, 59-128.
- Jiang, M. (2013). An overview of radioisotope thermoelectric generators. *Introduction to Nuclear Energy PH241-Stanford University-Winter*.
- Johansson, B. (2000). The many states of americium. *Physics World*, 13, 26-27.
- Karabash, A. G. (1958). On Some Chemical Properties of Thorium And Uranium.

- Katz, J. J. (2007). *The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements (Volumes 1-5)* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- Kim, T., & Taiwo, T. (2010). *Fuel cycle analysis of once-through nuclear systems*.
- Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Singh, D., Avtar, R., Hwang, G. H., Setiadi, T., & Lo, W.-h. (2022). Technological solutions for long-term storage of partially used nuclear waste: A critical review. *Annals of Nuclear Energy*, *166*, 108736.
- Kusumkar, V. V., Galamboš, M., Viglašová, E., Daňo, M., & Šmelková, J. (2021). Ion-Imprinted Polymers: Synthesis, Characterization, and Adsorption of Radionuclides. *Materials*, *14*(5), 1083.
- Lamart, S., Van der Meeren, A., Grémy, O., Miccoli, L., Coudert, S., Dubois, S., Bibard, S., Serond, A. P., Angulo, J. F., & Griffiths, N. M. (2019). Americium biodistribution in rats after wound contamination with different physicochemical forms in the presence or absence of plutonium: analyses using STATBIODIS. *J Radiol Prot*, *39*(3), 707-738.
- Lew, K. (2009). *Radium*. The Rosen Publishing Group, Inc.
- Littlefield, L. G., Travis, L. B., Sayer, A. M., Voelz, G. L., Jensen, R. H., & Boice Jr, J. D. (1997). Cumulative genetic damage in hematopoietic stem cells in a patient with a 40-year exposure to alpha particles emitted by thorium dioxide. *Radiation research*, *148*(2), 135-144.
- Lord, W. B. (1963). Some Physical Properties Of Plutonium.
- Magill, J., & Galy, J. (2005). Types of Radioactive Decay. *Radioactivity Radionuclides Radiation: Including the Universal Nuclide Chart on CD-ROM*, 59-87.
- Meléndez-Alafort, L., Ferro-Flores, G., De Nardo, L., Bello, M., Paiusco, M., Negri, A., Zorz, A., Uzunov, N., Esposito, J., & Rosato, A. (2019). Internal radiation dose assessment of radiopharmaceuticals prepared with cyclotron-produced (99m) Tc. *Med Phys*, *46*(3), 1437-1446.
- Moghissi, A. A. (1975). *Public health implications of radioluminous materials*. US Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Food
- Morishita, Y., Yamamoto, S., Momose, T., Kaneko, J. H., & Nemoto, N. (2018). Development Of A New Detector System To Evaluate Position And Activity Of Plutonium Particles In Nasal Cavities. *Radiat Prot Dosimetry*, *178*(4), 414-421.
- Mould, R. F. (1998). The discovery of radium in 1898 by Maria Sklodowska-Curie (1867-1934) and Pierre Curie (1859-1906) with commentary on their life and times. *The British Journal of Radiology*, *71*(852), 1229-1254.

- Mustafa, S. S., & Amin, E. A. (2024). Utilizing even Plutonium Isotopes as burnable absorbers for controlling the reactivity and power distribution in Pressurized Water Reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 170, 105117.
- Nénot, J.-C., & Stather, J. W. (2013). *The toxicity of plutonium, americium and curium: A report prepared under contract for the commission of the European communities within its research and development programme on plutonium recycling in light water reactors*. Elsevier.
- Othman, S. Q., Ahmed, A. H., & Mohammed, S. I. (2022). Natural radioactivity and radiological risk assessment due to building materials commonly used in Erbil city, Kurdistan region, Iraq. *Environ Monit Assess*, 195(1), 140.
- Özbakır, O. (2024). Safety Measures and Risk Management in Agricultural Confined Spaces: A Study on Farm in Iğdır Province, Using Bow tie and Matrix Methods. *Journal of Agriculture*, 7(1), 31-44.
- Özbakır, O., Koltka, S., & Sabah, E. (2017). Modeling and optimization of fine coal beneficiation by hydrocyclone and multi-gravity separation to produce fine lignite clean coal. *Particulate Science and technology*, 35(6), 712-722.
- Parinov, O. V., Semenova, M. P., Shandala, N. K., Lyaginskaya, A. M., Metlyaev, E. G., Kuptsov, V., & Bogdanov, I. I. (2023). Current concepts of the radio-biological effects of plutonium and uranium (Based on ICRP Publication 150). *Hygiene and sanitation*.
- Perrier, C., & Segrè, E. (1947). Technetium: The Element of Atomic Number 43. *Nature*, 159, 24-24.
- Poepfel, T. D., Handkiewicz-Junak, D., Andreeff, M., Becherer, A., Bockisch, A., Fricke, E., Geworski, L., Heinzl, A., Krause, B. J., & Krause, T. (2018). EANM guideline for radionuclide therapy with radium-223 of metastatic castration-resistant prostate cancer. *European journal of nuclear medicine and molecular imaging*, 45, 824-845.
- Reed, B. C. (2012). Neutrons as Party Animals: An Analogy for Understanding Heavy-Element Fissility. *The Physics Teacher*, 50, 544-545.
- Roberts, G. A., & Bull, R. K. (2020). Review of the effectiveness of internal dosimetry monitoring regimes. *J Radiol Prot*, 40(2), 381-392.
- Roessler, C., Smith, Z., Bolch, W., & Prince, R. (1979). Uranium and radium-226 in Florida phosphate materials. *Health Physics*, 37(3), 269-277.
- Roy, K., Basu, S., Pal, D., Lahiri, S., & Ramaswami, A. (2003). Separation of carrier-free ⁹⁵Tc from alpha-irradiated natural niobium. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 256, 311-313.

- Rump, A., Hermann, C., Lamkowski, A., Popp, T., & Port, M. (2023). A comparison of the chemo-and radiotoxicity of thorium and uranium at different enrichment grades. *Archives of Toxicology*, 97(6), 1577-1598.
- Saha, G. B., & Saha, G. B. (2010). Radioactive decay. *Fundamentals of Nuclear Pharmacy*, 11-31.
- Sahoo, S. K., Shiraishi, K., Kimura, S., Masuda, A., Los, I. P., & Zamostyan, P. V. (2002). Isotope ratios determination of uranium in soil samples affected due to Chernobyl accident using thermal ionisation mass spectrometer. *Radioprotection*, 37.
- Samuels, C., & Leggett, R. (2023). Dose reconstruction for plutonium-239 intakes at the Rocky Flats Plant. *Int J Radiat Biol*, 99(12), 1841-1852.
- Schatz, C., Suominen, M. I., Knuutila, M., Zitzmann-Kolbe, S., Rissanen, J., Käkönen, S.-M., Hagemann, U., & Scholz, A. (2022). PSMA-targeted thorium-227 conjugate (PSMA-TTC) inhibits tumor growth and abnormal bone changes in the intratibial LNCaP xenograft model of bone-metastatic prostate cancer. *Cancer Res*, 82(3318), 10.1158.
- Scott, B. R., & Peterson, V. L. (2003). Risk estimates for deterministic health effects of inhaled weapons grade plutonium. *Health Phys*, 85(3), 280-293.
- Sharma, S., Ali, M., Kumar, A., & Rawat, N. (2023). Combined Thermodynamic, Theoretical, and Biological Study for Investigating N-(2-Acetamido)iminodiacetic Acid as a Potential Thorium Decorporation Agent. *Inorg Chem*, 62(46), 18887-18900.
- Srivastava, S. C., & Richards, P. (2019). Technetium-labeled compounds. In *Radiotracers for Medical Applications* (pp. 107-186). CRC Press.
- Stebbins, J. H. (2001). Health risks from radium in workplaces: an unfinished story. *Occup Med*, 16(2), 259-270.
- Thoennessen, M. (2016). The discovery of isotopes. *Switzerland: Springer Int. Publ.*
- Tissot, F. L. H., Dauphas, N., & Grove, T. L. (2017). Distinct ²³⁸U/²³⁵U ratios and REE patterns in plutonic and volcanic angrites: Geochronologic implications and evidence for U isotope fractionation during magmatic processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 213, 593-617.
- Viro, M., Dumas, T., Cot-Auriol, M., Moisy, P., & Nikitenko, S. I. (2022). Synthesis and multi-scale properties of PuO₂ nanoparticles: recent advances and open questions. *Nanoscale Adv*, 4(23), 4938-4971.

- Williamson, M., & Preston, J. (2020). Radiation Detectors and Instrumentation. *Nuclear Non-proliferation and Arms Control Verification: Innovative Systems Concepts*, 249-264.
- Xing-an, C., & Yong-e, C. (2008). An investigation on the thorium lung burden and its health effects on the workers in a rare-earth refinery factory, Baotou, China.

Radyoaktif Maddelerin Terapötik Uygulamaları *Mustafa CENGİZ¹, Canan VEJSELOVA SEZER²*

GİRİŞ

Radyoaktif maddeler, kaza dışındaki radyasyona maruziyet koşullarını kontrollü bir şekilde sağlama potansiyeline sahip maddelerdir. Bu maddeler radyasyon terapisi ve çeşitli tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır. Günümüzde radyoterapi olarak da bilinen radyasyon terapisi, başta kanser olmak üzere birçok farklı hastalığın tedavisinde iyonlaştırıcı radyasyonun kullanılmasını ve tedavi etkinliğinin daha yüksek derecelere çıkarılmasını içermektedir. Tedavinin amacına yönelik olarak radyasyon terapisi internal (dahili) ve eksternal (harici) olarak uygulanmaktadır. Bu uygulamalarda hastanın özel vakasının karakteristikleri, genel sağlık durumu gibi faktörler dikkate alınarak hassas ön taramalardan sonra belirlenmektedir. Kişiyi özel uyarlamaların da yapılabildiği radyoterapi sürecinde uygulama esnasında ve sonrasında hem hastanın hem de sağlık personelinin radyasyon maruziyeti açısından yüksek denetimli güvenlik tedbirleri kullanılmaktadır. Tedbirler kapsamında gerçekleştirilen uygulamalar hassas olarak hedeflenebilen radyasyonun kanserli bölgeyi hedef alıp çevredeki sağlıklı dokuları ve organları korumayı amaçladığından geleneksel tedavi yöntemlerine kıyasla daha yüksek tedavi etkinliği sağlayabilmektedir. Tedavi sonrasında hem olası rekürrens ve yan etki durumları hem de tedavinin etkinliğinin değerlendirilmesi için hastaların yakından kontrol ve tetkiklerle takibi yapılmaktadır.

Bu bölümde radyasyon tedavisinin türleri, etkinlik mekanizmaları, uygulama teknikleri, farklı hastalıkların tedavisindeki kullanımları, hasta seçimi, tedavi ve takip süreçleri dikkat edilecek noktalarıyla birlikte detaylı örneklerle sunularak ele alınmıştır.

¹ Prof. Dr. Mustafa CENGİZ, Siirt Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, m.cengiz@siirt.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6925-8371

² Doç. Dr. Canan VEJSELOVA SEZER, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, cananvejelovasezer@eskisehir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-3792-5993

2.1. Kanser Tedavisinde Radyoterapi

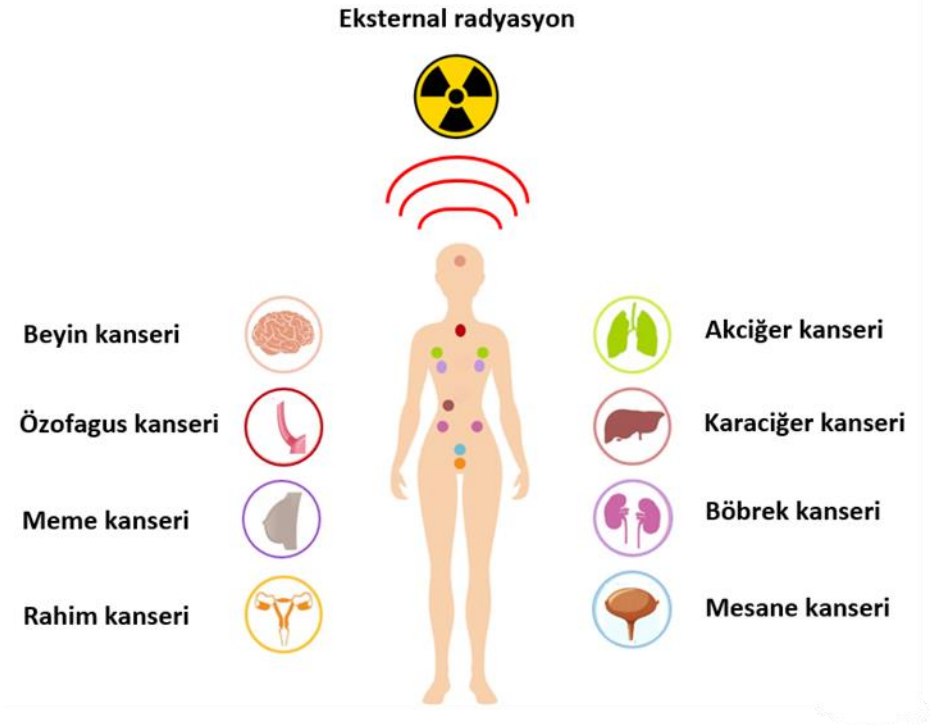
Radyoterapi kanser hücrelerini öldürmek veya hasarlamak amacıyla yüksek dozda radyasyon uygulamasını kapsayan aynı zamanda radyasyon tedavisi olarak da adlandırılan kanser terapi çeşididir. Radyoterapi ile kanser tedavisi sürecinde kanserli bölge birincil olarak hedeflenmekte ve sağlıklı çevre dokuların en az hasarla etkilenmesi veya etkilenmeden kanserli hücrelerin öldürülmesi amaçlanmaktadır. Kanser tedavi sürecinde radyoterapi hastalığın birçok farklı evresinde uygulamaya sahiptir (Zhang, Liu, Chen, & Yu, 2022).

2.1.1. Mekanizma

Radyoterapide kanser hücrelerini yok etmek için tıbbi tedavi olarak yaygın kullanıma sahip bir radyasyon şekli de iyonlaştırıcı radyasyondur. Radyoterapide, kanser hücrelerinin DNA'sına zarar vermek, büyüme ve bölünme yeteneklerini önlemek için yüksek enerjili radyasyon kullanılmaktadır. Radyoterapide X-ışınları ve gama ışınları yaygın olarak kullanılan iyonlaştırıcı radyasyon türleridir ve sahip oldukları yüksek enerjili fotonlar sayesinde dokulara nüfuz ederek kanserli hücrelerin genetik materyalini hasarlayabilmektedir (Liu, Yang, Luo, & Zhou, 2020; Zhang et al., 2022).

2.1.2. Radyoterapi Çeşitleri

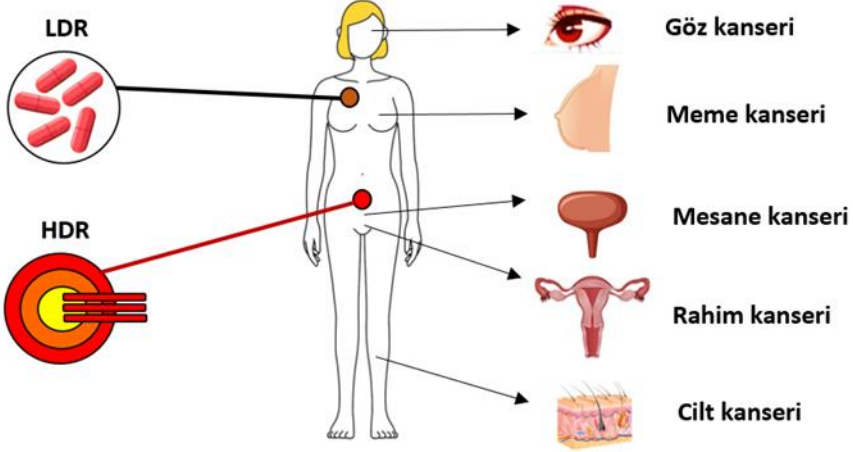
Radyoterapi günümüzde birçok kanserin tedavisinde kullanılan bir radyasyon terapisi. Bu terapinin çeşitleri harici (eksternal) ve dahili (internal) olmak üzere iki ana alt başlıkta toplanmaktadır (Armstrong et al., 2021). Harici ışın radyasyon tedavisi vücudun dışındaki bir makine ile tümöre hedeflenmiş dozlarda iyonlaştırıcı radyasyonun verildiği tedavi şeklidir (Şekil 1). Bu tedavi şeklinde hassas planlama ile sağlıklı çevre dokular en az radyasyona maruz bırakılarak kanser hücrelerindeki radyasyon dozu en yüksek seviyede uygulanmaktadır (Karpov et al., 2022). Radyoterapide uygulanan bir başka tedavi yöntemi yoğunluk modülasyonlu radyasyon terapisi (Akino et al., 2019). Bu terapi, harici ışın radyasyon tedavisinin bir türü olup radyasyon ışınlarının yoğunluğunun ayarlanabildiği ve sağlıklı çevre dokuların korunduğu, tümöre yüksek hassasiyetle radyasyon dozunun verilebildiği bir tedavi şeklidir (Ye, Han, Mao, & Cheng, 2022). Radyocerrahi vücuttaki belirli bir hedefe odaklanmış hassas radyasyon dozu veren bir radyasyon tedavisi şekli olup genellikle beyin tümörleri ve diğer küçük lezyonların terapi sürecinde kullanılmaktadır (Redmond et al., 2021).



Şekil 1. Eksternal radyoterapi uygulanan kanser türleri.

İnternal radyoterapi (Şekil 2) ise aynı zamanda brakiterapi olarak adlandırılmakta olup radyoaktif kaynakların doğrudan tümörün içine veya çok yakın çevre dokuya yerleştirilerek radyasyonun hassas bir şekilde kanserli bölgeye uygulanmasını kapsayan bir radyoterapi çeşididir (de la Torre-Aláez et al., 2022).

İnternal radyoterapi



Şekil 2. İnternal radyoterapi çeşitleri ve uygulandığı kanser türleri.

2.1.3. Tedavi Planlama

Radyasyon tedavisinde uygulama aşaması için hassas planlama kritik bir önem taşımaktadır. Bu tedavinin planlanması uzman uygulamacılar tarafından simülasyon ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Simülasyondan elde edilen verilerden yola çıkılarak tümürlü bölgenin hemen yakın çevresinde bulunan sağlıklı dokular olabildiğince korunarak kanserli bölgeye, tedavinin hedeflenmesi için özel tedavi planı yapılmaktadır (Harrison et al., 2022).

2.1.4. Radyasyon Uygulaması

Radyasyonun tedavi amacıyla hastaya verilmesi aşamasında oluşturulan dikkatli planlamadan sonra uygulama aşamasında radyasyonu kanserli bölgelere hedeflemek için özel cihazlar, radyoaktif maddeler ve uygulama yöntemleri kullanılmaktadır (de la Torre-Alález et al., 2022). Bunlara ilişkin birkaç örnek aşağıda sunulmuştur.

2.1.4.1. Gamma Knife: Geleneksel radyoterapi yönteminde düşük doz radyasyon birkaç seansta hastalara uygulanmaktadır. Geleneksel radyasyon tedavisinden farklı olarak stereotaktik radyocerrahide, tek bir seansta hassas ve yüksek seviyede odaklanmış radyasyon hedef bölgeye uygulanabilmektedir.

Gamma Knife, stereotaktik radyocerrahi uygulamasında kullanılan, birden çok düşük dozda radyasyonu içeren ve daha esnek ve hassas odaklamayı sağlayan özel bir cihazdır. Bu cihaz yaygın olarak beyin lezyonları, tümörleri ve diğer anormallikleri tedavi etmek amacıyla kullanılmaktadır (Kudrevicius et al., 2022).

2.1.4.2. Kobalt-60 Üniteleri: Teknolojinin ilerlemesiyle günümüzde kullanımları azalmaya başlayan Kobalt-60 (Co-60) üniteleri radyasyon tedavisinde önemli bir role sahiptir (Huh & Kim, 2020). Co-60 ünitelerinin radyoterapide kullanılması uzun yarılanma ömrü gibi bazı belirgin özellikleriyle ilişkilendirilmektedir. Bu üniteler, kobaltın radyoaktif bir izotopu olan ve yarılanma ömrü yaklaşık 5.26 yıl olan Co-60 içermektedir. Co-60 beta parçacıkları ve gama ışınları saçarak bozunmaktadır (Radha, Lawrence, Babu, Renuga, & Devi, 2024). Yayılan bu gama ışınları radyasyon onkolojisinde tedavi amacıyla uygulanmaktadır. Co-60 ünitelerinin radyoterapide kullanımı güvenilir ve uygun maliyetli bir terapötik radyasyon kaynağı sağlamak ve nispeten daha yüksek dozda radyasyonun kontrollü olarak uygulanması avantajını sağlamaktadır. Öte yandan, Co-60 ünitelerinin önemli sınırlılıkları nedeniyle dezavantajları vardır. Gama ışınları spektrumunu sürekli yaymaları bu dezavantajlardan birisidir. Sürekli ışın spektrumu radyasyon ışınına hassas olarak şekillendirmeyi ve tümörün spesifik hatlarına uygun hale getirmeyi zorlaştırmaktadır. Bu avantaj ve dezavantajlar dışında, Co-60 ünitelerinin kullanımı, izotopun radyoaktif yapısından kaynaklanan güvenlik sorunları içerdiğinden hasta ve sağlık personelinin korunması için etkili koruma ve güvenlik protokolleri gereklidir (Crapanzano, Secchi, & Villa, 2021).

2.1.4.3. Teleterapi Makineleri: Teleterapi, radyasyon kaynağının hastadan belirli bir uzaklıkta konumlandırıldığı bir radyoterapi türüdür. Vücut dışından harici ışın radyasyonu ileten cihazlar olan teleterapi makineleri ile gerçekleştirilen bu uygulamada Co-60 üniteleri çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu üniteler günümüze dek en çok baş ve boyun, göğüs ve pelvis kanserleri ve birçok kanser türünün tedavisinde kullanılmıştır (Bohannan, 1982; Khatun & Khatun). Co-60 ünitelerinden yayılan gama ışınları dokulara daha derin nüfuz edebilme özelliklerinden dolayı, derinde yerleşmiş olan tümör türlerinde radyasyonun daha başarılı iletimini sağlamaktadır (Catherwood, Finlay, & McLaughlin, 2016).

2.1.4.4. Lineer Hızlandırıcılar: Harici ışın terapisi için yaygın olarak kullanılan cihazlar arasında lineer hızlandırıcılar yer almaktadır. Son yıllarda birçok radyasyon tedavisi merkezinde lineer hızlandırıcıların kullanımı oldukça

artmıştır. Bu artışın nedeni geçişin nedeni lineer hızlandırıcıların radyasyon ışınıni şekillendirmede daha yüksek esneklik sunması ve günümüz tedavi planlama tekniklerine daha yüksek uyumluluk göstermesidir (Durmuş Manalp, 2016; Oğuz, 2019).

2.1.5. Fraksiyonlama

Geleneksek radyoterapi yönteminde genellikle birkaç gün veya hafta boyunca çok sayıda uygulama seansı vardır ve bunlar fraksiyonlar şeklinde gerçekleştirilmektedir. Fraksiyonlamanın kanser tedavisinde sağladığı avantaj kanser hücrelerine etkili bir doz verilmesini sağlarken, çevredeki sağlıklı dokulara verilen zararı en aza indirmesi ve radyasyondan etkilenen sağlıklı hücrelerin onarımına olanak tanımasıdır (Griffin et al., 2020).

2.1.6. Yan Etkiler

Kanser tedavisi radyoterapi şeklinde uygulandığında radyasyon maruziyeti nedeniyle ortaya çıkan birçok farklı etki semptomlar halinde kendini göstermektedir. Tedavi uygulanan bölgede radyoterapi kaynaklı kısa ve uzun sürede yan etkiler görülmektedir. Görülen bu yan etkiler arasında yorgunluk, mide bulantısı, cilt değişiklikleri ve geçici olarak saçların dökülmesi sayılabilmektedir (Dilalla, Chaput, Williams, & Sultanem, 2020; Majeed & Gupta, 2023).

2.1.7. Diğer Tedavilerle Kombine Uygulamalar

Tek başına etkinliği belirli bir seviyeye kadar tedavi sağlayabilen radyoterapinin kanser tedavisindeki etkinliğinin artırılması amacıyla genellikle cerrahi, kemoterapi veya immünoterapi ile birlikte kombinlenerek kullanılmaktadır (Özdemir, 2021).

2.1.8. Takip ve İzleme

Tüm hastalıkların tedavi etkinliğini takip ederek tedavi başarısını değerlendirmek gerekmektedir. Radyoterapi uygulanan hastalarda, hem etkinliği değerlendirmek hem de herhangi bir yan etki durumunu yönetmek için tedavi sırasında ve sonrasında izlenmektedir (Kahraman ÇETİNTAŞ et al., 2022).

Genel olarak değerlendirildiğinde radyoterapinin kanser tedavisinde çok önemli bir rol oynadığı ve uygulanmasının kanserin türü ve evresi, hastanın genel sağlık durumu ve tedavi hedefleri gibi birçok faktöre bağlı olduğu görülmektedir.

Radyoterapi uygulamasının kararı genellikle onkologlar ve radyasyon terapistleri gibi sağlık uzmanlarından oluşan multidisipliner bir ekip tarafından verilmekte olup hassas ve dikkatli planlama, profesyonel uygulama ve takip gerektirmektedir. Kendi başına genellikle etkinliği etkili düzeyde olan radyoterapinin etkinliği diğer tedavi yöntemleriyle birlikte kullanım ile artırılabilir.

2.2. Tümör içine veya yakın çevresine radyoaktif madde uygulama ile kanser tedavisi (Brakiterapi)

Radyoterapinin kapalı bir radyasyon kaynağının, tedavi uygulanacak bölgenin içine veya yakınına doğrudan yerleştirildiği bir türüdür. Brakiterapi dahili radyasyon terapisi olarak da bilinmektedir. Bu terapinin ismi Yunancada kısa anlamına gelen "Braksi" kelimesinden türetilmiş olup radyasyon kaynağının kat ettiği kısa mesafeyi ifade etmektedir. Bu tedavi yönteminde radyoaktif maddeler implant veya kaynak olarak adlandırılan küçük ünitelere kapatılarak hedef dokunun içine veya çok yakın bir bölgesine yerleştirilmektedir (Williams et al., 2021). Böylece, radyasyonun tümöre hassas ve etkili bir şekilde odaklanmış olarak uygulanmasını sağlamakta olup kanserli bölgenin çevresindeki sağlıklı dokuları radyasyonun zararlı etkisinden en yüksek seviyede korumaktadır. Günümüzde brakiterapi birçok farklı kanser türünün tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Lim & Kim, 2021). Tedavisinde brakiterapinin uygulandığı bu kanser çeşitlerine birkaç örnek aşağıda sunulmuştur.

2.2.1. Prostat Kanseri Tedavisi

Brakiterapi yaygın olarak prostat kanseri tedavisinde kullanılan bir yöntemdir. Bu uygulamada radyoaktif tohum ya da implantlar doğrudan prostat bezine yerleştirilerek tümör hedeflenmiş ışına maruz bırakılabilir. Prostat kanserinde kalıcı tohum implantları düşük doz oranı (LDR) ve geçici yüksek doz oranı (HDR) brakiterapisi şeklinde iki türde uygulanmaktadır (Crook, Marbán, & Batchelar, 2020).

2.2.1.1. Kalıcı Tohum İmplantları (LDR Brakiterapi)

Düşük doz oranlı brakiterapide özellikle iyot-125 veya paladyum-103 içeren küçük radyoaktif tohumlar prostat bezine kalıcı olarak yerleştirilmektedir. Bu tohumlar düşük dozda radyasyonu uzun süre içerisinde yayarak prostat

dokusunu odaklayan radyasyona maruz bırakırlar. LDR brakiterapi, genellikle ayakta tedavi operasyonu şeklinde uygulanmaktadır (Karius et al., 2022).

Prostat kanseri terapisi için LDR brakiterapi uygulamasında önemli olan hususlar vardır. Bunlardan ilki implantasyon prosedürüdür. Prosedürde küçük radyoaktif tohumlar doğrudan prostat bezine yerleştirilmekte olup genellikle birkaç ay süresince sürekli olarak düşük dozda radyasyon iletmektedir. İkinci önemli husus, hedefli radyasyonun tümörlü dokuya sunulabilmesidir (McLaughlin & Narayana, 2020). Burada radyasyon prostat bezine oldukça lokal ve hedefe yönelik olarak iletilirken çevredeki sağlıklı dokuları maruziyetin en düşük seviyesinde tutmaktadır. Üçüncü önemli husus, birkaç terapi şeklinin kombine olarak LDR brakiterapide uygulanmasıdır. Burada prostat kanseri tedavisi için sıklıkla harici ışın radyasyon terapisi, LDR brakiterapi ile birlikte uygulanmaktadır. Bu kombinasyon metastaz riski yüksek olan prostat kanseri vakalarında tedavi etkinliğinin artırılması amacıyla kullanılmaktadır (Yamazaki et al., 2021). LDR brakiterapinin dördüncü önemli hususu, prostat kanserinin metastaz yapmadığı veya diğer bir ifadeyle sadece prostat ile lokalize olduğu vakalarda yüksek uyumlulukla kullanılması ve ayakta tedavi prosedürü şeklinde uygulanarak aynı gün hastaların taburcu edilmesidir. Tedavinin sık idrara çıkma, geçici perineal rahatsızlık gibi yan etkiler ve tedavi sonrası izleme gerektirmesi, LDR brakiterapinin beşinci önemli uygulama hususu olarak değerlendirilmektedir (Yamazaki et al., 2021).

Prostat kanseri tedavisi için birçok vakada diğer geleneksel terapilere kıyasla etkili bir tedavi seçeneği olduğu gösterilen LDR brakiterapinin potansiyel faydaları ve riskleri sağlık ekibiyle tartışılarak hastaya özel en uygun stratejiyi belirlemek için çok önemlidir (Viktorin-Baier et al., 2020).

2.2.1.2. Geçici Yüksek Doz Oranı (HDR) Brakiterapi

Brakiterapinin HDR türü, yüksek yoğunluklu bir radyoaktif maddenin genellikle kateterler ya da aplikatörler kullanılarak prostat bezine geçici yerleştirilmesiyle uygulanmaktadır (Crook et al., 2020). HDR brakiterapi, terapi seansları çok kısa uygulamalar olup dakikalar içerisinde tamamlanmaktadır. Bu terapi seanslarını takiben radyoaktif kaynak uygulandığı bölgeden uzaklaştırılarak hastanın radyasyon ile bağlantısı kesilmektedir. Diğer kanser tedavilerinde olduğu gibi prostat kanseri tedavisinde de HDR brakiterapi uygulamasının önemli yönleri vardır. Bu yönler uygulama prosedürü bakımından geçici implantların prostat bezine veya çok yakın çevresine uygulanması ve

prostata hassas ve yüksek dozda radyasyonu sağlıklı dokulara en az maruziyetle kontrollü ve planlı verilebilmesidir (Koprivec et al., 2022). HDR brakiterapinin prostat kanseri tedavisi için sağladığı avantajlar vardır. Bu avantajlardan ilki tümörün hedeflenmesinde yüksek derecede hassasiyet sağlamasıdır. Böylece radyasyon, esas tedavi edilmesi gereken bölgeye odaklanarak, yakın çevrede bulunan sağlıklı dokuların en az düzeyde etkilenmesine yol açılmaktadır. Bu terapinin ikinci bir avantajı ise her tedavi seansının kısa sürmesidir. Bu avantaj sayesinde gerçek radyasyona maruz kalma süresi kısalmış olduğundan hastanın tedavi sürecindeki konforunu artırabilmektedir. Hassas olarak planlanan bu tedavi sürecinin planlanmasında, işlem öncesinde radyoaktif kaynakların yerleşimi manyetik rezonans (MR) veya bilgisayarlı tomografi (BT) taraması gibi görüntüleme teknikleri kullanılmaktadır. Ayrıca, radyasyon dozu dağılımının optimizasyonu için gelişmiş bilgisayar yazılımlarından faydalanılmaktadır (Crook et al., 2020). Bu hassas planlama sayesinde, sağlıklı dokular olabildiğince yüksek düzeyde korunurken kanser hücreleri üzerindeki radyasyon etkisi de en yüksek seviyeye çıkarılabilmektedir. HDR brakiterapi, prostat kanseri tedavisi için radyasyonun doz hızının işlem sırasında ayarlanabilir olması ile tümörün özelliklerine spesifik olarak tedavi uygulanması avantajı sunmaktadır (Fischbach et al., 2020). Buna ilaveten, bazı gerekli durumlarda bu tedavinin tekrarlanabilir olması ve uygulanmakta olan tedavinin süreci devam ederken uygun planlama değişiklikleri yapılabilmesi HDR brakiterapiyi daha efektif kılmaktadır. Bu terapi türü prostat kanserinin tedavisine daha kapsamlı bir yaklaşım sağlamak amacıyla genellikle harici ışın radyasyon terapisiyle kombinlenerek kullanılmaktadır ve tümöre uygulanan dış radyasyonu artırmak için ek bir konsantre doz verilebilmesini sağlamaktadır (Lakosi et al., 2021).

Prostat kanseri tedavisinde yukarıda değerlendirilen brakiterapi çeşitleri dikkate alındığında genel olarak hassas hedefleme, diğer radyasyon tedavilerine kıyasla minimal invaziv olma özelliği, tedavi uygulanma süresinin kısa olması avantajlarını sağlamaktadır. Brakiterapinin prostat kanseri tedavisinde kullanımı için dikkate alınması gereken hususlar genellikle dikkatli hasta seçimi, kombinasyon tedavileri ve yan etki değerlendirmelerinin yapılması şeklinde sıralanmaktadır. Brakiterapi uygulaması, genellikle erken evre prostat kanseri olan hastalarda tedavi yöntemi olarak seçilmekte olup gerekli durumlarda hassas bir planlama ile tedavinin etkinliğini artırmak üzere harici ışın radyasyon terapisiyle birlikte kullanılabilir. Brakiterapinin prostat kanseri tedavisinde uygulama sürecinde karşılaşılan yan etkileri yaygın olarak geçici

idrar semptomları, erektil disfonksiyon, bağırsak değişiklikleri ile karşılaşılırken bu semptomların şiddeti hastanın bireysel özelliklerine göre farklılık göstermektedir (Girum, Lalande, Hussain, & Créhange, 2020).

2.2.2. Meme Kanseri Tedavisi

Günümüzde kullanılan farklı terapi seçeneklerine ilaveten brakiterapi erken evre kanser vakaları veya geleneksel harici ışın radyasyonunun uygun olmadığı özel meme kanseri vakalarında tercih edilebilmektedir. İnterstisyel brakiterapinin uygunluğu tümörün boyutu, yeri ve hasta özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Bu vakalarda brakiterapi, hızlandırılmış kısmi meme ışınlaması (APBI) şeklinde uygulanmaktadır. Bu uygulamada da esas prensip radyoaktif kaynağın tümör veya tümörün yer aldığı bölgenin içine ya da çok yakınına yerleştirilmesini içermektedir. Meme kanseri tedavisinde etkilenmesi istenen bölgeye radyasyonun doğrudan odaklanarak ulaşmasını sağlayan iki temel terapi türü interstisyel ve intrakaviter brakiterapidir (Cozzi et al., 2022).

2.2.2.1. İnterstisyel Brakiterapi

Meme kanseri tedavisinde interstisyel brakiterapi radyoaktif maddenin geçici ya da kalıcı şekilde meme dokusunun içine doğrudan yerleştirilmesi şeklinde uygulanmaktadır (Lindel, 2020). Günümüzde daha çok tercih edilen geçici interstisyel brakiterapidir ve birkaç günlük uygulama sürecinde birden çok tedavi seansı kısa süreli olarak hastaya uygulanmaktadır. Meme kanseri tedavisinde interstisyel brakiterapinin kullanılmasına yönelik birçok önemli konu vardır. Burada en önemli konular tedavinin planlanması ve uygulama prosedürüne uygun doz tedavisinin seçimidir (Kamrava, Alrashidi, & Leung, 2021). İnterstisyel brakiterapinin meme kanseri tedavisindeki uygulamasından önce hastanın tümör boyutu, yeri, özellikleri ve hastanın genel sağlık durumu değerlendirilmektedir. Vakaya özel bu değerlendirmeler birlikte ya da ayrı ayrı olarak BT taramaları ve MR gibi görüntüleme teknikleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu değerlendirmeler ile radyoaktif kaynakların tam hedefe odaklı yerleşim yeri ve şekli belirlenmektedir. Değerlendirme aşamasından elde edilen verilere uygun olarak radyoaktif kaynağın hedef bölgeye yerleştirilme prosedürü seçilmektedir (Thorpe & Drury-Smith, 2020). Meme kanserinde interstisyel brakiterapinin uygulama prosedürü bir kateterin radyoaktif kaynakların dağıtımı için kanal olarak kullanımı ile doğrudan tümörün içine veya yakın çevresine radyasyon odaklanmasının sağlanmasıdır. Hedef bölgeye yerleştirilen

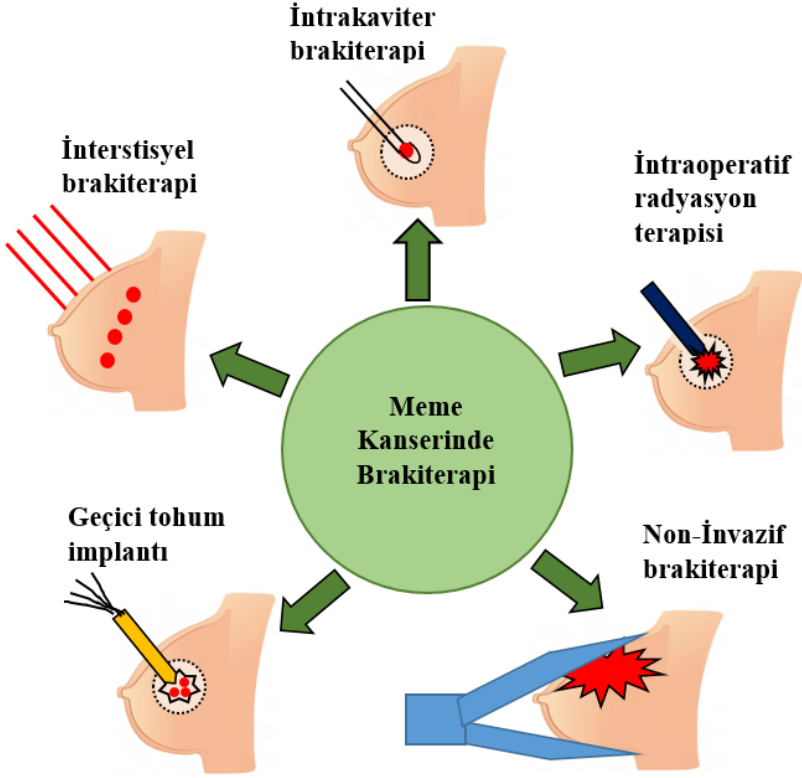
kaynaklardan etrafa yayılan radyasyon, kanser hücrelerini hasarlamakta ve proliferasyon ve büyümeyi bu şekilde baskılamaktadır (Garduño-Sánchez, Villanego-Beltrán, de las Peñas-Cabrera, & Jaén-Olasolo, 2022). Burada yüksek veya düşük doz hızı şeklinde interstisyel brakiterapi tercih edilebilmektedir. Yüksek doz uygulaması gerçekleştirildiğinde çok sayıda kısa sürelerle meme dokusuna radyasyon verilmesi gerçekleştirilirken, düşük doz uygulandığında ise HDR'ye kıyasla uzun bir süre boyunca ve sürekli olarak daha düşük dozda radyasyon verilmektedir. İnterstisyel brakiterapi radyasyonun tümöre hassas hedeflenmesini ve normal dokuların çok az radyasyon almasını sağladığı için avantajlı bir terapi seçeneğidir. Buna ilaveten HDR brakiterapi seansları ile genellikle geleneksel harici ışın radyasyon terapisinden daha kısa sürmesi ve hastalara terapi sırasında konfor ve kolaylık sağlaması interstisyel brakiterapinin sunduğu faydalı olanaklardandır (Strnad et al., 2023). Tüm bu avantajlarla birlikte diğer radyasyon terapisi türlerinde olduğu gibi interstisyel meme kanseri brakiterapisinde de hastalarda yaygın olarak geçici cilt değişiklikleri, yorgunluk ve kateter konumlanma bölgelerinde hafif rahatsızlık görülse de genel yan etki profili, hastaya özel tedavi ayrıntılarına ve bireysel faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir (C. Li, Lin, & Yeh, 2021).

Brakiterapi sağlık ekibi ve hasta arasında ortak karar ile uygulanabilen bir süreç olduğu için hastaların meme kanseri tedavi planlarını doğru anlayıp bilinçli kararlar alabilmeleri konusunda detaylı bir şekilde interstisyel brakiterapinin olası faydaları ve risklerini sağlık ekibiyle paylaşmaları ve bilgi edinmeleri önem taşımaktadır. Bu terapinin tercih edilmesinde radyasyon tedavisi yaklaşımının seçimi çeşitli faktörlere bağlı olduğundan ve hastanın bireysel ihtiyaçlarına göre uyarlanacağından sağlık ekibinin uzmanlığı ve hassas planlaması gereklidir (Kamrava et al., 2021).

2.2.2.2. İnterakaviter Brakiterapi

Meme kanseri tedavisinde kullanılan diğer bir özel brakiterapi şekli intrakaviter brakiterapidir. Bu terapi türünde, radyasyon kaynağı bir balon ya da aplikatörün içinde olacak şekilde tümör ameliyatla çıkarıldıktan sonra oluşan cerrahi boşluğun veya lumpektomi (memenin korunarak primer tümörün tamamen çıkartılması işlemi) bölgesinin içine geçici olarak yerleştirilmektedir. Bu uygulamada radyasyon kaynağı olarak genellikle iridyum-192 gibi izotoplar kullanılmakta olup bu kaynaktan doğrudan çevre dokulara yüksek dozda radyasyon verilmesi amaçlanmaktadır. İnterakaviter brakiterapi genellikle tek ya

da birden çok sayıda seanslar halinde hastaya uygulanmaktadır (Deng et al., 2017). İnterstisyel brakiterapide olduğu gibi intrakaviter barkiterapide de hassas hedefleme ve çevre dokuların radyasyon maruziyetinin en az düzeyde tutulabilmesi ve kısa süreli uygulamalarla hastaların rahat tedavi süreci geçirmesi avantajları vardır. İnterakaviter brakiterapi uygulanabilirlik açısından her vakaya uygun olmayıp özellikle meme koruyucu cerrahi geçirmiş erken evre meme kanserli hastalarda tercih edilmektedir (Fortin et al., 2016). Bu hastalardaki uygulama prosedürü de genellikle tümörün boyutuna, bulunduğu yere ve bireysel hasta özelliklerine bağlıdır. Bu özel vakalarda terapinin uygulandığı meme dokusunda rekürrens önlenmesi için intrakaviter brakiterapinin harici ışın radyasyon tedavisi kadar etkili olabileceği araştırmalarda gösterilmiştir (Şekil 3). Yine de tedavi ilerlemelerini izlemek ve potansiyel yan etkileri değerlendirmek için düzenli takip gerektiren bir brakiterapi türüdür (Kim, Kang, & Kim, 2020). Yan etkiler açısından diğer terapi yöntemlerine kıyasla biraz daha avantajlı sayılabilecek olan intrakaviter brakiterapinin yan etkileri genellikle tedavi edilen bölgeye lokalizedir. Tüm meme harici ışın radyasyonu tedavisine kıyasla daha hafif seyreden bu yan etkilerin en yaygın görülenleri geçici cilt değişiklikleri, şişme ve genel yorgunluktur (Smitt & Kirby, 2007).



Şekil 3. Meme kanseri tedavisinde brakiterapi çeşitleri.

2.2.3. Jinekolojik Kanserlerin Tedavisi

Brakiterapi, serviks, endometriyum ve vajina kanseri gibi birçok jinekolojik kanserlerin tedavisinde çokça kullanılmaktadır (Mourya, Aggarwal, & Choudhary, 2021). Brakiterapinin uygulandığı jinekolojik kanser türlerine bazı örnekler aşağıda detaylandırılarak verilmiştir.

2.2.3.1. Brakiterapinin rahim ağzı kanseri tedavisinde kullanımı

Brakiterapinin rahim ağzı kanseri tedavisinde yaygın ve etkili bir tedavi uygulaması olarak kullanımı vardır. Bu terapide kanser hücrelerinin eradike edilmesinde önemli olan yüksek dozda radyasyon lokal olarak verilebildiğinden dolayı özellikle rahim ağzı kanserinin tedavisinde başarı sağlamaktadır (Lichter et al., 2022). Uygulanabilirliği tek başına olarak genellikle rahim ağzı kanserinin birincil tedavisinde ya da harici ışın radyasyonu ve cerrahi ile kombinlenerek gerçekleştirilmektedir. Bu uygulamalara ilaveten, cerrahi operasyon sonrasında

olası kanser hücreleri kalıntısı riskini ortadan kaldırmak için adjuvan olarak da kullanılabilir. Rahim ağzı kanseri tedavisinde uygulanan bu brakiterapi HDR veya LDR olarak tercih edilebilir (Williamson, Liu, Mayadev, & Mell, 2021). Brakiterapinin rahim ağzı kanseri tedavisinde uygulanması radyoaktif kaynakların tümöre yakın olması ve hassas olarak hedeflenebilmesi özelliklerinden dolayı kanserli hücreleri daha etkin bir şekilde ortadan kaldırmaktadır. Bu özellikleri ile brakiterapinin serviks kanserinde üst düzeyde lokal kontrol sağladığı ve tümörleri küçültülerek, lokal rekürrens riskinin azalmasını ve genel sağkalım oranlarını yükselttiği çalışmalarda gösterilmiştir. Bu etkilerin sağlanabilmesi için brakiterapinin genellikle harici ışın radyasyonu ile birlikte kullanımı gerçekleştirilmektedir. Bu tedavi kombinasyonunda brakiterapi primer tümöre, harici ışın radyasyonu ise pelvise odaklanarak çevre dokuları ve lenf düğümlerini tedavi etmektedir (Schad et al., 2020).

Brakiterapinin rahim ağzı kanseri tedavisinde uygulanması için intrakaviter ve interstisyel yaklaşımlar gibi birçok farklı uygulamalar ve teknikler kullanılmaktadır. Burada uygulanacak olan aplikatörler ve tekniklerin seçiminde tümörün özellikleri ve hastanın anatomisine uygun olmasına dikkat edilmektedir. Rahim ağzı kanseri için brakiterapi uygulanan hastalar oluşan tedavi yanıtını ve meydana gelen yan etkileri veya herhangi bir rekürrens semptomunu izlemek için görüntüleme tekniklerinin kullanıldığı düzenli kontroller ile takip edilmektedir (Banerjee & Kamrava, 2014).

2.2.3.2. Brakiterapinin endometriyum kanseri tedavisinde kullanımı

Endometriyum kanseri, endometriyumdan kaynaklanan bir kanser türüdür ve günümüzde bunun tedavisi için brakiterapinin önemli tedavi seçeneklerinden olduğu belirtilmektedir (Schwarz et al., 2015). Endometriyum kanserinde brakiterapi kullanılmasında dikkat edilmesi gereken noktalar vardır. Endometriyum kanseri tedavisinde interstisyel ve intrakaviter brakiterapi teknikleri kullanılmaktadır. Tümörün henüz ilerlememiş olduğu veya serviksi de kapsadığı vakalarda radyoaktif kaynakların doğrudan tümör dokusuna yerleştirilmesi şeklinde uygulanan interstisyel brakiterapi tercih edilebilir. Kanserli bölgenin çevresinde bulunan sağlıklı dokuların korunmasını amaçlayarak hedef bölgeye yüksek dozda radyasyon verilmesini sağlayan intrakaviter brakiterapi tekniğinde ise HDR veya LDR brakiterapi cihazı doğrudan uterus boşluğuna yerleştirilmektedir (Nag et al., 2000).

Brakiterapinin endometriyum kanserinde kullanım amaçları farklılık göstermektedir. Genellikle adjuvan (ameliyat sonrası) tedavinin bir parçası olarak, yüksek rekürrens riskli vakalarda, daha kapsamlı bir tedavi yaklaşımı geliştirebilmek amacıyla harici ışın radyasyonu ile kombine edilerek, özellikle rahim ve yakın dokulardaki lokal hastalığın kontrol edilebilmesi tümörün boyutu, konumu ve derecesi gibi belirli hastaya has özelliklere göre uyarlayarak kişiye özel tedavi sağlanabilmesi amaçlarıyla uygulanmaktadır. Bunlara ilaveten brakiterapide çevredeki sağlıklı dokuların en az hasar görmesi ve kanserli dokunun hassas olarak hedeflenebilmesi nedeniyle yan etkilerin minimizasyonu amaçlı da tercih edilmektedir. Diğer kanserlerin tedavisinde olduğu gibi endometriyum kanserinin tedavisi sonrasında da takip ve genel bakım prosedürleri uygulanmaktadır (Gill, Chapman, Hansen, Sukumvanich, & Beriwal, 2015; Steen-Banasik, 2014).

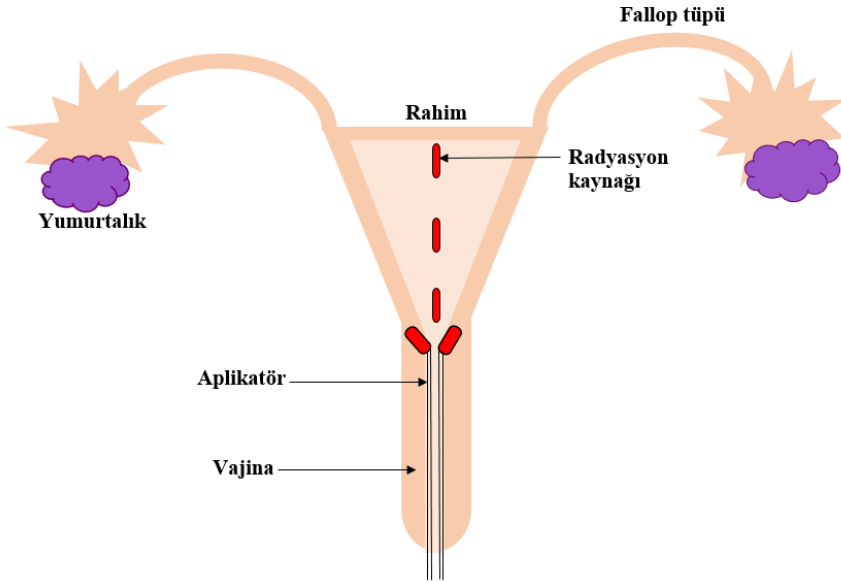
Tüm kanser tedavi uygulamaları ve semptomların yönetiminde olduğu gibi endometriyum kanseri tedavisi de özel tedavi planlaması gerektirmekte olup tedavi türü ve uygulama şekli dahil takip ve bakım aşamalarına kadar tüm ayrıntıların radyasyon ve jinekoloji onkologları ve diğer sağlık uzmanlarıyla işbirliği içerisinde multidisipliner bir yaklaşım ve ekiple birlikte gerçekleştirilmesi önemlidir (Espenel et al., 2020).

2.2.3.3. Brakiterapinin vajina kanseri tedavisinde kullanımı

Vajina kanseri nadir görülen bir kadın üreme sistemi malignitesi olup tedavisinde güncel yaklaşımlar gerektirmektedir. Brakiterapi, vajina kanseri tedavisinde yaygın ve etkili bir tedavi yöntemidir (Anuja, 2022). Vajina kanseri tedavisinde brakiterapinin uygulanmasına yönelik dikkat edilmesi gereken hususlar aplikatör ve yerleştirme tekniklerinin seçimi, radyasyonun hedefe hassas olarak odaklanması, kombinasyon tedavisi tercihi ve uygulama amacının belirlenmesi şeklinde başlıklar altında toplanabilmektedir (Westerveld et al., 2020). Vajina kanseri tedavisi için uygulanan brakiterapide aplikatörler, radyoaktif kaynakları tümör bölgesine iletmek üzere vajina içine yerleştirilen tümöre spesifik olarak uyarlanabilen ve radyasyonun tümöre tam olarak hedeflenmesini sağlarken sağlıklı çevre dokulara radyasyona maruz kalmayı en aza indirme özelliğindeki cihazlardır. Doğrudan hedeflemeyi hassas olarak yapabilen bu aplikatörler (Mourya et al., 2021) ile sağlıklı dokular korunabildiği için yan etki riskleri de en aza indirilebilmektedir (Şekil 4). Vajina kanserinde brakiterapinin diğer tedavi yöntemleriyle bir arada kullanımının kararı uzman

sağlık ekibi tarafından alınmakta olup, planlama sürecinde kanserin evresi, tümörün boyutu ve hastanın sağlık durumu göz önünde bulundurulmaktadır. Brakiterapinin bu nadir kanserin tedavisi için kullanımında tercih edilmesi hastalığın evresi ile de yakından ilişkilidir. Özellikle erken evre vajina kanserinde tedavi amacıyla tercih edilen brakiterapi, ilerlemiş vakalarda ya da palyatif süreçte tümörlerin küçültülerek ağrının hafifletilmesi ve hastalık semptomlarının en aza indirilmesi amacıyla kullanılabilir (J. Chen et al., 2021).

Hedefe yönelik bir tedavi olması brakiterapinin vajina kanseri terapi sürecinde ya da sonrasında yan etkilerinin ortaya çıkmasının önüne geçememektedir. Vajina kanserinde brakiterapi sonucu yaygın olarak geçici tahriş, vajina dokularında enfeksiyon ve bağırsak veya mesane fonksiyon bozuklukları gibi değişiklikler ortaya çıkabilmektedir. Bu semptomatik yan etkilerin şiddeti hastalar arasında bireysel farklılıklara bağlı olarak değişmektedir. Bu yan etkiler ve brakiterapi nedenli tedavi başarısını izlemek amacıyla klinik kontrol ve görüntüleme teknikleri kullanılabilir. Bu takip hastalar arasındaki farkları da ortaya koyabileceğinden kişiye özel tedavinin uzman ekiplerce ayrıntılı olarak planlanmasını ve yönetilerek uyarlanabilmesini sağlayan veriler ortaya koyabilmektedir (Qin et al., 2022).



Şekil 4. Vajina kanserinde brakiterapi uygulaması.

2.2.4. Baş ve Boyun Kanseri Tedavisi

Baş ve boyun kanserleri dünya genelinde mortalitesi ve insidansı üst sıralarda yer alan ciddi toplum sağlığı sorunları arasında yer almaktadır. Brakiterapi baş ve boyun kanserlerinin tedavisinde başarılı bir şekilde uygulanmakta olup birçok avantaj sunmaktadır (Bhalavat et al., 2020). Baş ve boyun kanseri tedavisinde brakiterapi kullanımının önemine aşağıda yer alan başlıklarda yer verilmiştir.

2.2.4.1. Hedeflenmiş Radyasyon Dağıtımı

Baş ve boyun kanserlerinde brakiterapi kullanımının en önemli nedenlerinden biri hedeflenmiş radyasyon dağıtımının sağlanmasıdır. Bu dağıtımda, radyasyon kanserli bölgeye hassas olarak hedeflenmektedir ve etkilenen bölgenin çevresinde yer alan sağlıklı dokuların bu radyasyondan etkilenmesi en alt seviyede tutulmaktadır. Baş ve boyun kanserlerinin neredeyse tüm türlerinde uygulanabilen brakiterapinin özellikle baş ve boyun bölgesinde oluşmuş olan küçük ya da lokalize tümörlerin tedavisinde yüksek etkinliği görülmektedir (Lin et al., 2021).

2.2.4.2. Organ Fonksiyonlarının Korunması

Brakiterapi uygulanması sırasında radyasyonun odaklanmış olarak verilmesi, larenks, farenks ve tükürük bezleri gibi dokuların ve organların korunmasında etkili olabilmektedir (Wang & Tepper, 2021). Baş ve boyun kanserlerinin tedavisinde brakiterapi, harici işın radyasyonuna kıyasla uygulama sırasında etkilenen konuşma ve yutma gibi fonksiyonların daha iyi korunmasını sağlayabilmektedir (Bhalavat et al., 2020).

2.2.4.3. Tümör Dokusuna Yüksek Doz

Brakiterapi tekniğinin uygulanması ile baş ve boyun kanserlerinin tedavisindeki başarı artırılabilir. Bu başarı durumu değişikliğinin esas nedeni, kanserli bölge yakınındaki normal dokuların korunabilmesi ve bu süreçte tümöre daha yüksek dozda radyasyonun odaklanarak verilebilmesidir. Baş ve boyun kanseri tedavisinde brakiterapi harici işın radyasyonuna dirençli tümörlerin tedavisinde de başarıyla uygulanabilmektedir (Wierzbicka et al., 2016).

2.2.4.4. Harici Işın Tedavisi ile Kombine Kullanım

Tedavi başarısının yükseltilebilmesi için brakiterapi diğer ışın tedavisi yöntemleri ile eş zamanlı olarak kullanılabilir. Bu uygulamalarda, brakiterapi genellikle harici ışın radyasyon tedavisi ile kombine edilerek kullanılmaktadır. Birlikte kullanım lokal olarak ilerlemiş vakalarda ya da rekürrensi yüksek tümörlerin kontrolünde tedaviyi daha etkili hale getirmektedir. Burada rekürrens gelişen bölgeye daha yoğun radyasyon dozu verilerek kalıcı ya da tekrarlayan özellikteki kanserlerin daha etkili olarak yönetimi sağlanabilmektedir (Zelevsky et al., 2008).

2.2.4.5. Azaltılmış Tedavi Süresi

Brakiterapi, harici ışın radyasyonu gibi tedavi uygulamalarına kıyasla belirli vakalara özel olarak baş ve boyun kanserlerinde de daha kısa bir terapi süreci sağladığından hastalara terapi sürecinde konfor sunmaktadır. Böylece multidisipliner bir terapi kararı olarak baş ve boyun kanserli vakalarda uygun bir yöntem olarak brakiterapi tercih edilmektedir (Joya et al., 2022).

2.2.4.6. Hastaya Özel Aplikatör Kullanımı

Baş ve boyun kanserinde brakiterapi kullanımının önemli noktalarından birisi hastaya özel aplikatörlerin uygulanabilmesiyle tedavinin daha kişiye özel kılınabilmesidir. Hastaya özel taramalardan sonra vakanın spesifik özelliklerine uyarlanmış aplikatörler radyasyonu tümöre özel şekil ve konumda uygulamak için kullanılmaktadır. Bu uyarılma sonucunda tedavi daha hassas ve komşu hücre ve dokuların sağlığının korunabildiği özel tedavi şeklinde uygulanarak tedavi etkinliği artırılabilir (Mitra et al., 2021; Mitra et al., 2020).

2.2.4.7. Erken Evre Hastalığın Yönetimi

Brakiterapi, diğer birçok kanser türünde olduğu gibi erken evre baş ve boyun kanserlerinin tedavisinde de yaygın olarak kullanılan bir radyasyon tedavisi şeklidir. Erken evre kanserlerin tedavisinde geleneksel olarak uygulanan cerrahi tekniği, harici ışın tedavisi gibi tedavi yöntemlerine etkinliği yüksek bir seçenek olarak brakiterapi tercih edilmektedir (Y. Chen et al., 2021). Baş boyun kanserlerinin tedavisinde brakiterapi kullanımı tedavi etkinliğini yükseltmesi, kişiye özel uyarlanabilir tedavi seçeneği sunması ve hassas hedefleme ile etkili tümör tedavisi sağlayabilmesi gibi birçok farklı avantajlar sunmaktadır (Tuček, Vošmik, & Petera, 2022). Brakiterapinin baş boyun kanseri tedavisinde

kullanılabilmesi tümörün spesifik özelliklerine, konumuna ve hastanın genel sağlık durumu gibi bireysel olarak değişiklik gösterebilen faktörlere bağlıdır. Uzman ve multidisipliner bir yaklaşımla brakiterapi kullanma kararı, vakaya özel olarak optimize edilerek hassas ve etkili tedavi planının sağlanmasını gerektirmektedir. Bu karar radyasyon onkologları, medikal fizikçiler ve cerrahlar gibi sağlık uzmanları ekibi tarafından verilmekte olup hastaya detaylı bilgilendirme ve gerekli durumlarda takip gerekliliği de bildirilerek uygulanmaktadır (Y. Li, Jiang, Qiu, Sun, & Wang, 2022).

2.2.5. Cilt Kanseri Tedavisinde Brakiterapi Uygulaması

Cilt kanseri farklı nedenlere bağlı olarak gelişen günümüzde insidansı yüksek olan kanserler arasında yer almaktadır. Cilt kanseri tedavisi için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan brakiterapi genellikle bazal hücreli karsinom (BCC) ve skuamöz hücreli karsinom (SCC) gibi melanomun dışında kalan cilt kanseri vakalarında kullanılmaktadır. Diğer kanser terapilerinden farklı olarak cilt kanseri tedavisinde brakiterapi radyoaktif kaynakların cilt yüzeyine doğrudan yerleştirilmesi şeklinde uygulanabilmektedir. Birçok kanser vakasına benzer olarak cilt kanserinde brakiterapi uygulama prosedürü tümörün içine ya da çevresine uygulanan kateterler veya aplikatörlere radyoaktif maddenin yerleştirilmesi ile de yapılabilmektedir. Brakiterapinin genel amacı olarak cilt kanserinde de kanser bölgesi çevresindeki sağlıklı dokulara en az maruziyetle etkilenen bölgedeki kanser hücrelerine yüksek dozda radyasyon vermektir (Cisek et al., 2021; Luca et al., 2021). Cilt kanseri tedavisinde brakiterapi uygulaması sırasında önemli olan konular aşağıda başlıklar halinde incelenmiştir.

2.2.5.1. Cilt Kanseri Tedavisinde Uygulanan Brakiterapi Türleri

Cilt kanseri tedavisi için uygunluğu onaylanan ve genellikle uygulanan iki farklı brakiterapi türü vardır. Bunlardan ilki yüzey brakiterapisidir (Brovchuk, Park, Shepil, Romanenko, & Vaskevych, 2022a). Yüzey brakiterapisinde cilt altında bulunan tümörün üzerindeki cilt yüzeyine radyoaktif kaynağın doğrudan yerleştirilmesi ile uygulanmaktadır. Cilt kanserinin tedavisinde uygulanan ikinci brakiterapi türü ise interstisyel brakiterapidir. Bu brakiterapi yönteminde radyasyon kaynakları kateterler ya da iğneler doğrudan tümörün içine ya da tümör çevre dokularının içine yerleştirilmektedir (Brovchuk, Park, Shepil, Romanenko, & Vaskevych, 2022b).

2.2.5.2. Brakiterapinin Cilt Kanseri Tedavisindeki Endikasyonları

Brakiterapinin cilt kanseri tedavisinde kullanımı genellikle yüzeysel cilt tümörleri için uygundur. Bunun tercih edilmesinin sebebi yüzeysel cilt tümörlerinde hedeflenmiş radyasyonun verileceği kanserli bölgenin çok yakınında yer alan sağlıklı dokuları korumanın büyük öneme sahip olmasıdır. Buna ilaveten kozmetik olarak hassas bölgelerde de brakiterapi kullanılabilir. Bu bölgelerde kozmetik görünümün korunması önemli olduğundan tedavide brakiterapi tercih edilmektedir (Sevim, 2018).

2.2.5.3. Cilt Kanseri Tedavisinde Brakiterapinin Avantajları

Cilt kanseri tedavisi için kullanılan brakiterapi geleneksel tedavi yöntemlerine kıyasla birçok avantaj sağlamaktadır. Burada sağlanan en önemli avantajlardan birisi konformal tedavi uygulanabilmesidir. Konformal tedavi, tedavisi hedeflenen bölgenin ve yakınında bulunan sağlıklı dokuların üç boyutlu olarak görüntülenmesini takiben tümör dokusuna en yüksek radyasyon dozu verilerek çevredeki sağlıklı dokuların bu radyasyon yayılımından en az düzeyde etkilenmesi planlanmaktadır. Günümüzde kullanılan konformal radyoterapi tekniklerinden olan brakiterapi konformal tedavi yaklaşımının cilt kanseri tedavisinde uygulanmasını sağlamaktadır. Brakiterapi ile sunulan diğer bir önemli avantaj ise geleneksel olarak kullanılan harici ışın radyasyon tedavisine kıyasla daha kısa tedavi süresiyle hastaların tedavi sürecinde daha konforlu olmalarını sağlamasıdır. Bunlara ilaveten ayakta tedavi prosedürü ve en az düzeyde rahatsızlığa sebep olması brakiterapinin cilt kanseri tedavisinde sağladığı önemli avantajlardandır. Tedavi sürecinde hissedilebilen en az düzeydeki rahatsızlık genellikle hastalar tarafından iyi tolere edilmektedir (Ongel, Mergen, Ayyıldız, & Tavli, 2009).

2.2.5.4. Tedavi Takibi ve Sınırlılıkları

Kanser tedavisi genellikle uzun ve zor bir süreç olduğundan süreç sonrasında tedavinin etkinliğini değerlendirmek, rekürrens oluşumunu izlemek ve kişiye özel sürecin sınırlılıklarını belirlemek için düzenli takip muayeneleri ve görüntülemeleri yapılmaktadır. Cilt kanserinde brakiterapinin her vaka için uygun olmaması uygulamaya yönelik sınırlılıklarından kaynaklanmaktadır. Bu sınırlılıklardan biri tümörün boyutu ve derinliğidir. Ciltteki küçük ve yüzeysel tümörlerin tedavisinde brakiterapi daha uygundur. Sınırlılıklardan bir diğeri ise

cilt lezyonunun yeri ve özelliklerinin vakarda farklılık göstermesidir. Burada brakiterapinin hassas optimizasyonu gereklidir (Dönmez Yılmaz & Ünsal, 2013).

Kişisel farklılıklar nedeniyle uygulanacak spesifik brakiterapi türünün değişkenlik gösterdiği ve uygulama esnasında dikkat edilecek konuların hastanın genel sağlık durumuna ve tedavi edilmesi planlanan cilt kanseri türüne bağlı olarak değişebileceği bilinmektedir. Tüm kanser tedavi süreci ve uygulamalarında olduğu gibi cilt kanseri tedavisinde brakiterapinin uygulama kararı radyasyon onkologları ve dermatologlar da dahil olmak üzere geniş bir sağlık uzmanları ekibince alınmaktadır (ÇELEBİOĞLU, 2001).

2.2.6. Göz Kanseri Tedavisine Brakiterapi

Brakiterapi, özellikle göz içi tümörlerinde ve belirli göz kanseri türlerinin tedavisinde kullanılabilen bir tedavi yöntemidir. Yaygın olarak gözün pigmentli tabakasında oluşan koroidal melanomun tedavisinde brakiterapi uygulanmaktadır. Bunun dışında, nadir görülen bir çocukluk çağı göz kanseri olan retinoblastomun belirli vakalarında da brakiterapi uygulanabilirliği gösterilmiştir (Simpson et al., 2014). Göz kanseri vakalarında brakiterapi kullanımına yönelik önemli noktalar aşağıda ayrıntılarıyla yer almaktadır.

2.2.6.1. Göz Kanseri Vakalarında Brakiterapi Uygulama Prosedürleri

Tedavisi planlanacak olan kanserler için farklı brakiterapi prosedürlerinin uygulanması gerekmektedir. Plak brakiterapi göz içi tümörlerinde altın veya farklı bir malzemeden üretilmiş plakların cerrahi operasyonla tümör üstünde yer alan göz dış yüzeyine yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen bir radyasyon tedavisini tanımlamaktadır. İyot-125 (Wen, Oliver, & McCannel, 2009) ve Rutenyum-106 (Kreusel, Bornfeld, Lommatzsch, Wessing, & Foerster, 1998) radyoaktif izotopları göz tümörlerinin tedavisinde plak brakiterapisi uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu radyoaktif izotoplar göz içi kanserlerin tedavisinin etkili olarak gerçekleştirilmesi için gerekli olan düşük enerjili radyasyonu bölgeye yaymaktadırlar. Plak dışında belirli göz kanseri vakalarında uygulanabilen radyasyon tedavisi prosedürü küçük radyoaktif tohumların ya da iğnelerin tümörün içine ya da tümör çevresinde yer alan dokunun içine doğrudan yerleştirilerek uygulanmasını kapsamaktadır (Belaïd et al., 2016).

2.2.6.2. Göz Kanseri Tedavisinde Brakiterapi Uygulamasının Avantajları

Brakiterapi göz tümörlerinin tedavisinde yüksek hassasiyet, çevre dokulara en az düzeyde radyasyon maruziyeti ve tedavide görme yetisinin korunması ve kısa süren tedavi süreci gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Hassasiyet avantajı tümör çevresindeki normal dokuları radyasyondan koruyarak tümöre hedefli radyasyonun verilmesini sağlamasından kaynaklanmaktadır. Birçok geleneksel tedavi yöntemi göz kanserlerinde uygulanırken görme yetisi kaybolabilmektedir. Brakiterapi uygulamasıyla tedavide birçok göz kanseri vakasında görme yetisinin korunması sağlanabilmektedir. Burada tedavi yanıtını izlemek ve rekürrensi belirlemek için ultrason ve MR gibi farklı yöntemlere başvurulmaktadır. Göz kanseri tedavisinde uygulanacak olan brakiterapi kişiye özel uyarlanan spesifik prosedüre bağlı olarak değişmekle birlikte hastalara ayakta ya da kısa süreli hastane yatışı verilerek sağlanmaktadır. Bu tedavi yönteminde iyileşme süreci de hastaya özel vakalar arasında değişiklik göstermektedir. Hastalar genellikle günlük hayatlarında çok küçük kesintiler yaşayarak kısa sürede tedavi yanıtını gösterebilmektedirler (KIRATLI & ELDEM, 1998; Tuncer).

2.2.6.3. Tedavi Planlaması ve Uygulamasında Multidisipliner Yaklaşım

Göz kanseri tedavisinde brakiterapi kullanma kararı diğer tedavi uygulamalarında olduğu gibi multidisipliner bir yaklaşımı gerektirmektedir. Bu kararda hastalar arasındaki bireysel vaka farklılıkları yani tümörün türü ve boyutu, göz içindeki konumu ve hastanın genel sağlık durumu göz önünde bulundurulmaktadır. Multidisipliner ekipte tedavi planı oluşturmak üzere genellikle oküler onkoloji uzmanı, oftalmologlar ve radyasyon onkologları bulunmaktadır (Chevli et al., 2021; Messer et al., 2020).

2.3. Nükleer Tıpta Radyofarmasötikler

Nükleer tıp, birçok farklı tıbbi durum teşhisi ve tedavisinde radyoaktif maddelerin kullanımını kapsayan tıp uzmanlık alanıdır. Nükleer tıpta radyofarmasötikler çok önemli bir role sahiptir. Radyofarmasötikler, bir farmasötik ajan ile birleştirilmiş bir radyoaktif izotopa sahip bileşiklerdir. Böylelikle oluşan farmasötik ajan ve radyonüklid birlikteliği radyasyonun belirli organlara, dokulara ya da hücrelere hedefli olarak verilmesini sağlamaktadır. Hastalara radyofarmasötiklerin uygulanması sonucu radyoaktif maddeler vücut içine yayılmaktadır. Bu maddelerin yayılımı ve davranışları özel görüntüleme teknikleri kullanılarak takip edildiğinde birçok tıbbi durum tespiti ve hastalık

tedavisi gerçekleştirilebilmektedir. Radyofarmasötiklerin bilinen bir diğeri adı radyotraserlerdir. Radyotraserler, gama kameraları veya pozitron emisyon tomografisi (PET) tarayıcıları ile saptanabilen gama ışınları yayarak doku ve organların sağlık durumu hakkında veriler sunmaktadır.

2.3.1. Radyofarmasötiklerin Teşhiste Kullanımı

Radyofarmasötikler belirli hastalıkların teşhisinde görüntüleme yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Teşhis amaçlı radyofarmasötik aracılı görüntüleme tek foton emisyon bilgisayarlı tomografi (SPECT) ve pozitron emisyon tomografisi (PET) olarak iki şekilde gerçekleştirilmektedir. SPECT yönteminde vücut iç yapılarının üç boyutlu görüntüleri gama ışınları yayan radyofarmasötiklerin kullanımı ile gerçekleştirilmektedir ve kemik bozuklukları, kalp sorunları ve belirli kanserlerin teşhisine yardımcı olmaktadır. PET görüntülemede ise pozitron yayan radyofarmasötikler kullanılmaktadır. Yöntemin mekanizmasında bir pozitronun bir elektronla çarpışması sonucu iki gama ışını üretilmesi yer almaktadır. PET tarama kanserin evrelemesi, beyin görüntülenmesi ve kardiyak perfüzyonun değerlendirilmesinde onkoloji, nöroloji ve kardiyoloji dallarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Calabria, Leporace, Tavolaro, & Bagnato, 2023; Lange, Schreuder, & Hendrikse, 2023).

2.3.2. Radyofarmasötiklerin Terapötik Uygulamaları

Tanısal amaçla kullanımlarına ilaveten bazı radyofarmasötiklerin terapötik uygulamaları vardır. Birçok farklı radyofarmasötik kanser tedavisinde kullanılmaktadır. Tedavi amacıyla en sık kullanılan radyofarmasötiklere örnek olarak radyoaktif iyot (I-131), stronsiyum-89, samaryum-153, lutesyum-177 ve itriyum-90 verilebilir (Zeliha Pala & Şen, 2023). I-131 tiroid kanseri ve hipertiroidizm gibi tiroid hastalıklarının tedavisinde kullanılmaktadır. Stronsiyum-89 ve samaryum-153 radyofarmasötikleri kemik metastazı olan kanser hastalarında ağrı kesici olarak kullanılmaktadır (Parlak et al., 2020). Nöroendokrin tümörler ve prostat kanseri gibi kanserlerin tedavisinde hedefe yönelik radyonüklid olarak lutesyum-177 ve itriyum-90 kullanılmaktadır (Alsharaf, Alanazi, Alharthi, Qandil, & Qushawy, 2020).

Bu amaçlarla kullanılan radyofarmasötikler tipik olarak siklotronlar ya da nükleer reaktörler kullanılarak üretilmektedir. Üretilen radyofarmasötiklerin güvenliğini ve etkinliğini denetlemek için kalite kontrol işlemlerinin gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Tedavi veya tarama amaçlı

kullanılacak olan radyonüklidlerin seçimi, uygulanacak vakanın özel durumları ve gerekli görüntüleme süresine bağlıdır. Burada kullanılacak olan radyofarmasötiklerin yarılanma ömrü de seçimde dikkat edilmesi gereken bir diğer noktalardan. Belirli farmasötikler kısa yarılanma ömürlü olup özellikle yerinde üretim ve hemen kullanımı gerektirmektedirler. Yarılanma ömrü uzun olanlar ise üretim yerlerinden tıbbi tesislere dağıtılabilecek ve uygun raf ömrü kapsamında kullanılabilir özelliktedir (Parlak et al., 2020).

Radyofarmasötiklerin kullanımı esnasında sağlık ekibinin ve hastaların radyasyona daha az düzeyde maruz kalmaları için ciddi güvenlik protokolleri uygulanmaktadır. Bu tedbirler kapsamında uygulamalar radyasyon risklerini en aza indirirken tedavi etkinliğini sağlamak için hassas ayarlanmış dozlarda uygulama gerçekleştirilmektedir (Alsharaf et al., 2020).

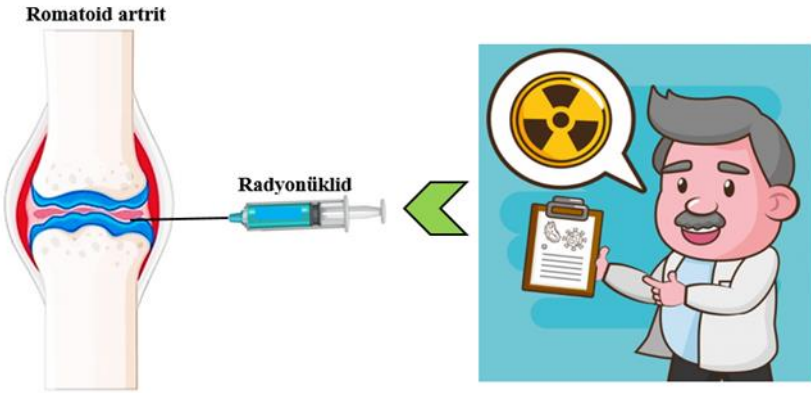
Radyofarmasötiklerin tıbbi uygulamaları özetlendiğinde nükleer tıp alanında en önemli unsurlardan oldukları ortaya çıkmaktadır. Çeşitli tanısal görüntüleme ve terapötik uygulamalarda kullanılabilen değerli ajanlar olan radyofarmasötikler sağlık hizmetlerinde nükleer tıbbın yetkinliklerini ve uygulamalarını genişletmeye alanlarında yapılan çalışmalar ile katkı sunmaya devam etmektedir.

2.4. Ağrı Yönetiminde Radyoaktif Ajanların Kullanımı (Radyosinovektomi)

Sinovit, eklemleri kaplayan sinoviyal membranın inflamasyonudur. Bu durum eklemlerde ağrı, şişme ve sertliğe yol açmaktadır. Sinovit gibi belirli eklem hastalıklarıyla ilgili ağrı ve inflamasyon tedavisinde radyosinovektomi (Şekil 5) yöntemi kullanılmaktadır. Radyosinovektomide, inflamasyonu ve buna bağlı semptomları hafifletmek için eklem içine radyoaktif madde enjeksiyonu yapılmaktadır. Tüm radyasyon tedavisi yöntemlerinde olduğu gibi radyosinovektomide de hasta seçimi önemlidir (Mödder, 2020). Uygulamadan önce hastalar sağlık uzmanlarınca fiziki muayenenin yanı sıra eklem inflamasyon boyutunu değerlendirmek için X-ışınları, MRI ya da ultrason gibi detaylı görüntüleme teknikleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmektedir. Hasta seçimini takiben ortaya çıkan verilere dayanılarak hastalığın tedavisinde uygulanacak olan radyofarmasötik seçimi yapılmaktadır. Farmasötik seçimi, eklem boyutu ve yeri gibi faktörler dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Her bir hasta ve hastalık boyutuna özel olarak hassas taramalardan sonra belirlenmiş radyofarmasötikler ilgili bölgeye floroskopi veya ultrason gibi görüntüleme teknikleriyle kontrol edilen bir şırınga veya iğne kullanılarak doğrudan enjekte

edilmektedir (Miszczyk et al., 2020). Eklem içine uygulama yapıldıktan sonra hastalığın tedavisi için hedeflenen amaç radyoaktif parçacıkların sinoviyal membranı hedefleyerek radyasyon yaymasıdır. Enjeksiyon sonrasında radyoaktif parçacıklar inflamasyonlu sinoviyal dokuda lokalize olarak yaydıkları radyasyon ile sinoviyumdaki aşırı aktif hücreleri baskılayarak veya yok ederek inflamasyonu azaltmayı sağlamaktadırlar. Tedavi sırasında uygulanan radyofarmasötüğün dağılımını ve oluşan tedavi etkinliğini izlemek gerekmektedir. Enjeksiyon sonrası tedavi etkinliğinin optimum düzeyde olması için bazı vakalarda eklem kısa süreli hareketsiz kalması sağlanmaktadır (Ray & Rowbotham).

Radyosinovektominin en yaygın kullanımı romatoid artrit ve belirli spondiloartrit gibi eklem hastalıklarında gerçekleştirilmektedir. Tüm vakalarda esas amaç ağrı ve inflamasyonun güvenli ve etkili olarak yönetilebilmesidir. Bu tekniğin uygulama kararı kişisel farklılıklar ve hastalığın spesifik özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Karar aşamasında sağlık uzmanları eklem hastalık türü ve evresi, hastanın genel sağlık durumu ve genel uygulamanın potansiyel risk ve faydalarını dikkate almaktadır (Patra et al., 2023).



Şekil 5. Eklem romatizması tedavisinde radyosinovektomi uygulaması.

2.5. Kan Hastalıklarında Radyoizotop Tedavisi

Kan hastalıklarının birçoğunda radyoaktif madde kullanımıyla tedavi uygulamaları mevcuttur. Radyoizotop tedavisi, radyonüklid tedavisi (Wang & Tepper, 2021) veya nükleer tıp tedavisi (Wolfgang et al., 2020) olarak da

bilinmekte olup belirli kan hastalıklarının tedavisinde radyoizotopların kullanılmasına dayanan terapi uygulamasıdır. Radyasyon tedavilerindeki genel amaca benzer olarak radyoizotop tedavisinde de hasta bölge çevresinde bulunan sağlıklı dokuların radyasyona en az düzeyde maruz kalması bununla eş zamanlı olarak da anormal hücrelerin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. Polisitemi vera, lenfomalar, miyeloproliferatif bozukluklar ve kemik iliği bozuklukları gibi belirli kan hastalıklarının tedavisi için radyoizotop tedavisi yaygın olarak kullanılmaktadır (KÜPESİZ et al.). Polisitemi vera eritrositlerin aşırı üretiminden kaynaklanan kan hastalığıdır ve tedavisinde özellikle fosfor-32 (^{32}P) radyonüklidi (Ertay, 2023) kemik iliğindeki eritrosit üretimini baskılamak amacıyla kullanılmaktadır. Bazı radyoizotoplar, özellikle lenfomalardaki kanserli hücreleri hedef alan antikora bağlanabilen radyasyon tedavisi seçeneği sunmaktadır. Bu kombine yaklaşım radyoimmünoterapi olarak adlandırılmakta olup özellikle Hodgkin lenfoma dışına kalan lenfoma türlerinin tedavisinde kullanılmaktadır. Buna ilaveten, miyelofibroz veya esansiyel trombositemi gibi miyeloproliferatif bozukluklarının semptomlarını gidermek için de radyonüklid tedavisi uygulanabilmektedir (İlem-ÖZdemİR, HiŞır, & EkiNci, 2022). Radyoizotop seçimi ve spesifik tedavi yaklaşımı, kan bozukluğunun türüne ve evresine bağlıdır. Kan bozukluğu tedavisinde en yaygın kullanılan radyoizotoplar iyot-131 (^{131}I), fosfor-32 (^{32}P) ve itriyum-90'dır (^{90}Y) (KÜPESİZ et al.) .

Genel değerlendirmesi yapıldığında radyoizotop tedavisi geleneksel kanser tedavilerine kıyasla radyasyon maruziyeti özelliğinden kaynaklı olarak daha hassas ve spesifik bir terapi uygulamasıdır. Tedavide uygulanacak tıbbi prosedür alanında uzman olan sağlıkçılar tarafından kişiye özel planlanabilmektedir. Hassas tedavi planlaması ve tedavi sonrası yan etkilerin ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi açısından hastalığın takibi önemlidir. Belirli kanser tedavilerinde kullanılabilen radyoizotop terapisi etkin tedavi süreci sağlayabilmektedir.

2.6. Sonuç ve Öneriler

Radyoaktif maddelerin tıpta kullanımının kanser başta olmak üzere birçok hastalığın tedavisinde uygulaması mevcuttur. Radyasyon maruziyetinden dolayı hastaların ve sağlık çalışanlarının tedavi sürecindeki güvenliğini sağlamak gerekmektedir. Ayrıca, korunma ve uygulama prosedürleri ciddi kuralları olan bir düzenlemeyi kapsamaktadır. Radyasyon tedavisinde hasta seçimi ve hastaya özel tedavi seçimi yapılırken ön taramalar ve genel sağlık durumu

değerlendirmeleri yapılmaktadır. Uygulama esnasında en uygun dozaj ve tedavi tekniği kişiye ve vakaya özel olarak dikkatlice belirlenmiş olup yüksek tedavi etkinliği sağlanmaktadır. Yapılan araştırmalar daha da ileri seviye tedavi etkinliğine ulaşılması için kombinasyon tedavileri ve gelişmiş hassasiyetli hedeflemelerin yapılabilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu konuda devam eden araştırma çalışmaları sonucunda başta kanser olmak üzere önemli toplum sağlık sorunu haline gelmiş birçok hastalığın tedavisinde daha konforlu ve yüksek etkili tedavinin gerçekleştirilebileceği öngörülmekte olup hem *in vitro* hem de *in vivo* koşullarda daha ileri araştırmaların yapılarak radyasyon tedavisinin etkinliğinin artırılması önerilmektedir.

Kaynaklar

- Akino, Y., Tohyama, N., Akita, K., Ishikawa, M., Kawamorita, R., Kurooka, M., . . . Nakamura, M. (2019). Modalities and techniques used for stereotactic radiotherapy, intensity-modulated radiotherapy, and image-guided radiotherapy: A 2018 survey by the Japan Society of Medical Physics. *Physica Medica*, *64*, 182-187. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.07.009>
- Alsharif, S., Alanazi, M., Alharthi, F., Qandil, D., & Qushawy, M. (2020). Review about radiopharmaceuticals: preparation, radioactivity, and applications. *Int J App Pharm*, *12*(3), 8-15.
- Anuja, J. (2022). Updates in the treatment of vaginal cancer. *International Journal of Gynecologic Cancer*, *32*(3), 344. doi:10.1136/ijgc-2021-002517
- Armstrong, N., Bahl, A., Pinkawa, M., Ryder, S., Ahmadu, C., Ross, J., . . . Payne, H. (2021). SpaceOAR Hydrogel Spacer for Reducing Radiation Toxicity During Radiotherapy for Prostate Cancer. A Systematic Review. *Urology*, *156*, e74-e85. doi:<https://doi.org/10.1016/j.urology.2021.05.013>
- Banerjee, R., & Kamrava, M. (2014). Brachytherapy in the treatment of cervical cancer: a review. *International Journal of Women's Health*, *6*(null), 555-564. doi:10.2147/IJWH.S46247
- Belaïd, A., Nasr, C., Jmour, O., Cherif, A., Kochbati, L., Bouguila, H., . . . Benna, F. (2016). Brachytherapy of Uveal Melanomas with Ruthenium-106 Plaques. *Asian Pac J Cancer Prev*, *17*(12), 5281-5285. doi:10.22034/apjcp.2016.17.12.5281
- Bhalavat, R., Budrukkar, A., Laskar, S. G., Sharma, D., Mukherji, A., Chandra, M., . . . Saraf, S. (2020). Brachytherapy in head and neck malignancies: Indian Brachytherapy Society (IBS) recommendations and guidelines. *Journal of Contemporary Brachytherapy*, *12*(5), 501-511. doi:10.5114/jcb.2020.100385
- Bohannon, P. (1982). The effects of bathing on skin exposed to cobalt-60 telepathy.
- Brovchuk, S., Park, S.-J., Shepil, Z., Romanenko, S., & Vaskevych, O. (2022a). High-dose-rate skin brachytherapy with interstitial, surface, or a combination of interstitial and surface mold technique. *14*(2), 107-114. doi:10.5114/jcb.2022.114661
- Brovchuk, S., Park, S.-J., Shepil, Z., Romanenko, S., & Vaskevych, O. (2022b). High-dose-rate skin brachytherapy with interstitial, surface, or a

combination of interstitial and surface mold technique. *Journal of Contemporary Brachytherapy*, 14(2), 107-114. doi:10.5114/jcb.2022.114661

- Calabria, F., Leporace, M., Tavolaro, R., & Bagnato, A. (2023). Radiopharmaceuticals. In *Radiology-Nuclear Medicine Diagnostic Imaging* (pp. 133-162).
- Catherwood, P. A., Finlay, D. D., & McLaughlin, J. A. D. (2016). Intelligent Subcutaneous Body Area Networks: Anticipating Implantable Devices. *IEEE Technology and Society Magazine*, 35(3), 73-80. doi:10.1109/MTS.2016.2593219
- Chen, J., Zhang, N., Liu, Y., Han, D., Mao, Z., Yang, W., & Cheng, G. (2021). Analysis of Applicator Insertion Related Acute Side Effects for Cervical Cancer Treated With Brachytherapy. 11. doi:10.3389/fonc.2021.677052
- Chen, Y., Dai, J., Jiang, Y., Ji, Z., Jiang, P., Sun, H., . . . Wang, J. (2021). Long-Term Outcomes of Personalized Stereotactic Ablative Brachytherapy for Recurrent Head and Neck Adenoid Cystic Carcinoma after Surgery or External Beam Radiotherapy: A 9-Year Study. 11(9), 839.
- Chevli, N., Scheffler, A. C., Bretana, M. E., Pino, R., Butler, E. B., & Teh, B. S. (2021). Staged Eye-Plaque Brachytherapy: A Novel Approach for Large Uveal Melanoma. *Advances in Radiation Oncology*, 6(4), 100712. doi:https://doi.org/10.1016/j.adro.2021.100712
- Cisek, P., Kieszko, D., Bilski, M., Dębicki, R., Grywalska, E., Hryniewicz, R., . . . Grzybowska-Szatkowska, L. (2021). Interstitial HDR Brachytherapy in the Treatment of Non-Melanocytic Skin Cancers around the Eye. 13(6), 1425.
- Cozzi, S., Augugliaro, M., Ciammella, P., Botti, A., Trojani, V., Najafi, M., . . . Bardoscia, L. (2022). The Role of Interstitial Brachytherapy for Breast Cancer Treatment: An Overview of Indications, Applications, and Technical Notes. 14(10), 2564.
- Crapanzano, R., Secchi, V., & Villa, I. (2021). Co-Adjuvant Nanoparticles for Radiotherapy Treatments of Oncological Diseases. 11(15), 7073.
- Crook, J., Marbán, M., & Batchelar, D. (2020). HDR Prostate Brachytherapy. *Seminars in Radiation Oncology*, 30(1), 49-60. doi:https://doi.org/10.1016/j.semradonc.2019.08.003
- ÇELEBİOĞLU, B. (2001). Brakiterapi. *Ankara Sağlık Hizmetleri Dergisi*, 2(1).
- de la Torre-Alález, M., Matilla, A., Varela, M., Iñarrairaegui, M., Reig, M., Lledó, J. L., . . . Sangro, B. (2022). Nivolumab after selective internal radiation

- therapy for the treatment of hepatocellular carcinoma: a phase 2, single-arm study. *J Immunother Cancer*, 10(11). doi:10.1136/jitc-2022-005457
- Deng, X., Wu, H., Gao, F., Su, Y., Li, Q., Liu, S., & Cai, J. (2017). Brachytherapy in the treatment of breast cancer. *International Journal of Clinical Oncology*, 22(4), 641-650. doi:10.1007/s10147-017-1155-5
- Dilalla, V., Chaput, G., Williams, T., & Sultanem, K. (2020). Radiotherapy Side Effects: Integrating a Survivorship Clinical Lens to Better Serve Patients. *27(2)*, 107-112.
- Dönmez Yılmaz, B., & Ünsal, M. (2013). Brakiterapi.
- Durmuş Manalp, F. (2016). Radyoterapide, medikal lineer hızlandırıcılar ile bor nötron yakalama terapisinin yapılabilirliğinin incelenmesi.
- Ertay, T. (2023). Radionuclide Labeled Blood Cells. [Radyonüklid İşaretli Kan Hücreleri]. *Nukleer Tıp Seminerleri*, 9(1), 65-75. doi:https://doi.org/10.4274/nts.galenos.2023.0009
- Espenel, S., Kissel, M., Garcia, M. A., Schernberg, A., Gouy, S., Bockel, S., . . . Chargari, C. (2020). Implementation of image-guided brachytherapy as part of non-surgical treatment in inoperable endometrial cancer patients. *Gynecologic Oncology*, 158(2), 323-330. doi:https://doi.org/10.1016/j.ygyno.2020.05.032
- Fischbach, F., Hass, P., Schindele, D., Genseke, P., Geisendorf, L., Stehning, C., . . . Fischbach, K. (2020). MRI targeted single fraction HDR Brachytherapy for localized Prostate Carcinoma: a feasibility study of focal radiation therapy (ProFocAL). *European Radiology*, 30(4), 2072-2081. doi:10.1007/s00330-019-06505-0
- Fortin, I., Tanderup, K., Haie-Meder, C., Lindegaard, J. C., Mahantshetty, U., Segedin, B., . . . Pötter, R. (2016). Image guided brachytherapy in cervical cancer: a comparison between intracavitary and combined intracavitary/interstitial brachytherapy in regard to doses to HR CTV, OARs and late morbidity-early results from the Embrace study in 999 patients. *Brachytherapy*, 15, S21.
- Garduño-Sánchez, S., Villanego-Beltrán, I., de las Peñas-Cabrera, M. D., & Jaén-Olasolo, J. (2022). Comparison between Accelerated Partial Breast Irradiation with multicatheter interstitial brachytherapy and Whole Breast Irradiation, in clinical practice. *Clinical and Translational Oncology*, 24(1), 24-33. doi:10.1007/s12094-021-02664-z

- Gill, B. S., Chapman, B. V., Hansen, K. J., Sukumvanich, P., & Beriwal, S. (2015). Primary radiotherapy for nonsurgically managed Stage I endometrial cancer: Utilization and impact of brachytherapy. *Brachytherapy*, 14(3), 373-379. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2014.12.003>
- Girum, K. B., Lalande, A., Hussain, R., & Créhange, G. (2020). A deep learning method for real-time intraoperative US image segmentation in prostate brachytherapy. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 15(9), 1467-1476. doi:10.1007/s11548-020-02231-x
- Griffin, R. J., Prise, K. M., McMahon, S. J., Zhang, X., Penagaricano, J., & Butterworth, K. T. (2020). History and current perspectives on the biological effects of high-dose spatial fractionation and high dose-rate approaches: GRID, Microbeam & FLASH radiotherapy. *The British Journal of Radiology*, 93(1113), 20200217. doi:10.1259/bjr.20200217
- Harrison, K., Pullen, H., Welsh, C., Oktay, O., Alvarez-Valle, J., & Jena, R. (2022). Machine Learning for Auto-Segmentation in Radiotherapy Planning. *Clinical Oncology*, 34(2), 74-88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clon.2021.12.003>
- Huh, H. D., & Kim, S. (2020). History of Radiation Therapy Technology. *Progress in Medical Physics*, 31(3), 124-134. doi:10.14316/pmp.2020.31.3.124
- İlem-ÖZDEMİR, D., HiŞır, D., & EkiNci, M. (2022). HEDEFE YÖNELİK TEDAVİDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR: LUTESYUM-177 İLE İŞARETLİ RADYOFARMASÖTİKLER. [Current approaches to targeted therapy: Lutetium-177 labeled radiopharmaceuticals]. *Journal of Faculty of Pharmacy of Ankara University*, 46(1), 209-230. doi:10.33483/jfpau.1007773
- Joya, M., Nedaie, H. A., Geraily, G., Ghorbani, M., Sheikhzadeh, P., & Arani, M. N. J. H. (2022). BEBIG 60Co HDR brachytherapy source dosimetric parameters validation using GATE Geant4-based simulation code. 8(3).
- Kahraman ÇETİNTAŞ, S., SaribaŞ, Ö., Kurt, M., DEMİRÖZ Abakay, C., Kahraman, A., Altay, A., . . . ÖZbek, T. (2022). Parsiyel Meme Işınlamasında Cyberknife Sisteminde Farklı Kolimatörlerle Elde Edilen Stereotaktik Meme Radyoterapisi Sanal Planlarının Karşılaştırılması: Retrospektif Çalışma. [Comparison of Stereotactic Body Radiotherapy Virtual Plans Obtained with Different Colimators in Cyberknife System in Partial Breast Irradiation: Retrospective Study]. *Uludağ Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 48(3), 293-299. doi:10.32708/uutfd.1129971

- Kamrava, M., Alrashidi, S. M., & Leung, E. (2021). Interstitial brachytherapy for gynecologic malignancies: Complications, toxicities, and management. *Brachytherapy*, 20(5), 995-1004. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2020.12.008>
- Karius, A., Lotter, M., Kreppner, S., Schaller, V., Lubgan, D., Grigo, J., . . . Bert, C. (2022). Permanent LDR prostate brachytherapy: Comprehensive characterization of seed-dynamics within the prostate on a seed-only level. *Brachytherapy*, 21(5), 635-646. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2022.04.007>
- Karpov, T., Postovalova, A., Akhmetova, D., Muslimov, A. R., Eletskaia, E., Zyuzin, M. V., & Timin, A. S. (2022). Universal Chelator-Free Radiolabeling of Organic and Inorganic-Based Nanocarriers with Diagnostic and Therapeutic Isotopes for Internal Radiotherapy. *Chemistry of Materials*, 34(14), 6593-6605. doi:10.1021/acs.chemmater.2c01507
- Khatun, R. A., & Khatun, J. A Relative Investigation among Hypofractionated Radiotherapy and Conventional Fractionated Radiotherapy in the Locoregional Control of Carcinoma of the Cervix.
- Kim, Y. J., Kang, H.-C., & Kim, Y. S. (2020). Impact of intracavitary brachytherapy technique (2D versus 3D) on outcomes of cervical cancer: a systematic review and meta-analysis. *Strahlentherapie und Onkologie*, 196(11), 973-982. doi:10.1007/s00066-020-01658-0
- KIRATLI, H., & ELDEM, B. (1998). Subfoveal Subretinal Membran İle Seyreden Yaşa Bağlı Makula Dejeneresansı Tedavisinde Radyoterapinin Rolü ve İyot-125 Plak Brakiterapi Uygulaması Sonuçları. *Journal of Retina-Vitreous*, 6(2), 86-92.
- Koprivec, D., Rosenfeld, A., Cutajar, D., Petasecca, M., Howie, A., Bucci, J., & Poder, J. (2022). Feasibility of online adaptive HDR prostate brachytherapy: A novel treatment concept. *Brachytherapy*, 21(6), 943-955. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2022.07.011>
- Kreusel, K. M., Bornfeld, N., Lommatzsch, A., Wessing, A., & Foerster, M. H. (1998). Ruthenium-106 brachytherapy for peripheral retinal capillary hemangioma. *Ophthalmology*, 105(8), 1386-1392. doi:[https://doi.org/10.1016/S0161-6420\(98\)98017-4](https://doi.org/10.1016/S0161-6420(98)98017-4)
- Kudrevicius, L., Jaselske, E., Adliene, D., Rudzianskas, V., Radziunas, A., & Tamasauskas, A. (2022). Application of 3D Gel Dosimetry as a Quality Assurance Tool in Functional Leksell Gamma Knife Radiosurgery. 8(2), 69.

- KÜPESİZ, F. T., EKER, N., BOZ, A., AKYILDIZ, F. F., ÇEVİKOL, C., GÜVEN, D., & KÜPESİZ, A. PEDİYATRİK HEMOFİLİKLERDE KRONİK SİNOVİT İÇİN YTTRIUM-90 VE RHENIUM-186 İLE RADYOİZOTOP SİNOVEKTOMİNİN UZUN SÜRELİ DEĞERLENDİRMESİ: AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ DENEYİMİ.
- Lakosi, F., Antal, G., Pall, J., Farkas, A., Jenei, T., Nagy, D., . . . Toller, G. (2021). HDR brachytherapy boost using MR-only workflow for intermediate- and high-risk prostate cancer: 8-year results of a pilot study. *Brachytherapy*, 20(3), 576-583. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2020.12.003>
- Lange, R., Schreuder, N., & Hendrikse, H. (2023). Radiopharmaceuticals. In P. Le Brun, S. Crauste-Manciet, I. Krämer, J. Smith, & H. Woerdenbag (Eds.), *Practical Pharmaceutics: An International Guideline for the Preparation, Care and Use of Medicinal Products* (pp. 531-550). Cham: Springer International Publishing.
- Li, C., Lin, J.-F., & Yeh, H. L. (2021). Dosimetric characteristics of accelerated partial breast irradiation by interstitial multicatheter brachytherapy with intraoperative free-hand implantation in the treatment of early breast cancer. 22(3), 27-34. doi:<https://doi.org/10.1002/acm2.13169>
- Li, Y., Jiang, Y., Qiu, B., Sun, H., & Wang, J. (2022). Current radiotherapy for recurrent head and neck cancer in the modern era: a state-of-the-art review. *Journal of Translational Medicine*, 20(1), 566. doi:10.1186/s12967-022-03774-0
- Lichter, K., Anakwenze Akinfenwa, C., MacDuffie, E., Bhatia, R., Small, C., Croke, J., . . . Grover, S. (2022). Treatment of cervical cancer: overcoming challenges in access to brachytherapy. *Expert Review of Anticancer Therapy*, 22(4), 353-359. doi:10.1080/14737140.2022.2047936
- Lim, Y. K., & Kim, D. (2021). Brachytherapy: A Comprehensive Review. *Progress in Medical Physics*, 32(2), 25-39. doi:10.14316/pmp.2021.32.2.25
- Lin, M.-Y., Hsieh, H.-H., Chen, J.-C., Chen, C.-L., Sheu, N.-C., Huang, W.-S., . . . Wu, C.-Y. (2021). Brachytherapy Approach Using 177Lu Conjugated Gold Nanostars and Evaluation of Biodistribution, Tumor Retention, Dosimetry and Therapeutic Efficacy in Head and Neck Tumor Model. 13(11), 1903.
- Lindel, K. (2020). Intrakavitäre und interstitielle Brachytherapie. In H.-J. Schmoll (Ed.), *Kompendium Internistische Onkologie : Standards in Diagnostik und Therapie* (pp. 1-5). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Liu, Y., Yang, M., Luo, J., & Zhou, H. (2020). Radiotherapy targeting cancer stem cells “awakens” them to induce tumour relapse and metastasis in oral

- cancer. *International Journal of Oral Science*, 12(1), 19. doi:10.1038/s41368-020-00087-0
- Luca, T., Francesco Giuseppe, C., Bruno, F., Calogero, C., Alessandro Di, S., Valentina, L., . . . Vincenzo, V. (2021). Non-melanoma Skin Cancer Treated by Contact High-dose-rate Radiotherapy (Brachytherapy): A Mono-institutional Series and Literature Review. *In Vivo*, 35(4), 2313. doi:10.21873/invivo.12505
- Majeed, H., & Gupta, V. (2023). *Adverse Effects of Radiation Therapy*: StatPearls Publishing, Treasure Island (FL).
- McLaughlin, P. W., & Narayana, V. (2020). Progress in Low Dose Rate Brachytherapy for Prostate Cancer. *Seminars in Radiation Oncology*, 30(1), 39-48. doi:https://doi.org/10.1016/j.semradonc.2019.08.002
- Messer, J., Zuhour, R., Haque, W., Lewis, G. D., Schefler, A., Wong, A., . . . Teh, B. S. (2020). Eye plaque brachytherapy versus enucleation for ocular melanoma: an analysis from the National Cancer Database. *12(4)*, 303-310. doi:10.5114/jcb.2020.98108
- Miszczyk, M., Jochymek, B., Miszczyk, L., Matysiakiewicz, J., Spindel, J., Jabłońska, I., . . . Tukiendorf, A. (2020). The results of 394 consecutive cases of knee joint radiation synovectomy (radiosynoviorthesis) using 90Y. *Annals of Nuclear Medicine*, 34(2), 94-101. doi:10.1007/s12149-019-01418-w
- Mitra, D., M. Devlin, P., Buzurovic, I., Thornton, K., C. Lam, A., P. Raut, C., . . . B. Lam, M. (2021). Clinical outcomes following high-dose-rate surface applicator brachytherapy for angiosarcoma of scalp and face. *Journal of Contemporary Brachytherapy*, 13(2), 172-178. doi:10.5114/jcb.2021.105285
- Mitra, D., Pei, Y., Buzurovic, I., Devlin, P. M., Thornton, K., Raut, C. P., . . . Lam, M. B. (2020). Angiosarcoma of the Scalp and Face: A Dosimetric Comparison of HDR Surface Applicator Brachytherapy and VMAT. *Sarcoma*, 2020, 7615248. doi:10.1155/2020/7615248
- Mourya, A., Aggarwal, L. M., & Choudhary, S. (2021). Evolution of Brachytherapy Applicators for the Treatment of Cervical Cancer. *Journal of Medical Physics*, 46(4).
- Mödder, G. (2020). Radiosynoviorthesis (Radiation Synovectomy). In H. Ahmadzadehfar, H.-J. Biersack, L. M. Freeman, & L. S. Zuckier (Eds.),

Clinical Nuclear Medicine (pp. 1015-1024). Cham: Springer International Publishing.

- Nag, S., Erickson, B., Parikh, S., Gupta, N., Varia, M., & Glasgow, G. (2000). The American Brachytherapy Society recommendations for high-dose-rate brachytherapy for carcinoma of the endometrium. *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*Physics*, 48(3), 779-790. doi:https://doi.org/10.1016/S0360-3016(00)00689-1
- Oğuz, A. (2019). *Radyoterapide kullanılan lineer hızlandırıcıların fiziksel ve dozimetrik parametrelerinin karşılaştırılması*. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,
- Ongel, K., Mergen, H., Ayyıldız, Ü., & Tavli, T. (2009). KANSER TEDAVİSİNDE FİZİK İLE TIBBIN BULUŞTUĞU NOKTA: BRAKİTERAPİDE YENİLİKLER. [At the point where physics and medicine met: Innovations in brachytherapy]. *Medical Sciences*, 4(3), 85-92. doi:10.12739/NWSA.2014.9.1.1A0351
- Özdemir, S. (2021). Radyoterapi ve İmmun kontrol noktası İnhibitörlerinin birlikte kullanımı. *Mevlana Tıp Bilimleri Dergisi*, 1(3), 95-100.
- Parlak, Y., Uysal, B., Kıracı, F. S., Kovan, B., Demir, M., Ayan, A., . . . ve, T. R. G. v. K. K. Ç. G. Ü. (2020). Radiation Safety Guide: General Definitions and Radiation Protection Rules in Nuclear Medicine Applications. *Nukleer Tıp Seminerleri*, 6(2), 71-89. doi:https://doi.org/10.4274/nts.galenos.2020.0009
- Patra, S., Chakravarty, R., Bahadur, J., Guleria, A., Rajeswari, A., Vimalnath, K. V., . . . Chakraborty, S. (2023). Radiolabeled nanoporous hydroxyapatite microspheres: An advanced material for potential use in radiation synovectomy. *Materials Chemistry and Physics*, 295, 127115. doi:https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127115
- Qin, X., Zhang, F., Hou, X., Yu, L., Yu, L., Yan, J., & Qiu, J. (2022). Efficacy and safety of a 3D-printed applicator for vaginal brachytherapy in patients with central pelvic-recurrent cervical cancer after primary hysterectomy. *Brachytherapy*, 21(2), 193-201. doi:https://doi.org/10.1016/j.brachy.2021.11.004
- Radha, R., Lawrence, S. M., Babu, P. R., Renuga, S., & Devi, P. (2024). HDR Brachytherapy In Cervical Cancers With Co 60 Source: A Single Institution Experience. *Int J Acad Med Pharm*, 6(1), 1546-1550.

- Ray, A., & Rowbotham, E. Radiosynovectomy in haemophilic synovitis and arthropathy of the knee: A scoping review. *n/a(n/a)*. doi:<https://doi.org/10.1111/hae.14966>
- Redmond, K. J., De Salles, A. A. F., Fariselli, L., Levivier, M., Ma, L., Paddick, I., . . . Sahgal, A. (2021). Stereotactic Radiosurgery for Postoperative Metastatic Surgical Cavities: A Critical Review and International Stereotactic Radiosurgery Society (ISRS) Practice Guidelines. *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*, *111*(1), 68-80. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2021.04.016>
- Schad, M. D., Patel, A. K., Glaser, S. M., Balasubramani, G. K., Showalter, T. N., Beriwal, S., & Vargo, J. A. (2020). Declining brachytherapy utilization for cervical cancer patients - Have we reversed the trend? *Gynecologic Oncology*, *156*(3), 583-590. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ygyno.2019.12.032>
- Schwarz, J. K., Beriwal, S., Esthappan, J., Erickson, B., Feltmate, C., Fyles, A., . . . Viswanathan, A. (2015). Consensus statement for brachytherapy for the treatment of medically inoperable endometrial cancer. *Brachytherapy*, *14*(5), 587-599. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2015.06.002>
- Sevim, İ. (2018). Radyoterapi ve Brakiterapide Yan Etkiler. *Celal Bayar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *5*(1), 17-19.
- Simpson, E. R., Gallie, B., Laperriere, N., Beiki-Ardakani, A., Kivelä, T., Raivio, V., . . . Kalach, N. I. (2014). The American Brachytherapy Society consensus guidelines for plaque brachytherapy of uveal melanoma and retinoblastoma. *Brachytherapy*, *13*(1), 1-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2013.11.008>
- Smitt, M. C., & Kirby, R. (2007). Dose–volume characteristics of a 50-kV electronic brachytherapy source for intracavitary accelerated partial breast irradiation. *Brachytherapy*, *6*(3), 207-211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2007.03.002>
- Steen-Banasik, E. v. d. (2014). Review paper Primary brachytherapy as a radical treatment for endometrial carcinoma. *Journal of Contemporary Brachytherapy*, *6*(1), 106-112. doi:[10.5114/jcb.2014.42028](https://doi.org/10.5114/jcb.2014.42028)
- Strnad, V., Polgár, C., Ott, O. J., Hildebrandt, G., Kauer-Dorner, D., Knauerhase, H., . . . Miguelez, C. G. J. T. L. O. (2023). Accelerated partial breast irradiation using sole interstitial multicatheter brachytherapy compared with whole-breast irradiation with boost for early breast cancer: 10-year

results of a GEC-ESTRO randomised, phase 3, non-inferiority trial. *24*(3), 262-272.

Thorpe, R., & Drury-Smith, H. (2020). A literature review of the role of brachytherapy in the management of early-stage breast cancer. *Journal of Radiotherapy in Practice*, *19*(3), 281-290. doi:10.1017/S1460396919000700

Tuček, L., Vošmik, M., & Petera, J. (2022). Is There Still a Place for Brachytherapy in the Modern Treatment of Early-Stage Oral Cancer? , *14*(1), 222.

Tuncer, S. Uvea Melanomlarında Brakiterapi.

Viktorin-Baier, P., Putora, P. M., Schmid, H.-P., Plasswilm, L., Schwab, C., Thoeni, A., . . . Engeler, D. (2020). Long-term oncological and functional follow-up in low-dose-rate brachytherapy for prostate cancer: results from the prospective nationwide Swiss registry. *125*(6), 827-835. doi:https://doi.org/10.1111/bju.15003

Wang, K., & Tepper, J. E. (2021). Radiation therapy-associated toxicity: Etiology, management, and prevention. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, *71*(5), 437-454. doi:https://doi.org/10.3322/caac.21689

Wen, J. C., Oliver, S. C., & McCannel, T. A. (2009). Ocular complications following I-125 brachytherapy for choroidal melanoma. *Eye*, *23*(6), 1254-1268. doi:10.1038/eye.2009.43

Westerveld, H., Nesvacil, N., Fokdal, L., Chargari, C., Schmid, M. P., Milosevic, M., . . . Nout, R. A. (2020). Definitive radiotherapy with image-guided adaptive brachytherapy for primary vaginal cancer. *The lancet oncology*, *21*(3), e157-e167.

Wierzbicka, M., Bartochowska, A., Strnad, V., Strojan, P., Mendenhall, W. M., Harrison, L. B., . . . Ferlito, A. (2016). The role of brachytherapy in the treatment of squamous cell carcinoma of the head and neck. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, *273*(2), 269-276. doi:10.1007/s00405-014-3332-8

Williams, V. M., Kahn, J. M., Thaker, N. G., Beriwal, S., Nguyen, P. L., Arthur, D., . . . Dyer, B. A. (2021). The Case for Brachytherapy: Why It Deserves a Renaissance. *Advances in Radiation Oncology*, *6*(2), 100605. doi:https://doi.org/10.1016/j.adro.2020.10.018

Williamson, C. W., Liu, H. C., Mayadev, J., & Mell, L. K. (2021). Advances in External Beam Radiation Therapy and Brachytherapy for Cervical Cancer.

Clinical Oncology, 33(9), 567-578.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.clon.2021.06.012>

- Wolfgang, A. W., Johannes, C., Carolyn, J. A., Ramsey, D. B., Henryk, B., Frank, B., . . . Strauss, H. W. (2020). The Future of Nuclear Medicine, Molecular Imaging, and Theranostics. *Journal of Nuclear Medicine*, 61(Supplement 2), 263S. doi:10.2967/jnumed.120.254532
- Yamazaki, H., Masui, K., Suzuki, G., Aibe, N., Shimizu, D., Kimoto, T., . . . Nakamura, S. (2021). High-dose-rate brachytherapy with external beam radiotherapy versus low-dose-rate brachytherapy with or without external beam radiotherapy for clinically localized prostate cancer. *Scientific Reports*, 11(1), 6165. doi:10.1038/s41598-021-85682-9
- Ye, M., Han, D., Mao, Z., & Cheng, G. (2022). A prospective study of radical external beam radiotherapy versus external beam radiotherapy combined with intraluminal brachytherapy for primary esophageal cancer. *Brachytherapy*, 21(5), 703-711. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2022.05.008>
- Zelevsky, M. J., Nedelka, M. A., Arican, Z.-L., Yamada, Y., Cohen, G. a. N., Shippy, A. M., . . . Zaider, M. (2008). Combined brachytherapy with external beam radiotherapy for localized prostate cancer: Reduced morbidity with an intraoperative brachytherapy planning technique and supplemental intensity-modulated radiation therapy. *Brachytherapy*, 7(1), 1-6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brachy.2007.12.002>
- Zeliha Pala, K., & Şen, M. (2023). Drug-induced Changes on the Biodistribution of Theranostic Radiopharmaceuticals. [Teranostik Radyofarmasötiklerin Biyodağılımlarında İlaça Bağlı Değişiklikler]. *Nukleer Tıp Seminerleri*, 9(1), 49-57. doi:<https://doi.org/10.4274/nts.galenos.2023.0007>
- Zhang, Z., Liu, X., Chen, D., & Yu, J. (2022). Radiotherapy combined with immunotherapy: the dawn of cancer treatment. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 7(1), 258. doi:10.1038/s41392-022-01102-y

Radyasyon Maruziyetinin Canlı Organizmaya Etkileri

Mustafa CENGİZ¹, Canan VEJSELOVA SEZER²

GİRİŞ

Radyoaktif maddeler sahip oldukları yüksek enerji sebebiyle canlılar üzerinde kullanım veya maruziyete bağlı olarak olumlu ve olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu etkiler, radyasyon türüne, dozuna, maruz kalma süresine ve organizmanın duyarlılığına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Maruz kalınan iyonlaştırıcı radyasyon, X ve gama ışınları gibi elektromanyetik ve alfa ve beta parçacıkları gibi parçacık radyasyonu başlıklarında toplanmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyona maruziyet sonrasında organizmada DNA'dan başlamak üzere mutasyon ve kalıtsal genetik hasarlar, hücre, organ ve doku hasarları, hücre ölümü, radyasyon hastalıkları ve kanser gelişimi gibi sonuçlar görülebilmektedir. Bu sonuçlar kısa veya uzun vadede gecikmiş etki şeklinde semptomatik hale gelebilmektedir. Tedavi uygulamaları dışında kalan kontrolsüz maruziyet sonucunda bu semptomlar şiddetlenmekte ve organizmada ciddileşerek canlı organizma sağlığı için büyük bir tehdit unsuru oluşturmaktadır.

Bu bölümde, radyasyona maruziyet sonrasında canlı organizmalar üzerinde oluşabilecek radyasyon kaynaklı etkiler maruz kalınabilen radyasyon türleri ve etki şekilleriyle birlikte örneklendirilerek ve bu etkilerden korunması veya en aza indirilmesi için uyulması gereken kurallar ve uygulama tedbirleri de dahil edilerek ele alınmıştır.

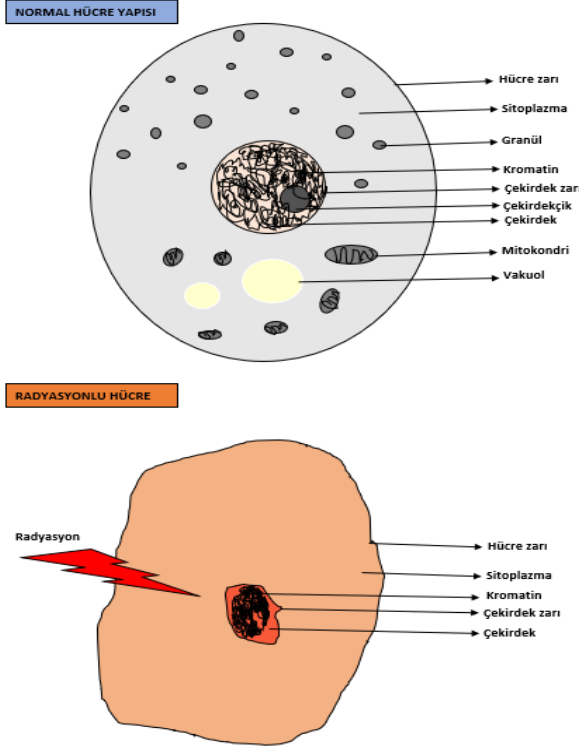
3.1. Hücre Hasarı

İyonlaştırıcı radyasyon kimyasal bağları kırabilen ve atomları iyonize ederek hücrelerdeki DNA, protein ve lipid gibi makro molekülleri hasarlayabilen bir radyasyon çeşididir. Özellikle, DNA hasarı, mutasyonlara ve ileri durumlarda kansere yol açabileceğinden tehlikeli bir durumdur (Coşkun, 2011; Yeyin, 2015)

¹ Prof. Dr. Mustafa CENGİZ, Siirt Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, m.cengiz@siirt.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6925-8371

² Doç. Dr. Canan VEJSELOVA SEZER, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, cananvejelovasezer@eskisehir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-3792-5993

(Şekil 1). Radyasyona maruz kalmanın canlı hücreler üzerindeki etkilerini gösteren örnekler aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. Normal hücre ve radyasyona maruz kalmış hücre yapısının şematik gösterimi.

3.1.1. DNA Hasarı

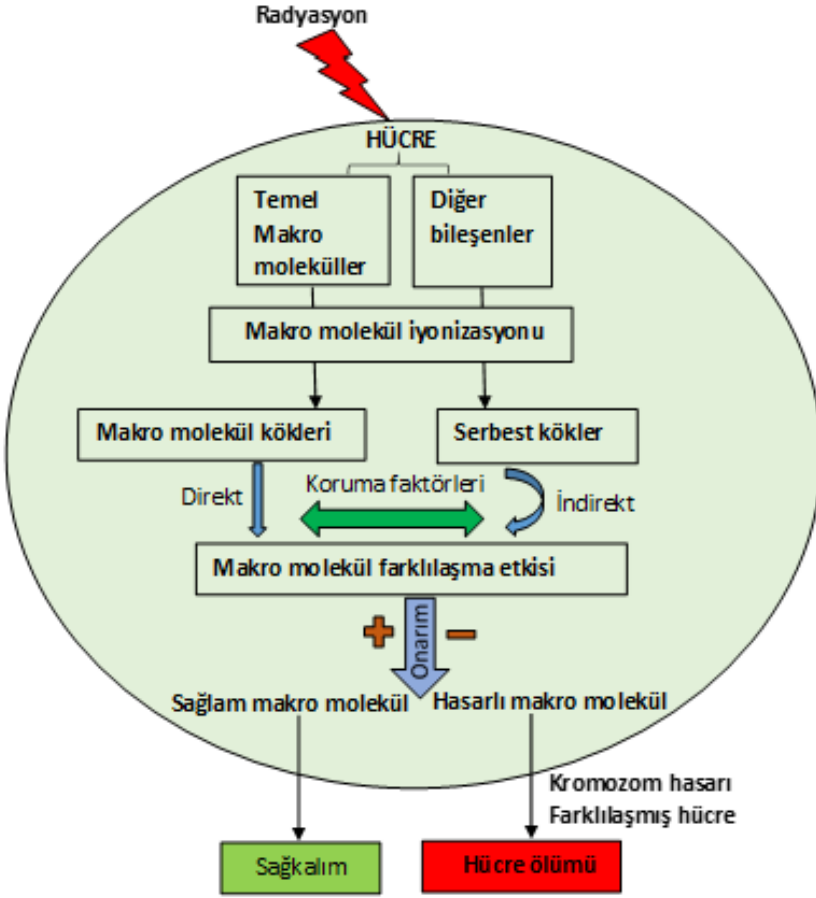
Radyoaktif maddelere maruz kalmak, iyonizasyon aracılığıyla DNA hasarına neden olabilmektedir. Radyoaktif maddelerin bu etkileri alfa ve beta parçacıkları ve gama ışınlarını kapsayan iyonlaştırıcı radyasyon yaymalarından kaynaklanmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyon enerjisi atomlardan sıkı bağlı elektronları uzaklaştırarak iyon oluşumuna yol açmaktadır. İyonizasyon sürecinde DNA doğrudan veya dolaylı olarak hasarlanabilmektedir (Alhmoud, Woolley, Al Moustafa, & Mallei, 2021).

3.1.1.1. Doğrudan İyonizasyon: Alfa ve beta parçacıkları, DNA molekülünün atomlarıyla doğrudan çarpışarak iyonize edebilen yüklü parçacıklardır. Bu parçacıklar DNA'daki atomlarla etkileşime girdiğinde, elektronları atomlardan

serbestleştirerek iyonize moleküller meydana getirebilirler. Böylece doğrudan iyonizasyon DNA'nın kimyasal bağlarını kırarak yapısal hasara neden olabilmektedir (İlem-Özdemir, Gökoğlan, Ekinci, Özgenç, & Aşikoğlu, 2020).

3.1.1.2. Dolaylı İyonizasyon: Gama ışınları, dokulara ve hücrelere nüfuz edebilen yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. Bu ışınlar vücuttan geçerek, hücrelerdeki su moleküllerini etkilemek yoluyla dolaylı DNA hasarına yol açabilirler. Gama ışınlarının su ile etkileşimi sonucunda, diğer moleküllerden elektronlar serbestleşerek reaktivitesi yüksek moleküller serbest radikaller meydana gelmekte ve bunlar DNA'yı hasarlayabilmektedir (Ardıç, 2021). Oluşan DNA hasarı, tek iplik, çift iplik kırılmaları, baz hasarı ve çapraz bağlanma gibi farklı şekillerde olabilmektedir. Tek iplik kırılmaları, DNA molekülünün tek bir ipliğinin koptuğu hasar çeşididir (Çağlar, 2022). Çift iplik kopmaları ise DNA molekülünün iki ipliğinin de kopmasıyla oluşan hasar olarak tanımlanmaktadır (Tan, Yay, Toprak, & Yildiz, 2020). DNA bazlarının (Adenin, Guanin, Sitozin, Timin) bireysel olarak değiştii veya hasarlandığı durumlar baz hasarıdır (McBride & Schae, 2020). Bir başka hasar çeşidi olan çapraz bağlanma, DNA molekülünün farklı bölgeleri arasında, iki ipliğın birbirinden normal bir şekilde ayrılmasını engelleyen bağlantıların oluşması ile karakterize olmaktadır (Gu et al., 2021).

DNA hasarı durumunda, hücre tamir mekanizmaları aracılığıyla hasar onarılmaya çalışılmaktadır. Hasarın tamir mekanizmalarınca onarılamayacak derecede olması veya onarımda mekanizmanın yetersiz kalması durumlarında mutasyon, hücre ölümü veya kanser gelişimi meydana gelebilmektedir (Şekil 2). Burada oluşan DNA hasarının derecesi maruz kalınan radyasyon türü ve enerjisi, maruz kalma süresi ve ilgili doku veya hücrelerin hassasiyeti gibi etmenlere bağlı olarak değişmektedir. İyonlaştırıcı radyasyona kronik olarak maruz kalınmasıyla kümülatif DNA hasarı riski ve buna bağlı sağlık riskleri artmaktadır.



Şekil 2. Canlı hücrelerde meydana gelen radyasyona bağlı etkiler.

3.1.2. Hücre Ölümü

Radyasyonun yüksek dozlarına maruz kalındığında, hücrelerde programlanmış hücre ölümü (apoptoz) veya nekroz tetikleyebilmektedir. Radyasyona bağlı apoptoz veya nekroz özellikle kemik iliği ve gastrointestinal sistem hücreleri gibi hızlı bölünen hücrelerde tetiklenen ölüm şekilleridir (Galassi, Klapp, Yamazaki, & Galluzzi, 2024; Zhu et al., 2021).

3.1.3. Hücre Hayat Döngüsünün Durması

Hücre döngüsü, G1 (hücre büyümesi), S (DNA sentezi), G2 (hücre bölünmesi için hazırlık) ve M (mitoz veya hücre bölünmesi) aşamalardan oluşan ve hassas olarak düzenlenen bir süreçtir. Yüksek dozda radyasyon maruziyeti ilk olarak

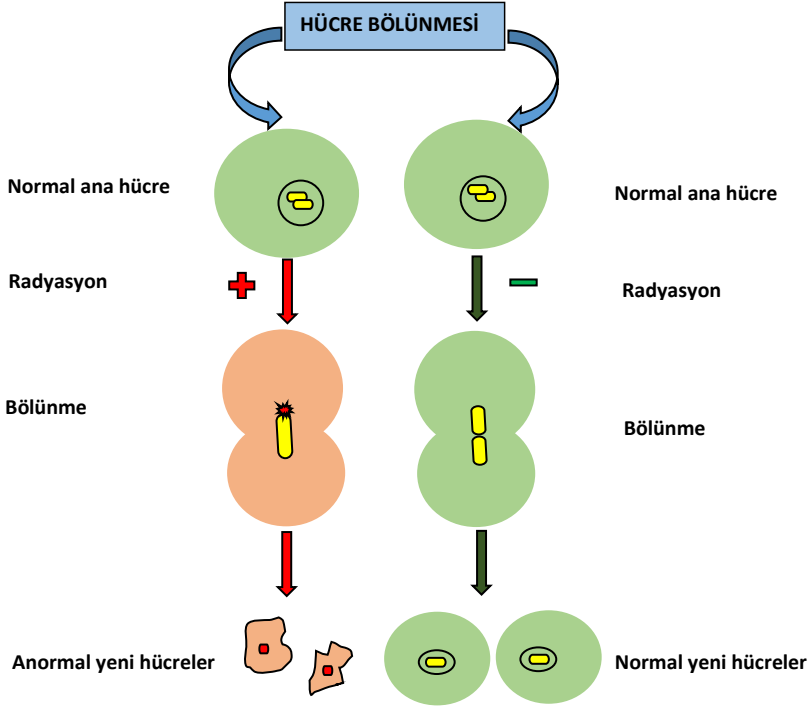
DNA hasarıyla başlamak üzere birçok farklı mekanizma aracılığıyla hücre döngüsünü etkileyebilmektedir (Khan & Wang, 2022). Yüksek doz radyasyonun hücre döngüsünü etkileyebileceği süreçler DNA hasarı, DNA hasar yanıtının aktivasyonu, hücre döngüsü kontrol noktaları, hücre döngüsü durması, apoptoz ve senesens'tir.

3.1.3.1. DNA Hasar Yanıtının Aktivasyonu: Hücreler DNA hasarını tespit ettiklerinde, DNA hasar yanıtı olarak bilinen karmaşık sinyal yollarını aktive etmektedirler. Hasar yanıtı, hasarın boyutunu değerlendirmeye yardımcı olur ve hasar yüksek ise DNA'yı onarır veya hücre döngüsünün durmasını tetikler.

3.1.3.2. Hücre Döngüsü Kontrol Noktaları: Döngü içinde yer alan kontrol noktaları, hücre döngüsünün aşamalarının doğru ilerlemesini sağlayan mekanizmalardır. Hücre döngüsü, bu kontrol noktalarında hasar varsa onarımının sağlanabilmesi için durdurulabilmektedir. Hasarın olmadığı durumlarda döngü kontrolden sonra devam etmektedir. Hücrelerde DNA hasarı meydana geldiği durumlarda özellikle de G1, S ve G2 kontrol noktaları aktive olmaktadır. DNA hasarının G1 fazı sırasında tespit edilmesi durumunda, hücreler S fazına girmeden önce onarılmak üzere G1 kontrol noktasında durabilmektedir. Buna benzer olarak, G2 fazında meydana gelen DNA hasarlarında, hücreler mitozu girmeden önce G2 kontrol noktasında durabilir (Sia, Szmyd, Hau, & Gee, 2020).

3.1.3.4. Apoptoz: DNA hasarı onarılamayacak kadar ileri derecedeysen, hücre programlanmış bir hücre ölümü mekanizması olan apoptozu yönlendirilmektedir. Apoptoz tetiklenmesi, tamiri mümkün olmayacak derecede DNA hasarı olan hücrelerin ortadan kaldırılması yoluyla hasarlı genetik materyalin sonraki hücrelere aktararak yayılmasını önlemek için hücrelerde oluşan bir koruyucu yanıttır.

3.1.3.5. Senesens: Hücrelerde DNA hasarı durumunda oluşturulan bir başka yanıt hücrelerin geri dönüşü olmayan bir çoğalma durması durumuna gelmesidir (senesens). Senesensde hasarlı hücreler bölünemez ancak doku onarımı ve yenilenmesi devam eder (Xu et al., 2022).



Şekil 3. Hücre bölünmesine radyasyonun etkisi.

Özetle, yüksek dozda radyasyona maruz kalmak, DNA hasarını tetikleyerek, DNA hasar yanıtını aktive eder, hücre döngüsü kontrol noktalarını aktive eder ve hasarın boyutuna bağlı olarak hücre döngüsünün durması, apoptoz veya senesense yol açmak suretiyle hücre döngüsünü bozabilir (Şekil 3).

3.1.4. Kanser

Kanser hastalığı riski düşük dozda radyasyona uzun süre maruz kalmakla artmaktadır. Riskin artması, radyasyonun yol açtığı DNA hasarının kötü huylu hücrelerin gelişmesine yol açabilmesinden kaynaklanmaktadır. Organizmada tiroid ve akciğerler gibi belirli dokular radyasyon kaynaklı kanser gelişimine daha yatkındır (Arnold, Mangesius, Skvortsova, & Ganswindt, 2020).

Radyoaktif maddelerin kanser riskini artırmadaki esas mekanizması yaydıkları iyonlaştırıcı radyasyona dayanmaktadır. Yayılan bu iyonlaştırıcı radyasyon, atomlardan elektronları kopararak iyon oluşturmak suretiyle hücrelerin yapısını hasarlamaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonun hücrelerin moleküler yapılarından en başta hasarladığı DNA'dır. Bu hasar sonucunda hücre ölümü meydana

gelebilmektedir (Daşdağ, 2010). DNA molekülü iyonlaştırıcı radyasyona maruz tek-zincir kırılmaları (Barone, Belli, & Mazzei, 1994), çift-zincir kırılmaları (Datta, Jaruga, Dizdaroglu, Neumann, & Winters, 2006; Isabelle, Prévost, Spothheim-Maurizot, Sabattier, & Charlier, 1995), baz hasarı, çapraz bağlanma (Nakano, Xu, Salem, Shoukamy, & Ide, 2017) ve kromozom aberasyonu gibi birçok farklı hasar oluşabilmektedir (Bryant, Riches, & Terry, 2010). Organizmada yer alan DNA'sı hasar görmüş hücrelerdeki toplam DNA hasarı zamanla kanser gelişimine yol açabilmektedir. Kanser gelişiminin meydana gelme olasılığı hücrelerdeki DNA tamir mekanizmalarının işlevselliğine bağlıdır. Tamir mekanizmasının yetersiz kalması durumunda ya da tamir sırasında hataların meydana gelmesi durumunda DNA'sı zarar görmüş hücreler kontrolsüz bir şekilde bölünerek ve bunun sonucunda da tümörler oluşturarak kanser gelişimini başlatmaktadırlar.

Kansere neden olma potansiyeli radyasyon türleri arasında farklılık göstermektedir. Hasar verme potansiyeli bakımından karşılaştırıldığında iyonlaştırıcı radyasyonun gama ve X-ışınları gibi yüksek enerjili formları, düşük enerjili radyasyona kıyasla daha yüksek DNA'da hasarı oluşturma potansiyeline sahiptir. Radyasyon türünün yanı sıra, radyasyona maruziyetin dozu ve süresi de kanser gelişimi riskini farklı düzeyde etkilemektedir. Ayrıca, düşük radyasyon dozlarına kronik olarak maruz kalmak da kanser gelişimi açısından risk oluşturma potansiyelindedir ve dokunun hassasiyetine göre bu risk düzeyi farklı dokularda farklı düzeydedir.

3.1.5. Genetik Etkiler

Gelecek nesillere sağlıklı olarak aktarılması gereken genetik materyal radyasyona maruz kalma durumunda mutasyonlara uğrayabilir. Radyasyon kaynaklı mutasyonlar özellikle germ hücreleri olan sperm ve yumurtada meydana gelmekte olup kalıtsal genetik etkilere neden olmaktadır (Lumniczky et al., 2021). Bu nedenle germ hücrelerinin DNA dizilimindeki mutasyonlar önemli sonuçlar ortaya koyabilmektedir. Radyasyona bağlı mutasyonların genomun kritik bölgelerinde meydana gelmesi veya önemli genleri etkilemesi gibi durumlarda genetik hasar riski artabilir veya genetik olarak aktarılma şeklinde kümülatif bir etkiyle sonraki nesillerde kanser gelişimini destekleyebilir. Diğer radyasyona bağlı etkilerde olduğu gibi, radyasyona bağlı mutajenik etkilerin seviyesi de radyasyon türü ve dozu, maruz kalma süresi ve etkilenen hücrelerin hassasiyeti gibi etmenlere bağlı olarak değişebilmektedir. Süre bakımından değerlendirildiğinde, iyonlaştırıcı radyasyona uzun süreli ya da

yüksek dozda maruziyet germ hücrelerinde mutasyon için yüksek risk potansiyeline sahiptir. İyonlaştırıcı radyasyona bağlı risk faktörlerinden korunmak için güvenlik önlemi uygulamaları, yasal radyasyon sınırların belirlenmesi ve çalışma ve tedavi ortamlarında koruyucu donanımların kullanılması ciddi bir gerekliliktir. Buna ilaveten, radyasyon maruziyetinin potansiyel genetik sonuçlarını daha detaylı anlamının zararı en aza indirmek ve sağlığı korumak için yeni stratejiler geliştirmek açısından önemi büyüktür.

3.1.6. Radyasyon Hastalıkları

Organizmada çok yüksek doz ve akut olarak radyasyon maruziyetinde bulantı, kusma, yorgunluk gibi belirtiler ve kemik iliği, gastrointestinal sistem ve diğer organlarda hasar oluşumu ile tanımlanan radyasyon hastalığı oluşabilmektedir (Guo et al., 2020).

3.1.7. Gecikmiş Etkiler

Radyasyona maruz kalmanın bazı sağlık etkileri akut olarak ortaya çıkmayıp hatta uzun yıllar sonrasında bile semptomatik hale gelmeyebilir. Örneğin, radyasyona bağlı kanser hastalığı çok uzun yıllar sonraki bir süreçte ortaya çıkabilmektedir (Brook, 2020). Radyasyonun gecikmiş etkilerinin boyutu radyasyonun türü, maruz kalınan radyasyon dozu ve maruz kalan dokuların radyasyona hassasiyeti gibi birçok farklı etmene bağlı olarak gelişmektedir. Hem akut hem de kronik radyasyon maruziyetine bağlı olarak gelişebilen gecikmiş radyasyon etkilerinden korunmak, önlemek veya azaltmak amacıyla zırlama ve maruz kalma süresinin en aza indirilmesi gibi önlemlerin alınması büyük önem taşımaktadır.

3.2. Akut Radyasyon Sendromu (ARS):

Bir diğer adı da radyasyon hastalığı olan Akut Radyasyon Sendromu (ARS), vücudun kısa süreli olarak yüksek dozda iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmasıyla ortaya çıkmaktadır. Maruz kalınan bu iyonlaştırıcı radyasyon yüksek enerjisi nedeniyle atomlardan elektronları uzaklaştırarak serbest radikallerin oluşmasına ve hücrenin farklı yapılarının hasarlanmasına yol açmaktadır. ARS'nin şiddeti de tüm radyoaktif madde maruziyeti vakalarındaki gibi maruz kalınan radyasyon dozu, süresi ve türüne bağlıdır (Singh & Seed, 2021). Akut Radyasyon Sendromunda radyoaktif maddelere maruziyet nedeniyle hücre hasarı, kemik iliği baskılanması, gastrointestinal hasar, merkezi sinir sistemi ve

organ fonksiyon bozuklukları meydana gelebilmektedir. Radyasyon şiddetine göre genel ARS aşamaları aşağıda yer almaktadır.

3.2.1. Prodromal Aşama: Maruziyetten kısa bir süre sonra ortaya çıkan prodromal aşamada karakteristik semptomlar bulantı, kusma ve ishaldir. Prodromal aşama semptomlarının şiddeti radyasyon dozu ile doğrudan ilişkilidir.

3.2.2. Gizli Evre: Radyasyon maruziyetinden sonra saatler veya haftalarca sürebilen, semptomların görünürde iyileştiği veya stabilize olduğu geçici bir dönem olarak tanımlanmaktadır.

3.2.3. Belirgin Hastalık Aşaması: Radyasyona maruziyet belirgin hastalık aşamasına geldiğinde kemik iliği, gastrointestinal sistem gibi radyasyona hassas vücut kısımlarındaki ve diğer organlar üzerindeki etkiler gibi tüm semptomlar belirgin hale gelmiştir. Belirgin hastalık aşamasını karakterize eden semptomların şiddeti maruz kalınan radyasyonun şiddetine bağlıdır.

Tedavi için ARS'de kullanılan stratejiler semptomları yönetmek için destekleyici bakım, kan hücresi sayılarındaki düşüşü gidermek için kan transfüzyonları ve kemik iliği fonksiyonunu indüklemek için uygulanan ilaçları kapsamaktadır. ARS'li bireylerde prognoz radyasyon dozu, organ hasarının boyutu ve tıbbi müdahalelerin zaman ve etkinliğine bağlıdır (M. Özcan & Topçuoğlu, 2008).

3.3. Organ ve Doku Hasarı:

Vücudun bazı organlarının radyasyona daha hassas olması sebebiyle hasar görme riskleri daha yüksektir. Örneğin, tiroid (Jereczek-Fossa et al., 2004) radyoaktif iyoda duyarlıdır ve kemik iliği radyasyondan (Ganasoundari, Uma Devi, & Rao, 1997) kaynaklanan hasara karşı hassastır. Radyasyonun etkisi bu doku ve organlarda akut veya kronik olarak ortaya çıkabilmektedir.

3.3.1. Kemik İliği

Kemik iliğinde radyasyona bağlı olarak meydana gelen etkilerden bazıları aşağıda verilmiştir.

3.3.1.1. Kemik İliği Baskılanması: Kemik iliğinde radyasyona bağlı etkiler arasında başlıca olanlardan biri de hematopoez inhibisyonudur. Bu inhibisyon durumu kemik iliği baskılanması veya miyelosupresyon olarak bilinmektedir. Miyelosupresyonda, oksijen taşıyıcı kan hücresi olan eritrositler, bağışıklık yanıtında görev alan lökositler ve kan pıhtılaşmasında gerekli olan trombositler

dahil olmak üzere tüm kan hücresi türleri etkilenmektedir (Şekil 4) (Guan et al., 2023).

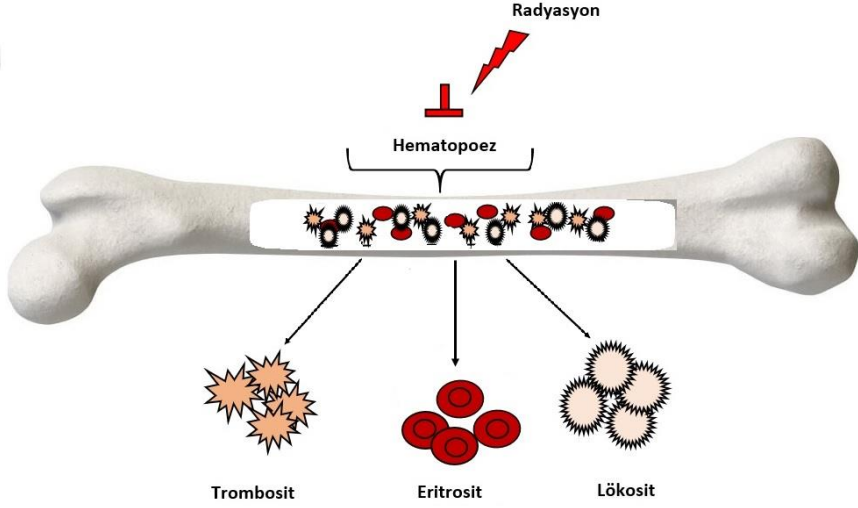
3.3.1.2. Anemi: Eritrositler olarak bilinen kırmızı kan hücrelerin üretimindeki azalma anemiye yol açabilmektedir (Arslan, 2017). Anemik bireylerde görülen en belirgin semptomlar yorgunluk, halsizlik ve nefes darlığıdır.

3.3.1.3. Enfeksiyon Riskinde Artış: Lökosit olarak bilinen beyaz kan hücrelerinin üretimindeki azalmaya bağlı olarak bağışıklık sistemi tehlikeye girmekte ve vücutta enfeksiyonların oluşma riski artırmaktadır. Yine lökosit baskılanması nedeniyle organizmadaki enfeksiyonlar daha şiddetli gelişmekte ve mücadele edilmesi daha zor hale gelebilmektedir (Üney, 2021).

3.3.1.4. Kanama ve Morarma: Trombosit üretiminde azalma meydana geldiği durumlarda, kanın pıhtılaşmasına önemli rol oynamaları sebebiyle vücutta daha yüksek kanama ve morarma riski meydana gelmektedir (Özdemir, 2014).

3.3.1.5. Pansitopeni: Ciddi vakalarda, radyasyona maruz kalma, eritrosit, lökosit ve trombositler olmak üzere üç ana kan hücresi tipinde de önemli bir azalmanın olduğu bir durum olan pansitopeniye neden olabilmektedir (Güdük, Kılıç, & Güdük, 2018).

3.3.1.6. İkincil Lösemi Riski: Özellikle kanser tedavisi bağlamında yüksek dozda radyasyona uzun süre maruz kalmak, kan oluşturan hücreleri etkileyen bir kanser türü olan ikincil lösemi gelişme riskini artırabilir. İkincil lösemi etkisinin şiddeti de radyasyona maruz kalma dozuna ve süresine bağlıdır (Cecen & Bolaman, 2010). Radyasyon terapisi de denilen radyoterapi kemik iliği kanseri de dahil olmak üzere birçok kanser vakasında tıbbi tedavi olarak uygulanmaktadır. Radyoterapide sağlıklı çevresel dokuları korumak için sadece tümörlü bölgeye tedavinin hedeflenmesi çok kritik bir yaklaşımdır. Bununla birlikte, kemik iliği üzerindeki potansiyel etkilerin anlaşılması ve yönetilmesi, radyasyon tedavisi planlamasının çok önemli yönleridir (Mayadağlı et al., 2001; Reyhan, 2021).



Şekil 4. Radyasyon nedenli miyelosupresyonda hematopoez inhibisyonu.

3.3.2. Tiroid Bezi

Radyoaktif maruziyetinin dokular arasında farklılık gösterdiği daha önce belirtilmiştir (Parlak, 2022). Radyasyona hassas dokular arasında yer alan tiroid bezi özellikle radyoaktif iyota karşı hassastır. Radyasyona maruz kaldığında fonksiyon bozukluğu meydana gelerek hipotiroidizme neden olabileceği gibi tiroid kanseri oluşma riskinin artmasını da sağlayabilmektedir (Zhou et al., 2021). Tiroid bezini etkileyebilecek iki ana radyasyon türü vardır (Çimen, 2018; İ. Özcan, 2020): iyonlaştırıcı radyasyon ve radyoaktif iyot.

3.3.2.1. İyonlaştırıcı Radyasyon: Tiroid bezini etkileyebilecek radyasyon türlerinden olan iyonlaştırıcı radyasyon harici ve çevresel olmak üzere iki farklı türde etkisini göstermektedir. Tıbbi X ışınları veya baş ve boyun kanserleri için radyasyon tedavisi gibi harici iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarına maruz kalmak tiroid hücrelerine zarar verebilmektedir. Oluşan bu zarar sonucunda, tiroid hormonu üretimi ve tiroid fonksiyon değişikliği gibi uzun vadeli etkilere yol açabilmektedir (Çimen, 2018; El-Benhawy et al., 2022). Buna ilaveten, nükleer kazalar veya çevresel iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarına maruz kalmak da tiroidi etkileyebilir. Örneğin, nükleer kazalardan kaynaklanan iyot-131 gibi radyoaktif izotopların salınımı tiroid tarafından emilerek tiroid fonksiyon bozukluğunu artırabilmektedir (Ali Abdulhasan et al., 2020).

3.3.2.2. Radyoaktif İyot (İyot-131)

İyot-131, nükleer fisyon sırasında üretilen radyoaktif bir iyot izotopudur. Genellikle nükleer kazalar sırasında çevreye yayılmaktadır (Brudecki et al., 2020; Khandaker et al., 2023). Tiroid bezi, tiroid hormonları üretmek için hem kararlı hem de radyoaktif formlardaki iyodu emme özelliğindedir. Bu nedenle radyoaktif iyota maruz kalan tiroid bezinin iç kısımları da radyasyona maruz kalmaktadır (Tong et al., 2024). Bu iç maruziyet tiroid kanseri ve birçok farklı tiroid bozukluklarının oluşma riskini artırabilmektedir. Tiroid içine giren radyoaktif iyot öncelikle tiroid nodülü oluşumunu indükleyebilir daha sonraki süreçte ise tiroide kanser oluşturabilmektedir. Burada radyasyon etki şiddetini değerlendirirken etken olarak radyasyona maruz kalma dozu ve süresi gibi faktör genel etmenlere ilaveten maruz kalan bireyin yaşının da önemi vurgulanmaktadır. Yaşa göre farklılık gösteren tiroid radyasyon maruziyeti çocukluk yaşlarında yetişkinlere kıyasla daha yüksek hassasiyetin olduğu bilinmektedir (Kadhim, Sheikhzadeh, Farzanefar, Yavari, & Ay, 2020).

Radyasyonun tiroid bezi üzerindeki etkilerinin gösterilmesinde birçok farklı uygulama mevcuttur (Abdi, Khorshed, Ali, Zakariaee, & Naderi, 2023). Radyasyon etkisinin belirlenmesinde en çok tiroid fonksiyon testleri ve görüntüleme çalışmaları kullanılmaktadır. Tiroid bezine radyasyonun etkisi maruz kalan kişinin yaşam ortamıyla doğrudan ilişkili olabilmektedir (Alidadi et al., 2022). Örneğin nükleer kazalara yatkın bölgelerde yaşayan kişilerde radyasyon maruziyeti yüksek olabilmektedir. Buna ilaveten, hastalıkları sebebiyle belirli ilaçlar kullanılarak tedavi gören kişilerde de radyasyon maruziyeti fazla olabilmektedir. Belirtilen gruplarda yer alan bireylerde önemli ölçüde radyasyona maruz kalma riski olduğundan tiroid fonksiyonları açısından yakından takiplerinin yapılması ve gerekli durumlarda uygun girişimlerin yapılabilmesi kritik öneme sahiptir (Yang et al., 2023).

3.3.3. Üreme Organları

Radyasyona maruz kalma durumunda vücutta diğer doku ve organların yanı sıra üreme organları da etkilenebilmektedir. Üreme organlarının radyasyondan etkilenmesi ile kısırlık ya da doğan yeni bireylerde doğum kusurları riskleri vardır. Dişi ve erkek üreme sistemlerinde gonad olarak adlandırılan testisler ve yumurtalıklar radyasyon maruziyetine özellikle hassastır (Hill-Kayser et al., 2023). Üreme sistemi üzerinde radyasyonun türü, dozu ve süresi faktörlerine bağlı olarak çok farklı etkiler ortaya çıkabilmektedir. Bu sistemde yer alan üreme

üreme organları üzerinde radyasyonun yukarıda belirtilen özelliklerine bağlı olarak hücre hasarı, kısırlık, doğurganlığın azalması, doğum kusurları ve hormon üretiminde bozukluklar meydana gelebilmektedir (Kuzay, 2022).

3.3.3.1. Kısırlık: Radyasyon maruziyetinin etki şeklini değiştiren faktörler arasında yer alan yüksek doza maruz kalındığında bireylerde kısırlık oluşturabilir, gebe kalmayı zorlaştırabilir ya da gebe kalmayı tamamen engelleyebilir. Yüksek radyasyon dozunun bu kısırlık etkisi maruz kalınan döneme göre değişik şiddette gelişebilmektedir (Shin et al., 2020). Örneğin, radyasyona maruz kalma aktif sperm ya da yumurta üretimi döneminde meydana geldiğinde kısırlık etkisi daha belirgindir.

3.3.3.2. Doğurganlığın Azalması: Yüksek doz dışında kalan daha düşük dozlarda radyasyon da üreme organlarında birçok değişikliğe neden olarak üreme sürecine müdahale etmekte ve böylece doğurganlığı etkileyebilmektedir (Gautam, Priyadarshini, Nirala, & Rajamani, 2022). Düşük dozda radyasyon maruziyeti, tam kısırlık oluşturmadan doğurganlığı düşürebilmektedir (Srivastav, Mishra, Keshari, Verma, & Aditi, 2022).

3.3.3.3. Doğum Kusurları: Radyasyona maruz kalma dönemi ve cinsiyet radyasyonun etkilerinin şekli ve boyutunu etkilemektedir (Zlobina et al., 2022). Hamilelik sürecinde radyasyona maruz kalmak, anne karnında gelişmekte olan fetüste doğum kusurlarının oluşma riskini önemli derecede artırabilmektedir. Bu maruziyet döneminin de içerisinde hamileliğin hangi sürecinde radyasyona maruz kalındığının oluşma riskinin artma potansiyeli ve fetüsün doğum kusurlarının şekli, şiddeti gibi olguları etkilediği bilinmektedir (Applegate et al., 2021). Doğum kusurlarının oluşma riski özellikle organların ve sistemlerin oluşmakta olduğu gebeliğin erken dönemlerinde radyasyona maruz kaldığında şiddetlenmektedir.

3.3.3.4. Hormon Üretiminde Bozukluk: Radyasyon, üreme işlevinde çok önemli bir rol oynayan endokrin sistemdeki normal hormon üretimini etkileyebilmektedir (Maluin, Osman, Jaffar, & Ibrahim, 2021). Hormon üretiminde meydana gelen bu bozulma cinsiyete ve radyasyon türü, şiddeti, maruz kalma süresi, yaş gibi faktörlere göre değişmekte olup hormon dengesizliklerinin oluşumunu tetiklemektedir (Leung et al., 2021). Meydana gelen hormon dengesizlikleri kadınlarda adet döngüsünü, erkekler ise sperm üretimini etkileyebilmektedir.

3.3.3.5. Kanser Riskinde Artış: Radyasyon etkilediği organlarda en belirgin risk olarak kanser gelişmesini artırmaktadır. Kanser gelişmesinin üreme fonksiyonu

üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur fakat üreme organlarındaki kanserleşme doğurganlık ve genel sağlığını etkileyen önemli sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir.

Üreme organlarında radyasyonun etkileri, maruz kalınan radyasyonun iyonlaştırıcı olup olmaması, alınan doz, maruz kalma süresi, yaş ve genel sağlık durumunu da kapsayan faktörleri içermektedir. Bu faktörlerin mevcut olduğu alanlarda birey üzerindeki riski azaltmak veya oluşacak etkilerin en az şiddete indirgenebilmesi için kalkanlama ve/veya koruma önlemlerinin alınması büyük önem taşımaktadır (Ali, Cucinotta, Ning-Ang, & Zhou, 2020). Bu konuda belirlenen tüm güvenlik önemlerine uyulması bireylerin üreme sağlığı üzerindeki olumsuz radyasyon etki riskini sağlayabilecektir.

3.3.4. Gastrointestinal Sistem

Radyasyonun gastrointestinal (GI) sistem üzerinde, özellikle şiddetli mazuriyet olduğunda, çok farklı etkileri görülebilmektedir. GI sistemde görülebilecek etkinin şiddeti doz, maruz kalma süresi ve radyasyon türü faktörlerine bağlı olup potansiyel etkilerden bazılarını örnek olarak Akut Radyasyon Sendromu (ARS), mukozit, bulantı ve kusma, ishal, malabsorpsiyon, fibrozis ve striktür oluşumu gösterilebilir (Xie et al., 2020).

3.3.4.1. Mukozit: Radyasyon nedeniyle GI kanalının iç yüzeyi hasarlanarak enfeksiyon oluşabilmektedir. Buna ilaveten, bu iç yüzeyde ülserasyon oluşabilmektedir. Mukozit olarak adlandırılan bu olgular ağrı, yutma güçlüğü ve enfeksiyona yatkınlıkta artış gibi semptomların görülmesine neden olabilmektedir (Rao, Behzadi, Le, Dagan, & Fiester, 2021).

3.3.4.2. Bulantı ve Kusma: GI kanalında radyasyon kaynaklı hasar nedeniyle beyinde yer alan kusma merkezi uyarılarak bulantı ve kusma ortaya çıkabilmektedir. Bulantı ve kusma radyasyona hem akut hem de kronik olarak maruz kalınması durumlarında görülmektedir (Afifi et al., 2020).

3.3.4.3. İshal: Radyasyon GI yolunda neden olduğu bir diğer etki şekli de ishaldir. İshal, bağırsakları kaplayan hücrelerin normal fonksiyonunun radyasyona bağlı olarak bozulmasıyla görülen bir semptomdur. Semptomun görülmesi özellikle alt GI yolun radyasyona maruz kaldığının yaygın olarak görülen bir göstergesi ve yan etkisi olarak bilinmektedir (Afifi et al., 2020; Araujo, Muñoz-Guglielmetti, & Mollà, 2020).

3.3.4.4. Malabsorpsiyon: Emilim bozukluğu olarak da bilinen malabsorpsiyon ince bağırsağın besinleri emme özelliğinin radyasyon maruziyeti nedeni

bozulduğunun göstergesi olabilmektedir. Bu durum kilo kaybı ve beslenme eksikliklerine neden olabilmektedir (Afifi et al., 2020; Nanduri, Panarelli, & Guha, 2022).

3.3.4.5. Fibrozis ve Striktür Oluşumu: Kronik radyasyona maruz kalma, GI kanalında yara dokusu oluşumunu (fibrozis) tetikleyebilmektedir. Fibrozisde bağırsak lümeni daralarak tıkanıklık ya da sindirim sorunları ortaya çıkabilmektedir (Afifi et al., 2020; Chen, Han, Zhang, Tu, & Zhang, 2021; Zhao, Cheng, Qu, Shao, & Liu, 2020).

Gastrointestinal sistemde de radyasyonun etkisi bazı durumlarda hemen görülmeyip uzun süre sonrasında görülmesi gecikmiş etki olarak tanımlanmaktadır. Gecikmiş etkiye bağlı oluşan hasar vücutta kronik enflamasyon, fibrozis ve sekonder malignitelerin gelişme riskini artırabilmektedir. Bu sistemde oluşan hasarlara bağlı semptomların ortadan kaldırılması veya azaltılması için uygun etki yönetimi stratejisinin uygulanması gerekmektedir. GI radyasyona bağlı etkilerinin yönetiminde tipik olarak bulantı ve kusma semptomlarına karşı antiemetik ilaçlar, ağrı yönetimi ve beslenme desteği gibi uygulamaları içermektedir. Darlık, tıkanıklık gibi daha şiddetli etkilerin ortaya çıkmış olması durumunda cerrahi müdahaleler gerekebilir.

3.3.5. Cilt

Cilt radyasyona karşı hassas olan organlar arasında yer almakta olup radyasyona maruz kaldığı durumlarda kızarıklık, şişme, kabarma gibi olgularla karakterize radyasyon dermatitine yol açabilmektedir (Schmeel et al., 2020; Xiao et al., 2020; Yardman-Frank & Fisher, 2021). Cildin kronik olarak radyasyona maruz kalmasıyla cilt kanseri riski artabilmektedir. İki ana radyasyon yüksek enerjili iyonlaştırıcı radyasyon, maruziyet durumunda cilt üzerinde önemli etkiler oluşturmakta olup aşağıda bu etkilerin birkaç örneğine yer verilmiştir.

3.3.5.1. Eritem (Kızarıklık): Kısa süreli olarak iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalınması durumunda ciltte eritem adı verilen kızarıklık oluşturabilmektedir. Eritemin ana mekanizması radyasyonun kan damarları genişleterek etkilenen bölgeye kan akışını hızlandırması şeklinde açıklanmaktadır (Bustamante et al., 2020; Schmeel et al., 2020; Xiao et al., 2020; Yardman-Frank & Fisher, 2021).

3.3.5.2. Kuruluk ve Deskuamasyon (Soyulma): İyonlaştırıcı radyasyonun vücuttaki önemli etkilerinden bir tanesi de deskuamasyondur (Bennardo et al., 2021; Y. Wang, Tu, Tang, & Zhang, 2020). Uzun süreli veya yüksek dozda iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmak ciltte kuruluğa ve cildin dış katmanlarının

soyulması olan deskuamasyona yol açabilmektedir (Fenton, Johnson, & White, 2021). Bu durumun mekanizması olarak cilt hücrelerinin hasar görmesi sonucunda ve cilt bariyer fonksiyonunun bozulmasıdır.

3.3.5.3. Radyasyon Dermatiti: Yüksek dozlarda radyasyona maruz kalınması radyasyon dermatiti olarak adlandırılan ve deride kızarıklık, şişme, kabarma ve ülserasyon semptomları ile karakterize radyasyon dermatitine yol açabilmektedir. Bu ciddi cilt hasarının şiddeti radyasyon dozu ve bireyin cilt hassasiyetine bağlıdır (Bhangoo et al., 2022; Iacovelli et al., 2020; Talapatra, Singh, Jaiswal, Rais, & Pandey, 2020).

3.3.5.4. Gecikmiş İyileşme: Radyasyon cildin normal iyileşme sürecine müdahale ederek yara iyileşmesinin gecikmesine yol açabilir. Bu etki özellikle kanser tedavisi için radyasyon tedavisi gören bireylerde önemli olabilir.

3.3.5.5. Hiperpigmentasyon ve Hipopigmentasyon: İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan ciltte pigmentasyon değişiklikleri oluşabilmektedir. Radyasyona bağlı olarak cilt pigmentasyonundan sorumlu hücreler olan melanositlerin hasar görmesinden kaynaklı cilt koyulaşması (hiperpigmentasyon) ya da cilt renginin açılması (hipopigmentasyon) meydana gelebilmektedir (Kim et al., 2021; Lee, 2021).

3.3.5.6. Kronik Etkiler: İyonlaştırıcı radyasyona uzun süre maruz kalınması cilt kanseri riskini artırabilmektedir. Radyasyona bağlı cilt kanseri türleri arasında bazal ve skuamöz hücreli karsinom ve melanom gösterilmektedir (Azizova, Bannikova, Grigoryeva, & Rybkina, 2021; Likhacheva et al., 2020; Teng et al., 2021).

Radyasyon türlerinden iyonlaştırıcı olmayan radyasyonun türleri arasında ultraviyole (UV) güneş ışığı veya bazı tıbbi cihazlardan kaynaklanan ışınlar yer almaktadır. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun cilt üzerinde güneş yanığı, erken yaşlanma ve cilt kanseri gibi riskleri artırıcı özellikte olduğu bilinmektedir. Bu etkilerden korunmak amacıyla güneş kremi ve koruyucu giysiler gibi koruma önlemleri, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyondan kaynaklanan cilt hasarını önlemede önem arz etmektedir. Ciltte görülen radyasyona bağlı etkilerin yönetimi için radyasyona maruz kalma endişesi durumunda veya cilt değişikliklerinin görülmesi durumunda teşhis ve rehberliğin doğru uygulanması açısından sağlık uzmanlarından destek ve danışmanlık istenmesi önerilmektedir.

3.3.6. Akciğerler

Tedavi amaçlı kullanılan radyasyon genellikle belirli kanserleri tedavi etmek için kullanılmaktadır. Bu tedavi kanser hücrelerini hedefleyerek eradike etmede etkilidir

fakat tamamen hedeflenmiş olmadığı için kanserli bölge çevresindeki sağlıklı dokuları da etkileyebilmektedir. Radyasyonun akciğerler üzerinde oluşturabileceği muhtemel etkilerden bazı örnekler aşağıda sunulmuştur (Şekil 5).

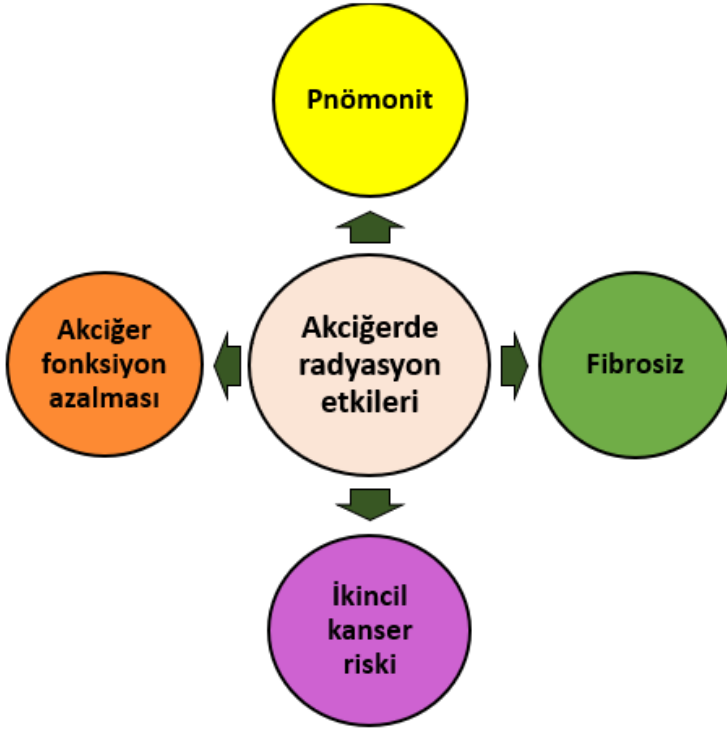
3.3.6.1. Pnömonit: Radyasyona bağlı akciğer dokusu enfeksiyonu pnömonit olarak adlandırılmaktadır. Pnömonitin semptomları arasında öksürük, nefes darlığı ve göğüs ağrısı bulunmaktadır. Tedaviye bağlı olarak gelişen pnömonit genellikle radyasyon tedavisinin başlamasından birkaç hafta veya birkaç ay sonra ortaya çıkabilmektedir (Arroyo-Hernández et al., 2021; Thomas, Chen, Hatabu, Mak, & Nishino, 2020).

3.3.6.2. Fibrozis: Radyasyona kronik olarak maruz kalındığında normal akciğer dokusunda yara dokuları oluşmakta olup fibrozis gelişebilmektedir. Fibroze bağlı olarak akciğer fonksiyonlarının azalması ve uzun süreli solunum sorunları ortaya çıkabilmektedir (Jin et al., 2020; Rahi et al., 2021).

3.3.6.3. Akciğer fonksiyonlarında azalma: Radyasyon, özellikle akciğerin önemli bir kısmı yüksek dozlara maruz kaldığında, akciğerlerin genel fonksiyonunu etkileyebilmektedir. Akciğer kapasitesinde azalma ve solunum fonksiyonlarında bozulmaya da yol açabilen radyasyon, bazı durumlarda akciğer kan damarlarını hasarlayabilmektedir. Hasarlanan akciğerlerde fonksiyon bozukluğu semptomları olarak nefes almada zorluk, öksürük ve göğüs ağrısı ortaya çıkabilmektedir (Käsmann et al., 2020; K. Wang & Tepper, 2021).

3.3.6.4. İkincil kanser riskinde artış: Radyoterapi ile kanser tedavisi sürecinde hem akciğer dokusunda hem de vücudun diğer bir bölgesinde ikincil kanserlere neden olma riski oluşturmaktadır. Radyoterapide genellikle tedavi etkinliği daha yüksek olasılık olarak kabul edildiğinden dolayı bu risk düşük olarak kabul edilmektedir (Xiang, Chang, & Pollom, 2020).

Radyoterapi teknikleri ve teknolojisindeki güncel gelişmeler, kanser hücrelerini etkin olarak hedefleyip sağlıklı dokulara en az zarar vermeyi amaçlamaktadır. Bu tedavi etkinliğine ilaveten uygulama yapan uzmanların tecrübesi ile yan etkilerin en aza indirilmesi için radyasyon tedavilerini hassasiyetle planlanarak takip edilmektedir. Akciğer kanseri de dahil olmak üzere diğer hastalıkların radyoterapi ile tedavisinde hastaların potansiyel yan etkileri ve riskleri sağlık ekipleriyle konsültasyon yapmaları ve sürecin tamamını takip etmek için düzenli prosedür izlemeleri tavsiye edilmektedir.



Şekil 5. Radyasyonun akciğerlerde oluşturabileceği potansiyel etkiler.

3.3.7. Merkezi Sinir Sistemi

Radyasyona maruz kalmak merkezi sinir sistemi (MSS) üzerinde çok farklı etkiler oluşturabilmektedir. Bu etkilerin şiddeti radyasyon türü, dozu, süresi ve birey hassasiyeti nedenlerine bağlı olarak değişmektedir (McBride & Schae, 2020; Onorato, Di Schiavi, & Di Cunto, 2020). Radyasyonun MSS 'de meydana getirdiği etkiler akut veya gecikmeli olarak meydana gelebilmektedir. Radyasyona bağlı olarak MSS'de gelişen potansiyel etkilere örnekler aşağıda verilmiştir.

3.3.7.1. Akut Etkiler: Yüksek dozda radyasyon bulantı, kusma, baş ağrısı ve yorgunluk gibi semptomlara maruziyetten sonraki saatler ile günler içinde neden olarak radyasyon hastalığını tetiklemektedir. Buna ilaveten radyasyon beyindeki kan damarlarını etkileyerek iskemi veya kanamaya yol açabilmekte ve bunun sonucunda da nörolojik semptomlara neden olabilmektedir (Brook, 2020).

3.3.7.2. Gecikmiş Etkiler: Yüksek dozlarda radyasyona kronik maruziyet, bilişsel eksikliklere yol açabilir. Bu durum hafıza, dikkat ve öğrenme ile ilgili sorunları içeren bilişsel bozukluk olarak tarif edilmektedir. Ayrıca, bu maruziyet sonucunda

Alzheimer ve Parkinson hastalığı gibi nörodejeneratif hastalık risklerinin artması ile ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte, uzun süre radyasyon maruziyeti beyin dokusunda hasar oluşturarak nekroza yol açabilmektedir. Bu durum nörolojik semptomlara yol açabilme özelliğinde olduğu için beyin tümörlerinin radyoterapisinde olumsuzluk olarak değerlendirilmektedir. İyonlaştırıcı radyasyona uzun süreli maruz kalmanın beyin tümörü gelişme riskinin artmasıyla ilişkili olduğu bildirilmiştir. Uzun maruziyet süresinin en belirgin gecikmiş etkileri arasında yeni nöron oluşumunun (nörogenez) azalması yer almaktadır. Bu durumda beynin belirli bölgelerinde nörogenezi engelleyerek bilişsel işlevi etkileyebilmektedir.

3.3.7.3. Radyasyon Tedavisinde Dikkat Edilmesi Gerekenler

Beyin tümörlerinde radyasyon tedavisi ve benzeri tedavi şekillerinde amaç genellikle sağlıklı beyin dokusuna verilen zararı en aza indirmenin yanı sıra kanser hücrelerinin yok olmasını hedeflemektir. Ayrıca, bu tedavilerde kanserli bölge çevresinde yer alan normal dokunun belirli bir radyasyona maruz kalması kaçınılmazdır. Bu nedenle etkin tedavi planlamasında potansiyel normal doku hasarını azaltmak için dikkatli ve hassas planlama yapılması gerekmektedir.

3.4. Sonuç ve Öneriler

Radyasyona maruz kalmanın etkilerinin radyasyon kaynağının türüne (doğal veya yapay) ve ilgili özel izotoplara bağlı olarak değişebileceği bilinmektedir. Radyasyonun tıbbi ve endüstriyel uygulamalarının yanı sıra nükleer kazalar gibi kazalara maruz kalmalar da farklı radyasyona bağlı riskler teşkil edebilmektedir. Maruziyet kaynaklı hasarın ve zararlı etkilerin azaltılması amacıyla kalkan kullanımı ve maruz kalma süresinin en aza indirilmesi gibi korunma önlemlerinin alınması çok önemlidir. Maruziyet birçok faktöre bağlı olarak vücutta farklı etkilere neden olabilmektedir. Bu etkinler ve etken faktörler günümüz araştırma konuları arasında yer almaktadır. Radyasyona maruz kalma ve radyasyonun bağışıklık sistemi üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalar günümüzde devam eden araştırma alanlarıdır. Bu araştırmalarda bilim insanları radyasyona maruz kalmayı ve bunun sağlık üzerindeki potansiyel etkilerini yönetmek için daha iyi stratejiler geliştirmek amacıyla bu radyasyon ile bağışıklık sistemi arasındaki ilişkinin detaylarını araştırmayı sürdürmektedir. Bu konuda daha ayrıntılı bilgilerin elde edilmesi durumunda radyasyonun yönetimi ve sağlık alanında daha etkin kullanımına yönelik verilerin ortaya konulabileceği düşünülmektedir.

3.5 Kaynaklar

- Abdi, A. I., Khorshed, K. N., Ali, R. T., Zakariaee, S. S., & Naderi, N. (2023). Radiation exposure to family members of patients treated with radioactive iodine (131I): a systematic review and meta-analysis. *Clinical and Translational Imaging*, 11(5), 465-477. doi:10.1007/s40336-023-00561-9
- Afifi, A. N. A. M., Powerski, M., Jechorek, D., Brunner, T. B., Weigt, J., & Venerito, M. (2020). Radiation-induced damage in the upper gastrointestinal tract: clinical presentation, diagnostic tests and treatment options. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, 48-49, 101711. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bpg.2020.101711>
- Alhmod, J. F., Woolley, J. F., Al Moustafa, A., & Mallei, M. I. (2021). DNA damage/repair management in cancers. *Advances in Medical Biochemistry, Genomics, Physiology, Pathology*, 309-339.
- Ali Abdulhasan, K., Peyman, S., Saeed, F., Shima, Y., Majdi Mousa, J., & Mohammad Reza, A. (2020). Measurement of Radiation Exposure to Caregivers of Patients with Thyroid Diseases Treated with Iodine-131: A Review. *Frontiers in Biomedical Technologies*, 7(3). doi:10.18502/fbt.v7i3.4622
- Ali, Y. F., Cucinotta, F. A., Ning-Ang, L., & Zhou, G. (2020). Cancer Risk of Low Dose Ionizing Radiation. 8. doi:10.3389/fphy.2020.00234
- Alidadi, S., Shabestani Monfared, A., Amiri, M., Zabihi, E., Assadollahi, E., Gholami, A., . . . Abedian, Z. (2022). The efficacy of melatonin against radiotoxicity of iodine-131 and its response to treatment in hyperthyroid patients: a randomized controlled trial. *Nuclear Medicine Review*, 25(1), 31-36. doi: {}
- Applegate, K. E., Findlay, Ú., Fraser, L., Kinsella, Y., Ainsbury, L., & Bouffler, S. (2021). Radiation exposures in pregnancy, health effects and risks to the embryo/foetus—information to inform the medical management of the pregnant patient. *Journal of Radiological Protection*, 41(4), S522. doi:10.1088/1361-6498/ac1c95
- Araujo, I. K., Muñoz-Guglielmetti, D., & Mollà, M. (2020). Radiation-induced damage in the lower gastrointestinal tract: Clinical presentation, diagnostic tests and treatment options. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, 48-49, 101707. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bpg.2020.101707>
- Ardıç, Z. (2021). Konya'da bir üniversite hastanesi çalışanlarında mesleki olarak iyonize radyasyon maruziyetinin oksidatif stres ve inflamasyon markırları üzerine etkileri.

- Arnold, C. R., Mangesius, J., Skvortsova, I.-I., & Ganswindt, U. (2020). The Role of Cancer Stem Cells in Radiation Resistance. *10*. doi:10.3389/fonc.2020.00164
- Arroyo-Hernández, M., Maldonado, F., Lozano-Ruiz, F., Muñoz-Montaño, W., Nuñez-Baez, M., & Arrieta, O. (2021). Radiation-induced lung injury: current evidence. *BMC Pulmonary Medicine*, *21*(1), 9. doi:10.1186/s12890-020-01376-4
- Arslan, N. (2017). Radyasyonun Biyolojik Sistemler Üzerindeki Etkileri. *Nucl Med Semin*, *3*, 178-183.
- Azizova, T. V., Bannikova, M. V., Grigoryeva, E. S., & Rybkina, V. L. (2021). Risk of skin cancer by histological type in a cohort of workers chronically exposed to ionizing radiation. *Radiation and Environmental Biophysics*, *60*(1), 9-22. doi:10.1007/s00411-020-00883-6
- Bennardo, L., Passante, M., Cameli, N., Cristaudo, A., Patrino, C., Nisticò, S. P., & Silvestri, M. (2021). Skin Manifestations after Ionizing Radiation Exposure: A Systematic Review. *8*(11), 153.
- Bhangoo, R. S., Cheng, T. W., Petersen, M. M., Thorpe, C. S., DeWees, T. A., Anderson, J. D., . . . Wong, W. W. (2022). Radiation recall dermatitis: A review of the literature. *Seminars in Oncology*, *49*(2), 152-159. doi:<https://doi.org/10.1053/j.seminoncol.2022.04.001>
- Brook, I. (2020). Late side effects of radiation treatment for head and neck cancer. *Radiat Oncol J*, *38*(2), 84-92. doi:10.3857/roj.2020.00213
- Brudecki, K., Kluczevska-Gałka, A., Zagrodzki, P., Jarzab, B., Gorzkiewicz, K., & Mróz, T. (2020). ¹³¹I thyroid activity and committed dose assessment among family members of patients treated with radioactive iodine. *Radiation and Environmental Biophysics*, *59*(3), 559-564. doi:10.1007/s00411-020-00860-z
- Bustamante, M., Hernandez-Ferrer, C., Tewari, A., Sarria, Y., Harrison, G. I., Puigdecenet, E., . . . Young, A. R. (2020). Dose and time effects of solar-simulated ultraviolet radiation on the in vivo human skin transcriptome. *British Journal of Dermatology*, *182*(6), 1458-1468. doi:10.1111/bjd.18527 %J British Journal of Dermatology
- Cecen, E., & Bolaman, Z. (2010). İkincil Kanserler. *International Journal of Hematology Oncology/UHOD: Uluslararası Hematoloji Onkoloji Dergisi*, *20*(3).
- Chen, G., Han, Y., Zhang, H., Tu, W., & Zhang, S. (2021). Radiotherapy-Induced Digestive Injury: Diagnosis, Treatment and Mechanisms. *11*. doi:10.3389/fonc.2021.757973

- Coşkun, Ö. (2011). İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri. [Biological Effects of Ionizing Radiation]. *Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 13-17.
- Çağlar, H. O. (2022). DNA Tamir Mekanizması İlişkili Genlerin Biyoinformatik Yöntemlerle Glioblastomda Tanımlanması. [Identification of Genes Related to DNA Repair Mechanism in Glioblastoma by Bioinformatics Methods]. *Kocaeli Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 8(2), 117-124. doi:10.30934/kusbed.1003777
- Çimen, B. (2018). İYONLAŞTIRICI RADYASYON VE ÇEVRE GÜVENLİĞİ. In.
- El-Benhawy, S. A., Fahmy, E. I., Mahdy, S. M., Khedr, G. H., Sarhan, A. S., Nafady, M. H., . . . El Khadry, H. A. (2022). Assessment of thyroid gland hormones and ultrasonographic abnormalities in medical staff occupationally exposed to ionizing radiation. *BMC Endocrine Disorders*, 22(1), 287. doi:10.1186/s12902-022-01196-z
- Fenton, G., Johnson, K., & White, R. J. (2021). Radiation dermatitis: the evaluation of a new topical therapy for the treatment and prevention of radiation-induced skin damage and moist desquamation: a multicentre UK case cohort study. *Journal of Radiotherapy in Practice*, 20(4), 461-465. doi:10.1017/S1460396920001077
- Galassi, C., Klapp, V., Yamazaki, T., & Galluzzi, L. (2024). Molecular determinants of immunogenic cell death elicited by radiation therapy. *321(1)*, 20-32. doi:<https://doi.org/10.1111/imr.13271>
- Ganasoundari, A., Uma Devi, P., & Rao, M. N. A. (1997). Protection against radiation-induced chromosome damage in mouse bone marrow by *Ocimum sanctum*. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 373(2), 271-276. doi:[https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(96\)00208-4](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(96)00208-4)
- Gautam, R., Priyadarshini, E., Nirala, J., & Rajamani, P. (2022). Impact of nonionizing electromagnetic radiation on male infertility: an assessment of the mechanism and consequences. *International Journal of Radiation Biology*, 98(6), 1063-1073. doi:10.1080/09553002.2020.1859154
- Gu, Y., Zhang, B.-W., Guo, Z., Li, J.-H., Yu, M., Li, L.-F., & Li, J.-Y. (2021). Radiation-induced cross-linking: a novel avenue to permanent 3D modification of polymeric membranes. *Nuclear Science and Techniques*, 32(7), 70. doi:10.1007/s41365-021-00905-y

- Guan, B., Li, C., Yang, Y., Lu, Y., Sun, Y., Su, L., . . . Meng, A. (2023). Effect of spermidine on radiation-induced long-term bone marrow cell injury. *International Immunopharmacology*, 114, 109557. doi:<https://doi.org/10.1016/j.intimp.2022.109557>
- Guo, H., Chou, W.-C., Lai, Y., Liang, K., Tam, J. W., Brickey, W. J., . . . Ting, J. P. Y. (2020). Multi-omics analyses of radiation survivors identify radioprotective microbes and metabolites. 370(6516), eaay9097. doi:doi:10.1126/science.aay9097
- Güdük, Ö., Kılıç, C. H., & Güdük, Ö. (2018). Radyasyonun Zararli Etkileri Hakkında Hastaların Bilgi Düzeyinin Değerlendirilmesi: Bir Hastane Örneği. *Adıyaman Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 4(2), 874-889.
- Hill-Kayser, C., Yorke, E., Jackson, A., Gracia, C., Ginsberg, J., Keene, K., . . . Hua, C.-H. (2023). Effects of Radiation Therapy on the Female Reproductive Tract in Childhood Cancer Survivors: A PENTEC Comprehensive Review. *International Journal of Radiation Oncology*Biological*Physics*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2023.08.013>
- Iacovelli, N. A., Torrente, Y., Ciuffreda, A., Guardamagna, V. A., Gentili, M., Giacomelli, L., & Sacerdote, P. (2020). Topical treatment of radiation-induced dermatitis: current issues and potential solutions. *Drugs Context*, 9. doi:10.7573/dic.2020-4-7
- İlem-Özdemir, D., Gökoğlan, E., Ekinci, M., Özgenç, E., & Aşıkoğlu, M. (2020). Radyasyon ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri. [Radiation and Its Effects on Human Health]. *Anatolian Clinic the Journal of Medical Sciences*, 25(3), 289-294. doi:10.21673/anadoluklin.709434
- Jereczek-Fossa, B. A., Alterio, D., Jassem, J., Gibelli, B., Tradati, N., & Orecchia, R. (2004). Radiotherapy-induced thyroid disorders. *Cancer Treatment Reviews*, 30(4), 369-384. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ctrv.2003.12.003>
- Jin, H., Yoo, Y., Kim, Y., Kim, Y., Cho, J., & Lee, Y.-S. (2020). Radiation-Induced Lung Fibrosis: Preclinical Animal Models and Therapeutic Strategies. 12(6), 1561.
- Kadhim, A. A., Sheikhzadeh, P., Farzanefar, S., Yavari, S., & Ay, M. R. (2020). RADIATION DOSE ASSESSMENT TO FAMILY MEMBERS TAKING CARE OF NON-CANCEROUS THYROID PATIENTS TREATED WITH I-131 THERAPY IN NUCLEAR MEDICINE DEPARTMENT. *Radiation Protection Dosimetry*, 190(2), 208-216. doi:10.1093/rpd/ncaa092 %J Radiation Protection Dosimetry

- Käsmann, L., Dietrich, A., Staab-Weijnitz, C. A., Manapov, F., Behr, J., Rimner, A., . . . Belka, C. (2020). Radiation-induced lung toxicity – cellular and molecular mechanisms of pathogenesis, management, and literature review. *Radiation Oncology*, 15(1), 214. doi:10.1186/s13014-020-01654-9
- Khan, M. G. M., & Wang, Y. (2022). Advances in the Current Understanding of How Low-Dose Radiation Affects the Cell Cycle. 11(3), 356.
- Khandaker, M. U., Hassanpour, M., Khezripour, S., Rezaei, M. R., Bazghandi, A., Hassanpour, M., . . . Bradley, D. A. (2023). Investigation of the effect of 131I on blood parameters for thyroid cancer treatment. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110897. doi:<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110897>
- Kim, H. M., Oh, S., Yang, J. Y., Sun, H. J., Jang, M., Kang, D., . . . Byun, K. (2021). Evaluating Whether Radiofrequency Irradiation Attenuated UV-B-Induced Skin Pigmentation by Increasing Melanosomal Autophagy and Decreasing Melanin Synthesis. 22(19), 10724.
- Kuzay, D. (2022). RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ VE OKSİDATİF STRES İLE İLİŞKİSİ. *Sağlık Bilimlerinde Güncel Araştırmalar Cilt*.
- Lee, A.-Y. (2021). Skin Pigmentation Abnormalities and Their Possible Relationship with Skin Aging. 22(7), 3727.
- Leung, C. T., Yang, Y., Yu, K. N., Tam, N., Chan, T. F., Lin, X., . . . Wu, R. S. S. (2021). Low-Dose Radiation Can Cause Epigenetic Alterations Associated With Impairments in Both Male and Female Reproductive Cells. 12. doi:10.3389/fgene.2021.710143
- Likhacheva, A., Awan, M., Barker, C. A., Bhatnagar, A., Bradfield, L., Brady, M. S., . . . Devlin, P. M. (2020). Definitive and Postoperative Radiation Therapy for Basal and Squamous Cell Cancers of the Skin: Executive Summary of an American Society for Radiation Oncology Clinical Practice Guideline. *Practical Radiation Oncology*, 10(1), 8-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.prro.2019.10.014>
- Lumniczky, K., Impens, N., Armengol, G., Candéias, S., Georgakilas, A. G., Hornhardt, S., . . . Schaeue, D. (2021). Low dose ionizing radiation effects on the immune system. *Environment International*, 149, 106212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106212>
- Maluin, S. M., Osman, K., Jaffar, F. H. F., & Ibrahim, S. F. (2021). Effect of Radiation Emitted by Wireless Devices on Male Reproductive Hormones: A Systematic Review. 12. doi:10.3389/fphys.2021.732420

- Mayadağlı, A., alış, M. D., Beşişik, S. K., alış, V., Taşkin, M., & İncekara, O. (2001). AKUT MYELOİD LÖSEMİ GELİŞEN BİR ASTROSİTOMA OLGUSU. *Journal of Istanbul Faculty of Medicine*, 64(3).
- McBride, W. H., & Schae, D. (2020). Radiation-induced tissue damage and response. 250(5), 647-655. doi:<https://doi.org/10.1002/path.5389>
- Nanduri, L. S. Y., Panarelli, N. C., & Guha, C. (2022). Radiation injury in the gastrointestinal tract. In *Yamada's Atlas of Gastroenterology* (pp. 677-684).
- Onorato, G., Di Schiavi, E., & Di Cunto, F. (2020). Understanding the Effects of Deep Space Radiation on Nervous System: The Role of Genetically Tractable Experimental Models. 8. doi:10.3389/fphy.2020.00362
- Özcan, İ. (2020). Radyasyonun Biyolojik Etkileri.
- Özcan, M., & Topçuoğlu, P. (2008). Akut Radyasyon Sendromu. *Nükleer Kaza veya Terörist Atakta Hematopoietik Kök Hücre Transplantasyon*.
- Özdemir, İ. (2014). *Tıbbi ve radyolojik terminoloji: Hiperlink eğit. ilet. yay. san. tic. ve ltd. sti.*
- Parlak, Y. (2022). TİROİD KANSERİNİN I-131 İLE TEDAVİSİNDE RADYASYON GÜVENLİĞİ. *SAĞLIK BİLİM : Güncel Tıp-III*, 129.
- Rahi, M. S., Parekh, J., Pednekar, P., Parmar, G., Abraham, S., Nasir, S., . . . Gunasekaran, K. (2021). Radiation-Induced Lung Injury—Current Perspectives and Management. 11(3), 410-429.
- Rao, D., Behzadi, F., Le, R. T., Dagan, R., & Fiester, P. (2021). Radiation Induced Mucositis: What the Radiologist Needs to Know. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, 50(6), 899-904. doi:<https://doi.org/10.1067/j.cpradiol.2020.10.006>
- Reyhan, M. (2021). I-131 Tedavisinde Erken ve Ge Dönem Yan Etkiler ve Hasta Yönetimi.
- Schmeel, L. C., Koch, D., Schmeel, F. C., Röhner, F., Schoroth, F., Bücheler, B. M., . . . Wilhelm-Buchstab, T. M. (2020). Acute radiation-induced skin toxicity in hypofractionated vs. conventional whole-breast irradiation: An objective, randomized multicenter assessment using spectrophotometry. *Radiotherapy and Oncology*, 146, 172-179. doi:<https://doi.org/10.1016/j.radonc.2020.02.018>
- Shin, E., Lee, S., Kang, H., Kim, J., Kim, K., Youn, H., . . . Youn, B. (2020). Organ-Specific Effects of Low Dose Radiation Exposure: A Comprehensive Review. 11. doi:10.3389/fgene.2020.566244

- Sia, J., Szmyd, R., Hau, E., & Gee, H. E. (2020). Molecular Mechanisms of Radiation-Induced Cancer Cell Death: A Primer. 8. doi:10.3389/fcell.2020.00041
- Singh, V. K., & Seed, T. M. (2021). Radiation countermeasures for hematopoietic acute radiation syndrome: growth factors, cytokines and beyond. *International Journal of Radiation Biology*, 97(11), 1526-1547. doi:10.1080/09553002.2021.1969054
- Srivastav, S., Mishra, J., Keshari, P., Verma, S., & Aditi, R. (2022). Impact of Radiation on Male Fertility. In S. Roychoudhury & K. K. Kesari (Eds.), *Oxidative Stress and Toxicity in Reproductive Biology and Medicine: A Comprehensive Update on Male Infertility Volume II* (pp. 71-82). Cham: Springer International Publishing.
- Talapatra, K., Singh, P., Jaiswal, I., Rais, S., & Pandey, S. (2020). Radiation dermatitis: A narrative review of the Indian perspective. 3(3), 526-536. doi:10.4103/crst.Crst_209_20
- Tan, F. C., Yay, A. H., Toprak, G., & Yildiz, O. G. (2020). Gama Radyasyonun İndüklediği Nefrotoksiteye Karşılık Pycnogenolün Koruyucu Etkisi. [Protective effect of pycnogenol against gamma radiation-induced nephrotoxicity]. *Genel Tıp Dergisi*, 30(3), 140-150.
- Teng, Y., Yu, Y., Li, S., Huang, Y., Xu, D., Tao, X., & Fan, Y. (2021). Ultraviolet Radiation and Basal Cell Carcinoma: An Environmental Perspective. 9. doi:10.3389/fpubh.2021.666528
- Thomas, R., Chen, Y.-H., Hatabu, H., Mak, R. H., & Nishino, M. (2020). Radiographic patterns of symptomatic radiation pneumonitis in lung cancer patients: Imaging predictors for clinical severity and outcome. *Lung Cancer*, 145, 132-139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2020.03.023>
- Tong, H., Yue, R., Fang, J., Li, X., Yang, S., Hou, Y., . . . Cheng, Y. (2024). Effects of postoperative antioxidants on the salivary glands in patients with thyroid cancer undergoing radioactive iodine-131 treatment. 10.1097/MNM.0000000000001817. doi:10.1097/mnm.0000000000001817
- Üney, İ. H. Radyasyon ilişkili akciğer hasarı.
- Üney, İ. H. (2021). Radyasyon ilişkili akciğer hasarı.
- Wang, K., & Tepper, J. E. (2021). Radiation therapy-associated toxicity: Etiology, management, and prevention. 71(5), 437-454. doi:<https://doi.org/10.3322/caac.21689>

- Wang, Y., Tu, W., Tang, Y., & Zhang, S. (2020). Prevention and treatment for radiation-induced skin injury during radiotherapy. *01(02)*, 60-68. doi:[doi:10.1016/j.radmp.2020.02.004](https://doi.org/10.1016/j.radmp.2020.02.004)
- Xiang, M., Chang, D. T., & Pollom, E. L. (2020). Second cancer risk after primary cancer treatment with three-dimensional conformal, intensity-modulated, or proton beam radiation therapy. *126(15)*, 3560-3568. doi:<https://doi.org/10.1002/cncr.32938>
- Xiao, Y., Mo, W., Jia, H., Yu, D., Qiu, Y., Jiao, Y., . . . Zhang, S. (2020). Ionizing radiation induces cutaneous lipid remodeling and skin adipocytes confer protection against radiation-induced skin injury. *Journal of Dermatological Science*, *97(2)*, 152-160. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jidermsci.2020.01.009>
- Xie, J., Wang, C., Wang, N., Zhu, S., Mei, L., Zhang, X., . . . Zhao, Y. (2020). Graphdiyne nanoradioprotector with efficient free radical scavenging ability for mitigating radiation-induced gastrointestinal tract damage. *Biomaterials*, *244*, 119940. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2020.119940>
- Xu, J., Liu, D., Zhao, D., Jiang, X., Meng, X., Jiang, L., . . . Jiang, H. (2022). Role of low-dose radiation in senescence and aging: A beneficial perspective. *Life Sciences*, *302*, 120644. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2022.120644>
- Yang, L., Ma, J., Lei, P., Yi, J., Ma, Y., Huang, Z., . . . Pan, H. (2023). Advances in Antioxidant Applications for Combating 131I Side Effects in Thyroid Cancer Treatment. *11(6)*, 529.
- Yardman-Frank, J. M., & Fisher, D. E. (2021). Skin pigmentation and its control: From ultraviolet radiation to stem cells. *30(4)*, 560-571. doi:<https://doi.org/10.1111/exd.14260>
- Yeyin, N. (2015). Radyasyonun biyolojik etkileri. *Nucl Med Semin*, *1(3)*, 139-143.
- Zhao, Z., Cheng, W., Qu, W., Shao, G., & Liu, S. (2020). Antibiotic Alleviates Radiation-Induced Intestinal Injury by Remodeling Microbiota, Reducing Inflammation, and Inhibiting Fibrosis. *ACS Omega*, *5(6)*, 2967-2977. doi:[10.1021/acsomega.9b03906](https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03906)
- Zhou, L., Chen, J., Tao, C. J., Chen, M., Yu, Z. H., & Chen, Y. Y. (2021). Research progress of radiation-induced hypothyroidism in head and neck cancer. *J Cancer*, *12(2)*, 451-459. doi:[10.7150/jca.48587](https://doi.org/10.7150/jca.48587)
- Zhu, M., Yang, M., Zhang, J., Yin, Y., Fan, X., Zhang, Y., . . . Yu, F. (2021). Immunogenic Cell Death Induction by Ionizing Radiation. *12*. doi:[10.3389/fimmu.2021.705361](https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.705361)

Zlobina, A., Farkhutdinov, I., Carvalho, F. P., Wang, N., Korotchenko, T., Baranovskaya, N., & Farkhutdinov, A. (2022). Impact of Environmental Radiation on the Incidence of Cancer and Birth Defects in Regions with High Natural Radioactivity. *19*(14), 8643.

Gebelik Döneminde Radyasyon Maruziyetinin Fetal Etkileri

Celal CENGİZ¹

GİRİŞ

Gebelik döneminde bazen tanısal görüntülemelere ihtiyaç olabilir. Ultrasonografinin gebelik döneminde güvenilir bir görüntüleme yöntemi olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Bunun yanı sıra tanısal acıdan diğer görüntüleme yöntemlerine de ihtiyaç duyulabilir. Bu yöntemler radyografi ve manyetik rezonans yöntemleridir.

ABD (Amerika Birleşik Devletleri) 'de gebe kadınlara yönelik yapılan radyolojik görüntüleme yöntemleri son 20 yılda 2 katından fazla artış göstermektedir (Coakley, Cody, & Mahesh, 2010; Lazarus, DeBenedictis, North, Spencer, & Mayo-Smith, 2009), en sık kullanılan görüntüleme yöntemleri; bilgisayarlı tomografi (bt) ve pet bt'dir.

Gebelik dönemindeki radyasyon maruziyetinin etkileri konusunda genel bir ön yargı mevcuttur. Endişe, korku ve yanlış bilgilendirmeler yüzünden tanı ve tedavi konusunda hastalar tarafından bariyer uygulanabilmektedir. Sonuç olarak tanı ve tedavide gecikmeler oluşmaktadır (Chen, Coakley, Kaimal, & Laros, 2008; Lee, Haims, Monico, Brink, & Forman, 2004; Sadigh, Khan, Kassin, & Applegate, 2014; Tremblay, Thérasse, Thomassin-Naggara, & Trop, 2012). Gecikmiş veya gözden kaçırılmış aşırı iyonize radyasyon maruziyeti gebe olmayan hastalar ve sonraki gebelikleri için önemli bir risk teşkil etmektedir.

4.1. Radyasyonun Maddeyle İlk Etkileşimi

İyonize radyasyon, doku ile ilk temasında transfer ettiği miktar 3 farklı yolla dokuya pentre olmaktadır. Bunlar: Fotoelektrik etki, compton saçılması, çift üretim etkisi (Bushberg & Seibert, 2022; Johns & Cunningham, 1983). Bu etkileşimlerle hedef ortamda bulunan elektronlar serbest hale gelmektedir. Penetrasyon hattı boyunda ortamdaki diğer elektronlarla etkileşime girerek

¹ Uzm. Dr. Celal CENGİZ, Batman İluh Devlet Hastanesi,
socialdoctor@outlook.com, ORCID ID: 0000-0002-9586-7541

enerji aktarımı yaparlar ta ki enerjilerini kaybedene kadar. Ve bu durum ortamda iyonlaşmaya sebep olmaktadır (Tuieng, Cartmell, Kirwan, & Sherratt, 2021).

Radyasyon absorbe dozu: Herhangi bir materyalde depolanan ionize radyasyondan salınan enerjiyi ifade eder 'Radyasyon absorbed dose '(Rad) (Cho et al., 2011).

Medikal görüntülemelerde tipik olarak 1 Gray (Gray) den daha düşük dozlar kullanılması uygun olmaktadır. En uygun dozlar milli gray (mGy) şeklinde olmalıdır. Bunun aksine hedef dokuya yönelik yapılan görüntülemelerde bazen doz aşımı söz konusu olabilmektedir (Cho et al., 2011).

Absorbe edilen dozun 1 Rad olması, 1 gram maddenin radyasyona maruz kaldığında 100 erg enerji absorbe ettiği anlamına gelir (Van de Voorde, 1969).

Gray ise radyasyonun uluslararası metrik ölçüm birimidir.

1rad: 0.01Gy: 10 mGy

Eşdeğer dozları: İnsan dokusundaki radyasyonun biyolojik etkilerini göstermek için kullanılır. Doz birimi "Roentgen-equivalent man"(Rem) olarak kullanılır (Eshwarappa et al., 2013).

Sievert (Sv) radyasyonun eşdeğer doz ölçümleri için kullanılan uluslararası ölçüm birimidir (Ferrari, Manenti, & Malizia, 2023). Radyasyon tipine göre (beta, gama, alfa, nötron) emilen dozun eşiti veya daha aşağısını temsil eder.

1Rem: 0.01Sv

Etkili doz: Bazı dokular, diğer dokulardan radyasyona daha hassas olmaktadır. Bu farklılıklar efektif dozlarla belirlenmektedir (Martin, 2007). Organlarda ölçülen eşdeğer dozlar aynı zamanda rem veya sv ölçülmektedir (Tonnessen & Pounds, 2011).

4.1.1. İyonize radyasyonun biyolojik dokulardaki etkisi

İyonize radyasyon biyolojik dokularda direk teması neticesinde DNA hasarı ve indirekt yolla hücre içi reaktif serbest kimyasal radikallerle hücrenin genetik materyalini etkileyebilmektedir. Bu serbest sıvı molekül fragmanları hidroksil radikaller, çözünmüş ve akışkan elektronlar ve hidrojen radikallerinden oluşmaktadır.

Direkt DNA hasarı tek veya çift zincirde kırılmalarla sonuçlanmaktadır. Bu hasar neticesinde hücre ölümü ya gerçekleşir ya da hasarlı hücre tamir mekanizmalarıyla normal fonksiyonlarına geri dönebilmektedir, ya da apoptoz mekanizmalarıyla yok edilmektedir.

4.2. Radyasyon Maruziyetinin Riskleri ve Dozları

ABD de yaşayan herhangi bir kişi tüm hayatı boyunca doğal ortam da maruz kaldığı ortalama radyasyon miktarı 3.1 mSv (310mRem) olduğu bilinmektedir (U.S.NRC, 2017). Amerika Birleşik Devletleri nükleer düzenleme komisyonu, gebelerin mesleki radyasyon maruziyetinin (yani, istihdamla ilgili maruziyet) tüm gebeliği boyunca fetüse 5 mSv'yi (500 mRem) aşmamasını önermektedir (U.S.NRC, 2017). Gebeliğin tüm trimestirleri boyunca doğal ortamda tüm dünya çapında ortalama maternal radyasyon maruziyeti 2.3 mSv 'dir, ve bazı bölgelerde bu oranlar değişebilmektedir. Fetüsün maruz kaldığı radyasyon dozu yaklaşık 0.5-1mSv'dir. Çünkü maternal vücut yapıları maruz kalınan radyoaktif maddeyi zayıflatmaktadır (Sadro, Bernstein, & Kanal, 2012). Radyoaktif görüntüleme bölümünde çalışan gebe kadınlar için tüm gebelik süreci boyunca Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP), Ulusal Radyolojik Koruma Konseyi radyasyondan korunma ve radyasyon ölçümleri ve nükleer düzenleme komisyonu üst limit olarak 5mGy olması gerektiğini önermişlerdir. Benzer şekilde fetüs maruziyetinde 1 mGy den daha az olması gerektiğini önermişlerdir (Colletti, 2012; McCollough et al., 2007; Siegel, 2002).

Kılavuzlarda fetal radyasyon maruziyeti 50 mGy altında olduğunda, gebelik döneminde oluşan risklerle karşılaştıldığında düşük riski, kanser olma riski ve fetal malformasyon oluşması riski ihmal edilebilir seviyededir (McCollough et al., 2007). Tek fazla bt ile bile bu radyasyon seviyesine ulaşılabilir (Raptis et al., 2014; Sadro et al., 2012). Şayet alınan doz 100 mGy in altında ise gebelik sonlandırılması gerekmez (Colletti, 2012; McCollough et al., 2007; Raptis et al., 2014). Amerika Radyoloji Derneği 100mGy dozu için gebelik haftasına bakılmaksızın klinik açıdan tespit edilebilir seviyenin altında olarak değerlendirmektedir ve bazı yazarlar herhangi bir yan etkisi oluşmayacağını belirtmişlerdir (McCollough et al., 2007; Raptis et al., 2014). Şayet fetal doz 150 mgy geçtiği zaman kuvvetli bir ihtimal malformasyon riskinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Colletti, 2012). Bazı yazarlar fetüsün 7-25 inci gebelik haftaları arasında maruz kaldığı radyasyon dozunun 500mgy aşması durumunda ileri derecede mental retardasyon gelişebileceğini ve terminasyon seçeneğinin önerilebileceğini belirtmişlerdir (McCollough et al., 2007; Sadigh et al., 2014). Ancak bu tartışmalı bir konudur bazı yazarlar daha düşük dozlarda >200 mgy bile terminasyon seçeneğinin düşünülebileceğini belirtmişlerdir (Raptis et al., 2014). Genel olarak terminasyon seçeneği bireyin mevcut psikolojik durumu, mevcut

koşular gestasyonel hafta, ek riskler ve radyasyona maruz kalınan süreye göre karar verilmesi gerekmektedir.

4.3. Görüntüleme Çalışmaları

Reproduktif dönemde(15-55 yaş) olan her kadın hasta görüntüleme yöntemleri kullanılmadan önce gebeliği olup olmadığı sorgulanmalıdır (Applegate, 2007). Şayet gebelik şüphesi söz konusu ise hemen laboratuvar yöntemleriyle doğrulanmalıdır. Üreme çağında olup aciliyet durumu söz konusu olmayan hastalarda görüntüleme yöntemi için en uygun ve güvenli zaman menstrüel siklusun ilk 10 günüdür. Böylece tespit edilemeyen gebelik durumlarından da kaçınılmış olunacaktır. Prekonsepsiyonel görüntüleme çalışmaları sonucunda oluşan ovaryan radyasyon maruziyetinin fertilitiyi ve gebelik sonuçlarını etkilediğine dair ölçülebilir bir veri mevcut değildir. Gebelik durumu söz konusu olduğunda seçilecek optimal görüntüleme yöntemi, tamamen hastaya özgü, kendi klinik koşullarına, bireye özgü ve kar-zarar hesabına göre yapılmalıdır. Bu durumda radyasyon maruziyetinin oluşturacağı potansiyel fetal riskler; izotopların veya iyonize kontrast maddelerin plasentadan geçişi neticesinde fetal dokularda oluşturacağı hasar göz önüne alınarak seçim yapılmalıdır.

Seçilecek görüntüleme yöntemi klinik açıdan bize en iyi bilgiyi sağlayacak biçimde seçilmelidir (cerrahi, medikal, obstetrik vs.) ve radyoloji uzmanına tanı, tedavi ve fetal maruziyeti daha asgari seviyelere indirecek teknikler için danışılması gerekmektedir

Çok sayıda ulusal ve uluslararası kuruluş gebe hastaların görüntülenmesine ilişkin kılavuzlar hazırlamıştır. 2011'de 17 kuruluş ve bunların 33 raporunu içeren kapsamlı bir kaynak yayınlanmıştır (Austin & Frush, 2011). Amerikan Obstetri ve Jinekoloji Derneği (ACOG) 2017 yılında "Gebelik ve Laktasyon Sırasında Tanısal Görüntüleme Kılavuzları" ile ilgili bir komite görüşü yayınlamıştır (Opinion, 2017). Bu konudaki bilgiler kısmen bu raporlardan alınmıştır ve karar vermede yardımcı olabilir.

Laktasyon dönemi: Laktasyon döneminde tıpkı gebelik zamanında olduğu gibi klinik durumlar söz konusu olduğunda görüntüleme yöntemleri kullanılabilir.

İyonize radyasyon ve iyonize kontrast maddeler infant bebeklerde bir etkisi görülmemektedir.

Bunun aksine nükleer izotop materyaller laktasyon döneminde kullanılması gerektiğinde yarılanma ömrüne ve radyoaktivitesine göre laktasyonun bir süre ertelenmesi gerekmektedir.

4.4. Fetal Maruziyeti En Aza İndirecek Teknikler

Abdominopelvik grafi: Bu teknikle fetal radyasyon maruziyetini minimal seviyeye indirebilmekteyiz. Klasik anterior-posterior abdominal grafiklerdeki radyasyon maruziyetinin çok altında bir etki oluşturmaktadır. Teknik açıdan şu yöntemle; koruyucu bir sistemle radyasyon yayan cihazın istenen bölgede toplanmasını sağlayarak ve uterusu olan etkisini minimize ederek koruyucu etki sağlanabilmektedir. Bunun neticesinde fetüs 0.002-0.004 mGy'den daha düşük bir doza maruz kalmaktadır.

Bilgisayarlı tomografi: Bu görüntüleme de oluşan fetal radyasyon dozu; tomografinin kesit kalınlığı, maruz kaldığı süre ve görüntülenmesi istenen alanın genişliği gibi durumlar söz konusudur. Burada fetal maruziyeti azaltacak teknik; radyasyonun istenen alanda toplanmasını ve daha kısa sürede tomografinin çekilmesini sağlayarak elde edilebilmektedir.

Floroskopi ve anjiyografi: Floroskopik ve anjiyografik görüntüleme çalışmaları sırasında, pozlama süresinin, elde edilen görüntü sayısının, ışın boyutunun ve görüntüleme alanının değiştirilmesi radyasyona maruz kalma miktarını azaltabilir.

Nükleer görüntüleme: Maternal hidrasyon ve sık idrara çıkma, maternal mesanede biriken radyonükleidlerden dolayı oluşan fetal maruziyeti azaltabilmektedir.

Kurşun yelek giyimi: Görüntüleme esnasında artık kurşun yelek giyimi Amerika Radyoloji Derneği(ACR), Amerika Fizikçileri ve Sağlık fizikçileri Derneği gibi birçok dernek tarafından artık önerilmemektedir (Medicine, 2020; Stephens, 2021).

Tanısal baş, boyun, göğüs ve ekstremitelerinde fetusun görüntüleme alanlarında olmadığı durumlarda fetuse herhangi bir yan etkisi olmadığından dolayı abdominal koruma sağlamak gerekmemektedir.

4.5. Fetal Riskler

İyonize radyasyonun insan fetuslarına olan etkilerini tespit eden yüksek kalitede çalışmalar mevcut değildir. Var olan veriler çernobil faciası ve Japonya'daki atom bombası patlamalarından sonra oluşan ve vaka bazlı

araştırmalardır (Castronovo, 1999; Hall, 1991; National Research Council Committee on the Biological Effects of Ionizing, 1990; Otake & Schull, 1998; Radiation, 1993). Yüksek dozlarda iyonize radyasyonun 2 tür etkisi olmaktadır (Wertelecki, 2010);

Deterministik Etki: Deterministik etki ancak radyasyona bağlı eşik değerin ve onun üzerindeki dozlarda oluşan etkilerdir. Bu hücresel reaksiyonlar için eşik değer Uluslararası İş birliği Araştırma ve Yayını 103. rehberinde (ICRP, 2007, 2011); etkilediği doku alanın %1'den fazlasını etki altına alan değer olarak kabul edilmektedir (Hamada & Fujimichi, 2014). Bu eşik değerin üzerindeki dozlarda geniş hücre gruplarından meydana gelen hasarlar etkilediği gebelik haftasına göre çok ciddi klinik problemlere sebep olmaktadır. Hücre ölümlerinden migrasyon anormalliklerine ve doku hasarlarına, spontan gebelik kayıplarına, norogelişimsel davranış bozukluklarına, organ hasarlarına büyüme gelişme geriliklerine sebep olmaktadır (Hamada & Fujimichi, 2014)(Tablo 1).

Tablo 1. (Amerikan Radyoloji Derneği Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu'nun intrauterin kaynaklı şüpheli deterministik radyasyon etkilerine ilişkin özet raporu)

Gestasyonel yaş	Döllenme zamanı	Radyasyon dozu <50mgy	Gestasyonel yaş	Döllenme zamanı
0-2 hafta arası (0-14 gün)	Döllenme öncesi	Yan etkisi yok	Yan etkisi yok	Yan etkisi yok
3-4 hafta arası (15-28 gün)	1-2. hafta arası (1-14.gün)	Yan etkisi yok	Muhtemel Yan etkisi yok	Spontan gebelik kayıplarına ve abortusle sonuçlanabilir
5-10 hafta arası (29-70.gün)	3-8.hafta arası (15-56.gün)	Yan etkisi yok	Potansiyel etkiler bilimsel olarak belirsizdir ve muhtemelen klinik olarak tespit edilemeyecek kadar belirsizdir.	Doz artımına bağlı malformasyon riski yükselebilir
11-17 hafta arası (0-14 gün)	9-15.hafta arası (57-105.gün)	Yan etkisi yok	Potansiyel etkiler bilimsel olarak belirsizdir ve muhtemelen klinik olarak tespit edilemeyecek kadar belirsizdir.	Artan radyasyon dozlarıyla beraber IQ puanına düşüklük ve mental retardasyon riskinde artış
18-27hafta arası (71-119. gün)	16-25.hafta arası (106-175.gün)	Yan etkisi yok	Yan etkisi yok	Tespit edilemeyen dozlarda zeka geriliği
>27hafta (>189.gün)	>25.hafta (>175.gün)	Yan etkisi yok	Yan etkisi yok	Tanısal açıdan uygun değil

Stokastik Etki: Stokastik etkiyi kısaca açıklamak istersek klasik olarak; radyasyonun sebep olduğu kanser diyebiliriz. Herhangi bir radyasyon dozunda hücre genomunda, hücre diferansiyasyonunda ve hücre fonksiyonunda bozukluk meydana gelebilir. Bunlar yüksek dozlarla ilişkili değildir. Çocukluk çağı tümörlerinin bu şekilde oluştuğu belirtilmiştir. Örnek olarak; Çernobil faciası

sonrası çocuklarda artan tiroid kanseri oranları stokastik etki olarak kendini göstermektedir (Castronovo, 1999). Stokastik etki ile ilgili çalışmalar, araştırmalar devam etmektedir. Özellikle 0.5Gy ve altı dozlara maruziyetin belgelenmesi teknik açıdan zor olmaktadır (Brenner et al., 2003). Genel olarak bakıldığında yaşam boyu kanser gelişme oranı yeni doğan infantlarda ve inutero maruziyetle beraber yaklaşık 10mGy doz başına % 0.4 tür (Council, 2006). 15 yaşından önce inutero fetal maruziyet nedeniyle çocukluk çağı kanserlerinden ölme oranı 10mGy lik doz için 1700 de 1 dir (ICRP, 2000).

Deterministik riskin artış gösterdiği fetusu ve embriyoyu etkilediği eşik değer tam olarak belirtilmemiş olmasına rağmen biz bunu 50mGy (5 Rad, 05Gy) olarak kabul etmekteyiz.

Doz<50 mGy : Amerika Radyoloji Derneği-SPR rehberinde (Mainprize, Yaffe, Chawla, & Glanc, 2023), ICRP (ICRP, 2000; Valentin, 2003) belirtildiğine göre gebelik döneminde yapılan araştırmalar neticesinde tüm gebeliklerin gebelik haftalarına bakılmaksızın 50mgy altındaki dozlarda gözlemlenebilir bir etkisini olmadığı görülmüştür.

Fetus <50mGy radyasyon dozuna maruz kaldığında fetal anomalilerde, entelektüel kapasitesinde, gelişim geriliğinde ve gebelik kaybında artış olduğuna dair bir kanıt gösterilememiştir (R. L. Brent, 1989; Prevention, 2016).

Doz >50mGy: Daha fazla fetal radyasyon maruziyeti ile ilişkili olan tanısal görüntüleme çalışmalarında bile (örn. abdominal veya pelvik bt, baryum lavmanı, sistoüretrogram) fetüs neredeyse hiçbir zaman 50mGy üzerindeki dozlara maruz kalmaz.

50-100 mgy arasındaki dozlarda fetal risk olup olmadığı net olarak belli değildir ancak kanıtlar riskin 100mgy (0.1gy,10rad) başladığını belirtmekte ve özellikle radyasyon dozu 150-200mGy üzerinde olduğunda daha bu riskin daha belirgin olduğunu göstermektedir.

Retrospektif bir çalışmada 97 gebe hastaya abdominal ve lomber bt çekilmiş, 5 hasta 50-90mGy arasında radyasyona maruz kalmış, 1 hastada konjenital anomali gelişmiş, <50mgy altındaki dozlarda herhangi bir anomali gelişmediği görülmüştür (Prevention, 2016).

Potansiyel sonuçlar açısından iyonize radyasyonun >50mGy üzerindeki dozlarında oluşan riskleri 4 kategoriye ayrılması gerekmektedir (Missanelli et al., 2022; Yamazaki & Schull, 1990); 1.Gebelik kaybı, 2.Konjenital malformasyon, 3.Fetal büyüme ve gelişim geriliği, 4.Mutajenik ve karsinojenik etki. Bu sonuçların her biri bulunduğu gestasyonel haftaya bağlı olarak ve fetus tarafından absorbe edilen

iyonize radyasyon miktarına ve tamir mekanizmalarının etkin bir şekilde çalışıp çalışmamasına göre şekillenmektedir. Bu bulgulardan herhangi birinin yokluğunda veya bu yolların herhangi birindeki bir eksiklikte insanlarda diğer malformasyon türlerinde varlığı radyasyon maruziyetine atfedilmemelidir (R. L. Brent, 1989; Robert L. Brent, 2009).

Tablo 2. Yaygın radyolojik muayenelerle ilişkili fetal radyasyon dozları

Muayene tipi	Fetal doz(mGy)
<i>Çok düşük doz maruziyeti(<0.1mGy)</i>	
Servikal omurga grafisi (anteroposterior-lateral)	<0.001
Herhangi bir ekstemitenin grafisi	<0.001
Mamografi iki yönlü	0.001-0.01
Göğüs grafisi iki yönlü	0.0005-0.01
<i>Düşük orta düzey maruziyet(0.1-10mGy)</i>	
Radyografi	
Abdominal grafi	0.1-0.3
Lumbar omurga grafisi	1-10
İntravenöz pyelografi	5-10
Çift kontrast baryumlu grafi	1-20
<i>Bilgisayarlı Tomografi(bt)</i>	
Kafa veya boyun bt	1-10
Göğüs bt veya pulmoner anjiyografi	0.01-0.66
Kesitsel pelvimetri(femur basından geçen)	<1
<i>Nükleer Tıp</i>	
Düşük doz perfuzyon sintigrafisi	0.1-0.5
Teknesyum-99 kemik sintigrafisi	4-5
Pulmoner dijital subtraksiyon anjiyografi	0.5
<i>Yüksek doz maruziyetleri(10-50mGy)</i>	
Abdominal bt	1.3-35
Pelvik bt	10-50
F ¹⁸ tum vücut PET /BT sintigrafisi	10-50

Gebelik Kaybı: Konsepsiyon sonrası ilk 14 günde oluşan embriyolojik doku iyonize radyasyona en hassas olduğu dönemdir. Bu dönemde radyasyona maruz kalan gebelik materyali ya hasarlanır ya da hasarlanmaz ya hep ya hiç kanunu işler (De Santis et al., 2007). Radyasyonun tetiklediği teratogenesis büyüme gelişme geriliği veya karsinogenesis bu evrede görülmez (R. L. Brent, 1989). Bu

dönemde insan embriyo hücreleri için ölüm dozu veya lethal doz 100 mGy (0.1Gy, 10Rad)'dir (Control & asp, 2016). 1000mGy (1 Gy, 100 Rad) embriyolojik doz, embriyoların %50 sinin ölümüne sebep olacaktır. Organogenesis dönemi konsepsiyon sonrası (2-8 hafta veya son menstrüel itibaren sıklıktan 4-10 hafta arası) radyasyonun etkilediği emriyoda hücrelerin proliferasyonunda, göçünde veya mitotik aktivitelerinde bozulma ve gecikme meydana gelebilmektedir (Bentur, 1994). Ölüm nadiren meydana gelmektedir.

Malformasyon: Organogenesis döneminde meydana gelen radyasyon hasarı konjenital malformasyonlara ve özellikle santral sinir sistemi anomalilerine (mikrosefali ve büyük göz anormallikleri) sebep olabilmektedir. Mikrosefali inutero radyasyon maruziyeti neticesinde oluşan en sık anomalidir (Mettler, 1985). 16. gebelik haftasından önceki fetuslerde konjenital malformasyon için eşik değer yaklaşık olarak 100-200mGy arasındadır (Control & asp, 2016). 16. gebelik haftasından sonra birçok araştırmacı konjenital malformasyon için eşik değerın daha yüksek olduğunu ve bu değerın en az 500-700mGy olduğunu belirtmişlerdir. 20-25. gebelik haftalarından sonra teratojenik etkilere karşı fetusun dirençli olduğunu belirtmişlerdir (De Santis et al., 2007).

a. Büyüme ve Gelişme Geriliği

Fetal Büyüme Geriliği: Atom bombası sonrası kurtulanlarda radyasyon dozu arttıkça özellikle 1000mGy üzerindeki dozlarda kalıcı fiziksel büyüme geriliği olduğunu veriler bize göstermiştir (Control & asp, 2016). Bu durum daha çok 1. trimesterde maruz kalındığında daha belirgin olduğu görülmektedir. Maruziyet dozu 1000mGy üzerinde olduğunda 18 yaşına geldiklerinde boylarda %3-4 azalma olduğu görülmüştür

Gelişim Geriliği: Hiroşimadaki atom bombası patlamasından sonra yapılan çalışmalar gösteriyor ki konsepsiyon sonrası 8-15. gebelik haftaları arasında radyasyon maruziyeti neticesinde entellektüel geriliğin daha belirgin olduğu görülmüştür (Radiation, 1993). Anormalilere norogelişimsel bozukluklarında eşlik ettiği görülmüştür. Hiroşimadaki atom bombasından kurtulanlar arasında yapılan çalışmalarda konsepsiyon sonrası 8 hafta altında veya 25 hafta üstünde radyasyona maruz kalan çocuklarda entelektüel kapasitede ciddi bir gerilik tespit edilmemiştir. Burada gösteriliyor ki doz artımıyla bu iş lineer şekilde hareket etmektedir. Konsepsiyon sonrası entelektüel kapasitede geriliğin meydana gelmesi için eşik değer 120mGy (0.12Gy, 12 Rad), 16-25. gebelik haftaları arasında da 210 mGy'dir (Coakley et al., 2010; Hall, 1991).

Konsepsiyon sonrası 8-15. gebelik haftaları arasında ortalama zekâ puanı her 100mGy üstü için 1000mGy basına yaklaşık 25-31 puan arasında ileri seviyede zihinsel engelli olma ihtimali mevcut, 100mGy aşan dozlarda 1000mGy basına yaklaşık %40. 16-25. gebelik haftaları arasında 100mGy üstü dozlarda ortalama zeka puanı kaybı 1000mGy basına yaklaşık 13-21, ileri seviyede zihinsel engelli olma ihtimali 700 mGy üstünde 1000mgy basına yaklaşık %9'dur.

b. Mutajenik ve Karsinojenik Etki

Genetik Mutasyonlar: Radyasyon genetik mutasyon sıklığını artırabilmektedir. Hafif artmış genetik mutasyon sıklığının tespiti zor olmaktadır. Çünkü geçirilmiş spontan mutasyon sıklığı yüksek olup yaklaşık %10 seviyelerinde olmaktadır. Resesif mutasyonlar jenerasyonlar boyunca meydana gelmektedir. Ancak otozomal dominant mutasyon nadir görülmektedir (Radiation, 1993). Bundan dolayı meydana gelen genetik mutasyonların sebebinin çevresel mi? yoksa radyasyonun mu tetiklediğini belirlemek mümkün olmamaktadır. Radyasyonun tetiklediği genetik mutasyonlarla ilgili çalışmalar geniş ölçekli ve tamamen hayvan ve bitkiler üzerinde yapılmıştır. İnsanlarla ilgili çok az veri mevcut, bunlarda gözlemsel çalışmalar olup atom bombasından kurtulan insan gruplarından oluşmaktadır. Bundan dolayı radyasyonun tetiklediği herhangi bir genetik mutasyonun varlığı insanlar üzerinde tespit edilememiştir (National Research Council Committee on the Biological Effects of Ionizing, 1990; Russell Ritenour, 1986; U.S.NRC, 2017).

Karsinogenesis: Hayvan çalışmaları karsinojenik etkinin geç fetal gelişim evresinde daha çok meydana geldiğini göstermiştir (Missanelli et al., 2022). Çok düşük (10mGy,20mGy) in utero maruziyetin çocukluk çağı kanserlerinde özellikle lösemide 1/3000 yaklaşık 1.5-2 katlık artışa sebep olduğu görülmüştür (R. L. Brent, 1989; Opinion, 2017). Yenidoğan döneminde 10mGy radyasyona maruz kalmak çocukluk çağında özellikle lösemi görülme riskini %0.2-0.3 olan beklenti düzeyi %0.3-0.7 arasındaki bir orana yükseltmektedir (Raptis et al., 2014). Düşük dozlarda radyasyon maruziyetinin lösemiye sebep olduğuyula ilgili tartışmalar hala mevcuttur. Radyasyona bağlı lösemi gelişen çocukların radyasyona maruz kalmamış kardeşlerinde de aynı şekilde lösemnin arttığı görülmüştür. Hiroşima ve Nagasaki'deki atom bombasına maruz kalan fetüslerde kanserde önemli derecede artış görülmemiştir (Kato, 1971).

Hiroşima ve Nagasaki'deki atom bombasından sağ kurtulanlarda inutero fetal maruziyet ve 6 yaşından küçük çocuklarda radyasyon maruziyeti neticesinde

solid kanser oranlarda artış olduğu görülmüştür. Hem inutero fetal maruziyet (2452 kişi) hem de erken yaş çocuk gruplarında (15,388kişi) doz ilişkili solid kanser oranlarından artış olduğu görülmüştür (Preston et al., 2008). Ve erken yaş çocuk grubunun radyasyon maruziyeti ile fetal radyasyon maruziyetlerinin yaşam boyu kanser olma riskleri karşılaştırıldığında erken yaş çocuk grubunda riskin daha yüksek olduğu görülmüştür.

50 yaşında olup inutero radyasyona maruz kalan veya çocukluk yaş grubunda radyasyona maruz kalan gruplarda 1000mGy başına kanser olma oranı 6,8-56/10000 kişi arasındadır 200mgY altındaki dozlarda onkojenite riski artmamıştır.

c. Seçilmiş Görüntüleme Çalışmaları

Yapılan çalışmalarda tahmini fetal iyonize radyasyon maruziyeti tablo 2 de belirtilmiştir (Bentur, 1994; Kereiakes & Rosenstein, 2019). Bu tablo bize yapılan bt ve radyografinin hedef dokudan fetüse olan olası etkileriyle ilgili bilgi vermesi açısından önemlidir.

Literatürde birçok fetal radyasyon doz tabloları mevcuttur. Ve birçok kriter bulunmaktadır. Bu durum hem klinisyenler hem de hastalar açısından kafa karışıklığına sebep olmaktadır. Bu durumdaki karışıklığı gidermek için gebe bir kadın konsülte edildiği zaman mevcut radyasyon doz ölçümlerinde hem radyoloji uzmanının hem de radyoloji teknikerlerinin aynı kriterleri kullanması gerekmektedir. Göz önünde bulundurulması gereken kriterler; projeksiyonların sayısı ve türü, maruziyet süresi, hedef doku ile fetus arasındaki mesafe, radyasyon yayan cihaz ile gebe arasındaki mesafe ve çekilecek tanınal görüntülemenin dozunu sınırlamak için kullanılan dijital toplama sistemleridir.

Diş grafisi: Diş grafisi gebelik döneminde kullanılabilir. Dental grafi çekimi esnasında anneden yayılan radyasyon dk başına yaklaşık 0.0001mGy'dir, genel anlamda zararsızdır.

Popülasyon tabanlı bir vaka kontrol çalışmasında annenin tiroid bezinin antepartum diş radyografisi nedeniyle >0,4 mGy (40 mRad) üzerinde radyasyona maruz kalması ile düşük doğum ağırlığı (2500 g'dan az) arasında bir ilişki bulunmuş (Hujoel, Bollen, Noonan, & del Aguila, 2004), bu ilişki, diğer bir çok çalışmalardan elde edilen bulgularla tutarlı değildir. Diğer çalışmalar biyolojik olarak uygun değildir (Robert L. Brent, 2009). Gebe hastalarda diş görüntüleme önerilerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan önce daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Kullanılan İyonize Kontrast Maddeler

Gebelik Dönemi: İyonize kontrast maddeler gebelik döneminde gereklilik hallerinde kullanılabilir. Bu kontrast maddelerin teratojenik veya karsinojenik bir etkisi olmadığı bilinmektedir (R. L. Brent, 1989). Kontrast maddeler plasentayı geçip fetal troid glandlarında depresif etki yapabilmektedir. Fetal troid glandlar iyodin alımına ilk trimestırda başlamaktadır. St3, St4 midtrimestırde salgılanmaktadır. İyonize kontrast madde kullanımı sonrası fetal dokularda 2.ve 3. trimestırda sekel kaldığına dair herhangi bir klinik durum rapor edilmemiştir (Rajaram, Exley, Fairlie, & Matthews, 2012; Raymond & LaFranchi, 2010).

Laktasyon Dönemi: İyonize kontrast madde kullanımı sonrası laktasyon kesilmeden devam edilebilmektedir. Bu durum ACOG ve ACR kılavuzlarında belirtilmiştir (U.S.NRC, 2017).

Amerika Radyoloji Derneği (ACR) anneye verilen iyonize kontrast maddenin yaklaşık yüzde <0.01 'den azının emzirme döneminde bebeğe geçebildiğini belirtmişlerdir (Rajaram et al., 2012). En sık kullanılan iyonize kontrast maddelerin özellikleri; proteine yüksek düzeyde bağlanma özelliği, yarılanma ömrü <60dk olması, vücuttan hızlı bir şekilde klirens uğraması, süte çok az geçmek gibi özellikleri bulunmaktadır (FitzJohn, Williams, Laker, & Owen, 1982; Ilett, Hackett, Paterson, & McCormick, 1981; Nielsen et al., 1987). İyonize kontrast maddelerin oral biyoyararlanımı çok düşük olduğunda emziren annelerin bebeklerine geçme durumu çok düşük düzeylerde olmaktadır.

Yapılan bir çalışmada 10 yenidoğan bebeğe kontrast madde verilmiş, 10. ve 30. gün tiroid fonksiyon testleri kontrol edilmiş ve herhangi bir anormalliğe rastlanmamıştır (Bona, Zaffaroni, Defilippi, Gallina, & Mostert, 1992).

Dip Not: Klasik bilgi iyonize kontrast madde verilen annelerin 24 saat emzirmemeleri gerektiği yönündedir.

Nükleer Tıp

Nükleer tıp görüntüleme çalışmaları radyoisostop maddelerle; pulmoner ventilasyon perfuzyon grafisi, tiroid, kemik ve renal radyonükleid tarama çalışmaları, tümör yayılımı ve etkileri vs. olarak hizmet vermektedir.

Fetal riskler verilen radyoizotop maddenin fetüse etkilerini etkileyen faktörler; maternal alım-atılım, plasental permeabilite, fetal vücutta dağılım şekli, doku affinitesi, radyonükleid maddenin yarılanma ömrü ve emilen radyasyon türüne göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca fetal maruziyeti

etkileyen bir başka durum maternal hidrasyona, mesanede radyonükleid maddenin kalma süresine, işeme sıklığına bağlı değişim gösterebilmektedir.

Verilen izotop maddeler fetal dokularda spesifite gösterebilmektedir ve buda endişe verici olabilmektedir. Örnek olarak; iodine -131 veya iodine 123 tiroid glandında, demir -59 karaciğerde, galyum dalakta ve stronium-90 ve yttrium-90 kemik dokuya spesifik izotoplardır.

Seçilmiş nükleer tıp görüntüleme çalışmaları tahmini fetal maruziyet tablo 2 de belirtilmiştir.

KAYNAKLAR

- Applegate, K. (2007). Pregnancy Screening of Adolescents and Women Before Radiologic Testing: Does Radiology Need a National Guideline? *Journal of the American College of Radiology*, 4(8), 533-536. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jacr.2007.03.016>
- Austin, L. M., & Frush, D. P. (2011). Compendium of National Guidelines for Imaging the Pregnant Patient. *197*(4), W737-W746. doi:10.2214/ajr.10.6351
- Bentur, Y. (1994). Ionizing and nonionizing radiation in pregnancy. *2*, 515-572.
- Bona, G., Zaffaroni, M., Defilippi, C., Gallina, M. R., & Mostert, M. (1992). Effects of iopamidol on neonatal thyroid function. *Eur J Radiol*, 14(1), 22-25. doi:10.1016/0720-048x(92)90056-f
- Brenner, D. J., Doll, R., Goodhead, D. T., Hall, E. J., Land, C. E., Little, J. B., . . . Zaider, M. (2003). Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: assessing what we really know. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 100(24), 13761-13766. doi:10.1073/pnas.2235592100
- Brent, R. L. (1989). The effect of embryonic and fetal exposure to x-ray, microwaves, and ultrasound: counseling the pregnant and nonpregnant patient about these risks. *Seminars in Oncology*, 16(5), 347-368.
- Brent, R. L. (2009). Saving lives and changing family histories: appropriate counseling of pregnant women and men and women of reproductive age, concerning the risk of diagnostic radiation exposures during and before pregnancy. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 200(1), 4-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ajog.2008.06.032>
- Bushberg, J. T., & Seibert, J. A. (2022). *The Essential Physics of Medical Imaging Study Guide*: Lippincott Williams & Wilkins.
- Castronovo, F. P., Jr. (1999). Teratogen update: radiation and Chernobyl. *Teratology*, 60(2), 100-106. doi:10.1002/(sici)1096-9926(199908)60:2<100::Aid-tera14>3.0.Co;2-h
- Chen, M. M., Coakley, F. V., Kaimal, A., & Laros, R. K. J. (2008). Guidelines for Computed Tomography and Magnetic Resonance Imaging Use During Pregnancy and Lactation. *112*(2 Part 1), 333-340. doi:10.1097/AOG.0b013e318180a505
- Cho, J. H., Kim, J. Y., Kang, J. E., Park, P. E., Kim, J. H., Lim, J. A., . . . Woo, N. S. (2011). A Study to Compare the Radiation Absorbed Dose of the C-arm Fluoroscopic Modes. *Korean J Pain*, 24(4), 199-204. doi:10.3344/kjp.2011.24.4.199

- Coakley, F. V., Cody, D. D., & Mahesh, M. (2010). The pregnant patient: alternatives to CT and dose-saving modifications to CT technique. *Image Wisely*, 13.
- Colletti, P. M. (2012). PET-CT in the Pregnant Patient. *Image Wisely*, 333-337.
- Control, C. f. D., & asp, P. J. A. a. h. w. b. c. g. r. p. (2016). Radiation and pregnancy: a fact sheet for clinicians.
- Council, N. R. (2006). *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2*. Washington, DC: The National Academies Press.
- De Santis, M., Cesari, E., Nobili, E., Straface, G., Cavaliere, A. F., & Caruso, A. (2007). Radiation effects on development. 81(3), 177-182. doi:<https://doi.org/10.1002/bdrc.20099>
- Eshwarappa, K. M., Ganesh, S., Siddappa, K., Kashyap, Y., Sarkar, P. S., & Sinha, A. (2013). Photoneutron spectrum estimation and its experimental validation using neutron REM (Roentgen Equivalent in Man) detector. *Annals of Nuclear Energy*, 57, 130-133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.01.054>
- Ferrari, C., Manenti, G., & Malizia, A. (2023). Sievert or Gray: Dose Quantities and Protection Levels in Emergency Exposure. 23(4), 1918.
- FitzJohn, T. P., Williams, D. G., Laker, M. F., & Owen, J. P. (1982). Intravenous urography during lactation. 55(656), 603-605. doi:10.1259/0007-1285-55-656-603
- Hall, E. J. (1991). Scientific view of low-level radiation risks. *Radiographics*, 11(3), 509-518. doi:10.1148/radiographics.11.3.1852943
- Hamada, N., & Fujimichi, Y. (2014). Classification of radiation effects for dose limitation purposes: history, current situation and future prospects. *J Radiat Res*, 55(4), 629-640. doi:10.1093/jrr/rru019
- Hujoel, P. P., Bollen, A. M., Noonan, C. J., & del Aguila, M. A. (2004). Antepartum dental radiography and infant low birth weight. *JAMA*, 291(16), 1987-1993. doi:10.1001/jama.291.16.1987
- ICRP, I. C. o. R. P. (2000). Pregnancy and medical radiation. *Ann ICRP*, 30(1), iii-viii, 1-43. doi:10.1016/s0146-6453(00)00037-3
- ICRP, I. C. o. R. P. (2007). The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. . *Ann ICRP* 37:1–332. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
- ICRP, I. C. o. R. P. (2011). ICRP statement on tissue reactions.
- Ilett, K. F., Hackett, L. P., Paterson, J. W., & McCormick, C. C. (1981). Excretion of metrizamide in milk. 54(642), 537-538. doi:10.1259/0007-1285-54-642-537
- Johns, H. E., & Cunningham, J. R. (1983). The physics of radiology.

- Kato, H. (1971). Mortality in children exposed to the A-bombs while in utero, 1945-1969. *Am J Epidemiol*, 93(6), 435-442. doi:10.1093/oxfordjournals.aje.a121277
- Kereiakes, J. G., & Rosenstein, M. (2019). *Handbook of radiation doses in nuclear medicine and diagnostic x-ray*: CRC Press.
- Lazarus, E., DeBenedictis, C., North, D., Spencer, P. K., & Mayo-Smith, W. W. (2009). Utilization of Imaging in Pregnant Patients: 10-year Review of 5270 Examinations in 3285 Patients—1997–2006. *251(2)*, 517-524. doi:10.1148/radiol.2512080736
- Lee, C. I., Haims, A. H., Monico, E. P., Brink, J. A., & Forman, H. P. (2004). Diagnostic CT Scans: Assessment of Patient, Physician, and Radiologist Awareness of Radiation Dose and Possible Risks. *231(2)*, 393-398. doi:10.1148/radiol.2312030767
- Mainprize, J. G., Yaffe, M. J., Chawla, T., & Glanc, P. (2023). Effects of ionizing radiation exposure during pregnancy. *Abdominal Radiology*, 48(5), 1564-1578. doi:10.1007/s00261-023-03861-w
- Martin, C. J. (2007). Effective dose: how should it be applied to medical exposures? , *80(956)*, 639-647. doi:10.1259/bjr/25922439
- McCullough, C. H., Schueler, B. A., Atwell, T. D., Braun, N. N., Regner, D. M., Brown, D. L., & LeRoy, A. J. J. R. (2007). Radiation exposure and pregnancy: when should we be concerned? , *27(4)*, 909-917.
- Medicine, A. A. o. P. i. (2020). Patient Gonadal and fetal Shielding in diagnostic imaging frequently asked questions.
- Mettler, F. A. (1985). Medical effects of ionizing radiation.
- Missanelli, A., Lombardi, N., Bettiol, A., Lanzi, C., Rossi, F., Pacileo, I., . . . Pistelli, A. (2022). Birth outcomes in women exposed to diagnostic radiology procedures during first trimester of pregnancy: a prospective cohort study. *Clinical Toxicology*, 60(2), 175-183. doi:10.1080/15563650.2021.1919693
- National Research Council Committee on the Biological Effects of Ionizing, R. (1990). *In Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: Beir V*. Washington (DC): National Academies Press (US)
- Copyright © 1990 by the National Academy of Sciences.
- Nielsen, S. T., Matheson, I., Rasmussen, J. N., Skinnemoen, K., Andrew, E., & Hafsaal, G. (1987). Excretion of iohexol and metrizoate in human breast milk. *Acta Radiol*, 28(5), 523-526.

- Opinion, C. (2017). Guidelines for Diagnostic Imaging During Pregnancy and Lactation. *Obstet Gynecology*, 130:e210.
- Otake, M., & Schull, W. J. (1998). Radiation-related brain damage and growth retardation among the prenatally exposed atomic bomb survivors. *Int J Radiat Biol*, 74(2), 159-171. doi:10.1080/095530098141555
- Preston, D. L., Cullings, H., Suyama, A., Funamoto, S., Nishi, N., Soda, M., . . . Shore, R. E. (2008). Solid cancer incidence in atomic bomb survivors exposed in utero or as young children. *J Natl Cancer Inst*, 100(6), 428-436. doi:10.1093/jnci/djn045
- Prevention, C. f. D. C. (2016). Radiation and pregnancy: a fact sheet for clinicians.
- Radiation, U. N. S. C. o. t. E. o. A. (1993). Sources and Effects of Ionizing Radiation. *UN Publication E.94.IX.2, UN Publications; United Nations, New York.*
- Rajaram, S., Exley, C. E., Fairlie, F., & Matthews, S. (2012). Effect of antenatal iodinated contrast agent on neonatal thyroid function. *Br J Radiol*, 85(1015), e238-242. doi:10.1259/bjr/29806327
- Raptis, C. A., Mellnick, V. M., Raptis, D. A., Kitchin, D., Fowler, K. J., Lubner, M., . . . Menias, C. O. (2014). Imaging of Trauma in the Pregnant Patient. *34(3)*, 748-763. doi:10.1148/rg.343135090
- Raymond, J., & LaFranchi, S. H. (2010). Fetal and neonatal thyroid function: review and summary of significant new findings. *Curr Opin Endocrinol Diabetes Obes*, 17(1), 1-7. doi:10.1097/MED.0b013e3283333b0b2
- Russell Ritenour, E. (1986). Health effects of low level radiation: Carcinogenesis, teratogenesis, and mutagenesis. *Seminars in Nuclear Medicine*, 16(2), 106-117. doi:[https://doi.org/10.1016/S0001-2998\(86\)80024-1](https://doi.org/10.1016/S0001-2998(86)80024-1)
- Sadigh, G., Khan, R., Kassin, M. T., & Applegate, K. E. (2014). Radiation Safety Knowledge and Perceptions among Residents: A Potential Improvement Opportunity for Graduate Medical Education in the United States. *Academic Radiology*, 21(7), 869-878. doi:<https://doi.org/10.1016/j.acra.2014.01.016>
- Sadro, C., Bernstein, M. P., & Kanal, K. M. (2012). Imaging of Trauma: Part 2, Abdominal Trauma and Pregnancy—A Radiologist's Guide to Doing What Is Best for the Mother and Baby. *199(6)*, 1207-1219. doi:10.2214/ajr.12.9091
- Siegel, J. A. (2002). Guide for diagnostic nuclear medicine. Reston, VA: *Society of Nuclear Medicine*.
- Stephens, K. J. A. I. N. (2021). NCRP Recommends Against Routine Gonadal Shielding.

- Tonnessen, B. H., & Pounds, L. (2011). Radiation physics. *Journal of Vascular Surgery*, 53(1, Supplement), 6S-8S. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jvs.2010.05.138>
- Tremblay, E., Thérèse, E., Thomassin-Naggara, I., & Trop, I. (2012). Quality Initiatives: Guidelines for Use of Medical Imaging during Pregnancy and Lactation. 32(3), 897-911. doi:10.1148/rg.323115120
- Tuieng, R. J., Cartmell, S. H., Kirwan, C. C., & Sherratt, M. J. (2021). The Effects of Ionising and Non-Ionising Electromagnetic Radiation on Extracellular Matrix Proteins. 10(11), 3041.
- U.S.NRC. (2017). Backgrounder on Biological Effects of Radiation.
- Valentin, J. (2003). Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus): ICRP Publication 90 Approved by the Commission in October 2002. *Ann ICRP*, 33(1), 1-206. doi:[https://doi.org/10.1016/S0146-6453\(03\)00021-6](https://doi.org/10.1016/S0146-6453(03)00021-6)
- Van de Voorde, M. H. (1969). *Effects of radiation on materials and components: megarad dosimetry*. Retrieved from
- Wertelecki, W. (2010). Malformations in a chornobyl-impacted region. *Pediatrics*, 125(4), e836-843. doi:10.1542/peds.2009-2219
- Yamazaki, J. N., & Schull, W. J. (1990). Perinatal Loss and Neurological Abnormalities Among Children of the Atomic Bomb: Nagasaki and Hiroshima Revisited, 1949 to 1989. *JAMA*, 264(5), 605-609. doi:10.1001/jama.1990.03450050063029 %J JAMA

Radyoprotektif Bitkiler ve Radyasyondan Korunmadaki Potansiyel Uygulamaları *Ahmet Zafer TEL¹, Muhittin KULAK²*

GİRİŞ

Radyasyon, kozmik ışınlar gibi doğal kaynaklardan veya tıbbi görüntüleme prosedürleri ve nükleer kazalar gibi yapay kaynaklardan kaynaklanan, insan sağlığı ve çevre için önemli bir tehdittir. Tıbbi tanılar, çevresel faktörler ve hatta uzay keşifleri gibi nedenlerle radyasyon maruziyeti giderek artan bir sorun haline gelmiştir. Radyasyon, günümüzde sağlık, endüstri ve uzay araştırmaları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu artan maruziyet sağlık risklerini de beraberinde getirmiştir. Radyasyona maruz kalmanın olumsuz etkileri, hücre ölümünden kanser ve genetik mutasyonlara kadar çeşitli sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Teknolojik ilerlemeler çözümler sunarken, tabiat çok eski zamanlardan beri ilaçların kaynağı olmuştur. Çeşitli bitkiler arasında, belirli bitkiler radyasyon kaynaklı hasara karşı potansiyel koruyucular olarak ortaya çıkmıştır. Radyasyonun neden olduğu hasarı azaltmak için geleneksel olarak ilaçlar ve teknolojik yöntemler kullanılmış olsa da son yıllarda doğal çözümlere yönelik ilgi artmıştır.

Bitkilerin radyasyon koruyucu özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, bu doğal kaynakların potansiyelini ortaya koymaktadır. Son yıllarda, radyoprotektif ajanlar, sülfhidril bileşikler, DNA bağlayıcı ajanlar, sitokinler ve hormonlar çevredeki normal dokuya olan toksisiteyi azaltmak için kullanılmıştır. Ancak, çoğu radyoprotektif ajan halen hayvan deneyi aşamasındadır ve klinik uygulamalara ilerlemek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. İdeal radyoprotektif ajanlar, yapısal kararlılık, yüksek radyasyon koruması, düşük yan etkiler, uygulama yollarının kullanımı kolaylığı ve

¹ Prof. Dr. Ahmet Zafer TEL, Iğdır Üniversitesi, ZİRAAT FAKÜLTESİ,
azafer.tel@igdir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-1204-3839

² Doç. Dr. Muhittin KULAK, Iğdır Üniversitesi, IĞDIR TEKNİK BİLİMLER MESLEK YÜKSEKOKULU,
muhittin.kulak@igdir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-3673-9221

özellikle normal dokuları koruyan yüksek derecede seçici aktivite ile karakterize edilmektedir. Sentetik kimyasal bileşiklerin yüksek toksisitesi ve maliyeti göz önüne alındığında, doğal ürünlerin araştırılmasına olan ilgi artmıştır. Bitkilerden, mikroorganizmalardan ve deniz kaynaklarından elde edilen doğal ürünler uzun süredir tıbbi amaçlar için kullanılmaktadır ve daha az toksik ve daha ucuz radyoprotektif ajanlar olabilirler. Günümüzde doğal ürünlerin parkinson hastalığı, romatoid artrit, iltihabi hastalıklar ve kanser dahil olmak üzere çeşitli hastalıklarda etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bazı doğal ürünler antioksidan ve anti-enflamatuar aktiviteler ile DNA hasarının onarımını teşvik etme gibi farklı biyolojik aktiviteler sergilemiştir. Bu da onları radyoprotektif ajan olarak geliştirme için uygun hale getirmektedir (Zhang vd, 2023).

Radyasyon, biyolojik sistemlerle çoğunlukla iyonlaşma aracılığıyla etkileşime girmekte, hücrelerde ve dokularda bir dizi biyokimyasal ve fizyolojik yanıtı neden olmaktadır. Radyasyona maruz kalmanın zararlı etkileri çok yönlüdür. DNA hasarı, protein denatürasyonu, lipid peroksidasyonu ve hücresel işaret geçitlerinin bozulması gibi durumları içerir. Önemli olan, iyonlaştırıcı radyasyonun reaktif oksijen türleri (ROS) ve oksidatif stres üretmesidir. Bu da radyasyonla indüklenen hücresel yaralanma ve ölümden rol oynar (Pryor ve Stone, 2012). X ışınları, gama ışınları ve kozmik ışınlar gibi kaynaklardan yayılan iyonlaştırıcı radyasyon, hücrelerde reaktif oksijen türleri ve serbest radikallerin oluşmasına neden olarak canlı organizmalar için bir tehdit oluşturur (Kumar vd., 2013). Bu son derece reaktif moleküller DNA hasarına, oksidatif strese ve nihayetinde doku hasarına yol açabilir.

Belirli durumlarda bitki özlerinin oldukça yararlı ve etkili radyoprotektörler olduğu kanıtlanmıştır. Bu özler, çeşitli bitki gruplarında bulunmaktadır (Zhang vd. 2023). Radyasyonla oluşan hasarlara karşı bazı bitkilerin radyoprotektif özellikleri olduğu bilinmektedir. Bazı bitkilere, radyasyon dahil olmak üzere çeşitli çevresel streslere karşı dayanıklı savunma mekanizmaları geliştirme özelliği verilmiştir. Bitkilerde bulunan zengin çeşitlilikteki fitokimyasallar, oksidatif stres ve radyasyonla indüklenen DNA hasarına karşı etkili bir savunma oluşturur. C vitamini, E vitamini, flavonoidler, polifenoller ve karotenoidler gibi antioksidanlar, serbest radikalleri etkisiz hale getirir, reaktif oksijen türlerini nötralize eder ve hücresel büyük molekülleri oksidatif hasardan korur (Dai ve Mumper, 2010). Ayrıca, bazı bitkilerin belirli radyasyon türlerine karşı özel koruyucu etkileri olduğu gözlemlenmiştir (Lukaszewicz vd., 2019). Tabiat eczanesi, radyasyon kaynaklı zorluklar karşısında umut veren koruyucu ajanlarla doludur. Bu bitkilerin radyasyon

hasarını azaltmadaki etkinliği umut verici olsa da optimal dozajlar ve uygulama yöntemleri hakkında daha fazla araştırma gerekmektedir. Bu bitkisel hammaddeler radyasyona karşı savunmamızı entegre eder, insan sağlığını korumada bilim ve doğa arasındaki derin iş birliğini vurgular (Hosseinimehr, 2014). Narenciye bitkilerinin meyve ve yaprakları, radyoprotektif bileşiklerin zengin kaynaklarıdır. Yetiştirilen çoğu narenciye türünde bulunan ana flavonoidler, flavanon glikozitleri, radyasyon kaynaklı hasara karşı daha etkili olduklarını kanıtlamışlardır (Hosseinimehr vd. 2003; Kumud vd. 2014).

Bu doğal maddeler, bitkiler, mantarlar veya mikroorganizmalardan çeşitli kaynaklardan gelebilir ve genellikle polifenoller, polisakkaritler, alkaloidler ve saponinler gibi birkaç geniş kategoriye ayrılır. Polifenoller, yapılarında çoklu fenol ünitelerinin bulunmasıyla karakterize edilen geniş bir bileşik sınıftır (Islam vd., 2021; Begum vd., 2012). Doğal ürünlerden en çok çalışılan radyoprotektif bileşikler arasında apigenin, genistein, epigallokateşin gallat (EGCG), quercetin, resveratrol ve curcumin bulunmaktadır. Özellikle, maydanoz, kereviz ve papatya çayında bulunan apigenin'in antioksidan, anti-enflamatuar ve antikanserojenik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Soya ürünlerinde bol miktarda bulunan genistein'in, antioksidan aktivitesi ve sinyal iletim yollarını değiştirme yeteneği nedeniyle radyoprotektif etkileri için incelendiği bildirilmiştir. EGCG, yeşil çayın temel polifenolüdür ve radyasyona bağlı DNA hasarına karşı koruma sağladığı rapor edilmiştir (Imran vd. 2020; El-Missiry vd. 2018; Xie vd. 2020; Zhang vd. 2023).

Astragalus (geven) geleneksel bir tıbbi bitkidir ve polisakkaritleri bağışıklık sistemi aktivitesini artırır ve antioksidan özelliklere sahiptir. Bu da radyasyon kaynaklı hasara karşı koruma sağlar. Polisakkaritler, potansiyel radyoprotektif etki gösteren karmaşık karbonhidratlardır (Liu vd. 2014; Li vd. 2020).

Schisandra (manolya sarmaşıkları) polisakkaritlerinin antioksidan ve immünomodölatör aktiviteleri aracılığıyla radyoprotektif etkiler gösterdiği gösterilmiştir. *Hoehenbuehelia serotina* adlı bir mantar türü, potansiyel radyoprotektif aktivite gösteren polisakkaritler üretir. Saponinler doğada yaygın olarak bulunan bir kimyasal bileşik sınıfıdır. Bu sınıftan, ginseng ve *Acanthopanax senticosus* bitkilerinden gelen ginsenosidlerin potansiyel radyoprotektif etkilere sahip olduğu bilinmektedir. Ginsengin başlıca etkin bileşenleri olarak ginsenosidlerin radyoprotektif özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. *Acanthopanax senticosus*, diğer adıyla Sibiry ginsengi muhtemelen antioksidan, immünomodölatör ve antikanser etkileri olan radyoprotektif aktiviteye sahip saponinlerin bir başka kaynağıdır (Zhao vd. 2015; Pan vd. 2002; Zhang vd. 2023).

Alkaloidler, çoğunlukla bazik nitrojen atomları içeren doğal olarak bulunan kimyasal bileşikler olup potansiyel radyoprotektif etkilere sahiptir. Matrin, ligustrazin ve karbolin bunların örnekleridir. *Sophora flavescens* bitkisinden gelen bir alkaloid olan matrin, anti-enflamatuar ve antioksidan özellikleri nedeniyle radyoprotektif etkilere sahip olduğu gösterilmiştir. *Ligusticum wallichii* bitkisinden elde edilen bir alkaloid olan ligustrazinin, radyasyonla indüklenen akciğer hasarını hafiflettiği bulunmuştur. Birkaç tıbbi bitkide bulunan karbolin alkaloidleri, geniş bir farmakolojik aktivite yelpazesine sahip oldukları için radyoproteksiyon etkiye sahiptir (Zhang vd. 2023). Alkaloidler, nitrojen içeren, baz benzeri özelliklere sahip, kompleks halka yapılarına ve önemli biyolojik aktivitelere sahip organik bileşiklerdir. Bunlar antitümör, anti-enflamatuar, radyoprotektif etkilere sahiptir. *Sophora flavescens*'ten izole edilen bir alkaloid olan matrin, kanserli hastalarda bağışıklık fonksiyonunu düzenleyerek ve artırarak kemoterapi ve radyoterapinin yan etkilerini azalttığı ve kemoterapi ve radyoterapinin terapötik etkileri ile sinerjik etkiler oluşturduğu gösterilmiştir (Li vd. 2016; Zhang, vd. 2023).

Astragalus propinquus, çeşitli farmakolojik aktivitelere sahip olduğu için en popüler geleneksel tıbbi bitkilerden biridir. Bunlar arasında antitümör, antiviral, antibakteriyel ve bağışıklık sistemini destekleyici etkileri bulunur. *Astragalus* polisakkaritleri, *Astragalus propinquus* bitkisinden ekstraksiyon, ayırma ve saflaştırma yoluyla izole edilen polisakkaritlerdir. Liu vd. (2014)'e göre *Astragalus* polisakkaritlerinin 60Co- radyasyonuna karşı koruyucu etkilerini incelemişlerdir. *Astragalus* polisakkaritlerinin farelerde alanin transaminaz, aspartat transaminaz ve laktat dehidrogenaz seviyelerini önemli ölçüde azalttığı ve yüksek dozlarda iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklı karaciğer ve akciğer hasarını hafiflettiği gösterilmiştir. Başka bir çalışmada, *Astragalus* polisakkaritlerinin, birkaç yüz g/mL konsantrasyonlarında, insan keratinosit hücre hattını UVA kaynaklı hasardan koruduğu ve mitokondriyal membran potansiyelini azaltarak UVA kaynaklı hücrel ROS üretimini azalttığı bulunmuştur (Li vd. 2014; Zhang vd. 2023).

Zhao vd. (2015) *Schisandra* polisakkaridinin bağışıklık sistemi hasarını önleyebileceğini, immünoğlobülinleri koruyabileceğini ve lenfosit apoptozunu inhibe edebileceğini, böylece radyoterapinin neden olduğu yan etkileri azaltabileceğini bulmuştur. Bu da *Schisandra* polisakkaridinin potansiyel bir yeni radyoprotektif ajan olarak hizmet edebileceğini düşündürmüştür. Aloe vera'daki asetillenmiş mannan, bağışıklık sistemini düzenleyerek ve hematopoetik hücrelerin proliferasyonunu uyararak ışınlanmış fareleri korumuştur. Zhang vd. (2016) *Rheum tanguticum* polisakkaridinin (RTP), Nrf2 ve onun downstream protein HO-1'i

düzenleyerek apoptoz ve inflamatuvar faktörleri önemli ölçüde azaltabileceğini ve böylece ışınlanma nedeniyle bağırsak hasarını önemli ölçüde hafifletebileceğini bulmuştur (Zhang vd. 2023).

Wang vd. (2015) *Hohenbuehelia serotina* polisakkaritlerinin, endoplazmik retikulum apoptoz yolu aracılığıyla splenositlerde SOD ve CAT aktivitesini etkileyerek splenositlerdeki MDA içeriğini azaltarak radyoprotektif etkiler elde edebileceğini etkili bir şekilde artırabileceğini göstermiştir. Buna ilave olarak *Sambucus nigra* substrat polisakkaridi (SNAAP)'nin, 60Co ile ışınlanmış farelerde gluconeogenesis ve glikojen sentezini artırabileceğini ve karaciğerde stres-aktivasyonlu protein kinaz (JNK) yollarını, pankreasta pankreas duodenal homolog kutu faktör-1 (PDX-1) ve glukoz taşıyıcı protein-2 (GLUT-2)'yi düzenleyerek radyasyonla indüklenen glukoz metabolizma bozukluklarını geri kazandırabileceğini göstermiştir (Zhang vd. 2023).

Angelica sinensis polisakkaridi, timus ve dalak indekslerini artırarak ve periferik kanda kırmızı ve beyaz kan hücrelerinin sayısını artırarak radyoprotektif etkiler gösterdiği bulunmuştur. Yapılan çalışmalar, *Angelica sinensis* polisakkaridinin radyoprotektif mekanizmasının hücrelerin antioksidan kapasitesini artırma ve DNA hasarını azaltma ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Kahverengi alglerden elde edilen polisakkaritlerin radyoprotektif etkilere sahip olduğunu bulmuştur. Örneğin, fukoidan kahverengi alglerde bulunan sülfatlı bir polisakkarittir. Antioksidan ve antitümör aktivitelerinin yanı sıra, fukoidan doza bağlı olarak radyoprotektif etkiler gösterebilir. Mesona blume polisakkaridi, tahıl glukani, Heliantnus tuberosus polisakkaridi, Laminaria japonica polisakkaridi, Alga polisakkaridi, Haberlea rhodopensis polisakkaridi, mor tatlı patates polisakkaridi, soya fasulyesi unu polisakkaridi, pektin polisakkaridi, Panax ginseng polisakkaridi ve Tinospora cordifolia kök polisakkaridi gibi bitki polisakkaritlerinin radyoprotektif etkiler sergilediği belirlenmiştir (Zhang vd. 2023).

İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma, kök hücrelerin etkilenmesine neden olarak dokunun işlevselliğinin kaybına yol açarak, hücreler ile yakın çevreleri arasındaki iletişim yollarını engelleyebilir. Hematopoietik uyarıcı özelliklere sahip bileşikler, radyasyonun sonuçlarını hafifletmek için kök hücreler, kan hücreleri veya progenitör hücreler aracılığıyla etkili olmaktadır. Hematopoietik sistemin baskılanması ve hasarlanması, radyasyon etkilerinin en riskli sonuçlarından biridir. Radyasyona maruz kalmanın bir sonucu, sıkıntılı kan hücreleri oluşumu ve hücreler ile çevre dokuları arasındaki düzensiz sinyal iletim yolları olabilir. Radyoprotektif

fitokimyasallar, hematopoetik elemanların üretimini uyarmak suretiyle radyasyonun zararlı etkilerini azalttıkları ortaya konulmuştur (Raj Xavier, 2022).

Çeşitli bitkisel kaynaklı bileşikler, ön klinik çalışmalarda dikkate değer radyoprotektif özellikler göstermiştir. Örneğin, kuersetin, kaempferol ve rutin gibi flavonoidler, radyasyonla indüklenen oksidatif stresi ve inflamasyonu hafifleten güçlü antioksidan ve anti-inflamatuar etkilere sahiptir (Sharma vd. 2017). Yeşil çay, üzüm ve meyvelerde bulunan polifenoller, serbest radikalleri etkisiz hale getirerek, endojen antioksidan savunmalarını artırarak, stres yanıtı ve DNA onarımında rol alan hücresel işaret yollarını düzenleyerek radyoprotektif etkiler gösterir (Hosseinimehr, 2017).

Çeşitli hastalıkları tedavi etmek için geleneksel halkların eski zamanlardan beri bitkisel ilaçları kullandığı bilinmektedir. Araştırmacılar, özellikle tanenler, antosiyaninler, flavonoidler, lignin vb. yüksek miktarda polifenol içeren bitkilerin antioksidan aktiviteye ve radyoprotektif ile anti-kanser özelliklere sahip olduğunu bulmuşlardır (Shahidi ve Yeo, 2018; Benkovic vd. 2008; Dutta vd. 2021).

Radyoprotektörler, insanlarda radyasyonun neden olduğu hasarı hafifletmek amacıyla tasarlanmış ilaçlar veya kimyasallardır. Böylece onları X ışınları, gama ışınları, kozmik ışınlar vb. gibi zararlı iyonlaştırıcı radyasyonlardan veya Uranyum, Toryum, Stronsiyum-90, Radon, Radyum, Cezyum-137 gibi radyonüklidlerden korur. Bu nedenle, radyasyon onkologları ve biyologlar insanları bu tehlikeli ve yıkıcı iyonlaştırıcı radyasyonlardan korumak için farmakolojik olarak dinamik, zararsız, etkili, verimli ve kolay uygulanabilir radyoprotektörler formüle etmeli ve geliştirmelidir (Dutta vd. 2021).

Doğal olarak bulunan bitkiler geniş bir antioksidan yelpazesine sahiptir. Alfa karoten, askorbik asit, flavonlar, flavanonlar, flavanol, stilbenoidler, antosiyaninler, fenolik asitler vb. Bu bileşenlerin geniş bir radyasyon absorpsiyon özelliklerine sahip olduğu bildirilmiştir (Nichols ve Katiyar, 2010; Vaid ve Katiyar, 2010). Ayrıca, bu fitobileşenlerin sinerjik foto-koruyucu etkiye sahip olduğu ve cilt hücrelerini radyasyon ışığına maruz kalma sonucu oluşabilecek hasardan korumak için güneş kremi olarak kullanılabilceği gösterilmiştir (Afaq vd. 2003; Campos vd. 2006; Lachumy vd. 2013).

Flavonoid içeren bitki özlerinin ve ayrıca tek başına izole edilmiş flavonoidlerin radyoprotektif potansiyeline sahiptir. Flavonoidler, yüksek redoks potansiyellerinden dolayı güçlü bir antioksidan etkiye sahiptirler, bu da onlara hidrojen vericileri ve indirgeyici ajanlar olarak hareket etme, metal şelasyon potansiyeli ile tekli oksijenin gidericileri olma yeteneği sağlar (Rice-Evans, 1996).

Bitkilerde, flavonoidler, ultraviyole ışınların, patojenlerin ve oksidatif stres koşullarının zararlı etkilerine karşı koruyucu olan en yaygın fotokimyasaldır (Agati vd., 2010). Bazı flavonoidlerin radyoprotektif etkileri, güçlü antioksidan ve anti-enflamatuar etkilerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, flavonoidlerin radyoprotektif etkilerinin fenolik hidroksil gruplarının yapılarında bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Heim vd. 2002; Yahyapour vd. 2018).

Radyoprotektörlerin, antioksidan fonksiyonun yanı sıra radikal temizleme özelliklerine sahip olmaları gerektiği öne sürülmüştür. Ancak, tüm antioksidanların radyoproteksiyon sağlamadığı bilinmektedir. Radyoprotektörler, normal dokularda radyasyonun neden olduğu hasarı en aza indirir veya azaltır ve koruyucu etkinliği için radyasyon maruz kalımından önce veya o sırada bulunmalıdır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, aromatik bitkilerin radyoprotektif etkileri ve radyasyona bağlı oksidatif hasarın değiştirilmesinde kullanıma yeteneğinin önemini ve yararını göstermiştir (Samarth vd. 2017).

Bitki temelli radyoproteksiyon stratejileri, bitkilerden elde edilen bileşiklerin tüketimi veya uygulanması yoluyla radyasyon hasarını azaltmayı içerir. Bitki açısından zengin beslenme, bitki kaynaklı antioksidanlarla desteklenmiş diyet takviyeleri ve bitki özlerini içeren topikal uygulamalar, radyasyon maruziyetindeki kişilerin dayanıklılığını artırmak için etkilidir. Ayrıca, bitkilerin, radyoaktif kirlenmeleri toksik olmayan hale getirmek, arazi ve suyu temizlemek için kullanılması olan fitoremediasyon, çevresel radyoproteksiyona önemli katkılar sağlar (Hassan vd. 2019).

Bitkilerin radyasyon koruyucu özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, doğal kaynakların potansiyelini ortaya koymaktadır. Ancak, bu alanda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır ve bitkilerin radyasyona karşı koruyucu etkilerinin tam olarak anlaşılması için daha fazla klinik çalışma gerekmektedir. Gelecekteki araştırmaların bitkilerin radyasyon koruyucu mekanizmalarını ve kullanımlarını daha iyi anlamamıza yardımcı olması beklenmektedir.

5.1. Radyoprotektif özellik gösteren bitkiler

5.1.1. *Aloe vera* (L.) *Burnm.f.* - (Sarısabır otu)

Liliaceae familyasına aittir. Yatıştırıcı özellikleriyle tanınan *Aloe vera*, radyasyon kaynaklı cilt hasarını hafifletme potansiyeline sahiptir. C ve E vitaminleri de dahil olmak üzere antioksidanlarla zengin bir bileşime sahip olması, oksidatif stres karşısında koruyucu etkiler sunar. *Aloe vera*, özellikle radyasyona maruz kalan cilt üzerindeki etkileriyle dikkat çeker. Antioksidan

özellikleri sayesinde *Aloe vera* cildi serbest radikallere karşı koruyabilir ve radyasyon kaynaklı iltihabı azaltabilir (Heggie vd. 2002). *Aloe vera*, tıbbi özellikleri nedeniyle son on yıllarda giderek popüler hale gelmiştir. *Aloe vera*, birçok vitamin, mineral, antioksidan ve anti-enflamatuar yağ asidi içerir. Klinik denemelerin sistemik bir incelemesi, *Aloe vera* tedavisinin çeşitli organlardaki radyasyon toksisitesini bastırdığını göstermiştir. Ancak, bağırsağa olan faydalı etkilerine ilişkin literatür sınırlıdır. Akut radyasyon proktiti olan hastalarda yapılan bir randomize klinik çalışma, *Aloe vera*'nın anti-enflamatuar özelliklerine ilişkin daha fazla kanıt sağlamıştır (Pathak vd. 2019).

5.1.2. *Ginkgo biloba* L. – (Mabet ağacı)

Milyonlarca yıllık bir geçmişe sahip olan *Ginkgo biloba* bitkisi'nin yaprağı uzun süredir geleneksel tıpta kullanılmaktadır. Son araştırmalar, *Ginkgo*'nun radyasyona karşı koruyucu etkilerini göstermektedir. *Ginkgo biloba* Ginkgoaceae ailesinden olup şu anda nesli tehlike altındadır. Bu bitkide bulunan ikincil metabolitler başlıca kuersetin, kemferol, mirisetin gibi flavonoid glikozitleri, ginkgolidler, terpen trilaktonlar, ginkgo biflavonlardır (Dutta vd. 2021). Flavonoidler ve terpenoidler de dahil olmak üzere antioksidan açısından zengindir. Araştırmalar, bu biyoaktif bileşiklerin serbest radikalleri temizleyerek ve DNA onarım mekanizmalarını artırarak radyasyon koruması sağladığını öne sürmektedir. Özellikle, *Ginkgo biloba*'nın antioksidan bileşikler içerdiği ve DNA hasarını azaltabileceği bulunmuştur (Singh vd. 2005). *Ginkgo biloba*'nın kurutulmuş yaprağından %30'luk etanolik bir ekstrakt, 100 µg/mL konsantrasyonda test edildiğinde, klastojenik faktörlere maruz kalan bir kültürde etkili bulunmuştur (Emerit vd. 1995a,b; Kumud vd. 2014). Khedr vd. (2018), *G. biloba* bitkisinin ekstrelerinin Wistar sıçanlarının organlarında radyoaktif 99m-teknetyum sestamibi nedeni oksidatif hasarı hafifletmedeki serbest radikal süpürücü potansiyeli yoluyla radyoprotektif etkililiğini rapor etmişlerdir (Dutta vd. 2021). *Ginkgo biloba* endojen antioksidanları, glutasyonu uyarıcı ve oksidatif stresi azaltıcı olduğu bildirilmiştir (Rong vd. 1996a,b; Arora vd. 2005). *Ginkgo biloba*, güçlü antioksidan özellikleri nedeniyle bazı klinik kullanımlar için önerilen en eski bitki türlerinden biridir. *Ginkgo biloba* özütleri, demans ve Alzheimer gibi bazı zihinsel bozuklukların iyileştirilmesi için önerilmiştir (Cieza vd. 2003; Liu vd. 2015). Shin vd. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada *Ginkgo biloba*'nın insan ve fare lenfositlerinde radyoprotektif etkisi tespit edilmiştir. Farelere 4.5 Gy gama ışını ile radyasyon verilmeden

önce 500 µg/kg dozunda *Ginkgo biloba* ile tedavi uygulanmıştır. Ayrıca, insan lenfositlerine 1 ila 500 µg/kg dozlarda 2 haftalık bir tedavi sonrasında da radyoprotektif etkisi gözlemlenmiştir (Yahyapour vd. 2018).

5.1.3. *Spirulina platensis*

Alkali göllerde ve göletlerde yetişen bir mavi-yeşil alg olan *Spirulina*, fitosiyanın ve beta-karoten gibi antioksidanlarla doludur. Çalışmalar, bu algın antioksidan savunmaları güçlendirdiği ve bağışıklık yanıtlarını düzenleyerek radyasyon kaynaklı hasarı azaltma potansiyeline sahip olduğunu öne sürmektedir (Dasgupta vd. 2001; Paull vd. 2011).

5.1.4. *Curcuma longa* L. - (Zerdeçal)

Çok yönlü iyileştirici özellikleriyle geleneksel tıpta saygı gören zerdeçal, ana biyoaktif bileşeni olan curcumin'e radyasyon koruma yeteneğini borçludur. Zingiberaceae ailesine ait *Curcuma longa* Asya'nın tropikal bölgelerinde yetiştirilen bir bitkidir. Turmerik olarak da bilinen bitki, gıdalar için renklendirici ve lezzet verici madde olarak kullanılır. Ayrıca aromatik, bazı uyarıcı ve karminatif özelliklere sahiptir. Turmeric ile söndürülmüş kireç karışımı, yaralanma kaynaklı burkulmalar ve şişliklere karşı geleneksel bir tedavi olarak kullanılmaktadır (Samarth vd. 2017). Çeşitli çalışmalar, curcuminin radyasyona maruz kalan hücrelerde DNA hasarını azaltabileceğini, radyasyon kaynaklı oksidatif stres ve iltihaplanma karşı koruyucu etkiler sağladığını göstermektedir (Gupta vd. 2011). Hücreleri radyasyonun neden olduğu glutatyon peroksidaz, kat) - (Kutsal fesleğen)

Bitkinin tıbbi değeri çeşitli eski Hint metinlerinde iyi belgelenmiş olup, bu bitkinin neredeyse her kısmı geleneksel, ayurvedik tıp sistemlerinde insan hastalıklarının tedavisi için kullanılmaktadır. Özellikle enfeksiyonlar, cilt hastalıkları, karaciğer bozuklukları, soğuk algınlığı ve öksürük, sıtma ateşi ve yılan ve zehirli böcekler tarafından yapılan ısırıklara karşı panzehir olarak kullanılmaktadır (Satyavati vd. 1987; Arora vd. 2005). *Ocimum sanctum* L., Lamiaceae familyasına ait olan ve kutsal fesleğen, tulsı veya tulasi olarak bilinen bitkidir. Bu aromatik, küçük bir yıllık ot, 50 cm'ye kadar uzayabilir. Kutsal fesleğen flavonoidler, alkaloidler, sabunlar, fenoller, antosiyanınler, triterpenoidler ve taninler içerir (Samarth vd. 2017). Elde edilen veriler, bu bitkinin radyasyon kaynaklı DNA hasarını azaltma ve hücresel onarım mekanizmalarını güçlendirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Geleneksel Hint tıbbında önemli bir yere sahiptir. Ayrıca, kutsal fesleğenin antioksidan ve anti-inflamatuar özellikleri sayesinde radyasyona karşı koruyucu etkiler sağlayabileceğini göstermektedir (Baliga vd. 2013). Hint kutsal fesleğen *Ocimum sanctum* yapraklarından izole edilen Orientin (Ot) ve Vicenin (Vc) adlı suda çözünür flavonoidlerin, in vivo şartlarda radyasyonun ölümcüllüğüne ve kromozomal anormalliklere karşı önemli bir koruma sağladığı gösterilmiştir (Vrinda vd. 2001; Kumud vd. 2014). Bu bitkiden izole edilen vicenin ve orientin gibi flavonoidler, insan periferik hücrelerinin kültürlendiği zaman 2 Gy gama ışınlarına maruz bırakıldığında radyasyonla indüklenen kromozomal hasarlara karşı koruma sağladığı rapor edilmiştir (Vrinda ve Devi, 2001; Dutta vd. 2021; Raj Xavier, 2022).

5.1.5. *Chlorella vulgaris*

Bu yeşil alg türü, klorofil, vitaminler ve mineraller açısından zengindir. Bazı çalışmalar, vücudun bağışıklık yanıtını artırarak radyasyona bağlı hasara karşı koruma sağlayabileceğini öne sürmektedir (Kumar vd. 2013).

5.1.6. *Silybum marianum* (L.) Gaertn. - (Meryemana diken)

Meryemana Dikeni içinde silymarin adlı bir kompleksi içerir. Silymarin, karaciğer hücrelerini radyasyon hasarından koruyabilen antioksidan özelliklere sahiptir (Shaban vd. 2020).

5.1.7. *Thymus vulgaris* L. - (Kekik)

Yüksek antioksidan içeriği ile bilinen kekik, bazı çalışmalarda radyasyon kaynaklı oksidatif stresi azaltmada umut vaat ettiği raporlanmıştır (Al-Waili vd. 2013).

5.1.8. *Allium sativum* L. - (Sarımsak)

Allium sativum L. *Allium* cinsine aittir. Liliaceae familyasına bağlı olup *Allium* cinsinin yaklaşık 780 türü bulunmaktadır. Bugün birçok ülkede yetiştirilmekte olup önde gelen üreticiler Hindistan, Çin ve Kore'dir. *Allium sativum* L. karakteristik bir tat veren γ -glutamil sistein ve diğer kükürt içeren bileşikler açısından zengindir. Bununla birlikte, sarımsağın ek bileşenleri arasında steroid glikozitler, uçucu yağ, flavonoidler, antosiyaninler, lektinler, prostaglandinler, fruktan, pektin, adenosin, B1, B2, B6, C ve E vitaminleri, biyotin, nikotinik asit, yağ asitleri, glikolipidler ve fosfolipidler bulunmaktadır (Samarth vd. 2017).

Kükürt bileşikleri ve antioksidanlar bakımından zengin olan sarımsak, radyasyona maruz kalan hücrelerde DNA hasarını azaltmaya yönelik araştırmalara konu olmuştur (Hosseinimehr, 2014).

5.1.9. *Camellia sinensis* (L.) Kuntze - (Yeşil çay)

Yeşil çayda bulunan polifenoller, epigallokateşin gallat (EGCG) gibi maddelerin radyasyon koruyucu etkileri üzerine çalışılmıştır; bunlar oksidatif stresi ve iltihabı azalttığı belirlenmiştir (Singh vd. 2009; Paull vd. 2011).

5.1.10. *Ageratum conyzoides* L. - (Vapur dumanı)

Ageratum bitkisi Asteraceae familyasına ait bir bitkidir. Bu, Afrika, Asya, Amerika ve Avustralya'da yaygın olarak bulunan, dik, yıllık ve 1 m yüksekliğe kadar büyüyen aromatik bir ottur. *Ageratum*'un farmakolojik olarak değerlendirilen birkaç türü bulunmaktadır. Bu bitki, yanıkların, yaraların, cilt hastalıklarının ve çeşitli enfeksiyonların tedavisinde kullanılmak üzere antik çağlardan beri bilinen iyileştirici etkisiyle tanınmaktadır. *Ageratum conyzoides*, flavonoidler bakımından zengindir. *A. conyzoides* özütünün radyoprotektif etkileri farelerde incelenmiştir. 6 ila 11 Gy arasındaki radyasyon dozlarına karşı farelerde gastrointestinal ve kemik iliği ile ilişkili ölümlerde azalmaya neden olmuştur. In vitro çalışmalar, *A. conyzoides* özütünün, radyoproteksiyonun serbest radikal temizleme mekanizmasını öneren DPPH radikallerini temizlemede de etkili olduğunu göstermiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.11. *Allium cepa* L. - (Soğan)

Dünya genelinde yaygın olarak bulunan *Allium cepa*, Liliaceae familyasına aittir ve soğan bitkisidir. Hindistan, Çin ve ABD, bu bitkinin önde gelen üreticileridir. Geleneksel olarak, mide ağrısı, boğaz enfeksiyonu ve hepatit tedavisinde kullanılmaktadır ve antioksidan, antihiperglisemik, antihipertansif ve anti-astım gibi özelliklere sahiptir (Samarth vd. 2017). *Allium cepa* L. soğan olarak bilinir ve toksikolojik deneyler sırasında sitolojik çalışmalar için bitki modeli olarak kabul edilir. *A. cepa* yüksek polifenol içeriğine sahiptir, sarı soğanlar ve kırmızı soğanlar sırasıyla yüksek miktarda flavonoid ve antosiyanin içerir. Kurutulmuş soğanın 20 mg/kg konsantrasyonunun mükemmel bir radyoprotektör olduğu bildirilmiştir (Arora vd. 2005; Dutta vd. 2021). Soğan ekstraktının radyasyon koruma ve antioksidatif etkileri beyaz sıçanlarda incelenmiştir. Karaciğer, böbrek ve kalp gibi biyokimyasal parametreler

değerlendirilmiş ve soğan ekstresinin önemli bir radyoprotektif etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Samarth vd. 2017). Ammar (2016), albino farelerde soğanın radyoprotektif aktivitesini incelemiş, antioksidanlar bakımından zengin olması radyasyon sırasında oluşan serbest radikalleri temizleme etkisi göstermiştir. Böylece hücreleri moleküler düzeyde hasardan korumuştur (Dutta vd. 2021).

5.1.12. *Centella asiatica* L. - (Kaplanotu)

Centella asiatica, Apiaceae familyasına aittir. Asiaticosid, sentellosid, madecossosid, thankunisid, isothankunik asit, sentellos, asiatic, centellik asitler gibi triterpenoidler içerir. Diğer bileşenler arasında brahmoside, brahminoside ve brahmic asit bulunur. *C. asiatica*'nın radyasyona karşı koruma sağladığı bildirilmiştir (Samarth vd. 2017). Joy ve Nair (2009), bitki ekstraktlarının fare kemik iliği hücrelerindeki radyoprotektif potansiyeli nedeniyle in vitro ve in vivo deneylerle değerlendirmiştir. Ayrıca, bitki ekstraktının radyasyona bağlı membran hasarına karşı koruma sağlama potansiyeline odaklanarak, lipid peroksidasyonunun derecesini tiyobarbitürik asit reaktif maddeler (TBARS) yöntemiyle değerlendirmişlerdir (Dutta vd. 2021). *C. asiatica*'nın nöromodülatör etkisi hakkında birçok rapor bulunmasına rağmen, radyasyonun neden olduğu davranışsal değişiklikler ve performans eksikliklerine karşı koruyucu etkileri belgelenmiştir (Goel vd. 2000; Shobi ve Goel, 2001). Davranışsal radyoproteksiyonla ilgili çalışmalar, radyasyonun koşullandırılmış tat aversionu (CTA), performans azalması ve öğrenme gibi ciddi davranışsal bozukluklara neden olduğu bilindiğinden önemlidir. *C. asiatica*, Sprague Dawley sıçanlarını düşük doz iyonlaştırıcı radyasyonun (2 Gy) olumsuz etkilerine karşı korumak için kullanıldığında, radyasyonun neden olduğu vücut ağırlığı kaybı ve koşullandırılmış tat aversionu karşısında önemli koruma sağladığı ortaya konulmuştur (Shobi ve Goel, 2001; Arora vd. 2005).

5.1.13. *Citrus aurantium* L. - (Turunç)

Citrus aurantium, Rutaceae ailesine aittir. *C. aurantium* L. var. *amara*'nın uçucu yağı, anti-anksiyete ve kas gevşetici etkilere sahiptir. Yetiştirilen narenciye türlerinde bulunan ana flavonoidler, flavanone glikozitler, hesperidin ve naringindir. Güçlü bir antioksidan aktivite sergiler. Narenciye özütü, fare kemik iliğinde 1.5 Gy γ -ışınlamasına karşı farklı dozlarda (250, 500 ve 1000 mg/kg)

radyoprotektif etkiler göstermiştir. Radyoprotektif aktivite, narenciye özütünde bulunan flavonoidlerden kaynaklandığı belirlenmiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.14. *Coleus aromaticus* Benth. - (Küba kekiği)

Coleus aromaticus, Lamiaceae ailesine aittir ve Hindistan ve Akdeniz'e özgü çeşitli tıbbi değerlere sahiptir. *C. aromaticus* yapraklarının kimyasal bileşenlerine ilişkin rapor, karvakrol, timol, öjenol, şavkol, etil salisilat, klorofilin, flavonoidler (cirsimaritin) ve β -sitosterol- β -D-glukozit'in varlığını göstermiştir. *C. aromaticus* ekstresinin in vitro ve in vivo olarak radyoprotektif potansiyeli değerlendirilmiş ve antioksidan, antiklastojenik ve radyoprotektif özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.15. *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. - (Limonotu)

Poaceae ailesine ait olan limon otu olarak da bilinen *Cymbopogon citratus* güneydoğu Asya ve Afrika gibi tropikal ülkelerde yaygın olarak kullanılan bir bitkidir. Bitkinin uçucu yağı, aromaterapide ve bitkisel içeceklerde tatlandırıcı olarak kullanılır. *C. citratus*'un esansiyel yağının kimyasal bileşimi, hidrokarbon terpenler, alkoller, ketonlar, esterler ve aldehitler gibi bileşiklerden oluşur. Esansiyel yağın ana bileşeni, iki stereoisomerik monoterpen aldehit olan trans-izomer geranial ve cis-izomer neral karışımı olan sitraldir. *C. citratus*'un sulu ekstraktının antioksidan ve radyoprotektif özellikler sergilediği gösterilmiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.16. *Elettaria cordamomum* (L.) Maton - (Kakule)

Zingiberaceae ailesine ait olan *Elettaria cordamomum*, genellikle kakule olarak bilinir ve hafif yeşil kapsüllere sahiptir. Aromatik kurutulmuş meyveleri genellikle yiyecek hazırlığında ve sağlık yararları için kullanılır. Kakule yağı, soğutucu etkileri nedeniyle kozmetik değere sahiptir ve antioksidan aktiviteye sahiptir. Uçucu yağ, yaklaşık %1.5 α -pinen, %0.2 β -pinen, %2.8 sabinen, %1.6 mircen, %0.2 α -fellandren, %11.6 limonen, %1.8-sineol, %0.7 γ -terpinen, %0.5 terpinolen, %3 linalool, %2.5 linalil asetat, %0.9 terpinen 4-ol, %2.6 α -terpineol, %31.3 α -terpinil asetat, %0.3 sitronellol, %0.5 nerol, %0.5 geraniol, %0.2 metil eugenol ve %2.7 trans-nerolidol içerir. Kakule, farelerde γ -ışınlamaya karşı radyoprotektif etkiler açısından değerlendirilmiş ve karaciğer ve kalp dokularında radyasyon tarafından indüklenen oksidatif hasara karşı koruma sağladığı belirlenmiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.17. *Lavandula angustifolia* Mill. – (Lavanta)

Lavandula angustifolia, Lamiaceae familyasına aittir. Lavandula cinsi, aromaterapide önemli uygulamalara sahip olan yaklaşık 35 türü içerir. Yağların % 98.4–99.7'sini temsil eden toplam 47 bileşik tanımlanmıştır. 1,5-dimetil-1-vinil-4-heksenil butirat, esansiyel yağın başlıca bileşeni olup (% 43.73), ardından 1,3,7-oktatrien, 3,7-dimetil- (% 25.10), öyküptol (% 7.32) ve kamfor (% 3.79) gelir. *L. angustifolia* yağı, UV radyasyonu ve γ -ışınlamasına karşı radyoprotektif aktivitesi için değerlendirilmiştir. EPR spektroskopisi ve UV ve γ -ışınılı yağ örnekleri mükemmel DPPH radikal temizleme aktivitesi göstermiştir. Uygun UV veya γ -ışınlama işleminden sonra, lavanta yağının kozmetik ve ilaç endüstrisinde olası uygulamalar için bir radyoprotektör ve antioksidan olarak kullanılabilceği öne sürülmüştür (Samarth vd. 2017).

5.1.18. *Mangifera indica* L. (Mango, Hint kirazı)

Mangifera indica, Anacardiaceae ailesine aittir ve Hintçe'de mango olarak adlandırılır. Ayurveda'da tıbbi olarak önemlidir. Güçlü antioksidan, anti-lipit peroksidasyon, immünomodülasyon, kardiyotonik, hipotansif, yara iyileştirici, antidejeneratif ve antidiyabetik aktivitelere sahiptir. Kimyasal içerikler mangiferin, bir polifenolik antioksidan ve bir glukozil xanton içerir. *M. indica* özütü insan lenfositlerinde ve lenfoblastoid hücrelerde radyoproteksiyon için değerlendirilmiştir. *M. indica* özütünün düşük dozlarında radyasyon tarafından indüklenen DNA hasarına karşı koruma sağladığı rapor edilmiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.19. *Bergera koenigii* L. (Syn: *Murraya koenigii*) – (Köri)

Murraya koenigii, Rutaceae ailesine mensup olup, Hintçe'de Meethi neem veya curry yaprağı olarak bilinir ve Güney Asya'ya özgüdür. Bu aromatik bitki, 6 metreye kadar yüksekliğe ulaşabilen, Hint alt kıtası boyunca geniş bir şekilde dağılmıştır. Özellikle aromatik yaprakları için değerlidir. Bu yapraklar sadece aromatik değil, aynı zamanda proteinler, karbonhidratlar, lifler, mineraller, karoten, nikotinik asit ve C vitamini bakımından zengindir. Ayrıca oksalik asit, kristalin glikozidler, karbazol alkaloidleri (koenigin ve reçine gibi) içerirler. Taze yapraklar, A vitamini ve kalsiyum bakımından zengin olan sarı uçucu bir yağa sahiptir ve ayrıca girinimbin, izomahanimbin, koenin, koenigin, koenidin ve koenimbin gibi bileşikler içerir. Yapraklarda ayrıca siklomahanimbin ve tetrahidromahanimbin gibi triterpenoid alkaloidler ile murrayastin, murrayalin

ve pypayafolin karbazon gibi alkaloidler bulunur. Çalışmalarda, farelerin karaciğerinde *M. koenigii* yaprak özütünün γ -ışınlamasına karşı radyoprotektif etkilerini değerlendirilmiş ve özütün antioksidan özelliklerini ve radyoproteksiyon için potansiyeli olduğunu göstermiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.20. *Myristica fragrans* Houtt. – (Küçük Hindistan cevizi, Murkat)

Myristica fragrans, Myristicaceae ailesine mensup olan ve antifungal, hepatoprotektif ve antioksidan özellikleri ile tanınan bir bitkidir. Kimyasal bileşenleri arasında mürisitin, lignan ve eugenol bulunur. Hindistan cevizi yağının esansiyel yağı, başlıca sabinen, α -pinen, β -pinen, mirsen, 1,8-sineol, mürisitin, limonen, safrol ve terpinen4-ol içerir. Çalışmalar, *M. fragrans* tohum özütünün radyasyonla indüklenen biyokimyasal değişikliklere karşı önemli ölçüde radyoproteksiyon sağladığını, hayatta kalma oranlarını arttırdığını ve radyoprotektör olarak potansiyeli olduğunu göstermiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.21. *Nigella sativa* L. – (Çörek otu)

Nigella sativa, Ranunculaceae ailesine mensup olan ve siyah çekirdek olarak da bilinen geniş bir tıbbi bitkidir. Tohumları ve yağları, thymoquinon, thymohidroquinon, dithymoquinon, p-cymen, karvakrol, 4-terpineol, t-anetol, seskiterpen longifolen, α -pinene ve thymol gibi önemli aktif bileşikler içerir. Ayrıca alkaloidler, isoquinoline ve pirazol halkalı alkaloidler, suda çözünen pentasiklik triterpen α -hederin ve saponin içerir. *N. sativa*, özütü ve yağının farelerde ve sıçanlarda radyoprotektif özellikleri araştırılmıştır. Işınlamadan önce *N. sativa* yağının oral uygulaması, kan malondialdehit, nitrat ve nitrit düzeylerinde önemli artışa yol açtığı, ayrıca antioksidan enzim seviyelerini arttırarak radyoprotektör potansiyelini göstermiştir (Samarth vd. 2017). *Nigella sativa*'dan gelen timokinon, *Fragaria vesca* ve *Rubus plicatus* yaprakları ve *Sanguisorba officinalis*, *Erigeron canadensis* çiçeklerinden gelen polifenolik glikokonjugatlar gibi antioksidanlar, radyoprotektif özelliklere katkıda bulunmuştur. Siyah çörek otu (*Nigella sativa*) yağı, thymoquinone bakımından zengindir ve tüm vücut gamma ışınlaması sonrası sıçanlarda hematopoetik elemanların sayısını arttırmıştır (Raj Xavier, 2022).

5.1.22. *Origanum vulgare* L. – (Keklik otu)

Origanum vulgare, labiatae familyasına aittir ve genellikle Avrupa ve İran'da yabani olarak bulunur. Romatizma, kas ve eklem ağrıları, yaralar ve şişliklerin

tedavisinde dış uygulama olarak ve dış ağrısını hafifletmek için kullanılır. Kekikte bulunan antioksidanlar arasında rozmarinik asit, kafeik asit, flavonoidler ve fenolik asitlerin türevleri ve α - tokoferol bulunur. Ayrıca, rosmarinik asit metil ester, kekik-A ve kekik-B antioksidan olarak etki eder. Kekik ekstraktının radyoprotektif etkisi, insan lenfositlerinde ve fare kemik iliğinde iç ve dış ışınlanma ile indüklenen genotoksisite açısından incelenmiştir. Kekik ekstraktı tedavisi, insan lenfositlerinde ve fare kemik iliğinde mikronukleus sıklıklarında önemli ölçüde azalmaya yol açmıştır. Kekik ekstraktının DPPH deneyi ile radikal süpürme aktivitesi incelenmiş ve doza bağlı olarak DPPH serbest radikalinin süpürülmesinde etkili olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, radyoproteksiyon için serbest radikal süpürmenin muhtemel bir mekanizma olduğu düşünülmektedir (Samarth vd. 2017).

5.1.23. *Piper longum* L. – (Uzun biber)

Piper longum, piperaceae familyasına aittir ve Hindistan'da Pipali olarak bilinir. Geleneksel olarak Asya ve Pasifik Adaları'nda gonore, adet ağrısı, tüberküloz, artrit gibi hastalıkların tedavisinde kullanılır ve aynı zamanda ağrı kesici, idrar söktürücü ve kas gevşetici olarak da kullanılmaktadır. Kimyasal çalışmalar, *Piper* cinsinin birçok bileşeni içerdiğini göstermiştir. Bunlar arasında doymamış amidler, flavonoidler, lignanlar, aristolactamlar, uzun ve kısa zincir esterler, terpenler, steroidler, propenilfenoller ve alkaloidler bulunur. Ekstrakt tedavisi farelerde radyasyonla indüklenen artmış glutatyon pirüvat transaminaz, alkalen fosfataz ve lipid peroksidasyon seviyelerinin azalmasında etkili olduğu ve böylece fareleri radyasyonla indüklenen hasara karşı koruduğu belirlenmiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.24. *Plumbago indica* L. – (Mavi yasemin)

Plumbago rosea L., Plumbaginaceae familyasına aittir. Hindistan'da bol miktarda doğal olarak yetişir. Bu bitki, iltihap, cilt hastalıkları, mide rahatsızlıkları ve karın ağrısı gibi hastalıkların tedavisinde çeşitli şekillerde kullanılır. Plumbagin, naftokinon, yağ alkoller, taninler ve sitosterol glikozidleri gibi aktif içeriklere sahiptir. *P. rosea* köklerinde birçok naftokinonit ve türevleri ile flavonoidler bulunduğu rapor edilmiştir. Kimyasal bileşenler arasında petrol ekstresinden plumbagin, palmitik asit ve mirisil palmitat, köklerin etil asetat ekstresinden plumbagik asit lakton, ayanin ve azaleatin bulunur. *P. rosea*

ekstresinin radyosenzitizasyon etkileri olduğu ve radyasyonla birleştirildiğinde tümör öldürme etkisini artırdığı bildirilmiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.25. *Rosmarinus officinalis* L. - (Biberiye)

Rosmarinus officinalis L., Lamiaceae familyasına aittir. Akdeniz deniz kıyıları ve Hindistan Himalayaları boyunca yaygın olarak bulunan aromatik ve tıbbi bir bitkidir. Biberiye yapraklarının önemli antioksidan özelliklere sahip olduğu ve gıda endüstrisinde geniş çapta kullanıldığı bildirilmiştir. Rosmarinus yaprakları, karnozik asit, karnosol, rosmarinik asit, rosmanol, isorosmanol ve epirosmanol gibi antioksidanlar içerir. R. officinalis yaprağı ekstresi, farelerin karaciğerini radyasyonun neden olduğu histopatolojik değişikliklere karşı koruma yeteneği açısından değerlendirilmiş ve ekstrakt tedavisinin, farelerde lipid peroksidasyonunun önemli ölçüde azalmasını ve GSH içeriğinin artmasını sağlamıştır (Samarth vd. 2017). Günümüz çalışmaları, Rosemarinus officinalis yaprak özütünün iyi bir radyoprotektör olduğunu göstermektedir (Kumud vd. 2014).

5.1.26. *Mentha x piperita* L. - (Nane)

Mentha piperita L. (Lamiaceae), çeşitli tıbbi özelliklere sahip aromatik bir bitkidir. Uyarıcı ve karminatif özellikleri bin yıldan fazla süredir bulantı, gaz ve kusmayı hafifletmek için kullanılmaktadır. Antioksidan ve antiperozidant özellikler, kafeik asit, öjenol, rozmarinik asit ve α -tokoferolün varlığına atfedilmiştir (Rastogi ve Mehrotra, 1991). Mentha ekstresi ve nane yağının antibakteriyel ve antifungal aktivitelere sahip olduğu gösterilmiştir. Mentha'nın antimutajenik özellikleri (DNA hasarının hatasız onarımını artırma yeteneği) de bildirilmiştir (Arora vd. 2005). *Mentha piperita* L. yaprak özütünün, albino farelerin testislerinde radyasyona bağlı hasara karşı koruyucu etkileri incelenmiştir. Mevcut çalışma, *M. piperita* L.'nin önemli bir radyoprotektif etkiye sahip olduğunu gösterdiği kanıtlanmıştır (Jagetia vd. 2002; Samarth vd. 2003; Paull vd. 2011). Nane, radyasyona maruz kalmış farelerin kemik iliği hücrelerini oksidatif hasardan ve radyasyonun neden olduğu DNA hasarından korumuştur (Baliga vd. 2010; Samarth ve Kumar, 2003; Kumud vd. 2014).

5.1.27. *Salvia officinalis* L. – (Tıbbi Adaçayı)

Salvia officinalis L., Lamiaceae familyasına aittir ve birçok ülkede yetişmektedir. İçermiş olduğu uçucu ve esansiyel yağlar nedeniyle tedavi edici

ve evsel öneme sahiptir. *S. officinalis* özütleri, antimikrobiyal, antikanser, antioksidan, anti-enflamatuar ve radyoprotektif özellikler gösterir. Bu etkiler, aromatik halkalar içeren aktif polifenolik bileşiklerin varlığına bağlanabilir (Samarth vd. 2017).

5.1.28. *Syzygium aromaticum* (L.) Merr. & L.M. Perry - (Karanfil)

Syzygium aromaticum, Myrtaceae familyasına aittir ve karanfil yağı kaynağıdır. Kurutulmuş çiçek tomurcuklarından, yapraklardan ve ağacın sapından elde edilen esansiyel yağlar, farmasötik endüstrisinde, koku ve gıda endüstrisinde geniş uygulamalara sahiptir. Esansiyel yağın başlıca bileşenleri arasında karvakrol, timol, eugenol ve sinamaldehit gibi fenilpropanoidler bulunur. Karanfil yağının radyoprotektif etkisi, belirli biyokimyasal parametrelerde farelerde incelenmiştir. Karanfil yağının lipid peroksidasyonunu azaltma, güçlü indirgeme özelliğe ve süperoksit radikal süpürme aktivitesine sahip olduğu gösterilmiştir (Paull vd. 2011; Samarth vd. 2017).

5.1.29. *Panax ginseng* CA Meyer – (Çin Ginsengi)

Ginseng, özellikle çeşitli hastalıkların tedavisi için geleneksel doğu tıbbında en yaygın olarak kullanılan tıbbi bitkilerden biridir. Bitki, adaptogenik, anti-stres, antitümör, antioksidan, yaşlanma karşıtı, antifungal ve yenileyici özellikleri için detaylı bir şekilde araştırılmıştır (Keum vd. 2000). Ginseng kökü ve ana biyoaktif bileşenleri karmaşık ve çoklu farmakolojik etkilere sahip olduğu bilinmektedir (Attele vd. 2002; Arora vd. 2005). *Panax ginseng* kök ekstraktı, hematolojik sistemini radyasyondan korumak için başka bir alternatif olabilir. *Panax ginseng* kök ekstraktının radyasyonla indüklenen hematolojik ve biyokimyasal değişikliklere karşı koruma sağladığı açıkça gösterilmiştir (Kumar vd. 2003; Paull vd. 2011; Kumud vd. 2014; Tung-Kwang Lee, 2010).

5.1.30. *Zingiber officinale* Roscoe – (Zencefil)

Zencefil (*Zingiber officinale*) hidroalkolik ekstraktının radyoprotektif etkisi farelerde incelenmiş ve in vitro olarak doza bağımlı bir şekilde reaktif oksijen türlerini temizlediği bulunmuştur (Jagetia vd. 2003; Kumud vd. 2014). Zencefil, Zingiberaceae familyasına ait olup Asya ve Amerika'da bulunur. Hem tıbbi hem de aromatik olup, mutfak uygulamalarında ve iyileştirici özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. *Z. officinale*, bağırsak mukozal bariyerini kısmen

antioksidan ve anti-inflamatuar özelliklerine atfedilen 6-shogol sayesinde radyasyon toksisitesinden koruduğu bildirilmiştir (Raj Xavier, 2022). Zencefilin esansiyel yağı antibakteriyel, antifungal ve antiviral aktivitelerin yanı sıra antioksidan, antiinflamatuar ve antinosiseptif özelliklere de sahiptir. Zencefil ekstraktının radyoprotektif etkileri karaciğer, böbrek ve kalp üzerinde X ışınına maruz kalan sıçanlarda gösterilmiştir. Ayrıca, γ -radyasyonu ile tüm vücut ışınlanmasına maruz bırakılan sıçanlarda zencefil ekstraktı ile ön tedavi, hematolojik parametrelerde ve antioksidan durumda önemli ölçüde iyileşme ile sonuçlandı. Zencefil esansiyel yağının farelerde değerlendirilmesi, antioksidan durumunun restorasyonu ve kromozomal anormallikler, mikronükleus frekansı ve DNA hasarı dahil olmak üzere sitogenetik hasarın azalmasını sağlamıştır (Samarth vd. 2017).

5.1.31. *Aegle marmelos* (L.) Corrêa – (Bel ağacı)

Aegle marmelos (L.) Corrêa, Rutaceae ailesinin bir üyesidir. Yaygın olarak 'Hindistan balı' veya 'Bengal eşkini' olarak bilinir ve Hinduizm'de kutsal ağaçlardan biri olarak kabul edilir. Bu bitkiden furokumarinler, rutin, marmesin, allokriptopin, O-metilhafordinol gibi ikincil metabolitlerin izole edildiği bildirilmiştir. Lampronti vd. (2003) ile Lambertini ve ark. (2004), bu bitkinin yapraklarının etanol ekstresinin tümör ve meme kanseri hücre hatlarına karşı anti-proliferatif potansiyelini rapor etmişlerdir. Jagetia vd. (2004) hem yapraklar hem de meyvelerin hidroalkol ekstraktının sırasıyla fare modellerinde 10 Gray (Gy) radyasyona karşı 15 mg/kg vücut ağırlığı dozu ve gama radyasyonlarına karşı 20 mg/kg vücut ağırlığı dozunda radyoprotektif aktivitesini bildirmişlerdir (Dutta vd. 2021). *Aegle marmelos* meyvesinden hidroalkolik bir ekstraktın radyoprotektif etkisi farelerde incelenmiş ve radyoprotektif etkisi bulunduğu kanıtlanmıştır (Jagetia vd. 2004; Kumud vd. 2014). *Aegle marmelos*, antidiyare, mikrobisidal, radyoprotektif, kanser önleyici, ateş düşürücü, iyileştirici, idrar söktürücü, doğum kontrolü ve anti-inflamatuar özelliklere sahiptir ve birçok hastalığın önlenmesi ve tedavisinde faydalıdır (Rahman ve Parvin, 2014; Raj Xavier, 2022).

5.1.32. *Cissampelos pareira* L. – (Kadife yaprağı)

Cissampelos pareira'nın potansiyel ve etkili antioksidan ve immünomodülatör aktiviteye sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, canlı ve canlı

olmayan çalışmalarda, anti-anksiyete aktivitesi ve hepatoprotektif aktivite gösterdiği belirlenmiştir (Rahul Dutt, 2014; Kumud vd. 2014).

5.1.33. *Justicia adhatoda* L. (Syn: *Adhatoda vasica* Nees) – (Malabar cevizi)

Justicia adhatoda L. (Syn. *Adhatoda vasica* Nees), Acanthaceae ailesinin bir üyesi olup astım ve kronik bronşit tedavisinde kullanılan mükemmel bir Hint geleneksel ilacıdır. Kumar vd. (2007), *J. adhatoda* yapraklarının etanol ekstresi ile radyasyon tarafından indüklenen testislerin histolojik değişikliklerini, Glutasyon (GSH), alkalin fosfataz ve lipid peroksidasyon (LPO) seviyelerini, ayrıca 1 ile 30 gün arasındaki kemik iliği hücrelerinde kromozomal aberrasyonları izleyerek albino farelerin testislerini tedavi etmişlerdir (Dutta vd. 2021).

5.1.34. *Syzygium cumini* (L.) Skeels – (Java eriği, Kimyon)

Syzygium cumini (L.) Skeels, Myrtaceae ailesinden olup yaygın olarak 'malabar eriği' olarak bilinir. Bu bitkide flavonol glikozitler, triterpenoidler, taninler, betulinik asit, kuersetin, β -sitosterol vb. fitokimyasallar rapor edilmiştir. Bitkinin yaprak ekstresinin, insan hücrelerinin gama ışınları ile 3 Gy radyasyona maruz kaldıktan sonra periferik lenfositleri tedavi etmek için kullanıldığında mikronükleus oluşumunda önemli bir azalmaya neden olduğu gösterilmiştir (Jagetia ve Baliga, 2002b). Jagetia vd. (2005b), *S. cumini* tohumlarının hidro-alkol ekstresinin, gama ışınlarına maruz kalan farelerde doza bağlı olarak radyoprotektif potansiyeli olduğunu rapor etmiştir (Dutta vd. 2021). *Syzygium cumini*, Asya, Afrika ve Amerika'da yetiştirilmektedir. Bitki değişen konsantrasyonlarda asetil oleanolik asit, triterpenoidler, ellagik asit, izokersitin, kersetin, kaempferol ve mirisetin içerir. Kültürlenmiş insan lenfositleri üzerinde yapılan çalışmalar, radyasyona maruz kalmadan önce kimyon yaprağı ekstraktı mikronükleus indüksiyonunda önemli bir azalmaya yol açmıştır. Ayrıca fareler üzerinde yapılan araştırmalar, *S. cumini* tohumu ve yaprak özleri radyasyona bağlı hastalık ve ölümlere karşı koruma sağlar (Samarth vd. 2017).

5.1.35. *Valeriana jatamansi* Jones ex Roxb. (Syn: *Valeriana wallichii* DC.) – (Kediotu)

Valerianaceae familyasının bir üyesi olan *Valeriana wallichii*, başta Himalayalar'ın dağlık bölgelerinde olmak üzere dünyanın her yerinde

bulunmakta ve Hint geleneksel tıbbında çeşitli bitkisel ilaçlarda kullanılmaktadır. Rizom ve rizom kök uçucu yağ, alkaloidler, boril izovalerianat, chatinin, format, glukozit, izovalerenik asit, 1-kamfen, 1-pinen, reçineler, terpineol ve valeriani içerir. *V. wallichii* radyasyonun neden olduğu serbest radikallere karşı önemli ölçüde koruma sağlar, uzun süreli oksidatif stresi azaltır, mitokondriyal kütleli artırır, kültürlenmiş hücrelerin üreme canlılığını artırır ve radyasyonun neden olduğu DNA hasarına karşı koruma sağladığı belirlenmiştir (Samarth vd. 2017).

5.1.36. *Withania somnifera* (L.) Dunal – (Bektaşı üzümü)

Solanaceae familyasına ait olan ve halk arasında Hint ginsengi veya ashwagandha olarak bilinen *Withania somnifera*, Ayurveda'da önemli tıbbi öneme sahip çok yıllık bir bitkidir. Kök ekstraktı, fenolik bileşikler ve flavonoidler de dahil olmak üzere fitokimyasalların karmaşık bir karışımıdır ve anolidler, farmakolojik etkilerinden sorumlu olan temel bileşenlerdir. Sıçanlar üzerinde yapılan çalışmalar *W. somnifera* ile tedavinin etkili olduğunu göstermiştir. Radyasyona maruz kalmadan önce kök ekstraktı hepatik enzimlerde, hepatik nitrat/nitrit oranında, malondialdehit seviyelerinde ve DNA hasarında önemli bir azalmaya yol açar. Ek olarak hem oksijenaz aktivitesinde, süperoksit dismutazda, glutatyon peroksidaz aktivitelerinde ve glutatyon içeriğinde önemli bir artış vardır. *W. somnifera*'nın antioksidan fonksiyonu ve hem oksijenaz indüksiyonu yoluyla radyokoruyucu bir ajan olarak kullanıldığı ispatlanmıştır (Samarth vd. 2017).

5.1.37. *Sinopodophyllum hexandrum* (Royle) T.S. Ying (Syn: *Podophyllum hexandrum* Royle) – (Mayıs elması)

Podophyllum hexandrum, çoğunlukla Alpin-Himalaya kuşağında bulunan yüksek rakımlı çok yıllık bir ottur. Türün rizom ve kökünde bulunan bir reçine, podofilotoxin gibi birçok lignan içerir ve anti-tümör, antiviral, anti-enflamatuar ve anti-proliferatif aktiviteye sahip önemli bir biyoaktif bileşik olarak podofilotoxin en önemli bileşiktir. Ayrıca, in vivo ve biyokimyasal çalışmalar, rizomun güçlü bir antioksidan kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Yüksek serbest radikal süpürme aktivitesi nedeniyle, çeşitli araştırmacılar bitki özütünün biyolojik sistemlerdeki olumsuz radyasyon etkilerini hafifletip hafifletmediğini belirlemeye çalışmıştır. Çok sayıda yayımlanan makale, *Podophyllum hexandrum*'un radyasyon kaynaklı hematopoetik aplaziyi,

kromozomal aberrasyonu, ölümcül etkileri, immünsüpresyonu, apoptozu, nöronal hasarı ve kan hücresi sayısında azalmayı önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Paull vd. 2011; Pathak vd. 2019).

5.1.38. *Ficus racemosa* L. – (Salkım incir)

Ficus racemosa L., Moraceae familyasından olup Hindu toplumunda kutsal bir ağaç olarak kabul edilir. Bu bitkide bulunan fitokimyasallar başlıca flavonoidler, alkaloidler, lanosterol gibi triterpenoidler, taninler, gluanol asetat, lupenol, rocemosik asit vb. içerir. Vinutha vd. (2015), plazmid pBR322'nin çeşitli dozlarla maruz kaldığı elektron ışını radyasyonu altında elektron ışını kaynaklı DNA hasarını inhibe etme potansiyelini kanıtlamak için *Ficus* bitkisi ekstralarının in vitro deneylerini gerçekleştirmişlerdir (Dutta vd. 2021).

5.1.39. *Hippophae rhamnoides* L. – (Yabani iğde)

Hippophae rhamnoides L., Elaeagnaceae ailesindedir. Bu bitkinin meyveleri polifenoller, malik asit, L-quebrachitol, kinik asit, C, E ve K vitaminleri vb. bakımından zengindir. Agrawala ve Goel (2002), farelere 10 Gy radyasyona maruz kaldıklarında 25-35 mg/kg vücut ağırlığı ekstraktında % 80 radyoprotektif potansiyel rapor etmişlerdir. Goel vd. (2005), 60Co-gamma radyasyonları ile ışınlanmış farelerde yaklaşık % 82 hayatta kalma şansı ve yaşam süresi artışı rapor etmişlerdir. Bu bitkinin meyvelerinin fraksiyonize ekstrallerinden elde edilen E vitamini radyoprotektif potansiyelini rapor etmişlerdir (Dutta vd. 2021). *H. rhamnoides*, yüzyıllardır geleneksel Tibet ve Hint tıbbi sistemlerinde kullanılmaktadır. *H. rhamnoides* meyveleri, (isorhamnetin, rhamnetin, quercetin, kaempferol gibi) polifenolik bileşikler, karotenler (α , β , γ), vitaminler (A, E, C, K), riboflavin, folik asit, taninler, palmitik, stearik ve oleik asitlerin gliseritleri ve bazı esansiyel amino asitler içerir (Chan vd. 1990), bu bileşenler serbest radikal temizleme, kromatin sıkılaştırma ve hipoksi indüksiyonu gibi biyoaktivitelere önemli rol oynamaktadır. Tüm etkiler radyoproteksiyonda hayati bir rol oynamıştır (Arora vd. 2005).

5.1.40. *Mentha arvensis* L. – (Japon nanesi)

Mentha arvensis L., Lamiaceae ailesinden, yaygın olarak 'mısır nanesi', 'tarla nanesi' veya 'yabani nane' olarak bilinir. Bu bitkiden mentol, neomentol, mentil asetat, piperiton, limonen, flavonoidler, taninler vb. gibi fitokimyasallar

izole edilmiştir. Jagetia ve Baliga (2002a), radyasyona maruz kalan farelere karşı 10 mg/kg vücut ağırlığında dozlanmış bu bitkinin kloroform ekstralarının radyoprotektif potansiyelini rapor etmiştir. Suda çözünen ekstrenin albino farelerin 8 Gy radyasyonla ışınlanmış kemik iliği hücrelerinde kromozomal hasarlara karşı radyoproteksiyon sağladığı bildirilmiştir (Samarth ve Kumar, 2003). Bu bitkinin ayrıca, gamma radyasyonlarıyla ışınlanmış fareleri hastalıktan ve ölümden koruduğu rapor edilmiştir (Baliga ve Rao, 2010; Dutta vd. 2021).

5.1.41. *Phyllanthus emblica* L. (syn: *Emblica officinalis* Linn.) – (Amla ağacı, Hint Bektaşi üzümü)

Phyllanthus emblica L. (Syn. *Emblica officinalis* Gaertn.) Phyllanthaceae ailesinden, yaygın olarak 'Hint kuşburnu', olarak bilinir ve bitkinin her bir parçası Hint geleneksel tıbbında kullanılır. Bu bitkiden yüksek miktarda C vitamini (askorbik asit), emblikanin A ve B, ellajitaninler, polifenoller ve ellajik asit, kemferol vb. gibi flavonoidler rapor edilmiştir. *P. emblica* ekstralarının fare modellerinde radyasyon kaynaklı hastalık ve hücre ölümüne karşı koruma sağlama potansiyeline sahip olduğu rapor edilmiştir. Bitkinin meyve ışınlanmış farelerde gamma ışınlarına karşı radyoprotektif potansiyeli olduğu rapor edilmiştir (Singh vd. 2005; Dutta vd. 2021).

5.1.42. *Tinospora cordifolia* (Thunb.) Miers. – (Giloya, Guduchi)

Tinospora cordifolia (Thunb.) Miers. Menispermaceae ailesinden olup 'kalp yapraklı muson tohumu' olarak bilinir. Bu bitkiden izole edilen kolombin, palmatin, tinosporik asit, tinosporal, kolin vb. gibi fitokimyasallar rapor edilmiştir. Pahadiya ve Sharma (2003), bu bitkinin radyoprotektif potansiyelini değerlendirmiştir. Veriler, kontrol grubundaki 13 gün içinde %100 ölüm oranına kıyasla, 13 gün içinde %50 hayatta kalma şansı göstermiştir. Goel vd. (2004a,b), 2 Gy gama ışını ile ışınlanmış erkek farelere vücut ağırlığı başına 200 mg konsantrasyonda uygulanan *T. cordifolia* bitkisi ekstresinin %76.3 hayatta kalma şansı gösterdiğini, kontrol grubunda ise %100 ölüm olduğunu rapor etmişlerdir (Dutta vd. 2021). *Tinospora cordifolia* (Menispermaceae), Ayurveda'da bir Rasayana, Medha ve yaşlanma karşıtı ilaç olarak kabul edilir. Bu bitki, tonik, canlandırıcı, anti-diyabetik, hepatoprotektif, ateş düşürücü, anti-stres, antiülser, antikanser, antioksidan ve immünomodülatör ajandır ve sarılık, cilt hastalıkları, kansızlık, zayıflık ve enfeksiyonlar dahil çeşitli

rahatsızlıkların tedavisinde yaygın olarak kullanılmıştır (Stanley vd. 1999a,b). *Tinospora cordifolia*'nın sulu sap ekstresinin, karın enfeksiyonlarını ve sepsisi önlediği, kronik karaciğer hasarı ve cerrahi sarılığı olan farelerde ve hastalarda Kupffer hücre işlevini ve polimorfonükleer hücre (PMN) aracılı fagositozu iyileştirdiği bildirilmiştir (Subramaniam vd. 2003). *Tinospora cordifolia*'nın antioksidan özelliklerinin, bu tıbbi etkilerden büyük ölçüde sorumlu olabileceği ilk kez rapor edilmiştir. *Tinospora cordifolia*'nın sulu sap ekstresi, serbest radikal süpürme ve metal şelasyon özellikleri göstermiş ve bu şekilde iyonlaşan radyasyona karşı koruma sağlamıştır (Goel vd. 2002; Arora vd. 2005). Bitkinin kurutulmuş gövdesinden elde edilen sulu özütten saf arabinogalaktan polisakkarit izole edilmiştir. Bu da birçok radyoprotektif bileşiğin immün modülatör aktivitesi aracılığıyla işlev gördüğü için poliklonal mitojenik olabilir. *T. cordifolia*'dan TP-zengin polisakkarit hazırlığı, organizmada radyasyon kaynaklı hasarı önlemede etkilidir (Goel vd. 2004a,b; Kumud vd. 2014).

Bunlara ilave olarak; Fitokimyasalların antioksidan etkilerinin radyoprotektif özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. *Moringa oleifera* yaprakları ve olgunlaşmamış meyveleri geleneksel tıpta ve besleyici bir gıda olarak yaygın kullanılmaktadır. Yaprak ekstraktı, çeşitli polifenoller, fenolik asitler, flavonoidler, glukozinolatlar ve alkaloidlerin varlığı nedeniyle yüksek antioksidan aktivite gösterir (Raj Xavier, 2022). *Cinchona* kabuğunda, kahve çekirdeklerinde, tatlı patateslerde, elma ve şeftalilerde bulunan kinik asit, antioksidan potansiyele sahiptir ve radyoproteksiyon sağlamıştır (Das vd. 2015; Raj Xavier, 2022). *Mesua ferrea*, serbest radikal süpürme aktivitesine ve büyük antioksidan potansiyele sahiptir (Fischer, vd. 2018; Raj Xavier, 2022).

Morus nigra L.'nin antioksidan aktivitesi, kemirgen kemik iliği hücrelerinde ve karaciğerde radyasyonla indüklenen genotoksisite ve sitotoksisitede azalma sağlamıştır (Sharma vd. 2002; Raj Xavier, 2022). Limon otu ve yıldız anason (*Illicium verum*) özütleri, pBR322 plazmidinde radyasyonla indüklenen DNA hasarının azaltılmasına yardımcı olmuştur (Raj Xavier, 2022). Siyah çay, güçlü bir antioksidan aktiviteye sahip olan flavonoidlerin zengin bir kaynağı olup radyoprotektif özelliklere sahiptir. Sitotoksisite koruma mekanizması, antioksidan bileşiklerin serbest radikal süpürme aktivitesiyle apoptotik sinyal iletiminin azalmasına ve endojen antioksidan enzimlerin düzenlenmesine yol açar (Raj Xavier, 2022). *Malpighia glabra* L., Orta Amerika'nın yerli bir meyvesidir ve zengin besin değeri ile tanınır. Özellikle olgunlaşmamış meyvede bulunan C vitamini gibi besinlerin karışımıyla yüksek antioksidan potansiyele

sahiptir. Hindiba tohumlarının metanol ekstraktının radyoprotektif etkisi, özellikle klorojenik asit ve fenolik bileşikler gibi aktif bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Üzüm, antioksidanlar açısından zengin olup aktiviteleri çeşitlilik gösterir. Üzüm ekstresi, düşük dozlarda iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklı oksidatif stresi önlemek için bir antioksidan olarak kullanılabilir. Kivi yaprağı ekstraktı, fenolik asitler ve prosiyanidin dimerleri gibi polifenollerin zengin bir kaynağı olduğu için radyasyonla indüklenen oksidasyondan eritrosit membranını koruyabilir (Raj Xavier, 2022).

Polyalthia longifolia yaprak ekstraktı, farelerde X-ışını ışınlaması nedeniyle oluşan hasarlara karşı radyoprotektif etki göstermiştir. *Malus baccata* meyveleri, fenolik bileşikler bakımından zengindir ve gama ışını radyasyonu kaynaklı oksidatif hasara karşı bir radyoprotektör olarak kullanılabilir. *Helianthus tuberosum* L. türünden elde edilen polisakkaritler, radyasyonla etkilenen hayvanların dalak ve kemik iliğinde lenfoid, eritroid ve miyeloid hücre hatlarının hematopoetik proliferasyonunu uyararak radyoprotektif bir bileşik olarak işlev görebilir. (Raj Xavier, 2022).

Pancarın sulu ekstresi, DNA hasarını azaltma ve hematopoetik progenitör hücrelerin proliferasyonunu ve uyarılmasını artırma yeteneğinden kaynaklanan bir radyoprotektif etkiye sahiptir. Pancar kökü ekstresi, IL-3 salgısını uyararak eritropoezi uyarır ve aynı zamanda kemik iliği hücrelerini ve dalak hücrelerini radyasyon kaynaklı hasarlardan korur. Geraniin adlı bir dehidro ellajittanin, *Nymphaea tetragona* var. *angusta* (su nilüferi) türünden izole edilmiş olup hematopoetik ve antioksidan potansiyeli sayesinde fareleri radyasyon hasarlarından korumuştur. *Angelica sinensis* köklerinden çıkarılan polisakkaritler, radyasyon tarafından indüklenen hematopoetik hasardan korunma potansiyeline sahiptir. *Rubia cordifolia* kökü, tüm vücut ışınlamasıyla indüklenen hematopoetik hasarı azaltma potansiyeline sahiptir ve antiinflamatuvar ve antioksidan özelliklere sahiptir (Raj Xavier, 2022).

Tablo 1. Radyoprotektif bitkiler ve kimyasal içerikleri

Bitkinin adı	Familiya	Yaygın adı	Kullanılan bitki parçası	Yetiştirildiği ve kullanıldığı Ülkeler	Kimyasal içeriği	Referans
<i>Ageratum conyzoides</i> L.	Asteraceae	-	Bitkinin tüm parçaları	-	Polioksijenlenmiş flavonoidler açısından zengindir. Triterpenler fridelin, başlıca steroller sitosterol ve stigmasterol. Likopsamin ve Ekinatin, iki izomerik pirrolizidin. Başlıca uçucu yağlar 7-metoksi-2,2-dimetilkromen (prekosen I), 6,7- imetoksi türevi, ageratokromen (önceki II) ve ageratokromen dimmer	Samarth vd. 2017; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005
<i>Allium cepa</i> L.	Liliaceae	Soğan	Bulb	-	Esansiyel yağı 3-1,8-sineol, L-linalool ve kafur. Kaempferol, -sitosterol, ferullik asit, miritik asit ve prostaglandinler. Flavonoidler ve tanenler Kuersetin, kuersetin 4-glikozit, taksifolin, taksifolin 7-glikozit ve Fenilalanin. Başlıca kükürt bileşikleri dimetil trisülfür, propenil propil disülfür, dipropil disülfür, propenilmetildisülfür ve metil propil trisülfür dipropil trisülfür.	Samarth vd. 2017; Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005; Ammar 2016; Dutta vd. 2021
<i>Allium sativum</i> L.	Liliaceae	Sarımsak	Bulb	-	C-glutamilsistein ve diğer maddeler açısından zengindir. Kükürt içeren bileşikler kükürt içermeyen biyomoleküller, örneğin steroidal glikozitler, uçucu yağlar, flavonoidler, antosiyaninler, lektinler, prostaglandinler, fruktan, pektin, adenozin, vitaminler B1, B2, B6, C ve E, biyotin, nikotinik asit, yağ asitleri	Samarth vd. 2017; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005; Maurya vd. 2006

<i>Centella asiatica</i> L.	Aiaceae	Gotu Kola	Bitkinin tüm parçaları	Afrika, Asya, Avustralya Tropikal bölgeleri ve Pasifik okyanusunun batısı	Triterpenoidler arasında asiaticosid, centellosid, madecossosid, izotankunik asit, centellose, asiatic, centellik ve brahmosid, brahmik asit, (2,6-hidroksi, 23-hidroksi-metil ursolik asit) Asiaticosid ve madecossosid, palmitik, stearik, lignoserik, oleik, linoleik ve linolenik asitler. Asiaticosid ve centellosid bitki kısımlarından. Flavanoidler, 3-glukozilkuersetin, 3-glukozilkaemferol ve 7-glukozilkaemferol.	Samarth vd. 2017; Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Dutta vd. 2021; Maurya vd. 2006
<i>Citrus aurantium</i> L.	Rutaceae	Turunç	Olgun meyve	Akdeniz ülkeleri, Güneydoğu Asya	Başlıca flavonoidler flavanon glikozitler, hespiridin ve naringin	Samarth vd. 2017; Maurya vd. 2006
<i>Coleus aromaticus</i> Benth.	Lamiaceae	-	Yaprak	Güney Afrika, Hindistan, Güneydoğu Asya, Arabistan	Karvakrol, timol, öjenol, chavicol, etil salisilat, klorofilin, flavonoidler (cirsimaritin)	Samarth vd. 2017
<i>Curcuma longa</i>	Zingiberaceae	Zerdeçal	Rizom	Güney Asya, Pakistan, Hindistan, Çin, Bangladeş	Uçucu yağ kurkumin (diferüloilmetan) bileşenleri p-hidroksisinamoil(feruloil)metan ve p'-dihidroksidinamoilmetanel. seskiterpen, ketonlar gibi bileşenler ve alkoller	Samarth vd. 2017 Lachumy vd. 2013 Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Dutta vd. 2021; Maurya vd. 2006

<i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) Stapf.	Poaceae	Limon otu	Bitkinin tüm parçaları	Denizel Güneydoğu Asya	Sitrat hidrokarbon terpenlerden, alkollerden oluşur. ketonlar, esterler ve aldehitler. Esansiyel yağ esas olarak iki bileşiğin karışımı olan sitralden oluşur. stereoizomerik monoterpen aldehitler; trans izomer geraniol. flavonoidler ve fenolik içerdiği rapor edilmiştir. Fluteolin, kersetin, kampferol gibi bileşikler ve flavonların apigenin glikosil türevleri apigenin ve luteolin tanımlanmıştır.	Samarth vd. 2017
<i>Eleteria cordatum</i> (L.) Maton	Zingiberaceae	Kakule	Kuru meyveler	Kosta Rika, Çinlindi	Uçucu yağ, Beta-pinen, sabinen, mirsen, alfa-phellandrene, limonen, -sineol, gama-terpinen, terpinolen, linalool, linalil asetat, terpinen, -terpineol, terpinil asetat, sitronellol, geraniol, metil öjenol ve trans-nerolidol.	Samarth vd. 2017
<i>Illicium verum</i>	Schisandraceae	Yıldız Anason	Bitkinin tüm parçaları	Güneybatı Çin	Anisil aseton ve benzenkarboksilik asit ana fenolik bileşenlerdir.	Samarth vd. 2017
<i>Lavandula angustifolia</i> Mill.	Lamiaceae	Lavanta	Çiçek	Akdeniz	1,5-Dimetil-1-vinil-4-heksenilbütirat ana uçucu yağın bileşeni, ardından 1,3,7-oktatrien, 3,7-dimetil- okalipitol ve kafur	Samarth vd. 2017
<i>Mangifera indica</i> L.	Anacardiaceae	Mango	Kök kabuğu	Güneydoğu Asya	Kabuğun protokateşik asit içerdiği bildiriliyor. Kateşin, mangiferin, alanin, glisin, -aminobütrik asit, kinik asit, şikimik asit ve tetrasiklik triterpenoidler sikloart-24-en-3,26diol, 3-ketodammar-24 (E)-en-20S, 26-diol, C-24 epimerleri cycloart-25 ve 3,24, 27-triol ve sikloartan-3,24,27-triol	Samarth vd. 2017

<i>Mentha x piperita</i> L.	Lamiaceae	Nane	Yaprak	Kültür	Öjenol, kafeik asit, rosmarinik asit varlığı ve tokoferol. Kafeik asit, rosmarinik asit, eriositrin, luteolin-7-O-glukozid asitler, flavonoidler ve s-karvon	Samarth vd. 2017; Maurya vd. 2006
<i>Bergera koenigii</i> L. (Syn: <i>Murraya koenigii</i>)	Rutaceae	Köri ağacı	Yaprak	Asya'nın tropikal bölgeleri, Hindistan Yarım Adası	Karbonhidratlar, lif, mineraller, karoten, nikotinik asit ve C vitamini. Oksalik asit içerir. Glikozitler, karbazol alkaloidleri, koenigin ve reçine. Taze yapraklar A vitamini açısından zengin uçucu yağ ve kalsiyum içerir. Girinimbin, iso-mahanimbin, koenine, koenigine, koenidin ve koenimbin. Mahanimbicine, bicyclomahanimbicine, phebalosin, Murrayone imperatoksın vb. Triterpenoid alkaloidler siklomahanimbin ve tetrahidromahanimbin, Alkaloidler-murrayastin, murrayalin, pipayafolinkarbazol	Samarth vd. 2017
<i>Myristica fragrans</i> Houtt.	Myristicaceae	Küçük Hindistan cevizi	Yaprak	Çin, Tayvan, Endonezya, Malezya, Karayipler, Hindistan, Sri Lanka ve Güney Amerika tropik bölgeler	Kimyasal bileşenler arasında miristin, lignan ve öjenol bulunur. Küçük hindistan cevizi esansiyel yağ şunları içerir. Esas olarak sabinen, -pinen ve pinen, mircen sineo, miristin, limonen.	Samarth vd. 2017; Maurya vd. 2006; Raj Xavier, 2022

<i>Nigella sativa</i> L.	Ranunculaceae	Çörek otu	Kapsül ve tohumlar	Akdeniz	En önemli aktif bileşikleri timokinon, timohidrokinon, ditimokinon, p-simen, karvakrol, 4-terpineol, t-anetol, seskiterpen longifolen beta-pinen ve diğerleri arasında timol. Alkaloitler içerir. İzokinolin ve pirazol halkası taşıyan alkaloitler. Ek olarak tohumları hederin içerir.	Samarth vd. 2017
<i>Ocimum tenuiflorum</i> L. (Syn: <i>Ocimum sanctum</i> L.)	Lamiaceae	Kutsal Fesleğin	Yaprak	Avustralya, Malezya, Asya, Batı Pasifik'in tropik bölgeleri	Bütün bitki ekstraktı flavonoidler, alkanoidler içerir. saponinler, fenoller, antosininler, triterpenoidler, tanenler. Yaprak ekstraktı ise flavonoidler, alkanoidler içerir. saponinler, tanenler, fenoller, antosininler, terpenoidler, steroidal	Samarth vd. 2017; Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Dutta vd. 2021; Maurya vd. 2006
<i>Origanum vulgare</i> L.	Lamiaceae	Kekik, Güveyotu, Keklikotu	Bitkinin tüm parçaları	Akdeniz	Kekikte bulunan antioksidanlar rosmarinik asittir. Kafeik asit, flavonoidler ve fenolik türevleri asitler ve tokoferol. Ayrıca rosmarinik asit metil ester	Samarth vd. 2017
<i>Piper longum</i> L.	Piperaceae	Endonezya uzun biberi	Meyve	Tropikal bölgeler Endonezya	Flavonoidler, liganlar, aristolaktamlar, uzun ve kısa zincir esterleri, terpenler, steroidler, propenilfenoller ve alkaloitler bileşikler seskiterpenler, ortak seskiterpenler, E-karyofilen ve germakren D, E, E-farnesil-PP- E, Z-farnesil-PP reaksiyonlarından (a-kopaen ve d-kadinen)	Samarth vd. 2017; Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010
<i>Plumbago indica</i> L. (syn: <i>Plumbago rosea</i> L.)	Plumbaginaceae	-	Kök	Güneydoğu asya, Endonezya, Filipinler, Hindistan	Naftokinonoidler ve bunların türevleri ve flavonoidler ile plumbagin, palmatik asit ve mirisil palmitat petrol ekstraktı ve plumbagiasit lakton, ayanin ve köklerin etil asetat ekstraktından elde edilen azaleatin içerir	Samarth vd. 2017

<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Lamiaceae	Biberiye	Yaprak	Akdeniz bölgesi	Karnosol, rosmarinik asit, rosmanol, izorosmanol ve Epirosmanol	Samarth vd. 2017
<i>Salvia officinalis</i> L.	Lamiaceae	Adaçayı	Yaprak	Akdeniz bölgesi	Mevcut antioksidanlar salvinolok asittir (dimeri rosmarinik asit), karnosol, karnosik asit, rosmarinik asit, rosmanol, izorosmanol ve epirosmanol	Samarth vd. 2017
<i>Syzygium aromaticum</i> (L.) Merr. & L.M. Perry	Myrtaceae	Karanfil	Kuru Çiçek	Endonezya, Madagaskar, Hindistan, Sri Lanka	Karvakol, timol, öjenol gibi fenilpropanoidler ve sinnedihit	Samarth vd. 2017
<i>Syzygium cuminii</i> (L.) Skeels	Myrtaceae	Java eriği	Yaprak		Triterpenoidler, ellagik asit, izoquercitin, kersetin, kaempferol ve mirisetin	Samarth vd. 2017; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005; Dutta vd. 2021; Maurya vd. 2006
<i>Valeriana jatamansi</i> Jones ex Roxb. (Syn: <i>Valeriana wallichii</i> DC.)	Valerianaceae	Hint kediotu	Kök	Hindistan, Nepal, Pakistan, Çin	alkaloitler, borilden oluşan yağ izovalerianat, chatinin, format, glikozit, izovalerenik asit, 1-kamfen, 1-pinen, reçineler, terpineol ve valerianine. Rizomlardan bazıları sitrik asit, malik asit gibi önemli bileşikler, malol, süksinik asit ve tartarik asit içerir.	Samarth vd. 2017
<i>Zingiber officinale</i> Roscoe	Zingiberaceae	Zencefil	Rizom	Çin, Hindistan, Endonezya, Vietnam, Japonya	Gingerol gibi gingerol ile ilgili bileşikler, shagaoller, gengedioller, zingeron, dehidrozingeron, gingeron ve diarilheptanoidler p-sineol, terpineol, zingiberen ve petandekonik asit ana bileşenlerdir. öjenol ve zingeron etanol oleoresin ve metanoldeki bileşenler, CCl4 izooktan oleorezin	Samarth vd. 2017; Raj Xavier, 2022

<i>Ginkgo biloba</i> L.	Cycadaceae	Mabet Ağacı	Yaprak	Çin	Flavonoid, ginkgolid	Kumud vd. 2014; Paul vd. 2010; Dutta vd. 2021
<i>Hippophae rhamnoides</i> L.	Elaeagnaceae	Yabancı İğde	Tüm bitki kısımları	Avrupa ve Asya'nın sıcak bölgeleri, Hindistan, Nepal, Pakistan	Meyveleri C vitamini içerir.	Kumud vd. 2014; Paul vd. 2010; Dutta vd. 2021
<i>Tinospora cordifolia</i> (Thunb.) Miers	Menispermaceae	-		Hindistan'ın tropik bölgeleri	Alkaloit, fitosteroller, glikozitler, tinosporid	Kumud vd. 2014; Dutta vd. 2021
<i>Phyllanthus emblica</i> L. (syn: <i>Embilica officinalis</i> Linn.)	Phyllanthaceae	Amla		Güney Asya ve Tropikal bölgeler		Kumud vd. 2014; Dutta vd. 2021; Maurya vd. 2006; Paul vd. 2010; Maurya vd. 2006; Raj Xavier, 2022
<i>Panax ginseng</i> CA Meyer	Araliaceae	Kore Ginsengi	Kök	Çin, Japonya, Kore		Kumud vd. 2014; Paul vd. 2010
<i>Amaranthus paniculatus</i> L.	Amaranthaceae	-		Kozmopolit		Kumud vd. 2014; Paul vd. 2010; Maurya vd. 2006; Raj Xavier, 2022

<i>Mentha arvensis</i> L.	Lamiaceae	Japon Nanesi	Yaprak	Avrupa'nın ılıman bölgeleri, batı ve orta Asya, Himalaya, Kuzey Amerika	Mentol, izomenton, limonen, metil asetat, pinen, tanen ve flavonoid içerir	Kumud vd. 2014 Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005; Dutta vd. 2021
<i>Aegle marmelos</i> (L.) Corrêa	Rutaceae	Bel, Wood apple	Meyve	Hindistan, Güneydoğu Asya,		Kumud vd. 2014 Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005; Dutta vd. 2021; Maurya vd. 2006
<i>Vanilla planifolia</i> Miller	Orchidaceae	Vanilya	meyve	Sıcak ve nemli tropikal bölgeler	Glikozit, Vanilin	Dutta vd. 2021
<i>Aloe vera</i> (L.) Burrm.f.	Asphodelaceae	Aloe vera	yaprak	Tropik ve Yarı tropik bölgeler, Arap yarımadası, Kuzey Afrika, Kanarya Adaları,	<i>antraquinones</i>	Lachumy vd. 2013; Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005; Maurya vd. 2006
<i>Carica papaya</i> L.	<i>Caricaceae</i>	<i>Papaya</i>	Meyve	Güney Meksika, Orta Amerika	<i>L-ascorbic acid, C vitamini, Betakaroten</i>	Lachumy vd. 2013
<i>Glycine max</i> (L.) Merr.	Fabaceae	Soya fasulyesi	Tohum	Doğu asya Kültürar	<i>Anthocyanin</i>	Lachumy vd. 2013

<i>Eleutherococcus senticosus</i> (Rupr. & Maxim.) Maxim	Araliaceae	Sibirya gindengi	Kök	Doğu asya, Çin, Japonya, Sibirya	Triterponoid saponin	Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005; Maurya vd. 2006
<i>Justicia adhatoda</i> L. (Syn: <i>Adhatoda vasica</i> Nees)	Acanthaceae	Malabar cevizi	Meyve	Afganistan, Hindistan, Sri Lanka, Pakistan	Alkoidler, tanenler, saponinler, fenolikler, flavonoidler	Raj Xavier, 2022; Dutta vd. 2021
<i>Aphanamixis polystachya</i> (Duvar.) RN Parker	Meliaceae	Amoora Rohituka, Pithraj tree	Meyve	Hindistan, Pakistan, Nepal, Butan, Bangladeş, Sri Lanka	Triterpenler, diterpen, limonoid, flavonoid	Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010
<i>Angelica archangelica</i> L. (Syn: <i>Archangelica officinalis</i> Hoffm)	Apiaceae	Melek otu	Kök, tohum	Rusya, Finlandiya, İsveç, Norveç,	Alfa-pinen, Beta-phellandren, terpen. Tohumları kumarinler, ostruthol	Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005
<i>Beta vulgaris</i> L.	Amaranthaceae	Pancar	Kök	Akdeniz bölgesi	Betain, betalain	Raj Xavier, 2022
<i>Biophytum sensitivum</i> (L.) DC.	Oxalidaceae	-	Tüm bitki kısımları	Nepal, Hindistan, Güneydoğu asya,	Amentoflavon, izoorientin	Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010

<i>Chlorella vulgaris</i>	-	Chlorella Alg					Raj Xavier, 2022
<i>Lepidium didymum</i> L. (Syn: <i>Coronopus didymus</i>)	Brassicaceae	-					Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010
<i>Glycyrrhiza glabra</i> L.	Fabaceae	Meyan	Kök	Bati asya, Kuzey Afrika, Güney Avrupa	Glisirhizimik asit, triterpenoidler, polifenoller, flavonoidler, izoflaven glabren		Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005
<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Moringaceae	Moringa	Tüm kısımları	Kuzey Hindistan			Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Arora vd. 2005
<i>Sinopodophyllum hexandrum</i> (Royle) T.S. Ying (Syn: <i>Podophyllum hexandrum</i> Royle)	Berberidaceae	Hint Mays elması	Rizom	Afganistan, butan, Pakistan, Hindistan, Nepal	podoflin		Raj Xavier, 2022; Paul vd. 2010; Maurya vd. 2006
<i>Punica granatum</i> L.	Lythraceae	Nar	Meyve, meyve kabuğu	Ilman akdeniz iklimini görüldüğü yerler			Raj Xavier, 2022
<i>Saraca indica</i> L.	Fabaceae	Ashoka ağacı		Tayland			Raj Xavier, 2022

<i>Spirulina platensis</i>		Spirullina Alg		Çin Chenghai Gölü, Doğu Afrika soda gölleri	Raj Xavier, 2022
<i>Tephrosia purpurea</i> (L.) Pers.	Fabaceae	-		Hindistan ve Sri Lanka	Raj Xavier, 2022; Arora vd. 2005; Paul vd. 2010
<i>Angelica sinensis</i> (Oliv.) Diels	Apiaceae	Dang Gui		Doğu Asya, Çin	Paul vd. 2010; Arora vd. 2005
<i>Hypericum perforatum</i> L.	Hypericaceae	Sarı Kantaron	Çiçek	Avrupa, Kuzey Amerika, Akdeniz	Paul vd. 2010; Arora vd. 2005
<i>Lycium chinense</i> Mill.	Solanaceae	-	Meyve		Paul vd. 2010; Arora vd. 2005; Maurya vd. 2006
<i>Pilea microphylla</i> (Linn.) Liebm.	Urticaceae	-		Florida, Meksika, Batı hint Adaları, Tropik orta ve güney Amerika	Paul vd. 2010

<i>Tinospora cordifolia</i> (Thunb.) Miers.	Menispermaceae	-			Hindistan bölgeleri tropik	Alkoloidler, fitosteroller, glikozitler, tinosporid	Paul vd. 2010; Maurya vd. 2006
<i>Andrographis paniculata</i> (Burm.f) Nees	Acanthaceae	-	Tüm bitki kısımları	Tropik asya ülkeleri, Endonezya, Filipinler, Sri Lanka, Malezya, Tailand, Singapur	Andrographolit, diterpenoid lakton, 14-Deoksi-11-dehidroandrografolid, 5-Hidroksi7,8,2,3-Tetrametoksiflavon, Panikolin	Dutta vd. 2021	
<i>Ficus racemosa</i> L.	Moraceae			Avustralya ve Tropik Asya		Dutta vd. 2021	
<i>Acorus calamus</i> L.	Acoraceae	Hazanbel /Eğir kökü			Uçucu yağlar, beta-asaron, lektinler, alfa asaron	Maurya vd. 2006; Raj Xavier, 2022	
<i>Aspalanthus linearis</i> (Burm.f.) R.Dahlgren	Fabaceae	-		Güney Afrika		Maurya vd. 2006	
<i>Rubia cordifolia</i> L.	Rubiaceae		Gövde, dallar	Tropikal bölgelerde Africa, Sudan-Somali, Hindistan, Afganistan, Japonya Endonezya		Maurya vd. 2006	

<i>Terminalia chebula</i> Retz.	Combretaceae	Kara Halile	Meyve	Pakistan'dan güney Asyaya, Malezya, Vietnam, Hindistan	Ariungenin, chebulin, gallik asit, Luteik asit, Chebulinik asit	Maurya vd. 2006
<i>Camellia sinensis</i> (L.) Kuntze	Theaceae	Yeşil Çay	Yaprak	Güney ve güneydoğu Asya ve subtropik bölgeler	Polifenoller, epigallokateşin gallat (EGCG)	Singh vd. 2009; Paul vd. 2011

5.2. VOSviewer yardımı ile ilgili alanda literatürlerin analizi

İnsanoğlu yaşamının ilk günlerinden itibaren çeşitli stres faktörlerine maruz kalmıştır. Buna bağlı olarak, bir dizi hastalık etmenine maruz kalmış ve buna bağlı olarak ölümler ve diğer yaralayıcı sonuçlar yaşamıştır. Bu sorunlara çözüm bulmak için birçok deneme yanılma yolu ile arayışlara girmişlerdir. Sentetik ya da yarı-sentetik kimyasal girdisi olmadan birçok soruna çözüm bulmuşlardır. Kimi zamanlarda da; antik öncesi zamanlarda olduğu gibi, ortaya çıkan bir sonuç/vaka üzerine bilirkişiler görüş bildirmek yolu ile çözüm bulmuşlardır. Ancak çevresel etmenlere maruz kalma süresi ve insan popülasyonunun giderek artması yeni sorunlara da açık kapı bırakmıştır. Son 200 yılda bilim dünyasında deneysel yöntemlere sıklıkla başvurulmuştur. Bunun neticesinde, farklı alan ve disiplinlerde inanılmaz sayıda yayınlar ortaya çıkmıştır. Artan yayın sayısına bağlı olarak, belirli bir alandaki bilgi birikimi de kümülatif olarak artış göstermiştir. Yüklü sayıdaki yayınların sistematik bir şekilde rapor edilmesi, yorumlanması, ilişkilendirilmesi ve görselleştirmesi önem arz etmektedir. Bu yaklaşım ile herhangi bir alandaki bilgi birikiminin özünün ne olduğu, zamansal ve mekânsal dağılımının da belirlenmesi amacıyla önem taşımaktadır. Bu analizler neticesinde; belirli bir alana ilişkin tematik haritaların oluşturulması bağlamı da ciddi önem taşımaktadır. Son zamanlarda, bu tarz analizler bibliyometrik analizler olarak adlandırılmaktadır. Bu amaçla; VOSviewer, Bibliometrix ve CiteSpace gibi birçok analiz aracı kullanılmaktadır (Celik, 2020; Celik vd. 2021; Özbakır, 2023; Yamaner Kuzeyli ve Özbakır, 2024). Bu kitap projesi kapsamında, ilgili bölüm ile alakalı olması bağlamında SCOPUS veritabanı üzerinden basit bir tarama yapılmıştır. Bu amaçla; “başlık-özet-anahtar kelime” içinde “UV-protection” geçen çalışmaların basitçe listelenmesi yapılmıştır. Ancak, daha farklı kelimeler ile (konu ile uyumlu ve ilişkili olmak üzere) aramalar detaylandırılabilir. Arama sonuçlarımıza (UV-protection”) göre toplam 3,379 bilimsel yayına ulaşılmıştır. Bu yayınların yarısının “malzeme bilimi” ile ilişkili olduğu görülmüştür. Ancak, bu yayınlar içerisinde “natural and herbal” olarak sınırlama yaptığımızda 144 doküman elde edilmiştir. Daha sonra bu yayınlar CSV formatında indirilmiş ve VOSviewer yazılımı ile analiz edilmiştir. Bilimsel çalışmalarda, “anahtar kelimeler” ilgili raporların navigasyonu işlevinde olup özünü yansıtır. Bu sebeplerden dolayı; analiz kapsamında, yorumlamalar “anahtar kelime” adresli yapılmıştır. Analize alınan tüm raporlarda toplam 524 adet anahtar kelimenin kullanıldığı belirlenmiştir. Daha sonra bu anahtar kelimelerin tamamı kullanılarak ağ analizi oluşturulmuştur. Ağ analizi ile anahtar kelimeler arasında nasıl bir bağlantının olduğu belirlenmiştir (Şekil 1). Buna göre;

bahsedildiği üzere) meydana gelir. Oksidatif stres ise sekonder stres olarak tanımlanmaktadır. Bir başka deyişle; primer bir stres (örneğin; UV-ışını, tuz stresi, kuraklık stresi, ağır metal stresi) gibi kaynakların etkisi sonucu ortaya çıkmaktadır. Oksidatif stres indüklenmesi ile reaktif oksijen türleri (ROT) ortaya çıkar ve ROT'lar kontrol altına alınmadığı zaman hücre membranlarına zarar vermek yoluyla lipit peroksidasyonuna neden olmaktadır. Tüm bu olumsuzlukların etkileri bitkilerin fenotiplerinde açık bir şekilde görülür. Bu durum sadece bitkiler alemi ile sınırlı kalmayıp tüm canlılar aleminde görülen bir durumdur. Başka bir deyişle, canlıların normal yaşamsal döngülerinde meydana gelen tüm olumsuzluklar ROT'ların bir sonucudur. ROT'ların ne denli olduğunu Şekil 1'de görülmektedir. "Reactive oxygen species" olarak ifade edilmiştir. Fiziksel olarak hareketsiz ancak işlevsel olarak dinamik olan bitkiler; oksidatif stresin tamponlanması amacıyla orkestra biçimde enzimatik ve enzimatik olmayan savunma bileşenlerini kullanırlar. Bu savunma sistemlerinin temel işlevi antioksidan olmalarıdır. Bu antioksidan sistem süperoksit dizmutaz, katalaz ve askorbat peroksidaz gibi enzimlerden oluşmakla birlikte terpenoitler, fenolikler gibi enzimatik olmayan bileşikler de içermektedir. Tüm bu sebep ve bulgular birlikte değerlendirildiğinde; Şekil 1'de "antioxidant" teriminin de ön plana çıkması beklenen bir durumdur. Yukarıda literatür bölümünde de bahsedildiği üzere; bitkiler sahip olduğu sekonder metabolitler ile antioksidan sistemi devreye sokarak UV ışınlarına karşı koruyucu roller göstermektedir.

Ayrıca, şunu belirtmekte fayda var, şöyle ki; bitkilerin sahip olduğu tıbbi ve aromatik özellikler bu bileşenlere bağlıdır. Sekonder metabolitlerin diğer bir isminin de "bitkiye özel metabolitler" olduğudur. Yine şekil 1'de görüleceği üzere "cosmetics" and "cosmeceutical" gibi bir terim yoğunlukla ön plana çıkmıştır. İnsanın ilk günlerinden beri; bitkilerin kozmetik ve benzeri amaçlarla da kullanıldığı da bilinmektedir.

Yapılan çalışmalara göre yapısı aydınlatılan 200 bin kadar bitkisel bileşikler bulunmaktadır ve bu sayının 1 milyon kadar olduğu tahmin edilmektedir. Bu bileşiklerin hepsi tek bir bitki türünde olmayıp tüm bitki taksalarına dağıldığı bilinmektedir. Bu sebeplere bağlı olarak; her bitki benzer tıbbi ve aromatik özellik göstermemektedir. Yukarıda verilen literatür bilgilerine göre; toplam sekonder bileşikler bağlamında tartışmalar ve analizler yapılmıştır. Bundan dolayı; UV-ışınlarına koruyucu etkisi araştırılan bitkilerin fenolikler, terpenoitler ve alkaloidler özelinde bileşik analizleri yapılmalıdır. Daha sonra, ön plana çıkan (yanıt veren) bileşikler hem tek başına hem de kombine olarak uygulamaları yapılmalıdır. Tüm bu sonuçlar neticesinde biyo-uyumlu materyaller geliştirilebilir.

Kaynaklar

- Afaq, F., Adhami, V.M., & Ahmad, N. (2003). Prevention of short-term ultraviolet B radiation-mediated damages by resveratrol in SKH-1 hairless mice. *Toxicol Appl Pharmacol*, 186:28-37.
- Agati, G., & Tattini, M. (2010). Multiple functional roles of flavonoids in photoprotection. *New Phytologist*, 186(4):786-793.
- Agrawala, P.K., & Goel, H.C. (2002). Protective effect of RH-3 with special reference to radiation induced micronuclei in mouse bone marrow. *Indian J Exp Biol*, 40:525-530.
- Al-Waili, N., Saloom, K.S., Al-Waili, H., & Al-Waili, T. (2013). The radioprotective effects of thyme (*Thymus vulgaris*) extract on rats exposed to total head irradiation. *Journal of Investigative Medicine*, 61(3):587-590.
- Ammar, A.A. (2016). Use of onion and curcumin as radioprotectors against ionizing radiation induced hepato-testicular alterations in rats. *Egyp J Hosp Med*, 65:468-473. doi:10.12816/0033754
- Arora, R., Gupta, D., & Chawla, R. (2005). Radioprotection by plant products: present status and future prospects. *Phytother Res*, 19:1-22.
- Baliga, M.S., & Rao, S. (2010). Radioprotective potential of mint: A brief review. *J Can Res Ther*, 6:255-262. Doi:10.4103/0973-1482.73336
- Baliga, M.S., Jimmy, R., Thilakchand, K.R., Sunitha, V., Bhat, N.R., & Saldanha, E. (2013). *Ocimum sanctum* L (Holy Basil or Tulsi) and its phytochemicals in the prevention and treatment of cancer. *Nutrition and cancer*, 65:26-35.
- Begum, N., & Prasad, N.R. (2012). A Dietary Antioxidant, Modulates Gamma Radiation-Induced Oxidative Damages in Human Peripheral Blood Lymphocytes. *Biomed Prev Nutr*, 2:16–24.
- Benkovic, V., Knezevic, A., & Dikic, D. (2008). Radioprotective effects of propolis and quercetin in gamma-irradiated mice evaluated by the alkaline comet assay. *Phytomedicine*, 15:851-858. Doi:10.1016/j.phymed.2008.02.010
- Campos, P.M.B.G.M., Gianeti, M.D., Kanashiro, A., Lucisano, V.Y.M., & Gaspar, L.R. (2006). In vitro antioxidant and in vivo photoprotective effects of an association of bioflavonoids with liposoluble vitamins. *Photochem Photobiol*, 82:683-8.
- Celik, E., Durmus, A., Adizel, O., & Nergiz Uyar, H. (2021). A bibliometric analysis: what do we know about metals (loids) accumulation in wild birds?. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 10302-10334.

- Cieza, A., Maier, P., & Pöppel, E. (2003). Effects of Ginkgo biloba on mental functioning in healthy volunteers. *Archives of Medical Research*, 34(5):373-381.
- Çelik, M. A. (2020). Kuraklık Araştırmalarında Yeni Eğilimler, Kullanılan Teknikler Ve Kavramlar Üzerine Bibliyometrik Ağ Analizi. *International Journal of Geography and Geography Education*, (42), 602-630.
- Dai, J., & Mumper, R.J. (2010). Bitki Fenolikleri: Ekstraksiyon, Analiz ve Antioksidan ve Antikanser Özellikleri. *Molecules*, 15(10):7313-7352.
- Das, S., Kumar, R., & Rao, B.S.S. (2015). Radio-modifying potential of *Saraca indica* against ionizing radiation: an in vitro study using Chinese hamster lung fibroblast (V79) cells. *Cell biology international*, 39(9):1061-1072.
- Dasgupta, T., Banerjee, S., Yadava, P.K., & Rao, A.R. (2001). Chemomodulation of carcinogen metabolising enzymes, antioxidant profiles and skin and forestomach papillomagenesis by *Spirulina platensis*. *Molecular and cellular biochemistry*, 226(1-2):27-38.
- Dutta, S., Wadekar, R.R., & Roy, T. (2021). Radioprotective natural products as alternative complements in oncological radiotherapy. *Bol Latinoam Caribe Plant Med Aromat*, 20(2):101-122. Doi:10.37360/blacpma.21.20.2.9
- El-Missiry, M.A., Othman, A.I., El-Sawy, M.R., & Lebede, M.F. (2018). Neuroprotective Effect of Epigallocatechin-3-Gallate (EGCG) on Radiation-Induced Damage and Apoptosis in the Rat Hippocampus. *Int J Radiat Biol*, 94:798–808.
- Emerit, I., Oganessian, N., & Sarkisian, T. (1995b). Clastogenic factors in the plasma of Chernobyl recovery workers: Anticlastogenic effects of Ginkgo biloba extract. *Radiat Res*, 144:198–205.
- Emreit, I., Arutyunyan, R., Oganessian, N., Levy, A., Cernjavsky, L., Sarkisian, T., Pogossian, A., & Asrian, K. (1995a). Radiation- induced clastogenic factors: Anticlastogenic effects of Ginkgo biloba extract. *Free Radic Biol Med*, 18:985-991.
- Fischer, N., Seo, E.J., & Efferth, T. (2018). Prevention from radiation damage by natural products. *Phytomedicine*, 47:192-200.
- Goel, H.C., Arora, R., Shobi, V., & Mathew, T.L. (2000). *A Process for Preparation of a Behavioural Radioprotective Herbal Extract*. Indian Patent filed. New Delhi, India.

- Goel, H.C., Gupta, D., Gupta, S., Garg, A.P., & Bala, M. (2005). Protection of mitochondrial system by *Hippophae rhamnoides* L. against radiation-induced oxidative damage in mice. *J Pharm Pharmacol*, 57:135-143. Doi:10.1211/0022357055218
- Goel, H.C., Kumar, I., & Rana, S.V.S. (2002). Free radical scavenging potential of *Tinospora cordifolia*, a possible role in radioprotection. *Indian J Exp Biol*, 40:727-734.
- Goel, H.C., Prasad, J., Singh, S. (2004b). Radioprotective potential of an herbal extract of *Tinospora cordifolia*. *J Radiat Res*, 45:61-68.
- Goel, H.C., Prasad, J., Singh, S., Sagar, R.K., Agrawala, P.K., Bala, M., Sinha, A.K., & Dogra, R. (2004a). Radioprotective potential of an herbal extract of *Tinospora cordifolia*. *J Radiat Res*, 45:57-64.
- Gupta, S.C., Patchva, S., Koh, W., Aggarwal, B.B. (2012). Discovery of curcumin, a component of golden spice, and its miraculous biological activities. *Clinical and experimental pharmacology & physiology*, 39(3):283-299.
- Hassan, S.A., Rizvi, M.A., & Naeem, A. (2019). Phytoremediation: A Sustainable Approach to Recovering Radioactive Contaminated Sites. *IntechOpen*, 341-356.
- Heggie, S., Bryant, G.P., Tripcony, L., Keller, J., Rose, P., Glendenning, M., & Thompson, J.F. (2002). A phase III study on the efficacy of topical aloe vera gel on irradiated breast tissue. *Cancer nursing*, 25(6):442-451.
- Heim, K.E., Tagliaferro, A.R., & Bobilya, D.J. (2002). Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. *J Nut Biochem*, 13(10):572-584.
- Hosseinimehr, S.J. (2014). The radioprotective effects of curcumin and other herbal antioxidants. *Journal of the Iranian Institute for Health Sciences Research*, 13(1):1-13.
- Hosseinimehr, S.J. (2017). Genomic Instability Induced by Flavonoids and Ionizing Radiation. *Today's Drug Discovery*, 22(2):435-443.
- Hosseinimehr, S.J., Tavakoli, H., Pourheidari, G., Sobhani, A., & Shafiee, A. (2003). Radioprotective effects of citrus extract against gamma-irradiation in mouse bone marrow cells. *J Radiat Res*, 44:237.
- Imran, M., Aslam Gondal, T., Atif, M., Shahbaz, M., Batool Qaisarani, T., Hanif Mughal, M., Salehi, B., Martorell, M., & Sharifi-Rad, J. (2020). *Apigenin as an Anticancer Agent Phytother Res*, 34:1812-1828.

- Islam, B., Suhail, M., Khan, M.K., Zughaibi, T.A., Alserihi, R.F., Zaidi, S.K., & Tabrez, S. (2021). Polyphenols as Anticancer Agents: Toxicological Concern to Healthy Cells. *Phytother Res*, 6063–6079.
- Jagetia, G.C., & Baliga, M.S. (2002a). Influence of the leaf extract of *Mentha arvensis* Linn. (mint) on the survival of mice exposed to different doses of gamma radiation. *Strahlenther Onkol*, 178:91-98. Doi:10.1007/s00066-002-0841-y
- Jagetia, G.C., Baliga, M.S., & Venkatesh, P. (2005b.) Influence of seed extract of *Syzygium cumini* (Jamun) on mice exposed to different doses of gamma-radiation. *J Radiat Res*, 46:59-65. Doi:10.1269/jrr.46.59
- Jagetia, G.C., Baliga, M.S., Venkatesh, P., & Ulloor, J.N. (2003). Influence of ginger rhizome (*Zingiber officinale*) on survival, glutathione and lipid peroxidation in mice after whole-body exposure to gamma radiation. *Radiat Res*, 160:584-592.
- Jagetia, G.C., Venkatesh, P., & Baliga, M.S. (2004). Fruit extract of *Aegle marmelos* protects mice against radiation-induced lethality. *Cancer Ther*, 3:323-332.
- Joy, J., & Nair, C.K. (2009). Protection of DNA and membranes from gamma-radiation induced damages by *Centella asiatica*. *J Pharm Pharmacol*, 61:941-947. Doi:org/10.1211/jpp/61.07.0014
- Keum, Y.S., Park, K.K., Lee, J.M., et al. (2000). Antioxidant and antitumor promoting activities of the methanolic extract of heatprecessed ginseng. *Cancer Lett*, 150:41–48.
- Khedr, M.H., Shafaa, M.W., Abdel-Ghaffar, A., & Saleh, A. (2018). Radioprotective efficacy of *Ginkgo biloba* and *Angelica archangelica* extract against technetium-99m-sestamibi induced oxidative stress and lens injury in rats. *Int J Radiat Biol*, 94:37-44. Doi:10.1080/09553002.2018.1407463
- Kumar, D., Salian, S. R., Kalthur, G., Uppangala, S., Kumari, S., Challapalli, S., ... & Adiga, S. K. (2013). Semen abnormalities, sperm DNA damage and global hypermethylation in health workers occupationally exposed to ionizing radiation. *PloS one*, 8(7), e69927.
- Kumar, M., Samarth, R., Kumar, M., Selvan, S.R., Saharan, B., & Kumar, A. (2007). Protective effect of *Adhatoda vasica* nees against radiation-induced damage at cellular, biochemical and chromosomal levels in Swiss Albino mice. *Evid Based Complement Alternat Med*, 4:343-350. Doi:/10.1093/ecam/nel098

- Kumar, M., Sharma, M.K., Saxena, P.S., & Kumar, A. (2003). Radioprotective effect of Panax ginseng on the phosphatases and lipid peroxidation level in testes of Swiss albino mice. *Biol Pharm Bull*, 26:308-312.
- Kumud, B., & Katare, P.S.D.P. (2014). Current status and future potential of herbal radioprotectants. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3(8):1341-1366.
- Lachumy, S.J., Oon, C.E., Deivanai, S., Saravanan, D., Vijayarathna, S., Choong, Y.S., Yeng, C., Latha, L.Y., & Sasidharan, S. (2013). Herbal Remedies for Combating Irradiation: a Green Anti-irradiation Approach. *Asian Pac J Cancer Prev*, 14(10):5553-5565.
- Lambertini, E.R., Piva, M.T., Khan, I., Lampronti, N., Bianchi, M., & Gambari, R. (2004). Effects of extracts from Bangladeshi medicinal plants on in vitro proliferation of human breast cancer cell lines and expression of estrogen receptor alpha gene. *Int J Oncol*, 24:419-423 Doi:10.3892/ijo.24.2.419
- Lampronti, I.D., Matello, N., Bianchi, M., Borgatti, E., Lambertini, R., Piva, S., Jabbar, M.S., Choudhuri, M.T., & Gambari, R. (2003). *In vitro* antiproliferate effects on human tumor cell lines of extract from the Bangladesh medicinal plant *Aegle marmelos* Correa. *Phytomedicine* 10:300-308. Doi:10.1078/094471103322004794
- Lee, T.K., O'Brien, K.F., Wang, W., Johnke, R.M., Sheng, C., Benhabib, S.M., Wang, T., & Allison, R.R. (2010). Radioprotective Effect of American Ginseng on Human Lymphocytes at 90 Minutes Postirradiation: A Study of 40 Cases. *The Journal Of Alternative And Complementary Medicine* 16(5):561–567. Doi:10.1089=acm.2009.0590
- Li, J., Xu, J., Lu, Y., Qiu, L., Xu, W., Lu, B., Hu, Z., Chu, Z., Chai, Y., & Zhang, J. (2016). A Matrine Derivative, Offers Radioprotection by Modulating Lethal Total-Body Irradiation-Induced Multiple Signaling Pathways in Wistar Rats. *Molecules*, 21:649.
- Li, Q., Wang, D., Bai, D., Cai, C., Li, J., Yan, C., Zhang, S., Wu, Z., Hao, J., Yu, G. (2020). Photoprotective Effect of Astragalus Membranaceus Polysaccharide on UVA-Induced Damage. *PLOS ONE*, 15:e0235515.
- Liu, X., Hao, W., Qin, Y., Decker, Y., Wang, X., Burkart, M., Schötz, K., Menger, M.D., Fassbender, K., & Liu, Y. (2015). Long-term treatment with Ginkgo biloba extract EGb 761 improves symptoms and pathology in a transgenic mouse model of Alzheimer's disease. *Brain Behavior and Immunity*, 46:121-131.

- Liu, Y., Liu, F., Yang, Y., Li, D., Lv, J., Ou, Y., Sun, F., Chen, J., Shi, Y., Xia, P. (2014). Astragalus Polysaccharide Ameliorates Ionizing Radiation-Induced Oxidative Stress in Mice. *Int J Biol Macromol*, 68: 209–214.
- Lukaszewicz, M., Matysiak, W., & Wójcik, M. (2019). *Bitkilerde ultraviyole ve iyonlaştırıcı radyasyon altında DNA hasarı ve onarımı*. Kanser Kök Hücrelerinin DNA Onarımı. *Academic Press*, 169-181.
- Nichols, J.A., & Katiyar, S.K. (2010). Skin protection by natural phenols: anti-inflammatory, antioxidant and DNA repair mechanism. *Arch Dermatol Res*, 71:302.
- Özbakır, O. (2023). Analysis of Reports on the Occupational Health and Safety in the Agricultural Industry: A bibliometrix-Aided Approach. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(4), 2516-2531.
- Pan, Y., Gu, Y., & Gu, X. (2002). Protection of Acanthopanax Senticosus Saponin on Free Radical Injury Induced Aging of Nerve Cell. *Chin J Integr Tradit West Med*, 8:200-203.
- Pathak, R., Shah, S.K., & Hauer-Jensen, M. (2019). Therapeutic Potential of Natural Plant Products and their Metabolites in Preventing Radiation Enteropathy resulting from Abdominal or Pelvic Irradiation. *Int J Radiat Biol*, 95(4):493–505. Doi:10.1080/09553002.2018.1552374
- Paul, P., Bansal, P., Nayak, P. G., Pannakal, S. T., Priyadarsini, K. I., & Unnikrishnan, M. K. (2012). Polyphenolic fraction of *Pilea microphylla* (L.) protects Chinese hamster lung fibroblasts against γ -radiation-induced cytotoxicity and genotoxicity. *Environmental toxicology and pharmacology*, 33(1), 107-119.
- Paul, P., Unnikrishnan, M.K., & Nagappa, A.N. (2011). Phytochemicals as radioprotective agents. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 2(2):137-150.
- Pryor, W.A., & Stone, K. (2012). Sigara Dumanında Oksidanlar: Radikaller, Hidrojen Peroksit, Peroksinitrat ve Peroksinitrit. *New York Bilimler Akademisi Dergisi* 686(1):12-27.
- Rahman, S., & Parvin, R. (2014). Therapeutic potential of *Aegle marmelos* (L.)-An overview. *Asian Pacific Journal of Tropical Disease*, 4(1):71.
- Rahul Dutt, K., Brijesh, N., & Nishteswar, K. (2014). Potentialities of Berberine containing medicinal plants-a review. *International Journal of Pharmacy Review & Research*, 4(2):120-126.

- Rastogi, R.P., & Mehrotra, B.N. (1991). Compendium of Indian Medicinal Plants. Central Drug Research Institute (CDRI) and Publications and Information Directorate. *Council of Scientific and Industrial Research (CSIR)*, 3:420.
- Rice-Evans, C.A., Miller, N.J., & Paganga, G. (1996). Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. *Free Radical Biol Med*, 20(7):933-956.
- Rong, Y., Geng, Z.H., & Lau, B.H.S. (1996b). *Ginkgo biloba* attenuates oxidative stress in macrophages and endothelial cells. *Free Radic Biol Med*, 20:121–127.
- Rong, Y., Geng, Z., & Lau, B.H.S. (1996a). *Ginkgo biloba* modulates glutathione redox cycle in vascular endothelial cells. *Nutr Res*, 16:1913–1923.
- Samarth, R.M., & Kumar, A. (2003). *Mentha piperita* (Linn.) leaf extract provides protection against radiation induced chromosomal damage in bone marrow of mice. *Indian J Exp Biol*, 41:229-237. Doi:10.1269/jrr.07052
- Samarth, R.M., Samarth, M., & Matsumoto, Y. (2017). Medicinally important aromatic plants with radioprotective activity. *Future Sci OA*, 3(4):FSO247.
- Satyavati, G.V., Gupta, K.A., & Tandon, N. (eds) (1987). Medicinal Plants of India, *Indian Council of Medical Research*:354.
- Shahidi, F., & Yeo, J. (2018). Bioactivities of phenolics by focusing on suppression of chronic diseases: A Review. *Int J Mol Sci*, 19:1573. Doi.org/10.3390/ijms19061573
- Sharma, J., Sharma, R. (2002). Radioprotection of Swiss albino mouse by *Centella asiatica* extract. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 16(8):785-786.
- Sharma, S., Singh, H., Ahmad, N., Mishra, M., & Sharma, P. (2017). Flavonoids and their Radioprotective Role: A Comprehensive Review. *Pharmacognosy Reviews*, 11(21):143-156.
- Shin, J.H., Go, Y.J., Jeong, K.S., Park, S.J., Kwak, D.M., Kwon, O.D., Jee, Y.H., Ryu, S.Y., Yang, T., & Kim, Y. (2009). Protective effect of *Ginkgo biloba* against radiation-induced cellular damage in human peripheral lymphocytes and murine spleen cells. *International Journal of Low Radiation*, 6(3): 209-218.
- Shobi, V., & Goel, H.C. (2001). Protection against radiation-induced conditioned taste aversion by *Centella asiatica*. *Physiol Behavior* 73:19–23.

- Singh, I., Sharma, A., Nunia, V., & Goyal, P.K. (2005). Radioprotection of Swiss albino mice by *Emblica officinalis*. *Phytother Res*, 19:444-446. Doi:10.1002/ptr.1600
- Singh, U., Kunwar, A., Srinivasan, R., Nanjan, M.J., & Priyadarsini, K.I. (2009). Differential free radical scavenging activity and radioprotection of *Caesalpinia digyna* extracts and its active constituent. *J Radiat Res*, 50:425-33.
- Stanley, P., Mainzen, P., & Menon, V.P. (1999b). Antioxidant activity of *Tinospora cordifolia* roots in experimental diabetes. *J Ethnopharmacol*, 65:277–281.
- Stanley, P., Mainzen, P., Menon, V.P., & Gunasekaran, G. (1999a). Hypolipidaemic action of *Tinospora cordifolia* roots in alloxan-induced diabetic rats. *J Ethnopharmacol*, 70:9–15.
- Vaid, M., & Katiyar, S.K. (2010). Molecular mechanisms of inhibition of phtocarcinogenesis by silymarin, a phytochemical from milk thistle (*Silybum marianum* L. Gaerth). *Int J Oncol*, 36:1053-60.
- Vinutha, K., Vidya, S.M., Suchetha, N.K., Sanjeev, G., Nagendra, H.G., & Pradeepa, V.C. (2015). Radioprotective activity of *Ficus racemosa* ethanol extract against electron beam induced DNA damage *in vitro*, *in vivo* and *in silico*. *Int J Pharm Pharmaceut Sci*, 7:110-119.
- Vrinda, B., & Uma Devi, P. (2001). Radiation protection of human lymphocyte chromosomes *in vitro* by orientin and vicenin. *Mutat Res*, 498(1-2):39-46.
- Wang, J., Zhang, Y.Y., Cheng, J., Zhang, J.L., & Li, B.S. (2015). Preventive and Therapeutic Effects of Quercetin on Experimental Radiation Induced Lung Injury in Mice. *Asian Pac J Cancer Prev*, 16:2909–2914.
- Xavier, J.R., Chauhan, O.P., & Sharma, R.K. (2022). Natural plant products as promising radio protectors. *Bull Env Pharmacol Life Sci*, 4:261-276.
- Xie, L.W., Cai, S., Zhao, T.S., Li, M., & Tian, Y. (2020). Green Tea Derivative - Epigallocatechin-3-Gallate (EGCG) Confers Protection against Ionizing Radiation-Induced Intestinal Epithelial Cell Death Both *In Vitro* and *In Vivo*. *Free Radic Biol Med*, 161:175–186.
- Yahyapour, R., Shabeeb, D., Cheki, M., Elejo, M.A., Farhood, B., Rezaeyan, A., Amini, P., Fallah, H., & Najafi, M. (2018). Radiation Protection and Mitigation by Natural Antioxidants and Flavo-noids; Implications to Radiotherapy and Radiation Disasters. *Current Molecular Pharmacology*, 11. Doi:10.2174/1874467211666180619125653

- Yamaner Kuzeyli, E. D., & Özbakır, O. (2024). Bibliometric Analysis of Occupational Health and Safety Research in the Construction Industry: Worldwide Trends and Key Focal Points (1990-2023). *Duzce University Journal of Science & Technology*, 12(3).
- Zhang, S., Liu, X., Mei, L., Wang, H., & Fang, F. (2016). Epigallocatechin-3-Gallate (EGCG) Inhibits Imiquimod-Induced Psoriasis-like Inflammation of BALB/c Mice. *BMC Complement. Altern Med* 16:334.
- Zhang, Y., Huang, Y., Li, Z., Wu, H., Zou, B., & Xu, Y. (2023). Exploring Natural Products as Radioprotective Agents for Cancer Therapy: Mechanisms, Challenges, and Opportunities. *Cancers*, 15:3585. Doi:10.3390/cancers15143585
- Zhao, L.M., Jia, Y.L., Ma, M., Duan, Y.Q., Liu, L.H. (2015). Prevention Effects of Schisandra Polysaccharide on Radiation-Induced Immune System Dysfunction. *Int J Biol Macromol*, 76:63–69.

BÖLÜM 6

Radyoaktif Maddelerin Biyokimyasal Parametrelere Etkileri

Abdülmelik ARAS¹

GİRİŞ

Radyoaktif maddelere maruz kalmanın vücut üzerindeki biyokimyasal parametreler üzerinde çeşitli etkileri olabilir. Bu etkiler, radyasyonun türü, dozu, maruz kalma süresi ve etkilenen spesifik organ veya dokulara bağlı olarak değişiklik gösterebilir. İyonlaştırıcı olmayan ve iyonlaştırıcı radyasyon olmak üzere iki ana türde görülür (Møller & Mousseau, 2013).

İnsan hücreleri radyasyonla serbest radikaller üreterek DNA, lipidler, proteinler ve karbonhidratlar gibi makromoleküllerde hasara yol açabilir (Khorrami & Riahi-Zanjani, 2015).

Radyant enerji türleri, elektromanyetik enerji dalgaları olarak röntgen ve gama ışınları veya kütleli parçacıklar olarak alfa ve beta parçacıkları, protonlar ve nötronlar şeklinde sınıflandırılır. Alfa parçacıkları, helyum atomunun çekirdeğidir ve iki birim pozitif yüke ve dört birim kütleyle sahiptir. Beta parçacıkları (elektronlar) ise bir negatif yüke ve 1/1840 birim kütleyle sahiptir. Protonlar, hidrojen çekirdeğinin bileşeni olarak bir birim pozitif yüke ve bir birim kütleyle sahiptir. Nötronlar ise atom çekirdeklerinin bir bileşeni olup yüksüz ve bir birim kütleyle sahiptir. Pozitron emisyonu ise bir pozitif yüke sahip olup elektronlarla aynı kütleyle sahiptir ancak zıt yüke sahiptir.

Kararsız bir atom çekirdeği, enerjisini alfa parçacığı, elektron, proton, nötron veya gama ışını gibi enerji formları veya bu formların bir kombinasyonu şeklinde salarak daha kararlı bir duruma geçebilir. Bu radyasyona maruz kalan materyaller, enerji kuantaları (kütlesiz) ve kütlesi olan partiküllerle bombardımana tutulmuş olarak düşünülebilir. İnsan, hayvan veya bitki hücreleri, bu çeşitli radyant enerji türlerinden zarar görebilir. Zararın türü ve derecesi, radyasyonun fiziksel özelliklerine, yoğunluğuna, maruz kalma

¹ Doç. Dr. Abdülmelik Aras İĞDIR ÜNİVERSİTESİ, FEN EDEBİYAT FAKÜLTESİ,
abdulmelik.aras@igdir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-7711-3298

süresine ve hedeflenen hücrelerin özelliklerine bağlı olarak değişir (Lawrence et al., 1948).

Radyasyona maruz kalan kişiler için uygun kişisel koruyucu ekipmanların kullanılması, periyodik tıbbi gözetim yapılması ve radyasyon koruma ve güvenlik üzerine araştırma projelerinin yürütülmesi gerekmektedir, bu da geri dönüşü olmayan hasarları önlemeye yardımcı olabilir.

6.1. Hematolojik Etkiler

6.1.1. Kan Hücreleri Sayımındaki Değişiklikler

İyonlaştırıcı radyasyon teknolojisinin tıbbi uygulamaları günümüzde yaygınlaşmaktadır ve bu durum sağlık çalışanlarının teşhis, tedavi veya ameliyat sırasında X-ışınları veya γ -ışınlarına maruz kalmasına yol açmaktadır. Bu, 100 mSv veya daha az olan düşük doz radyasyon ve saatlik olarak 6 mSv veya daha az maruziyet anlamına gelir (Valentin, 2007). Radyasyon epidemiyolojisi çalışmaları, LDR'nin radyasyon çalışanlarının sağlığı üzerinde belirli etkilere sahip olabileceğini göstermiştir. Bu etkiler arasında radyasyon kaynaklı katarakt, kardiyovasküler hastalıklar ve ruh sağlığı sorunları bulunmaktadır (Chen et al., 2019; Kadhim et al., 2013; Tang & Loganovsky, 2018). Radyasyona maruz kalma, kan hücreleri üzerinde çeşitli etkilere neden olabilir. Lenfosit alt popülasyonları, iyonlaştırıcı radyasyona karşı farklı duyarlılıklar gösterebilir. Örneğin, B hücrelerinin genellikle T hücrelerinden daha radyosensitif olduğu düşünülmektedir (Anderson et al., 1977; Prosser, 1976; Van Rensburg et al., 1985). Bu bulgular, lenfosit kültürleri içindeki apoptozisin radyosensitivitelerle ilişkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, T hücreleri alt popülasyonları içinde de radyosensitivitenin farklılık gösterebileceği gösterilmiştir (Kwan & Norman, 1977), baskılayıcı T hücrelerinin yardımcı T hücrelerinden daha radyosensitif olduğu görülmüştür (Wilkins et al., 2002). Radyasyonun periferik kan lenfositleri üzerindeki genetik (Hristova et al., 2013; Qian et al., 2016) ve immünolojik (Fardid et al., 2019; Gyuleva et al., 2018; Yang et al., 2014) etkilerine odaklanmıştır.

Radyasyonun periferik kan lenfositleri üzerindeki genetik ve immünolojik etkileri üzerine yapılan araştırmalar, kromozom aberasyonu ve mikronükleus analizlerinin sıkça kullanıldığını göstermektedir (Bi et al., 2019). Bununla birlikte, LDR'nin radyasyon işçilerinin sağlığı üzerindeki etkileri hala tam olarak anlaşılabilir değildir. Bu nedenle, radyasyon işçilerinin sağlık takibinde hem lenfositlerin hem de kırmızı kan hücrelerinin durumunun izlenmesi gereklidir.

Kırmızı kan hücreleri, insanlarda ve hayvanlarda birçok biyolojik süreçte önemli bir rol oynar ve bazı durumlarda radyasyon işçilerinde anormal değişikliklere işaret edebilir (Tian et al., 2022). Özellikle hastane çalışanları, işleri sırasında maruz mesleki kazalar ve tehlikelere maruz kalır (Özbakır, 2024).

6.1.2. Değişen Hematopoez

Radyasyon, kemik iliğinde kan hücrelerinin üretildiği süreç olan hematopoez üzerinde etkili olabilir, bu da kan hücrelerinin normal dengesinde bozulmalara neden olabilir. Radyasyonun canlı hücreler üzerinde potansiyel etkileri vardır ve serbest radikal mekanizması aracılığıyla sitotoksositeye yol açabilir (Khorrami & Riahi-Zanjani, 2015) yol açar (Khorrami & Riahi-Zanjani, 2015). Normal fizyolojik koşullarda, serbest radikal oluşumu ile antioksidan kapasite arasında bir denge bulunmaktadır (KALAM et al., 2007). Ancak, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma sonucu bu denge bozulabilir ve oksidatif stres oluşabilir (Chakraborty et al., 2009; KALAM et al., 2007). Bu nedenle, pro-oksidan üretimi ile antioksidan savunma arasındaki denge, hücrel homeostazın korunması açısından son derece önemlidir (Hughes, 1999). İyonlaştırıcı radyasyona uzun süreli maruz kalma, oksidan/antioksidan dengesini oksidan yönüne kaydırabilir ve çeşitli olumsuz sağlık etkilerine yol açabilir. İyonlaştırıcı radyasyona karşı en savunmasız dokulardan biri, kemik iliğidir; bu durum, iliğin çoğalma aktivitesinin ve göreceli DNA onarım kapasitesinin sınırlı olmasıyla ilişkilidir (Bruce et al., 1966). rombosit büyük oranı (P-LCR), trombosit uyarım seviyesi veya trombosit üretim oranındaki değişiklikleri yansıtan bir ölçümdür (J. Bancroft, 2000). Trombosit dağılım genişliği (PDW), dolaşımdaki trombosit hacmindeki heterojenliği ölçen bir parametredir ve trombosit devir hızını veya aktivasyonunu yansıtabilir (Qayyum et al., 2012). Kemik iliğinin iyonlaştırıcı radyasyona karşı hassasiyeti göz önüne alındığında, radyoloji personelinin yüksek PDW ve PLCR seviyeleri, radyasyonun trombosit progenitör hücreleri üzerindeki olumsuz etkileriyle ilişkili olabilir (Weiss, 2003). Meo ve meslektaşlarının yaptığı bir çalışmada, radyasyona maruz kalan çalışanlar arasında trombosit sayısında azalma gözlenirken, diğer hematolojik endekslerde önemli bir değişiklik saptanmamıştır, bu da radyasyonun spesifik etkilerine işaret edebilir (Meo et al., 2002). Ayrıca, Rozgaj ve ekibinin çalışması, mesleki radyasyon maruziyetinin kromozom aberasyon sıklığında artışa neden olduğunu göstermiştir, bu da radyasyonun genetik düzeydeki etkilerine dikkat çekmektedir (Rozgaj et al., 1999). Wagner ve meslektaşlarının yaptığı in vitro

çalışmada, iyonlaştırıcı radyasyonun olgun lökositler üzerinde fosfataz aktivitesi üzerinde toksik bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir (Wagner et al., 1957). Bu bulgu, radyasyonun hücresel düzeydeki etkilerini anlamamıza yardımcı olmaktadır. Ancak, yüksek doz iyonlaştırıcı radyasyonun genel olarak zararlı etkileri iyi bilinmektedir (Jha & Sharma, 1991). Kemik iliği, hücre kök alt parçalarının (veya kemik iliği mikroçevresindeki diğer hücre tiplerinin) radyasyona karşı seçici olarak dirençli olduğu bildirilmiştir (Cronkite et al., 1993; Down et al., 1991). Grande ve meslektaşları tarafından yapılan bir çalışmada, 17 günlük fetüslerin ve 12 haftalık yetişkin farelerin 1-3 Gy dozlarında ışınlanmasının, lenfohematopoietik kemik iliği hücrelerinin çoğalma kapasitesini bozduğu gözlemlenmiştir (Grande et al., 2000). Ayrıca, radyasyona maruz kalmış (7 Gy) farelerden alınan kemik iliğinin, radyasyona maruz kalmamış farelerin böbrek kapsülünün altına taşındığı ektopik bir transplantasyon modelini kullanan Grande ve Bueren, stromal hücrelerin kök hücre çoğalmasını destekleme kapasitesinde uzun vadeli (bir yıl boyunca) hasarın iyonlaştırıcı radyasyona maruziyetten kaynaklandığını öne sürmüşlerdir (Dainiak, 2002; Grande & Bueren, 1994).

6.2. İmmünolojik Etkiler

6.2.1. Bağışıklık Sisteminin Baskılanması

Bu durum, immünooglobulin seviyelerinde, T hücresi sayımlarında ve diğer bağışıklık parametrelerinde değişikliklere neden olabilir. Kronik radyasyon maruziyetinin sağlık üzerinde önemli sonuçları vardır ve birçok çalışma, immünoloji, mutasyon ve hastalık sıklığı üzerinde olumsuz etkiler olduğunu göstermektedir.

Bitkiler üzerindeki etkilerin hayvanlardan daha güçlü ve daha geniş boyutlarda olduğu gösterilmiştir. Radyasyona direnç konusundaki çalışmalar, özellikle bakteriler ve mantarlarda yaygın olmakla birlikte, meyve sinekleri ve fareler de dahil olmak üzere Metazoa'da da radyo direncine dair kanıtlar sunmaktadır. Radyo direncinin kapsamı, farklı taksonlar arasında değişiklik gösterir. (Møller & Mousseau, 2013). İncelenen bulgular arasında antioksidan seviyelerinin azalması, bağışıklık tepkilerinin zayıflaması ve hastalık sıklığının artması yer almaktadır. Radyasyona maruz kalan kişilerde antioksidan seviyelerinin baskılanması, özellikle radyasyon kazalarında olduğu gibi rapor edilmiştir (Nesterenko & Nesterenko, 2009). Yüksek arka plan radyasyon seviyelerine maruz kalmanın hastalık insidansının artmasına yol açması, artan

mutasyon oranlarından ziyade radyasyonun bağışıklık sistemi üzerindeki etkilerinden kaynaklanabileceğini düşündürmektedir (Attar et al., 2007). Potansiyel olarak kanser riski de yüksek arka plan radyasyon seviyeleriyle ilişkilendirilmiştir (Tao et al., 2000).

6.2.2. Enfeksiyonlara Karşı Artan Duyarlılık

Zayıflamış bağışıklık fonksiyonu, enfeksiyon riskinde artışa ve etkili bir bağışıklık tepkisi oluşturmada zorluklara neden olabilir. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldıktan sonra enfeksiyonların ölümcül sonuçlara yol açtığı gözlemlenmiştir. Veriler, test edilen duyarlı hayvan türlerinin çeşitliliğini ve enfeksiyon etkenlerinin çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Radyasyon ışınlamalarından sonra artan duyarlılık, sadece patojenik bakteriyel, viral, fungal, riketsiyal, helmantik ve protozoal etkenlere değil, aynı zamanda normalde zararsız olan *Escherichia coli* ve *Proteus spp.* gibi gastrointestinal sistemin yaygın sakinlerine karşı da gözlemlenmiştir. Bu organizmalar, radyasyona maruz kalmış konakçılarda patojenik hale gelerek ölümcül enfeksiyonlara neden olabilirler. Genellikle, duyarlılık tek bir radyasyon dozuna maruz kalındıktan sonra belirlenir (Shechmeister, 1954). Çok yakın zamanda radyasyonun mikroorganizmaların kendileri üzerinde olası doğrudan bir etkisinin olduğunu ve bunun da ölümlerine yol açtığını ortaya konmuştur (Møller et al., 2005). 1970'lerde yapılan bir öncü keşif, UV radyasyonunun ilk olarak farelerde bir tümör modelinde gösterilen immünosupresyona neden olabileceğiydi (Fisher & Kripke, 2002).

UV radyasyonu ve bir antijene maruz kalmanın ardından, hücre aracılı bağışıklık tepkisi karmaşık bir süreci başlatır ve o antijene karşı bastırılabilir. UV radyasyonu ve antijen maruziyeti sonrasında, epidermal Langerhans hücrelerinin sayısında azalma görülür ve antijen sunma yetenekleri azalır. Dendritik hücreler, ışınlanmış bölgeyi boşaltan lenf düğümlerinde birikmeye başlar ve daha sonra bu hücreler ile makrofajlar maruz kalan cilt bölgesine göç eder. Ayrıca, birçok yapışma ve yardımcı uyarıcı molekülün ifadesi değişir ve T hücrelerine antijen sunumunda değişiklikler meydana gelir. Biyolojik risk faktörleri arasında virüs, bakteri, mantar ve parazit gibi biyolojik ajanlar olup solunum, cilt teması ve göz teması yoluyla vücuda girebilir (Özbakır, 2023).

6.3. Organlardaki Biyokimyasal Değişiklikler

6.3.1. Karaciğer Fonksiyon Bozukluğu

Radyasyona maruz kalma, karaciğerde çeşitli biyokimyasal parametreler üzerinde etkiler gösterebilir ve karaciğer hasarına yol açabilir. Karaciğer kanseri tedavisinde radyoterapi sırasında, özellikle karaciğerin yakın çevresinde bulunan tümörler için yüksek dozda radyasyon uygulanması gerekebilir. Ancak bu durum, radyasyonun karaciğerde sağlıklı dokular üzerindeki etkileri nedeniyle sınırlıdır (Benson et al., 2016). Radyasyon kaynaklı karaciğer hastalığı, genellikle karaciğer kanseri tedavisindeki önemli bir kısıtlama olarak karşımıza çıkar. Özellikle radyoterapinin neden olduğu karaciğer hasarı, hastaların tedaviye olan yanıtını ve sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebilir (Guha & Kavanagh, 2011). Bu hücreler, karaciğer fibrozisini teşvik eden ve radyasyon maruziyeti sırasında karaciğerin yapısını ve işlevini bozan çeşitli maddeler salgılar (Yamanouchi et al., 2009). Bu nedenle, radyasyona bağlı karaciğer hastalığının patofizyolojik mekanizmalarının ayrıntılı olarak incelenmesi, hem hastalığın ilerlemesini önlemek hem de radyoterapinin tedavi etkinliğini artırmak ve sonuç olarak genel yaşam kalitesini iyileştirmek için kritik öneme sahiptir (Kim & Jung, 2017).

6.3.2. Böbrek Fonksiyon Bozukluğu

Böbrekler ve idrar sistemi, organizmanın homeostazını sağlamak için hayati öneme sahip çeşitli düzenleyici işlevleri yerine getirir. Böbreklerin başlıca işlevleri arasında metabolik atıkların ve ksenobiyotiklerin atılmasıyla detoksifikasyon, elektrolit konsantrasyonlarının düzenlenmesi, su içeriğinin ve osmotik basıncın korunması, asit-baz ve pH dengesinin sağlanması, ayrıca bazı hormonların üretimi bulunur. Bu nedenle, böbrek işlev bozuklukları, akut veya kronik böbrek yetmezliği olarak kendini gösterebilir ve bireyin genel sağlık durumunu ciddi şekilde etkileyerek ölüme neden olabilir (Guéguen & Frerejacques, 2022). Radyasyona maruz kalma sağlıklı organlara zarar verebilir. Radyoterapinin yan etkileri arasında tekrarlama riski, ikincil kanser oluşumu ve normal doku hasarı bulunmaktadır. Bu durumlar, kanserli hastaların tedavi sürecinde karşılaştıkları önemli klinik sorunlardır (Kim et al., 2021). Bu süreçler, hücrelerde genetik materyalde (DNA) zarara yol açabilir ve biyolojik sistemlerde çeşitli patolojik etkilere sebep olabilir (Wei et al., 2019). ROS'un antioksidanlardan daha ağır bastığı durumlarda oksidatif stres oluşabilir. Bu reaktif oksijen türleri, hücresel lipitler, proteinler ve DNA gibi

makromoleküllere zarar verebilir (Lord & Ashworth, 2012). Radyasyon tedavisi, tümör büyümesini kontrol etmede ve genel sağ kalımı uzatmada etkili olmakla birlikte, radyasyonun uygulandığı sağlıklı dokular üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir. Radyoterapide en büyük zorluklardan biri, sadece kanserli dokuya seçici olarak etki etmektir (Schaue & McBride, 2015). Sağlıklı doku toksisitesi, uygulanan radyoterapi dozlarını sınırlar ve bu da tümör kontrolünü optimum düzeyde tutmada zorluk yaratabilir. Ayrıca, kemoterapi ile kombinasyon, normal dokular üzerindeki toksisiteyi artırabilir ve dolayısıyla tolere edilebilir maksimum dozun daha da azalmasına neden olabilir (De Ruyscher et al., 2019). Bunun yanı sıra, böbrekler radyasyona karşı duyarlı ve tedavi sırasında doz sınırlayıcı organlardır (Dawson et al., 2010). Kemoterapiye kıyasla daha az yaygın olmasına rağmen, radyasyon nefropatisi radyoterapinin geri dönüşü olmayan geç bir sonucu olarak ortaya çıkabilir (Cohen & Robbins, 2003).

6.4. Genetik ve Moleküler Etkiler

6.4.1. DNA Hasarı

Radyasyon, hücre içindeki DNA'ya zarar vererek genetik mutasyonlara neden olabilir. Bu, DNA hasarı ve onarımı ile ilişkili moleküler ve hücreyel biyobelirteçlerde değişikliklere yol açabilir. İyonlaştırıcı radyasyon, çeşitli kanser türlerini tedavi etmek için temel bir yöntem olarak kullanılır (Liauw et al., 2013). Radyasyonun ana hedefi, genetik materyal olan deoksiribonükleik asit (DNA)'dır (Willers et al., 2004; Zhang et al., 2022). Radyasyonun DNA ile etkileşimi ve hasarlı molekülün daha sonraki işlenmesi üzerine önemli çalışmalar yapılmıştır (Powell & McMillan, 1990). İyonlaştırıcı radyasyon, DNA'da doğrudan çift sarmallı kırılmalar oluşturur ve ayrıca reaktif oksijen türlerinin üretimi yoluyla dolaylı olarak kırıklara neden olabilir. Bu hasarlı hücreler, onarılmazsa apoptoz, mitotik felaket ve otofaji gibi çeşitli hücreyel ölüm biçimlerine maruz kalabilir (Philchenkov, 2018). Öldürücü DNA hasarı üretme yeteneğiyle birlikte, iyonlaştırıcı radyasyon aynı zamanda antitümör bağışıklık tepkilerini kolaylaştırmak için güçlü bir araç olarak kabul edilmektedir (Walle et al., 2018).

6.4.2. Oksidatif Stres

Zararlı iyonlaştırıcı radyasyonun etki mekanizması, ışınlanmış dokularda artan oksidatif stresle güçlü bir şekilde ilişkilidir (Buonanno et al., 2011). Bu durum, antioksidan enzim aktivitelerinde ve oksidatif stres belirteçlerinde

gözlemlenen değişikliklerle ortaya çıkabilir. Ayrıca, suyun radyolizi sonucunda oluşan reaktif kimyasal türler, nükleik asitler, proteinler ve lipidler gibi biyomoleküllere zarar verebilir (Hall, 2006). Radyasyonun doğrudan ve dolaylı etkileri bir arada, hücrelerde biyokimyasal ve moleküler sinyal olaylarını başlatarak, hasarı onarabilecek veya kalıcı fizyolojik değişikliklere ve hücre ölümüne neden olabilir (Spitz et al., 2004). Hücrelerin yüksek su içeriği nedeniyle, iyonlaştırıcı radyasyonun su moleküllerinin radyoliziyle başlayan işlem, reaktif oksijen türlerinin (ROS) artan oluşumuna önemli katkıda bulunur (Cui et al., 2019). Bu tür destekleyici terapilerde değerlendirilen maddeler, aşırı oksidatif strese karşı etkili bir koruma sağlamalıdır (Nuszkiewicz et al., 2020).

6.5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, iyonlaştırıcı radyasyonun oksidatif stresin bir indükleyicisi olarak birçok hastalığın patogenezi ve seyri üzerinde önemli bir rol oynadığına dikkat çekiyor. Radyasyonun etkileri, sadece tıbbi prosedürler sırasında kullanılan IR ile sınırlı kalmaz; aynı zamanda organizmanın güneş ışığına ve çevresel arka plan radyasyonuna maruz kaldığı durumlarda da ortaya çıkar. Akut yüksek doza maruz kalma, kronik veya düşük doza maruz kalmayla karşılaştırıldığında farklı etkilere yol açabilir. Ayrıca vücudun radyasyon hasarını onarma ve iyileştirme yeteneği, biyokimyasal parametreler üzerindeki genel etkide rol oynar.

Biyokimyasal parametrelerin izlenmesi ve değerlendirilmesi, radyasyona maruz kalan kişiler için tıbbi gözetimin temel bileşenleridir. Sağlık uzmanları bu parametreleri radyasyon hasarının boyutunu değerlendirmek ve uygun tıbbi müdahalelere rehberlik etmek için kullanır. Maruziyetin en aza indirilmesi ve güvenlik protokollerine bağlı kalınması da dahil olmak üzere koruma ve güvenlik önlemleri, radyasyona maruz kalmanın olumsuz etkilerini önlemek veya azaltmak için çok önemlidir.

Beyan: Yazar bu çalışmanın hazırlanması sırasında metnin düzenlenmesi amacıyla yapay zeka (ChatGPT) kullanmıştır. Bu aracı/hizmeti kullandıktan sonra, yazar içeriği gerektiği gibi gözden geçirmiş ve düzenlemiş ve yayın içeriğinin tüm sorumluluğunu üstlenmiştir.

Kaynakça

- Anderson, R. E., Olson, G. B., Autry, J. R., Howarth, J. L., Troup, G. M., & Bartels, P. H. (1977). Radiosensitivity of T and B Lymphocytes: IV. Effect of Whole Body Irradiation Upon Various Lymphoid Tissues and Numbers of Recirculating Lymphocytes. *Journal of Immunology*, *118*(4), 1191-1200.
- Attar, M., Molaie, K. Y., & KHANSARI, N. E. (2007). Effect of high dose natural ionizing radiation on the immune system of the exposed residents of Ramsar Town, Iran.
- Benson, R., Madan, R., Kilambi, R., & Chander, S. (2016). Radiation induced liver disease: a clinical update. *Journal of the Egyptian National Cancer Institute*, *28*(1), 7-11.
- Bi, J., Dai, H., Feng, J., Bian, H., Chen, W., Wang, Y., Liu, Y., & Huang, Y. (2019). Rapid and high-throughput detection of peripheral blood chromosome aberrations in radiation workers. *Dose-Response*, *17*(2), 1559325819840852.
- Bruce, W., Meeker, B., & Valeriote, F. (1966). Comparison of the sensitivity of normal hematopoietic and transplanted lymphoma colony-forming cells to chemotherapeutic agents administered in vivo. *Journal of the National Cancer Institute*, *37*(2), 233-245.
- Buonanno, M., De Toledo, S. M., Pain, D., & Azzam, E. I. (2011). Long-term consequences of radiation-induced bystander effects depend on radiation quality and dose and correlate with oxidative stress. *Radiation Research*, *175*(4), 405-415.
- Chakraborty, S., Singh, O. P., Dasgupta, A., Mandal, N., & Das, H. N. (2009). Correlation between lipid peroxidation-induced TBARS level and disease severity in obsessive-compulsive disorder. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, *33*(2), 363-366.
- Chen, B., Dai, Q., Zhang, Q., Yan, P., Wang, A., Qu, L., Jin, Y., & Zhang, D. (2019). The relationship among occupational irradiation, DNA methylation status, and oxidative damage in interventional physicians. *Medicine*, *98*(39), e17373.
- Cohen, E. P., & Robbins, M. E. (2003). Radiation nephropathy. *Seminars in nephrology*,
- Cronkite, E., Inoue, T., Hirabayashi, Y., & Bullis, J. (1993). Are stem cells exposed to ionizing radiation in vivo as effective as nonirradiated transfused stem cells in restoring hematopoiesis? *Experimental hematology*, *21*(6), 823-825.

- Cui, F., Ma, N., Han, X., Chen, N., Xi, Y., Yuan, W., Xu, Y., Han, J., Xu, X., & Tu, Y. (2019). Effects of ^{60}Co γ irradiation on the reproductive function of *Caenorhabditis elegans*. *Dose-Response*, *17*(1), 1559325818820981.
- Dainiak, N. (2002). Hematologic consequences of exposure to ionizing radiation. *Experimental hematology*, *30*(6), 513-528.
- Dawson, L. A., Kavanagh, B. D., Paulino, A. C., Das, S. K., Miften, M., Li, X. A., Pan, C., Ten Haken, R. K., & Schultheiss, T. E. (2010). Radiation-associated kidney injury. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*, *76*(3), S108-S115.
- De Ruyscher, D., Niedermann, G., Burnet, N. G., Siva, S., Lee, A. W., & Hegi-Johnson, F. (2019). Radiotherapy toxicity. *Nature Reviews Disease Primers*, *5*(1), 13.
- Down, J., Vanos, R., & Ploemacher, R. (1991). Radiation Sensitivity and Repair of Long-Term Repopulating Bone-Marrow Stem-Cells. *Experimental hematology*,
- Fardid, R., Ghahramani, P., Mosleh-Shirazi, M.-A., Kalantari, T., Behzad-Behbahani, A., Kazemi, E., & Okhovat, M.-A. (2019). Expression of transforming growth factor-beta and interferon gamma biomarkers after whole body gamma irradiation. *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, *15*(Suppl 1), S135-S139.
- Fisher, M. S., & Kripke, M. L. (2002). Systemic alteration induced in mice by ultraviolet light irradiation and its relationship to ultraviolet carcinogenesis. *Bulletin of The World Health Organization*, *80*, 908-912.
- Grande, T., & Bueren, J. (1994). Involvement of the bone marrow stroma in the residual hematopoietic damage induced by irradiation of adult and young mice. *Experimental hematology*, *22*(13), 1283-1287.
- Grande, T., Varas, F., & Bueren, J. A. (2000). Residual damage of lymphohematopoietic repopulating cells after irradiation of mice at different stages of development. *Experimental hematology*, *28*(1), 87-95.
- Guéguen, Y., & Frerejacques, M. (2022). Review of knowledge of uranium-induced kidney toxicity for the development of an adverse outcome pathway to renal impairment. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(8), 4397.
- Guha, C., & Kavanagh, B. D. (2011). Hepatic radiation toxicity: avoidance and amelioration. *Seminars in radiation oncology*,

- Gyuleva, I., Djounova, J., & Rupova, I. (2018). Impact of low-dose occupational exposure to ionizing radiation on T-Cell populations and subpopulations and humoral factors included in the immune response. *Dose-Response*, *16*(3), 1559325818785564.
- Hall, E. (2006). Radiobiology for the Radiologist. In: Lippincott Williams & Wilkins.
- Hristova, R., Hadjidekova, V., Grigorova, M., Nikolova, T., Bulanova, M., Popova, L., Staynova, A., & Benova, D. (2013). Chromosome analysis of nuclear power plant workers using fluorescence in situ hybridization and Giemsa assay. *Journal of Radiation Research*, *54*(5), 832-839.
- Hughes, D. A. (1999). Effects of dietary antioxidants on the immune function of middle-aged adults. *Proceedings of the Nutrition Society*, *58*(1), 79-84.
- J. Bancroft, E. A., M. McLaren, JF Belch, A. (2000). Mean platelet volume is a useful parameter: a reproducible routine method using a modified Coulter thrombocytometer. *Platelets*, *11*(7), 379-387.
- Jha, A., & Sharma, T. (1991). Enhanced frequency of chromosome aberrations in workers occupationally exposed to diagnostic X-rays. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, *260*(4), 343-348.
- Kadhim, M., Salomaa, S., Wright, E., Hildebrandt, G., Belyakov, O. V., Prise, K. M., & Little, M. P. (2013). Non-targeted effects of ionising radiation—implications for low dose risk. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, *752*(2), 84-98.
- KALAM, Z. A., KEYHANI, A., Hajati, J., NOURAEI, M., Latifinia, A., ZAKERI, F., & KHANSARI, N. E. (2007). Total plasma level of antioxidant and immune system function in radiology and nuclear medicine staff.
- Khorrani, M., & Riahi-Zanjani, B. (2015). Hematological profile of healthy workers exposed to low dose radiation. *Archives*, *2*, 138-141.
- Kim, D. Y., Lee, M., & Kim, E. J. (2021). Involvement of Klotho, TNF- α and ADAMs in radiation-induced senescence of renal epithelial cells. *Molecular Medicine Reports*, *23*(1), 1-1.
- Kim, J., & Jung, Y. (2017). Radiation-induced liver disease: current understanding and future perspectives. *Experimental & molecular medicine*, *49*(7), e359-e359.
- Kwan, D. K., & Norman, A. (1977). Radiosensitivity of human lymphocytes and thymocytes. *Radiation Research*, *69*(1), 143-151.
- Lawrence, J. S., Dowdy, A. H., & Valentine, W. N. (1948). Effects of radiation on hemopoiesis. *Radiology*, *51*(3), 400-413.

- Liauw, S. L., Connell, P. P., & Weichselbaum, R. R. (2013). New paradigms and future challenges in radiation oncology: an update of biological targets and technology. *Science translational medicine*, 5(173), 173sr172-173sr172.
- Lord, C. J., & Ashworth, A. (2012). The DNA damage response and cancer therapy. *Nature*, 481(7381), 287-294.
- Meo, S. A., Azeem, M. A., Arian, S. A., & Subhan, M. M. (2002). Hematological changes in cement mill workers. *Saudi medical journal*, 23(11), 1386-1389.
- Møller, A. P., & Mousseau, T. A. (2013). The effects of natural variation in background radioactivity on humans, animals and other organisms. *Biological Reviews*, 88(1), 226-254.
- Møller, K. I., Kongshoj, B., Philipsen, P. A., Thomsen, V. O., & Wulf, H. C. (2005). How Finsen's light cured lupus vulgaris. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 21(3), 118-124.
- Nesterenko, A. V., & Nesterenko, V. B. (2009). *Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for People and the Environment*. Blackwell Pub.
- Nuszkiewicz, J., Woźniak, A., & Szewczyk-Golec, K. (2020). Ionizing radiation as a source of oxidative stress—the protective role of melatonin and vitamin D. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(16), 5804.
- Özbakır, O. (2023). Occupational Health and Safety Risk Assessment and Mitigation in Chemistry Laboratories: A Case Study of Iğdır University. *Şırnak Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 1-20.
- Özbakır, O. (2024). Enhancing Healthcare Worker Well-Being and Patient Safety in the Pediatric Emergency Department: A Comprehensive Hazard and Risk Analysis. *The Journal of International Scientific Researches*, 9(1), 35-49.
- Philchenkov, A. (2018). Radiation-induced cell death: signaling and pharmacological modulation. *Critical Reviews™ in Oncogenesis*, 23(1-2).
- Powell, S., & McMillan, T. (1990). DNA damage and repair following treatment with ionizing radiation. *Radiotherapy and Oncology*, 19(2), 95-108.
- Prosser, J. S. (1976). Survival of human T and B lymphocytes after X-irradiation. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*, 30(5), 459-465.
- Qayyum, R., Becker, D. M., Yanek, L. R., Mathias, R., Vaidya, D., Kral, B. G., Moy, T. F., & Becker, L. C. (2012). Genome-wide association study identifies two loci associated with platelet distribution width in healthy adults. In: Am Heart Assoc.

- Qian, Q.-Z., Cao, X.-K., Shen, F.-H., & Wang, Q. (2016). Effects of ionising radiation on micronucleus formation and chromosomal aberrations in Chinese radiation workers. *Radiation protection dosimetry*, 168(2), 197-203.
- Rozgaj, R., Kašuba, V., Šentija, K., & Prlić, I. (1999). Radiation-induced chromosomal aberrations and haematological alterations in hospital workers. *Occupational Medicine*, 49(6), 353-360.
- Schaue, D., & McBride, W. H. (2015). Opportunities and challenges of radiotherapy for treating cancer. *Nature reviews Clinical oncology*, 12(9), 527-540.
- Shechmeister, I. (1954). Susceptibility of irradiated animals to infection. *Radiation Research*, 1(5), 401-409.
- Spitz, D. R., Azzam, E. I., Jian Li, J., & Gius, D. (2004). Metabolic oxidation/reduction reactions and cellular responses to ionizing radiation: a unifying concept in stress response biology. *Cancer and Metastasis Reviews*, 23, 311-322.
- Tang, F. R., & Loganovsky, K. (2018). Low dose or low dose rate ionizing radiation-induced health effect in the human. *Journal of Environmental Radioactivity*, 192, 32-47.
- Tao, Z., Zha, Y., Akiba, S., Sun, Q., Zou, J., Li, J., Liu, Y., Kato, H., Sugahara, T., & Wei, L. (2000). Cancer mortality in the high background radiation areas of Yangjiang, China during the period between 1979 and 1995. *Journal of Radiation Research*, 41(Suppl), S31-S41.
- Tian, X.-L., Lu, X., Lyu, Y.-M., Zhao, H., Liu, Q.-J., & Tian, M. (2022). Analysis of red blood cells and their components in medical workers with occupational exposure to low-dose ionizing radiation. *Dose-Response*, 20(1), 15593258221081373.
- Valentin, J. (2007). *The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection* (Vol. 37). Elsevier Oxford.
- Van Rensburg, E. J., Louw, W., Izatt, H., & Van Der Watt, J. (1985). DNA supercoiled domains and radiosensitivity of subpopulations of human peripheral blood lymphocytes. *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*, 47(6), 673-679.
- Wagner, R., Meyerricks, N., & Berman, C. Z. (1957). In vitro effects of X-radiation on white blood cells and blood platelets. *Blood*, 12(8), 733-745.
- Walle, T., Martinez Monge, R., Cerwenka, A., Ajona, D., Melero, I., & Lecanda, F. (2018). Radiation effects on antitumor immune responses: current perspectives and challenges. *Therapeutic advances in medical oncology*, 10, 1758834017742575.

- Wei, J., Wang, B., Wang, H., Meng, L., Zhao, Q., Li, X., Xin, Y., & Jiang, X. (2019). Radiation-induced normal tissue damage: oxidative stress and epigenetic mechanisms. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2019(1), 3010342.
- Weiss, M. (2003). Standards on medical fitness examinations for Navy divers. *International maritime health*, 54(1-4), 135-143.
- Wilkins, R., Wilkinson, D., Maharaj, H., Bellier, P., Cybulski, M., & McLean, J. (2002). Differential apoptotic response to ionizing radiation in subpopulations of human white blood cells. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 513(1-2), 27-36.
- Willers, H., Dahm-Daphi, J., & Powell, S. (2004). Repair of radiation damage to DNA. *British Journal of Cancer*, 90(7), 1297-1301.
- Yamanouchi, K., Zhou, H., Roy-Chowdhury, N., Macaluso, F., Liu, L., Yamamoto, T., Yannam, G. R., Enke, C., Solberg, T. D., & Adelson, A. B. (2009). Hepatic irradiation augments engraftment of donor cells following hepatocyte transplantation. *Hepatology*, 49(1), 258-267.
- Yang, G., Kong, Q., Wang, G., Jin, H., Zhou, L., Yu, D., Niu, C., Han, W., Li, W., & Cui, J. (2014). Low-dose ionizing radiation induces direct activation of natural killer cells and provides a novel approach for adoptive cellular immunotherapy. *Cancer Biotherapy and Radiopharmaceuticals*, 29(10), 428-434.
- Zhang, Y., Fu, Q., Huang, T., Liu, Y., Chen, G., & Lin, S. (2022). Ionizing radiation-induced DNA damage responses affect cell compressibility. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 603, 116-122.

Radyoaktif Maddelerle Çalışmada İş Sağlığı ve Güvenliği

Alpaslan BAYRAKDAR¹

GİRİŞ

Radyoaktif maddelerle çalışma, bilimsel ve endüstriyel alanlarda önemli bir yer tutmakla birlikte, beraberinde ciddi iş sağlığı ve güvenliği risklerini de getirir. Bu bölümde, radyoaktif maddelerin potansiyel tehlikeleri ve bu tehlikelerle başa çıkma yöntemleri üzerinde durulacaktır. Radyoaktivitenin doğası gereği, bu maddelerin doğru şekilde yönetilmesi ve kontrol edilmesi kritik öneme sahiptir. Çalışanların, çevrenin ve toplumun güvenliğini sağlamak için etkili önlemler ve prosedürler geliştirmek, sadece yasal bir zorunluluk değil, aynı zamanda etik bir sorumluluktur.

Bu bağlamda, radyoaktif maddelerle çalışanlar için iş sağlığı ve güvenliği standartlarının göz önünde bulundurulması gereklidir. Bu bölümde, radyasyon alanlarında çalışma sürecinde riskleri en aza indirmek ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için gerekli bilgi ve stratejileri sunmaktır.

7.1. Radyoaktivite Nedir?

Radyoaktivite veya radyoaktif bozunma, bazı atom çekirdeklerinin sahip oldukları fazla enerjiyi, daha kararlı hale geçmek için radyasyon yaymak suretiyle salması sürecidir. Radyoaktif maddelerin birim zamanda yayınladıkları radyasyon miktarı aktivite olarak isimlendirilir. Radyoaktivite başlığında, radyoaktif bir atomun aktivitesinin yarıya düşme sürecini tanımlayan yarı ömür diğer önemli bir kavramdır. Radyoaktivite, ilk defa Henri Becquerel tarafından 1896 yılında keşfedilmiş olup (Allisy, 1996), Marie ve Pierre Curie tarafından gerçekleştirilen çalışmalarla radyoaktivitenin fiziksel ve kimyasal özellikleri aydınlatılmıştır (Curie, 1923). Radyoaktivite insanların sağlığına zarar verme potansiyeli taşıyan fiziksel bir fenomendir (Mitchell & Furey, 2011). Radyasyon, bir Uluslararası Birimler Sistemi (SI) olan Becquerel (Bq) cinsinden ölçülür.

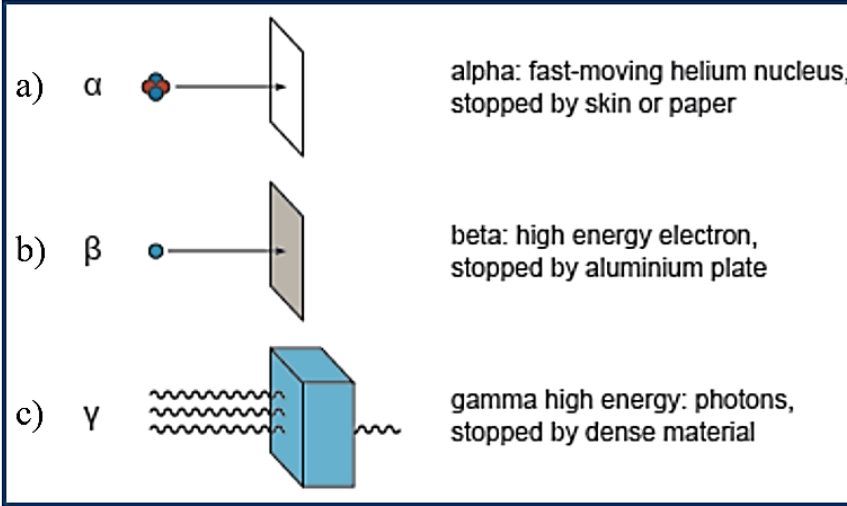
¹ Doç. Dr. Alpaslan BAYRAKDAR İĞDIR ÜNİVERSİTESİ, SAĞLIK HİZMETLERİ MESLEK YÜKSEKOKULU, alpaslan.bayrakdar@igdir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-7967-2245

Türetilmiş radyoaktivite birimidir ve bir Becquerel, saniyede bir çekirdeğin bozunduğu bir miktar radyoaktif maddenin aktivitesi olarak tanımlanabilir (Pathak, 2023).

Dokuda absorbe edilen iyonlaştırıcı radyasyon miktarı ile ilgili olarak Gray (Gy) ve Sievert (Sv) diğer kullanılan birimlerdir. Gray (Gy) birimleri tiroide absorbe edilen doz miktarını ifade etmek için kullanılırken, Sievert (Sv) ağırlıklı olarak hem dış hem de iç ışınlamadan tüm vücuda verilen dozları, etkin doz cinsinden ifade eder (Nations and Scientific Committee 2010).

7.2. Radyoaktif Bozunma Süreçleri

Radyoaktif bozunma, kararsız atom çekirdeklerinin kararlı hale geçerken fazla enerjilerini elektromanyetik ışınlar olarak yayarlar. Bu süreçte elektromanyetik ışınlar Şekil 1'de gösterildiği gibi alfa, beta ve gama radyasyonu olmak üzere üç ana türde gerçekleşir (Hofmann et al., 2020; Karmaker et al., 2021).



Şekil 1. İyonlaştırıcı radyasyonlar ve tesir güçleri
a) alfa, b) beta ve c) gama parçacıkları

7.2.1. Alfa Bozunması

Alfa bozunmasında bir atom çekirdeği iki proton ve iki nötron içeren alfa parçacıkları (Helyum çekirdekleri) yayar. Alfa parçacıkları büyük kütle ve pozitif yüke sahip olduğu için dış ortamda menzilleri kısadır (Şekil 1a). Dolayısıyla dış

ortamda alfa radyasyonuna maruz kalma ihtimali çok düşüktür. Diğer taraftan alfa parçacıklarının içsel maruziyet riskleri yüksektir ve vücut dâhilinde veya bulunduğu zararlı etkiler meydana getirebilirler. Örnek olarak, uranyum-238 ve radyum-226 gibi ağır elementler alfa yayını yapar.

7.2.2. Beta Bozunması

Beta bozunumu, bir atom çekirdeğinde bir nötronun bir protona dönüşürken β^- (elektron) ve anti-nötrino veya bir protonun bir nötrona dönüşürken β^+ (pozitron) ve bir nötrino yayması suretiyle gerçekleşen nükleer bozunma sürecidir. Beta bozunmasında yayınlanan parçacıklar alfa parçacıklarına kıyasla daha küçük ve hafiftir. Dolayısıyla dış ortamda tesir menzilleri fazladır (Şekil 1b). Bununla beraber cilde nüfuz edemezler. Beta bozunması vasıtasıyla parçacık yayını yapan maddelere karbon-14 ve flor-18 örnek olarak verilebilir.

7.2.3. Gama Bozunması

Gama bozunması, çekirdeklerin fazla enerjiyi gama ışınları olarak yayarak daha stabil hale gelmesini sağlayan bir süreçtir. Gama radyasyonu, yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar olduğu için çok yüksek penetrasyon kapasitesine sahiptirler (Şekil 1c). Dolayısıyla gama ışınlarına maruziyet çok tehlikelidir. Korunma için kalın kurşun veya beton gibi yoğun malzemeler gerektirir. Gama bozunması vasıtasıyla parçacık yayını yapan maddelere Kobalt-60 ve cesyum-137 gibi radyoaktif maddeler örnek olarak verilebilir.

Radyoaktivite, bilimsel araştırmalar, tıp uygulamaları ve endüstriyel süreçlerde önemli bir rol oynar. Ancak, bu süreçlerin doğru yönetilmesi ve radyasyon güvenliğine dikkat edilmesi, potansiyel sağlık risklerini en aza indirmek için kritik öneme sahiptir.

7.3. Radyoaktif Maddelerin Kullanım Alanları

7.3.1. Endüstrideki Uygulamalar

Radyoaktif maddeler, endüstride çeşitli alanlarda kullanılır. Örneğin endüstriyel malzemelerin yapısal kusurlarının araştırılmasında radyografi tekniği uygulanır. Bu süreçte kobalt-60 veya sezyum-137 tarafından yayımlanan gama ışınlarından faydalanılır. Bunun yanında Radyoaktif maddeler malzemelerin kalınlığının ölçülmesi, ulaşılması güç derinliklerde gerçekleşen olayların takibinde yaygın bir şekilde kullanılır.

7.3.2. Tıp Alanındaki Uygulamalar

Radyoaktif maddeler, tıpta hem teşhis hem de tedavi amaçlı geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin, tiroid hastalıklarının tedavisinde iyot-131 kullanılmaktadır. Ayrıca, radyoaktif izotoplar tıbbi görüntüleme yöntemlerinde, özellikle pozitron emisyon tomografisi (PET) ve single photon emisyon bilgisayarlı tomografi (SPECT) gibi tekniklerde, organ ve doku görüntüleme işlevi görür. Bunun yanı sıra, radyoaktif maddeler kanser tedavisinde de önemli bir rol oynar; burada gama ışınları veya beta parçacıkları, tümörleri hedef alarak tedavi edici etki sağlar. Bunun yanında tıpta kullanılan X-ışınları bazı hastalıkların teşhisini ve organizma içindeki organların durumunun araştırılmasını sağlar.

7.3.3. Bilimsel Araştırmalardaki Uygulamalar

Bilimsel araştırmalarda radyoaktif maddeler, çeşitli deneylerde ve analizlerde önemli rol oynar. Bu analizlere birkaç örnek vermek gerekirse, özellikle radyoaktif izotoplar, biyolojik süreçlerin ve kimyasal reaksiyonların izlenmesinde kullanılırken bu izotoplar, moleküllerin hareketini ve etkileşimlerini takip etmek için etiketleme amacıyla dahi kullanılırlar. Bunun yanında arkeoloji ve jeolojide tarihlendirme çalışmalarında, oldukça etkili bir yöntem olan luminesans çalışmalarında yaş tayini yapmak için kullanılır.

7.4. Radyoaktif Maddelere Maruziyetleri

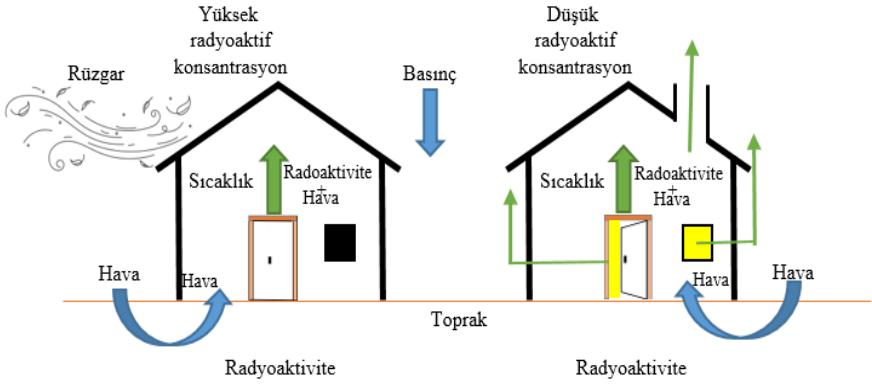
Radyoaktif maddelerden kaynaklanan ışımalara maruziyet esas olarak içsel ve dışsal maruziyet olmak üzere iki temel başlıkta ele alınabilir.

7.4.1. İçsel Maruziyet

İçsel maruziyet, radyoaktif maddelerin solunum, sindirim ya da deri yoluyla vücuda girmesiyle ortaya çıkar. Bu maddeler vücutta kaldığı sürece, radyoaktif ışınımına da devam eder. Bu durum, sadece belirli bir organı değil, vücuttaki tüm dokuları ve hücreleri etkileme potansiyeline sahiptir. İçsel maruziyetin sonucunda, hücrelerde geniş çaplı zararlar meydana gelebilir. Bu zararlar, DNA hasarına, hücre ölümüne ve genetik mutasyonlara yol açarak çeşitli sağlık sorunlarına, hatta kanser gibi ciddi ve uzun vadeli sağlık risklerine neden olabilir. İçsel radyasyondan korunmada önemli olan parametreler şu şekilde sıralanabilir:

7.4.1.1. Solunum

İçsel maruziyette diğer önemli bir parametrede solunumdur. Dolayısıyla solunum ortamında gerekli tedbirlerin alınması, solunum yoluyla gerçekleşecek olan içsel maruziyette oldukça önemlidir. Bu tedbirlerin belki en başında yaşam ortamının havalandırılması gelir. Örneğin Şekil 2'de verilen şamaya paralel olarak toprakta doğal olarak bulunan Radon ve radyoizotopların bozunması sonucu oluşan radyoaktif maddeler havadaki partiküllere tutunarak solunum yoluyla insanların vücuduna girerler. Havadaki bu partikül konsantrasyonunun azaltılarak bunun önüne geçilmesi için yaşamsal ortamın havalandırılması büyük önem taşır.



Şekil 2. Radyasyon alanında soluma yoluyla maruziyet şeması

7.4.1.2. Yutma ve Hijyen

İçsel radyasyona yutma yoluyla maruz kalma, radyoaktif maddelerin ya da radyoaktiviteye maruz kalan besinlerin ağız yoluyla vücuda alınması sonucu ortaya çıkar. Radyoaktif materyaller, yiyecekler, içecekler veya kirli su gibi kaynaklar aracılığıyla vücuda girdiğinde, sindirim sistemi üzerinden emilerek kan dolaşımına karışabilir. Bu maddeler vücutta çeşitli organlara dağılır ve burada radyoaktif ışınım yayarak hücrelere zarar verebilir. Bu durum, DNA hasarı, hücre bozulmaları ve potansiyel olarak kanser gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Ayrıca, yutulan radyoaktif maddeler vücutta uzun süre kalabilir ve zamanla birikerek sağlık risklerini artırabilir. Bu yüzden, radyoaktif maddelerin bulunduğu ortamlardan uzak durmak, temiz su ve gıda tüketimine dikkat etmek ve hijyen kurallarına uymak, içsel radyasyondan korunmada önemli bir role sahiptir.

7.4.2. Dışsal Maruziyet

İnsanların radyoaktiviteye maruz kalmalarında diğer önemli bir parameter dışsal maruziyettir. İnsanlar yaşadıkları doğal çevreden gelen kozmik ışınlardan ve yer kürede bulunan U-238, Th-232 ve K-40 gibi radyoaktif izotoplardan kaynaklanan doğal radyoaktiviteye sürekli maruz kalırlar. Radyoaktif ışımalar maruziyet ve derecesi, radyoaktif kaynak civarında geçirilen zaman ve ışımamanın şiddeti parametreleri ile doğru orantılı olarak artar. Dolayısıyla radyasyondan korunmada, zaman, mesafe ve zırhlama parametrelerine dikkat edilmelidir.

7.5. Radyasyonun Sağlık Üzerindeki Etkileri

Radyasyona maruziyet, canlı organizmalarda birçok sağlık problemini beraberinde getirir. Düşük dozlarda maruz kalma genellikle zararsız olmakla beraber yüksek dozlara maruz kalmak DNA hasarına yol açabilir ve bu da kanser riskini artırabilir. Radyasyonun maruz kalan kişi üzerindeki etkileri, deterministik ve stokastik etkiler olmak üzere iki başlıkta incelenir.

7.5.1. Deterministik Etkiler

Radyasyonun sağlık üzerindeki akut etkileri, genellikle yüksek dozlarda ve kısa süreli maruziyetlerde ortaya çıkar (Hamada & Fujimichi, 2014). Yüksek doz radyasyona maruz kalan bireylerde, baş ağrısı, bulantı, kusma, halsizlik gibi belirtiler hemen görülebilir. Ayrıca, yüksek dozlarda radyasyon vücuttaki hücrelere zarar vererek ciddi yanıklar, organ hasarları ve radyasyon hastalığına neden olabilir (Rehani et al., 2010). Radyasyon hastalığı, tıbbi acil durumları içerir ve genellikle kan hücrelerinin tahribatı nedeniyle bağışıklık sisteminin zayıflaması, enfeksiyonlara yatkınlık ve ciddi anemiye yol açar.

7.5.2. Stokastik Etkiler

Kronik radyasyon etkileri ise uzun süreli ve düşük dozlarda radyasyona maruz kalma sonucunda ortaya çıkar (López et al., 2011). Bu etkiler genellikle yıllar süren maruziyetlerin ardından belirginleşir ve kanser riski, genetik mutasyonlar ve organ hasarları gibi uzun vadeli sağlık sorunlarına yol açar. Özellikle, radyasyonun DNA üzerindeki zararlı etkileri, hücrelerin normal işleyişini bozarak kanser gelişimi riskini artırabilir (Valentin, 2007). Ayrıca, kronik maruziyet, tiroid hastalıkları, katarakt ve çeşitli metabolik bozukluklarla ilişkilendirilebilir. Bu etkiler, özellikle radyoaktif maddelerle çalışılan işyerlerinde veya yüksek radyasyonlu bölgelerde uzun süreli maruziyetlerde daha belirgin hale gelir.

7.6. İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetimi

Çalışma alanlarında görev ve sorumlulukların belirsizliği acil bir durum karşısında rol karmaşıklığına yol açabilir (Akşit & Gür, 2024). Bundan dolayı iş sağlığı ve güvenliği yönetimi işyerlerinde çalışanların sağlık ve güvenliğini korumak amacıyla sistematik bir yaklaşım geliştirmeyi hedefler. Bu yönetim sistemi, çalışanların sağlığını ve güvenliğini sağlamak için kapsamlı bir strateji sunar ve genellikle risk değerlendirmeleri, güvenlik eğitimleri, acil durum planları, düzenli denetimler ve mevzuata uyum gibi uygulamalarla desteklenir (Özbakır, 2023; Robson et al., 2007). Ayrıca, bu yönetim sistemi, iş kazalarını ve meslek hastalıklarını minimize etmek, yasal yükümlülüklere uymak ve işyeri verimliliğini artırmak için önemlidir. Etkili bir iş sağlığı ve güvenliği yönetimi, hem işverenlerin hem de çalışanların bilinçli ve proaktif bir yaklaşım benimsemesini gerektirir ve güvenli bir çalışma ortamı oluşturmayı amaçlar.

7.6.1. Radyasyon Alanları

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Kanunu'nun 15. Maddesine göre bir kişinin bulunduğu ortamda bir yılda maruz kaldığı radyasyon miktarı 1 mSv değerini geçiyorsa bu alanlar radyasyon alanı olarak tanımlanarak denetimli ve gözetimli alanlar olarak iki başlıkta ele alınır (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu [TAEK], Radyasyon güvenliği yönetmeliği 2010, s.3)

7.6.1.1. Denetimli Alanlar

Giriş çıkışların özel şartlara bağlı olduğu, radyasyondan korunma konusunda spesifik kuralların olduğu ve ortamda bulunanların ardışık beş yıllık doz sınırlarının en az 3/10'u kadar doza maruz kalma olasılıklarının olduğu alanlar denetimli alanlar olarak tanımlanır (Walker, 2018).

7.6.1.2. Gözetimli Alanlar

Radyasyon bulunan ortamlarda çalışanların yıllık doz sınırlarının 1/20'sinin aşılma ihtimali ile beraber, 3/10'unun aşılması olasılığı beklenmeyen, Bu alanlar, bireysel doz ölçümüne ihtiyaç duymadan, bununla beraber çevresel radyasyonun izlenmesinin zorunlu olduğu alanlar gözetimli alanlar olarak tanımlanır (Walker, 2018).

7.6.2. Eğitim ve Bilinçlendirme

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, iş yerlerinde güvenlik ve sağlık ile ilgili olarak eğitim ve motivasyonun önemini vurgulamaktadır. Eğitim, çalışanların özel bilgi ve becerilerinin planlı bir şekilde iyileştirilmesi, iş ortamının optimizasyonu ve kişisel koruyucu ekipman güvenliği ve çalışma şartları gibi İş sağlığı ve güvenliği başlıklarına yönelik beklenen tutumların geliştirilmesinde güçlü bir araçtır (Özbakır, 2023b). Radyoaktif maddelerle çalışma, yüksek düzeyde bilgi ve dikkat gerektiren bir alandır. Bu bağlamda, eğitim ve bilinçlendirme, hem çalışanların güvenliğini sağlamak hem de çevresel riskleri minimize etmek için kritik öneme sahiptir (Özbakır, 2023a). Eğitim programları, radyoaktivite hakkında temel bilgilerin yanı sıra, güvenlik prosedürleri, acil durum yönetimi ve kişisel koruyucu ekipman kullanımı gibi konuları kapsamlı bir şekilde ele almalıdır.

İlk olarak, radyoaktif maddelerle çalışan personelin radyoaktivitenin temel prensiplerini ve potansiyel sağlık risklerini anlaması sağlanmalıdır. Eğitim, radyoaktif maddelerin özellikleri, maruziyet yolları ve sağlık üzerindeki etkileri hakkında ayrıntılı bilgi sunmalıdır. Ayrıca, radyoaktif materyallerle çalışma sırasında karşılaşılabilecek tehlikeler ve bu tehlikelerden nasıl korunulacağı konusunda açık ve net bilgiler verilmelidir.

Çalışanların güvenlik kültürünü benimsemelerinin desteklenmesinde ve yaptıkları işe odaklanmalarında bilinçlendirme faaliyetleri oldukça önemlidir. Eğitim programları, teorik bilgilerin yanı sıra pratik uygulamalar ve gerçek yaşam senaryolarıyla desteklenmelidir. Ayrıca, çalışanların güvenlik prosedürlerine uyumunu teşvik etmek ve radyoaktif maddelerle ilgili güncel bilgileri sürekli olarak takip etmelerini sağlamak için düzenli olarak yeniden eğitimler yapılmalıdır.

Başka bir ifadeyle, etkili bir eğitim ve bilinçlendirme süreci, radyoaktif maddelerle çalışma sırasında olası riskleri azaltır ve güvenli bir çalışma ortamı sağlar. Çalışanların bu konudaki bilgi seviyelerinin yüksek tutulması, hem bireysel hem de toplumsal sağlık açısından önemli bir adımdır.

7.6.3. Risk Değerlendirmesi

Radyoaktif maddelerle çalışanlar için, potansiyel tehlikeleri belirlemek için kapsamlı bir risk analizi yapılmalıdır. Bu analiz, radyoaktif maddelerin depolama, taşıma ve kullanım aşamalarında ortaya çıkabilecek riskleri incelemeyi içerir. Radyoaktiviteden kaynaklanan bir problem ortaya çıktığında süreç devam

ederken ve sonrasında müdahale ekibi dâhil olmak üzere olay yerinde bulunanların bu tür olaylarla ilgili oluşabilecek tehlikelerden haberdar olması gerekir. Özellikle bu tür olaylarda en başta gelen tehlike olan iyonlaştırıcı radyasyondur. Olay yerinde bulunanlar için kısa süreli bile olsa yüksek dozda iyonlaştırıcı radyasyona maruziyet kısa ve uzun vadede sağlık problemlerine sebep olabilir.

Riskleri azaltmak için stratejiler geliştirilmelidir. Risklerin minimize edilmesi ile ilgili olarak 2690 sayılı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Kanunu'nun 4üncü maddesinin (d) bendine dayanılarak hazırlanan yönetmelik çerçevesinde Radon ölçümlerinin yaptırılması, ortamdaki radon konsantrasyonunun 1000 Bq/m³'ü aşması durumunda havalandırma sistemlerinin kurulması ve etkin çalıştırılması, ortamda kullanılan hammaddelerin içeriğinde uranyum, toryum, fosforlu malzemeler ihtiva eden üretim prosesleri, bunların taşınması ve depolanması faaliyetlerinde çalışanlar da dâhil olmak üzere radyoaktif maddeler içerebilecek toz zerreciklerinin solunmasını engellemek amacıyla toz maskesi kullanması zorunludur (TAEK, 2010, s.6). Ek olarak radyoaktivite kaynaklarının düzenli kontrolü ve bakımı yine ilgili mevzuat tarafından düzenlenmiştir.

7.6.4. Güvenlik Prosedürleri

Radyasyon koruması, iyonlaştırıcı radyasyonun zararlarını minimize etmek için gereksiz radyasyon maruziyetini azaltmayı hedefler (Tsapaki et al., 2018). Radyasyon alanlarında bulunanlar için maksimum maruz kalınabilecek doz için uluslararası standartlar vardır. Tablo 1'de verilen standartlara göre bir insanın radyasyona maksimum maruziyeti için belirlenen doz, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP) tarafından, bir insanda tehlikeye yol açabilecek bedensel veya kalıtsal bir etki oluşturmayacak en yüksek iyonlaştırıcı radyasyon dozu olarak tanımlanmıştır (Eckerman, 1994). Radyasyon alanlarında çalışanların radyoaktiviteden korunabilmesi için ICRP tarafından Kabul edilen Gerekçeleştirme (Justification), Optimizasyon (ALARA) ve Doz Sınırlamaları (Limitations) olmak üzere üç temel kriter vardır.

Tablo 1. Maksimum müsaade edilen doz değerleri

Etkin Doz		Radyasyon görevlileri (mSv)	Halk (mSv)
Tüm vücut (Yıllık)		50	1
Tüm vücut (5 Yılın Ortalaması)		20	1 (5 mSv özel durumlarda)
Göz merceği (Yıllık)	Eski	150	15
	Yeni	20 mSv, 5 yılın ortalaması ve herhangi bir yılda maksimum 50 mSv	15 (yıl)
El, ayak ve tüm cilt (Yıllık)		500	50

7.6.4.1. Gerekçeleştirme

Gerekçeleştirme kriterine göre radyasyonun potansiyel etkileri dikkate alınarak, mutlak bir yarar sağlamayan radyasyon uygulamalarının hiç birine izin verilmemelidir. Başka bir deyişle, radyasyon uygulamasının olası zararları dikkate alınarak uygulamanın gerçekten uygun olup olmadığına karar verilmelidir. Bunun yanında potansiyel olumsuz etkiler ciddi bir maliyet olarak değerlendirilmeli ve bu maliyet, uygulama sonucunda elde edilecek faydayla karşılaştırılmalıdır.

7.6.4.2. ALARA

Radyasyon yönetmeliklerinde ALARA (As Low as Reasonably Achievable) kriteri olarak isimlendirilen optimizasyon kriteri radyasyonu teşhis ve tedavinin bir parçası olduğunu kabul etmekle beraber, bu süreçte radyasyona maruziyetin minimuma indirilmesi konusunda tüm önlemlerin alınmasını sağlamayı amaçlar. Bu kriterin değerlendirmesi yapılırken sosyal ve ekonomik parametrelerde mutlaka hesaba katılmalıdır.

7.6.4.3. Sınırlama

Sınırlama kriteri kişilerin maruz kaldıkları doz eşdeğeri miktarı belirli doz sınırlarını aşmaması gerektiğini ifade eder. Bu sınırlar, kanser ve kalıtsal hasarlar gibi olasılığa bağlı etkilerin ortaya çıkışını kontrol altına almak için belirlenmiş olup, kişilerin ve gelecek nesillerin kabul edilmeyecek bir risk altına girmesini engeller.

7.6.5. Çalışma Alanı Düzenlemeleri

TAEK tarafından hazırlanan yönetmeliğe göre radyasyon içeren alanlarda çalışanlar ya da bir şekilde bu alanlara giren insanlar için, ortamdaki iyonlaştırıcı radyasyondan korunması için program hazırlanmalıdır. Bu program dâhilinde radyasyon alanları ve radyasyon alanlarında çalışanlar Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinin 19. maddesine uygun olarak Çalışma Koşulu A veya Çalışma Koşulu B olarak sınıflandırılmalıdır (TAEK, 2010, s.6).

Çalışma alanında gerçekleşen potansiyel radyoaktivite dikkate alındığında etkin dozun 6 mSv'in üzerinde veya yıllık eşdeğer dozlarının el, ayak veya cilt için 150 mSv'in, göz merceği için ise 15 mSv'in üzerinde olabileceği değerlendiriliyorsa bu kişiler Çalışma Koşulu A olarak belirlenmelidir. Potansiyel ışınlanma durumları dahil olmak üzere yılda 6 mSv'in üzerinde etkin doz almayacağı ancak halk için verilen yıllık 1 mSv'in üzerinde doz alma olasılığı olan personel ise Çalışma Koşulu B olarak belirlenebilir.

7.6.5.1. Kişisel Koruyucu Ekipmanlar

Radyoaktif maddeler ile çalışmada koruyucu ilk tedbir çalışma alanının sürekli farklı türdeki dozimetreler vasıtasıyla izlenmesidir. Bu alanlarda çalışan insanlar için tesbit edilen ve kontrolleri dışında gelişen sızmalara karşı, radyoaktiviteye maruziyeti en aza indirmek için koruyucu giysiler, eldivenler, gözlükler ve maske gibi radyasyon geçirmez malzemeler gibi kişisel koruyucu ekipmanlar kullanmalıdırlar. Bu ekipmanlar radyasyon alanının doğasına göre farklılık gösterebilir. OSHA işverenlerin çalışanları için uygun olan kişisel koruyucu ekipmanların temininden, kontrolünden ve dekontaminasyonundan sorumlu olduğunu ifade eder (Gibbs et al., 2020).

7.6.5.2. Kişisel Koruma Faktörleri

ABD Çevre Koruma Ajansına görer radyasyon alanlarında çalışan ya da bulunan insanların radyasyondan korunması için Şekil 3'te verildiği gibi zaman, mesafe ve zırhlama olmak üzere üç temel parametre vardır (Pedrosa et al., 2010).



Şekil 3. Radyasyon alanlarında çalışanlar için temel üç koruyucu faktör,
a) Zaman, b) Mesafe ve c) Zırhlama

7.6.5.2.1. Zaman

Radyasyon alanlarında maruz kalınan doz, ortamda kalınan zamanla radyasyon doz şiddetinin çarpımı olarak tanımlanır. Mesela, ölçülen radyasyonun $100 \mu\text{Sv/saat}$ olduğu bir ortamda bulunan bir kişinin sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü saat sonunda maruz kaldığı radyasyon dozu saatte $100 \mu\text{Sv}$, $200 \mu\text{Sv}$ ve $300 \mu\text{Sv}$ 'tir. Radyasyon alanlarında geçirilen zaman ne kadar az olursa risk o kadar azalır. Dolayısıyla radyasyon ihtiva eden alanlarda ihtiyaç yoksa ya da aynı iş başka bir ortamda yapılabiliyorsa oradan hemen uzaklaşılmalıdır (Hellweg et al., 2020).

7.6.5.2.2. Mesafe

Diğer bir korunma parametresi mesafedir. Radyasyon şiddeti, kaynaktan olan uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak değişir. Radyasyon kaynağından olan mesafenin artması, Gama radyasyon kaynakları için, doz şiddeti mesafeyle hızla düştüğü için risk potansiyelinin azalmasında oldukça etkili olur (Persson, 2020). Örneğin, A noktasında 1 metre uzaklıkta bulunan kaynaktan dolayı meydana gelen doz şiddeti $100 \mu\text{Sv/saat}$ ise sırasıyla 2 ve 5 metre uzaklıkta bulunan B ve C noktalarındaki doz şiddeti sırasıyla $25 \mu\text{Sv/saat}$ ve $4 \mu\text{Sv/saat}$ 'tir.

7.6.5.2.3. Zırhlama

Diğer bir koruma parametremiz Zırhlamadır. Radyasyon alanlarındaki doz oranını minimize etmek için radyasyon kaynağı ile vücut arasına uygun zırhlama materyali konulmalıdır. Zırhlama için kullanılacak malzeme tercihi, radyasyonun türü ve enerjisine göre değişmektedir (AbuAlRoos et al., 2019). Örneğin Beta ışıması yapan kaynaklar için düşük atom numaralı plastik malzemeler tercih

edilebilirken, Gama ve X-ışını yayan kaynaklardan korunmak için yüksek atom numaralı kurşun ve çelik gibi malzemeler zırhlama için kullanılmalıdır.

7.6.6. Acil Durum Prosedürleri

Radyasyon alanlarında olası kaza veya sızıntı durumunları etkilenen bölgedeki tüm çalışanlar için tehlike oluşturacağından böyle bir duruma karşı acil durum prosedürleri belirlenmelidir. İşverenler, acil durum müdahale operasyonları sırasında iyonlaştırıcı radyasyon için çalışan doz sınırları (yani mesleki maruz kalma sınırları) dâhil olmak üzere geçerli tüm OSHA gerekliliklerine uymalıdır. Bu prosedürlerde çalışanların güvenli bir yere sığınmaları ve mümkünse tahliye planları, Acil müdahale çalışanlarının (özellikle kolluk kuvvetleri, itfaiyeciler, sağlık ve kurtarma görevlileri ve diğer ilk müdahale görevlileri) nasıl harekete geçeceğini, ilk yardım uygulamalarını ve kazanın kontrol altına alınmasını içerir. Dolayısıyla Her iki kategorideki çalışanların (acil müdahale çalışanları ve radyasyon kaynağının yakınındaki çalışanlar) işverenleri, bir radyasyon acil durumu veya başka bir acil durum sonrasındaki dakikalar, saatler ve günlerde uygun şekilde müdahale etmeye hazır olmalıdır. Bunun için çalışanların acil durum tatbikatlarına katılmaları ve bu prosedürlere dair düzenli bilgilendirmeler almaları sağlanmalıdır (Streffer, 2011).

7.7. Sonuç ve Öneriler

Radyoaktif maddelerle çalışma, iş sağlığı ve güvenliği açısından büyük dikkat ve özen gerektiren bir alandır. Bu bölümde ele alınan çeşitli riskler ve güvenlik önlemleri, radyoaktif maddelerle çalışan bireylerin ve çevrenin korunması için kritik önem taşımaktadır. Sonuç olarak, etkili bir radyoaktif madde yönetim sistemi oluşturmak ve uygulamak, hem güvenliği artırmak hem de olası sağlık sorunlarını önlemek için gereklidir. Dolayısıyla radyasyon alanlarında çalışanlar için gerçekleştirilecek eğitim ve bilinçlendirme çalışmalarıyla radyoaktivite gösteren malzemelerle çalışma güvenliği konusundaki bilgi seviyelerinin güncel tutulmalıdır. Bu kapsamda kullanılacak koruyucu ekipman ve onların doğru kullanımı bu eğitimlere dahil edilmelidir. Radyasyon alanlarının radyoaktif madde seviyeleri sürekli takip edilerek düzenli risk değerlendirmeleri yapılmalıdır. Herhangi bir şeyin ters gitmesi durumunda hızlı ve etkili müdahale için acil durum planları hazırlanmalıdır. Çalışanlar için hazırlanan planlar doğrultusunda ve acil durum tatbikatları düzenli olarak gerçekleştirilmelidir.

Bütün bu öneriler yeni yasa ve düzenlemeler takip edilerek sürekli güncellenmelidir.

Bu önerilerin uygulanması, radyoaktif maddelerle çalışmanın getirdiği riskleri minimize ederek hem çalışanların hem de çevrenin güvenliğini sağlamaya yardımcı olacaktır. İş sağlığı ve güvenliği konusunda dikkatli bir yaklaşım, uzun vadede hem iş verimliliğini artıracak hem de sağlığı koruyacaktır.

7.7. Referanslar

- AbuAlRoos, N. J., Amin, N. A. B., & Zainon, R. (2019). Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review. *Radiation Physics Chemistry*, 165, 108439.
- Akşit, İ., & Gür, B. (2024). *İş Sağlığı Ve Güvenliğinde Görev Ve Sorumlulukların Önemi*
- Allisy, A. (1996). Henri Becquerel: the discovery of radioactivity. *Radiation protection dosimetry*, 68(1-2), 3-10.
- Curie, M. (1923). Marie und Pierre Curie. In: The Macmillan Company, New York.
- Eckerman, K. F. (1994). *Dosimetric methodology of the ICRP*.
- Gibbs, J. L., & Nonnenmann, M. W. (2020). OSHA Voluntary Respirator Use: Challenges incurred with use of N95 filtering facepiece respirators during the COVID-19 pandemic. *Toxicology industrial health*, 36(9), 681-688.
- Hamada, N., & Fujimichi, Y. (2014). Classification of radiation effects for dose limitation purposes: history, current situation and future prospects. *Journal of radiation research*, 55(4), 629-640.
- Hellweg, C. E., Berger, T., Matthiä, D., & Baumstark-Khan, C. (2020). *Radiation in space: relevance and risk for human missions*. Springer.
- Hofmann, W., Li, W. B., Friedland, W., Miller, B. W., Madas, B., Bardiès, M., & Balásházy, I. (2020). Internal microdosimetry of alpha-emitting radionuclides. *Radiation environmental biophysics*, 59, 29-62.
- Karmaker, N., Maraz, K. M., Islam, F., Haque, M. M., Razzak, M., Mollah, M.,...Khan, R. A. (2021). Fundamental characteristics and application of radiation. *GSC Advanced Research Reviews*, 7(1), 064-072.
- López, M., Martín, M. J. R. o. p. o., & radiotherapy. (2011). Medical management of the acute radiation syndrome. *16(4)*, 138-146.
- Mitchell, E. L., & Furey, P. J. J. o. v. s. (2011). Prevention of radiation injury from medical imaging. In (Vol. 53, pp. 225-275): Elsevier.
- Özbakır, O. (2023a). Hazard and risk assessment in a dairy products factory in Iğdır province using the Fine Kinney Risk Method: recommendations for mitigation. *International Journal of Agriculture Environment Food Sciences*, 7(3), 563-572.
- Özbakır, O. (2023b). Occupational Health and Safety Risk Assessment and Mitigation in Chemistry Laboratories: A Case Study of Iğdır University. *Şırnak Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 1-20.

- Özbakır, O. (2024). Enhancing Healthcare Worker Well-Being and Patient Safety in the Pediatric Emergency Department: A Comprehensive Hazard and Risk Analysis. *The Journal of International Scientific Researches*, 9(1), 35-49.
- Pathak, A. (2023). Radioactivity and Its Units. In *Tools and Techniques in Radiation Biophysics* (pp. 25-53). Springer.
- Pedrosa, M. C., Farraye, F. A., Shergill, A. K., Banerjee, S., Desilets, D., Diehl, D. L.,...Rodriguez, S. A. (2010). Minimizing occupational hazards in endoscopy: personal protective equipment, radiation safety, and ergonomics. *Gastrointestinal endoscopy*, 72(2), 227-235.
- Persson, B. R. (2020). Radiation hazards. In *Occupational Hazards in the Health Professions* (pp. 163-235). CRC Press.
- Radiation and Health Effects, (2024 April 29). World Nuclear Association. Erişim 19 Eylül, 2024, <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/radiation-and-health-effects/>
- Rehani, M., Ciraj-Bjelac, O., Vaňó, E., Miller, D., Walsh, S., Giordano, B., & Persliden, J. (2010). Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department. *Annals of the ICRP*, 40(6), 1-102.
- Robson, L. S., Clarke, J. A., Cullen, K., Bielecky, A., Severin, C., Bigelow, P. L.,...Mahood, Q. (2007). The effectiveness of occupational health and safety management system interventions: a systematic review. *Safety science*, 45(3), 329-353.
- Streffer, C. (2011). International commission on radiological protection: Policy and worldwide standards. *The politics of scientific advice: Institutional design for quality assurance*, 102-136.
- Tsapaki, V., Balter, S., Cousins, C., Holmberg, O., Miller, D., Miranda, P.,...Vano, E. (2018). The International Atomic Energy Agency action plan on radiation protection of patients and staff in interventional procedures: Achieving change in practice. *Physica Medica*, 52, 56-64.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2010). *Radyasyon güvenliği yönetmeliği*.
- Valentin, J. (2007). The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection (Vol. 37). Elsevier Oxford.
- Walker, J. S. (2018). Permissible dose: a history of radiation protection in the twentieth century. Nuclear Regulatory Commission.

Radyoaktif Maddelere Maruziyetin Önlenmesi Amacıyla Zırhlama *Muhammet Raci AYDIN¹*

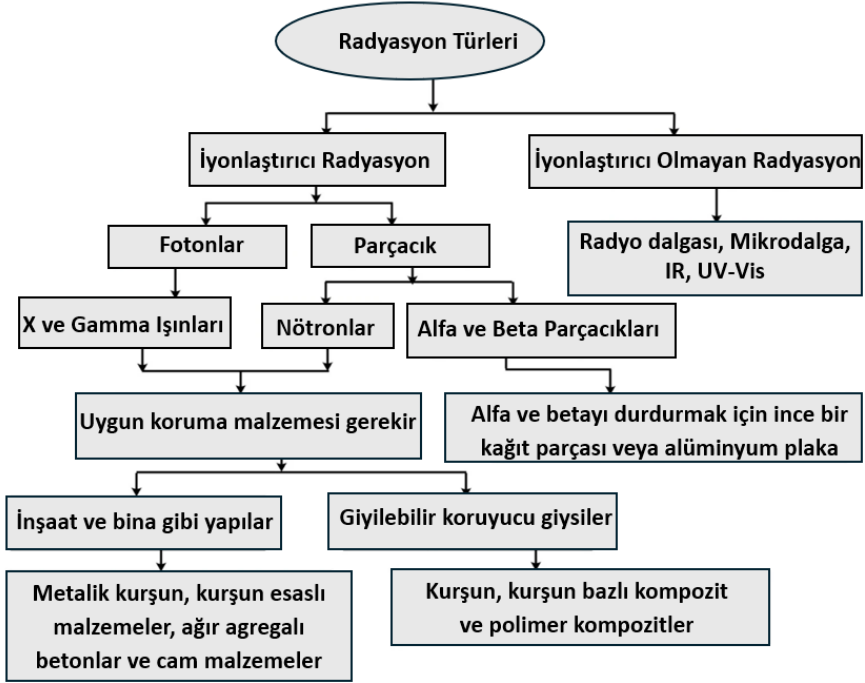
GİRİŞ

Radyoaktif maddeler, tıbbi teşhis ve tedaviden nükleer araştırma tesislerine, endüstriyel uygulamalardan metal döküm kusurlarının tespitine, biyolojik araştırmalardan uzay keşiflerine, güvenlik ve kontrolden bilimsel araştırmalara kadar farklı sektörlerde kullanılmaktadır. Radyoaktif madde kaynaklı radyasyona maruziyet, insan sağlığı ve çevre üzerinde telafisi mümkün olmayan ciddi zararlara neden olabilmektedir. Söz konusu zararlardan sakınmak ve maruziyeti en aza indirmek amacıyla klasik yöntemlerin yanı sıra teknolojik gelişmeler doğrultusunda daha etkili yöntem arayışları artarak devam etmektedir. Bu yöntemlerin en önemlileri mesafe, zaman ve zırhlama ile ilgili çalışmalardır. Radyasyona karşı zırhlamanın amacı, çalışanların ve halkın radyasyona maruziyetini kabul edilebilir bir seviyede tutmaktır. Zırhlamada temel prensip, radyasyonun yayılımını ve nüfuziyetini engellemek veya en aza indirmek amacıyla radyasyon türüne uygun koruyucu bariyerlerin kullanılmasıyla maruziyetin minimize edilmesi ve böylece insan ve çevrenin zararlı etkilerinden büyük oranda korunmasıdır (NCRP, 2015).

Radyasyon, radyoaktif çekirdeğe sahip maddelerin kararlı yapıya geçebilmek için bir ortamdan başka bir ortama elektromanyetik dalga, parçacık veya enerji transferi sonucu meydana gelir. Bir kaynaktan yayılan ve uzayda hareket eden bir enerji türü olan radyasyon, bazı malzemeler tarafından absorbe edilebilirken bazı malzemelerden ise nüfuz ederek geçebilme yeteneğine sahiptir. Radyasyon, maddeleri iyonize etme kapasitesine göre **iyonlaştırıcı radyasyon** ve **iyonlaştırmayan radyasyon** olarak iki ana kategoride ele alınabilir (Johns & Cunningham, 1983; Singh et al., 2014). Temas ettiği yapıdan elektron koparamayacak seviyede etki eden radyasyon türü iyonlaştırmayan

¹ Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Raci AYDIN, İĞDIR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, mraci.aydin@igdir.edu.tr, ORCID ID: [0000-0002-4120-1816](https://orcid.org/0000-0002-4120-1816)

radasyon olarak ifade edilir. İyonlaştırmayan radasyon, atomlardan elektron koparamayacak kadar düşük enerjiye sahip olup, görünür ışık, mikrodalgalar, radyo dalgaları, kızılötesi ışınlar ve güneş ışığı gibi türleri vardır (Oto et al., 2015). İyonlaştırıcı radasyon ise yüksek enerjisinden dolayı temas ettiği yapının atomlarından elektron koparabilmektedir. Bu yüzden pozitif iyonlaşmış atomların ve negatif yüklenmiş serbest elektronlar oluşur. Bu, gama ve X ışınları gibi fotonlar veya alfa, beta ve nötron gibi parçacıklar biçiminde olabilir (Harish et al., 2009). Şekil 1’de iyonlaştırıcı ve iyonlaştırmayan radasyon ve bu radasyon türlerini engellemek için gerekli uygun zırh malzemeleri şematik olarak gösterilmiştir (Bijanu et al. 2021). Yüksek enerjili iyonlaştırıcı radasyonlar, özellikle gama ışınları, endüstriyel uygulamalardan nükleer reaktörlere, tıbbi tanı ve tedavi yöntemlerinden nükleer araştırma tesislerine, gıda ışınlamadan nükleer atık depolama alanlarına, biyolojik araştırmalardan metal dökümlerindeki kusurların tespitine, nükleer tıp görüntülemesi ve tedavisine, uzay keşif çalışmalarına ve yüksek enerjili fizik deneylerine kadar birçok sektörde kullanılmaktadır. Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonunun (International Commission on Radiological Protection) sınır değer olarak belirttiği, yıllık 20 mSv doz seviyesini aşan iyonlaştırıcı radasyon maruziyeti; uzun vadede akut radasyon sendromları, kanser, merkezi sinir sistemi hasarı, kalp hastalıkları, katarakt gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu sebeple, radyoaktif maddelere maruziyet süresi ve dozu büyük önem taşımaktadır. Radyoaktif madde maruziyet süresini düşürmek ve aradaki mesafeyi artırmak, maruz kalınan dozun azaltacaktır.



Şekil 1. Radyasyon çeşitleri ve maruziyeti engellemek için kullanılan zırh malzemeleri (Bijanu et al. 2021).

Mesafe faktörü, ters kare kuralına göre etki eder; yani mesafe iki katına çıkarsa yeni konumda etki eden doz miktarı dörtte bir oranında düşer. Söz konusu zararlardan sakınmak ve maruziyeti en aza indirmek amacıyla klasik yöntemlerin yanı sıra teknolojik gelişmeler doğrultusunda daha etkili yöntem arayışları artarak devam etmektedir. Radyasyon maruziyetine karşı etkili bir yöntem olan zırhlama yöntemleri ile ilgili araştırmalar güncel çalışma konuları arasındadır. Beton, kurşun benzeri ve bunların kombinasyonlarıyla oluşturulan karma zırhlama yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler çoğu zaman pratik uygulamalarda ağırlık ve toksik etkilerinden dolayı kullanışlı değildir. Kapsamlı Çevresel Müdahale, Tazminat ve Sorumluluk Yasası'na (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act - CERCLA) göre kurşun, toksik, aşındırıcı, kansere neden olan bir maddedir ve en tehlikeli 20 madde listesinde ikinci sırada yer almaktadır. Bu olumsuzlukların üstesinden gelebilmek amacıyla yeşil kimya uygulamaları ve yeşil sentez metodlarının bir sonucu olarak polimerik kompozitlerin matris yapısının içerisine yüksek atom numaralı toksik olmayan bileşenler eklenerek daha hafif

ve etkili yapıların geliştirilmesi ilgi çekici araştırma konuları arasındadır (Sayyed et al., 2019; Guo et al., 2020; Woodhead, 2002; AbuAlRoos et al., 2019; Singh et al., 2014a, Karagölge & Gür, 2016). Radyoaktif madde maruziyetinden insan sağlığı ve çevreyi korumak amacıyla hafif ve dayanıklı yeni teknolojik malzemelerin kullanılması ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Uygun zırhlayıcı yapıları geliştirme konusunda, malzeme yoğunlukları, maliyet ve radyasyonu yansıtma ve/veya absorbe etme kapasiteleri, araştırmacıların dikkat etmesi gereken temel parametrelerdir. Etkili bir radyasyon zırhlama malzemesi, maruz kalınan radyasyonun büyük kısmını azaltabilen, absorbe edebilen veya engelleyebilen bir yapıya sahip olmalıdır (Singh et al., 2014a,b; Al-Buriahi et al., 2019; Levet et al., 2020). Polimerik kompozitler; kurşun ve beton gibi geleneksel malzemelere kıyasla hafif olmaları, üretim yöntem ve kombinasyonlarının çeşitliliği, dayanıklılık ve esneklik, üstün fiziksel, mekanik, optik ve radyasyon direnci özellikleri sebebiyle zırhlama malzemesi olarak dikkat çekici alternatiflerden birisidir. Ayrıca kompoziti oluşturan polimerlere yüksek atom numarasına sahip malzemeler ilave edilerek daha etkili radyasyon zırhları meydana getirilebilmektedir (Ambika et al., 2016; Alavian & Tavakoli-Anbaran, 2020; Atashi et al., 2018). Radyasyon tehlikesinden korunmanın üç ana yolu; maruziyet süresini azaltmak, radyasyon kaynağı ile çalışma ortamı arasındaki mesafeyi artırmak, uygun özelliklere sahip radyasyon zırhlarının arkasında çalışmaktır. Maruziyet süresi ve mesafeyi yönetmekten ziyade, radyasyon zırhlarının arkasında çalışmak, çalışanları ve çevreyi zararlı radyasyondan korumanın en etkili yoludur (Akkurt et al., 2010).

Radyoaktif madde kullanan tesislerde, minimum üç tür zırhlama gereklidir. Duvar, zemin ve çatı inşasında "yapısal zırhlamalar", pencere uygulamaları için optik olarak "şeffaf zırhlamalar" ve insanları hayati risklerden korumak için kullanılan "esnek zırhlamalar". Dolayısıyla uygun zırhlama malzemeleri seçilerek gelen radyasyonun enerjisine ve zırh malzemesinin atom numarasına bağlı olarak foton ve parçacıkların radyoaktif madde ile etkileşimi kontrol edilebilir (Nambiar & Yeow, 2012).

İyonlaştırıcı radyasyon riski bulunan bölgelerde kullanılması gereken uyarı sembolü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2).



iyonlaştırıcı radyasyon – tehlike sembolü

Şekil 2. İyonlaştırıcı radyasyonun sembolü (*Rad. P*, 2022).

8.1. Radyoaktif Madde Maruziyetine Karşı Temel Prensipler

Atom Enerjisi Ajansı (IAEA, International Atomic Energy Agency)'na göre radyoaktif madde maruziyetinden korunma, insanları ve çevreyi iyonlaştırma etkisi olan radyasyonun zararlarından muhafaza etmeyi amaçlayan bilimsel çalışma ve uygulamaları kapsamaktadır. Bu durum sadece nükleer santrallerde değil, radyoaktif madde maruziyetinin olabileceği bütün endüstriler için geçerlidir. UAEA'ya göre radyasyon koruması üç ana alanda incelenebilir:

- Mesleki radyasyon koruması, iş gereği doğrudan radyasyonlu ortamlarda çalışmak zorunda olan kişilerin korunması.
- Tıbbi radyasyon koruması, tanı ve/veya tedavi amaçlı radyasyona maruz kalan hastaların korunması.
- Kamu radyasyon koruması, genel olarak toplumun günlük yaşamda radyasyona maruz kalmaktan korunması.

Radyasyon zırhı, yalnızca radyasyon tesisindeki çalışanları ve çevre sakinlerini radyasyon maruziyetinden korumak için değil, aynı zamanda çevresel ekipmanların (elektrikli cihazlar gibi) aktivasyonunu ve hasarını önlemek için önemli bir konudur. Aynı zamanda zırh tasarımı yapılırken radyasyon güvenliğinin inşa edilecek tesisin maliyetleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu unutulmamalıdır (Paydar et al., 2023).

Radyasyondan koruma için Uluslararası Radyasyon Koruması Komisyonu (ICRP, International Commission on Radiological Protection) dikkate alınması gerektiğini vurguladığı üç ana unsur vardır. ICRP, toplum için radyoaktif madde maruziyetinden korunma bilimini ilerletmeye adanmış bağımsız, uluslararası bir kuruluştur. Bunlar; gerekçelendirme, optimizasyon ve doz sınırlamalarıdır.

8.1.1. Gerekçelendirme

Radyasyon maruziyetinin potansiyel etkileri göz önünde bulundurulduğunda, açık bir fayda sağlamadığı sürece hiçbir radyasyon uygulamasına izin verilmemelidir. Başka bir deyişle, radyasyon maruziyetinin zararlı etkileri hesaba katılmalı ve uygulamanın gerçekten kabul edilebilir olup olmadığı belirlenmelidir. Uygulamadan kaynaklanabilecek olumsuz etkiler bir maliyet olarak değerlendirilmeli ve uygulamadan sonra elde edilecek fayda ile karşılaştırılmalıdır.

8.1.2. Optimizasyon

Optimizasyon ilkesine göre, yukarıda belirtilen yarar-zarar karşılaştırmasına göre gerekli görülen radyasyon uygulamaları için amaç, dozu mümkün olduğunca aza indirmek olmalıdır. Bu ilkeyi uygularken ekonomik ve toplumsal faktörler dikkate alınarak radyasyon dozları mümkün olduğunca en aza indirilmelidir. Bunun için “makul ölçüde elde edilebilecek kadar düşük” (ALARA: as low as is reasonably achievable) ve “makul ölçüde uygulanabilecek kadar düşük” (ALARP: as low as reasonably practicable) kriterleri dikkate alınmalıdır. (ICRP, 2007).

8.1.3. Doz Sınırlamaları

Bireylerin maruz kaldığı eşdeğer doz miktarı belirli doz sınırlarını aşmamalıdır. Bu durum bireyin maruz kalabileceği etkili eşdeğer dozun kesinlikle sınırlandırılmasını gerektirir. Bu sınırlar, kanser ve genetik hasar gibi stokastik etkilerin oluşumunu kontrol etmek, bireylerin ve gelecek nesillerin kabul edilemez risklere maruz kalmasını önlemek için belirlenir.

Maksimum İzin Verilen Dozlar; Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu tarafından belirlenen maksimum izin verilen doz, bir kişide herhangi bedensel hastalığa veya genetik etkiye neden olması beklenmeyen iyonlaştırıcı radyasyon dozu olarak tanımlanır. Maksimum izin verilen doz değerleri aşağıda verilmiştir (Tablo 1). Doğal radyasyondan ve tıbbi ışınlanmalardan maruz kalınan dozlar yıllık doz sınırına dahil edilmez.

Tablo 1. Müsaade edilen maksimum doz değerleri tablosu (Afad, 2024)

Etkin Doz	Radyasyon görevlileri (mSv)	Halk (mSv)
Tüm vücut (Yıllık)	50	1
Tüm vücut (5 Yılın Ortalaması)	20	1 (5 mSv özel durumlarda)
Göz merceği (Yıllık)	20 mSv, 5 yılın ortalaması ve herhangi bir yılda maksimum 50 mSv	15 (yıl)
El, ayak ve tüm cilt (Yıllık)	500	50

İyonlaştırıcı radyasyonda kullanılan miktarlar, birimler ve bunların etkileri, özellikle biyolojik sistemleri etkileyenler için standartlaştırılmış kavramlar, tanımlar ve öneriler; geliştirmeye odaklanan Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komisyonu (ICRU) (International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)) ile yakından ilişkilidir (Stabin, 2011).

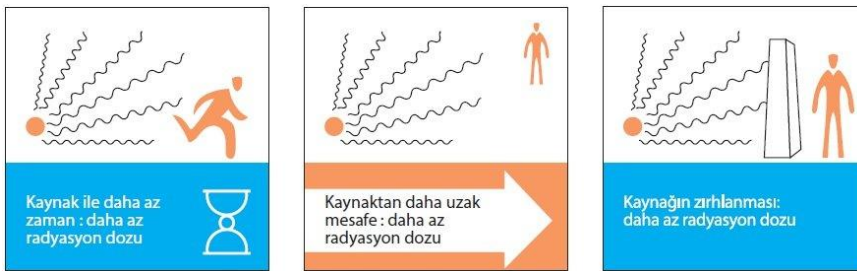
8.2. Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği ve Zırlama Tasarımı Hakkında

Zırlama tasarımının ulusal ve/veya yerel düzenlemelere bağlı olduğunu unutmamak gerekir. İyonlaştırıcı radyasyon ışınlamalarına karşı kişilerin ve çevrenin radyasyon güvenliğini sağlamak amacıyla ülkemizde “Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği” (Resmî Gazete Sayısı, 23999) İkinci Kısım Birinci Bölüm’de Radyasyondan Koruma Sistemi, Doz Sınırlama Sisteminin Temel İlkeleri, Madde 7’de Radyasyon korumasında kullanılan doz sınırlama sisteminin temel prensipleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca Koruyucu giysi ve teçhizat ile ilgili Madde 22’de Yapılan işin niteliğine uygun koruyucu giysi ve teçhizat kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca ulusal ölçekte radyasyona karşı alınabilecek önlemler ve korunma yolları ile ilgili akademik çalışmalar farklı durum açısından aydınlatıcı içeriklere sahiptir (Özbakır, 2024a; Özbakır, 2024b).

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’na bağlı Nükleer Düzenleme Kurumu’nun “Radyasyon güvenliği ile ilgili temel bilgiler” kapsamında; Radyasyon işçileri için etkili doz, beş ardışık yıl boyunca ortalama 20 mSv’yi geçmemekle beraber hiçbir yıl 50 mSv’yi geçemez. Toplum için etkili doz miktarı yılda ise 1 mSv’yi geçmemelidir. Özel durumlarda, beş yıllık ortalama 1 mSv’yi geçmediği sürece yılda 5 mSv’ye kadar izin verilebileceği belirtilmiştir.

8.3. Dış Radyasyon ve Dış Radyasyondan Korunma

Dışsal ışınlanma radyasyon kaynağının vücudun dışından radyasyona maruz kalmasıdır. Günlük hayatımızda arka-plan radyasyonu, yapay radyasyon kaynaklarının ışınlamaları ve vücut içinden gerçekleşmeyen tüm ışınlanmalar bu kategoriye girmektedir. Dışsal ışınlanmaya yol açan farklı radyasyon türleri farklı etkiler göstermektedir. Çevremizde bulunan radyoaktif maddelerin yaydığı radyasyonun vücudumuza dışarıdan ulaşmasına dışsal radyasyon denir. Dışsal radyasyon maruziyetinden korunmak için dikkat edilmesi gereken kavramlar zaman, mesafe ve zırhlama'dır.



Şekil 3. Dış radyasyondan korunmanın temel prensipleri (Afad, 2024)



Şekil 4. Dış radyasyondan korunmanın ana bileşenleri (Afad, 2024)

8.3.1. Zaman

Radyasyon bulunan ortamda ne kadar az zaman geçirilirse o kadar az doza maruz kalınır.

- Radyasyon alanlarında geçirilen süreyi en aza indirmek için bazı yöntemler şunlardır.
 - Gerçekçi koşullar altında görevleri planlamak ve prova etmek.
 - Radyasyon alanına girmeden önce tam çalışma yerini bilmek.
 - İş yerinde gerekli tüm araçların olduğundan emin olmak.
 - Net iletişim kurmak.
 - Alanda gereksiz zamandan kaçınmak.

Benzer şekilde, havadaki radyoaktivitenin olduğu alanlarda geçirilen süreyi en aza indirmek, radyoaktif madde alımı doğrudan maruz kalma süresiyle (solunan hava miktarı) orantılı olduğundan, iç dozları azaltacaktır.

8.3.2. Mesafe

Radyasyon kaynağından ne kadar uzak durulursa maruz kalınan doz o kadar az olur. Bu durum "Ters-Kare Kanunu" (Inverse Square Law) ile açıklanır. Birçok radyasyon kaynağı belirli bir noktadan kaynaklanıyormuş gibi görünür. kaynağa olan mesafe arttıkça etki eden doz, önemli ölçüde azalır. Bu miktar, kaynak ile arasında olan mesafenin karesiyle ters orantılıdır. Bir işte mesafeyi artırma yöntemleri şunlardır:

- Uzatma araçları kullanma.
- Uzaktan operasyon istasyonlarından yararlanma.
- "Sıcak noktalardan" kaçınma.

Havadaki radyasyon kaynaklarından daha uzakta kalarak, aktivite konsantrasyonu dağıldıkça azaldığından radyoaktif maddelerin alımı da en aza indirilebilir. Bir radyasyon kaynağından birkaç fitlik bir mesafe bile doz oranını büyük ölçüde azaltabilir ve gerekli görevleri yerine getirirken daha uzun çalışma sürelerine olanak tanır.

8.3.3. Zırhlama

Radyasyonun etkisini zayıflatmak için radyoaktif madde kaynağının önüne konan veya kaynağı çevreleyen yapılara zırh denir. Bu işlemin icra edilmesine zırhlama denir. Zırhlama işlemi, etki eden dozun en aza indirilmesine yardımcı olmada en etkili yöntemlerden bir tanesidir. Radyasyon tipine göre zırhlama gereksinimleri farklılık gösterir.

Alfa kaynağını zırhlamada bir kâğıt parçası yeterli olurken, beta kaynakları için alüminyum, gama ve x-ışınları için kurşun tabaka ve nötronlar için beton kullanılır.

- Dozu en aza indirmek için zırhlamayı en üst düzeye çıkarmak gerekir.

Zırhlamayı kaynağa mümkün olduğunca yakın yerleştirerek, çevredeki alanlardaki doz oranları önemli ölçüde azaltılabilir. Bu durum, radyasyon kaynağı yakınında geçirdikleri zamanı azaltamayan veya kaynaktan uzaklıklarını artıramayan çalışanları korunması açısından önemlidir.

8.4. Geçici Portatif ve Sabit Kurulu Zırhlama

Radyoaktif madde bulunan tesisteki iki ana zırhlama türü, sabit kurulu zırhlama ve geçici portatif zırhlamadır. Sabit kurulu zırhlama, radyoaktif madde nüfuziyetini azaltma amacıyla ilgili tesiste inşa edilen sabit yapılardır. Beton zırh duvarlar buna güzel bir örnektir. Geçici portatif zırhlama, kurşun levhalar, tuğlalar veya kurşun dolu torbalar şeklinde olabilir. Bunlar etki eden radyasyon seviyelerini azaltmak için kaynağın yakınına farklı şekillerde yerleştirilebilir. Ayrıca, maksimum zırhlama etkinliğini sağlamak için gerektiği gibi şekillendirilebilir. Kurulu ekipman da zırhlama malzemesi olarak kullanılabilir. Demir, kurşun, beton ve su gibi malzemelerin radyasyon absorbe etme kabiliyetleri farklılık gösterir (USNRC).

8.5. İyonlaştırıcı Radyasyonun Farklı Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan iyonlaşma mekanizmaları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon, yüklü parçacıklar (atom çekirdeği, elektronlar, pozitronlar, protonlar, vb.) yeterli kinetik enerjiye sahipse, Coulomb kuvvetine göre temel etkileşim yoluyla atomları doğrudan iyonlaştırabilirler. Radyasyona temel olarak iki ana şekilde maruz kalınabilir. Dışsal ışınlanma radyasyon kaynağının vücudun dışından radyasyona maruz bırakmasıdır. Günlük hayatımızda arka-plan radyasyonu, yapay radyasyon kaynaklarının ışınlamaları ve vücut içinden gerçekleşmeyen tüm ışınlanmalar bu kategoriye girmektedir. Dışsal ışınlanmaya yol açan farklı radyasyon türleri farklı etkiler göstermektedir.

- Alfa parçacıkları için tehlike sınırlıdır. Alfa radyasyonu, yüksek enerjili alfa parçacıklarından oluşur. Alfa hızlı parçacıkların oluşması alfa bozunması olarak ifade edilir. Bu parçacıklar deriyi geçemez fakat açık yaralar risk teşkil edebilir.
- Beta parçacıkları alfa parçacıklarına göre daha zararlı olabilmektedir. Beta radyasyonu serbest elektronlardan veya pozitronlardan oluşur. Beta parçacıklarının oluşması beta bozunması olarak ifade edilir. Bazı durumlarda derinin yanmasına sebep olabilir ve göze zarar verebilir.
- Foton radyasyonu yüksek enerjili fotonlardan (Gama ve X ışınlarından) oluşur. X ışınları çekirdeğin dışındaki elektronlar tarafından yayılırken, gama ışınları çekirdek tarafından yayılır. En önemli etkiye sahip olan gama ışınlarının oluşması gama bozunması olarak ifade edilir. Farklı

radyoizotoplar farklı enerjide gama ışını yayılır. Uzun mesafeler kat edebilen gama ışınları tüm vücuda nüfuz edebilir.

Dışsal ışınlanma düzeyi kaynağın durumuna göre de değişmektedir. Işınlanma düzeyi, kozmik radyasyondan, medikal kaynaklara kadar farklılık gösterebilmekte ve kaza ile saldırı durumlarında önemli bir tehdit oluşturabilmektedir.

Dolaylı iyonlaştıran radyasyon nötr parçacıklardan oluşur ve güçlü bir etkileşime sebep olmaz (Rad.P, 2022 & Afad, 2024).

8.5.1. Alfa Parçacıkları:

Genel olarak alfa parçacık nüfuziyeti, ince bir kâğıt ile engellenebilir.

Alfa parçacıkları insan derisinin dış katmanındaki ölü hücrelere tam olarak nüfuz edemez. Bu yüzden yalnızca alfa radyasyonuna karşı korunma ciddi bir problem değildir. Ancak alfa parçacık yayılımının yutulması veya solunması durumunda iç kirlenme denilen ciddi sağlık riskleri oluşabilir. Alfa parçacıkları vücuda girdikten sonra canlı dokulara ciddi zararlar verebilir. Aynı zamanda, sadece alfa radyasyonu oldukça nadir görülür. Genellikle alfa bozunması daha zor korunma gerektiren gama radyasyonu ile etki eder.

Alfa parçacıkları, ikişer proton ve nötrondan oluşan iyonlaştırma etkisine sahip bir radyasyon çeşididir. Diğer iyonlaştırma etkisine sahip radyasyon türlerine kıyasla (yapısındaki proton ve nötronlardan dolayı) kütlede değişime sebep olur. Alfa parçacıkları diğerlerine kıyasla kütle etkisinden dolayı düşük hız ve sınırlı nüfuziyete sahiptir, havada yalnızca birkaç inç kadar hareket edebilir. Genellikle düz çizgiler halinde hareket ederler ve küçük bir alanda çok sayıda iyonlaşmaya sebep olurlar.

8.5.2. Beta Parçacıkları:

Beta parçacığı, genellikle negatif yüklü olan yüksek hızlı iyonlaştırıcı radyasyon parçacığıdır. Bir beta parçacığının yükü bir elektronun yüküne (pozitif veya negatif) eşittir ve kütlesi bir proton veya nötronun kütlesinin yaklaşık 1/1800'üne eşittir. Beta parçacıkları, daha düşük yüklere ve kütelere sahip oldukları için havada yaklaşık 10 fit kadar mesafede ilerleyebilir ve çok ince malzemelere nüfuz edebilir. Bununla birlikte, giysiler, cam ve plastik maddeler çoğu beta parçacığını engelleyebilir. Bununla birlikte beta parçacıkları, cildin canlı dokularına nüfuz edebilir. Bu yüzden hem iç dış bir tehlike olarak kabul edilirler. Ayrıca beta parçacıkları, göz merceği için dışsal bir

risk oluşturabilir. Beta radyasyonuna karşı ince katmanlı alüminyum veya bakır gibi hafif metaller ya da plastikler ile koruma sağlanabilir.

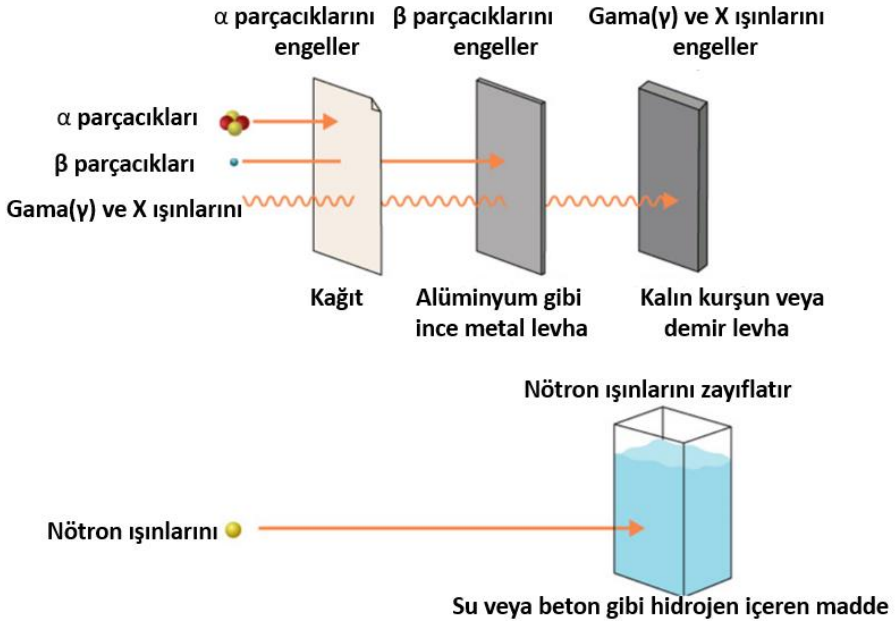
8.5.3. Gama Işınları:

Gama radyasyonu çok daha penetratif olduğundan dolayı bunu önlemek için daha yoğun malzemeler, özellikle kurşun, beton veya çelik kullanılır. Gama ışını, birçok açıdan görünür ışığa benzer ancak çok daha fazla enerjiye sahiptir. Aynı zamanda elektromanyetik enerji biçiminde iyonlaştırıcı bir radyasyondur. Bu ışınlar yüksek enerjili olması, durgun kütle ve yüke sahip olmaması nedeniyle havada binlerce fit mesafe kat edebilir. Aynı zamanda insan vücuduna kolayca nüfuz edip vücuttan geçebilir. Bu kabiliyetleri nedeniyle hem iç hem de dış tehlike olarak değerlendirilir. Gama ışınlarını durdurmak için kurşun, beton ve bunların kombinasyonları gibi çok yoğun malzemeler zırhlama malzemesi olarak kullanılmaktadır.

8.5.4. Nötron Radyasyonu:

Nötronlar yüksek hızlı ve enerjiye sahip parçacıklardan düşük hız ve enerjiye sahip parçacıklara kadar farklı türleri olabilen iyonlaştırıcı bir radyasyon türüdür. Nötronlar yüklü olmadığından, hidrojen zengin malzemeler; örneğin su, polietilen veya betonla etkili şekilde durdurulabilir. Su, yüksek hidrojen içeriği ve kolay bulunabilirliği nedeniyle en etkili ve yaygın nötron zırhıdır. Ancak, suyu oluşturan hidrojen ve oksijenin düşük atom numaralarına sahip olması sebebiyle, gama ışınları açısından uygun bir malzeme değildir. Ancak yüksek kalınlığa sahip su zırhı kullanılarak veya zırhın ön/arka tarafına başka malzemeler bariyer yapılarak bu eksiklik telafi edilebilir. Nötronların hidrojen çekirdeği tarafından emilmesiyle yüksek enerjili ikincil gama ışınları üretilir. Bu gama ışınları maddeye oldukça nüfuz eder ve bu nedenle su zırhının kalınlığına ilişkin gereksinimleri artırabilir. Borik asit katkısıyla nötron emilimi artırılabilir. Bunu yaparken borikasitin inşaat malzemelerinin korozyonuna olumsuz etkisi göz ardı edilmemelidir (Connor, 2019). Nötronlar için en iyi zırhlama malzemeleri, su, polietilen ve beton gibi hidrojen atomları içerenlerdir. Bir hidrojen atomunun çekirdeği bir proton içerir. Kurşun gibi ağır atomlara sahip malzemeler nötronları engellemek için yetersiz kalabilmektedir. Nötron zırhlaması hidrojen içeren malzemeler gerektirirken, x-ışını zırhlama malzemeleri kütle ve yüksek atom numarası gerektirir. Her iki radyasyon türünü engellemek amacıyla farklı kombinasyonların birlikte kullanımı

düşünülebilir (Şekil 3). Zırhlama, radyasyonun türüne bağlı olarak farklı malzemelerle yapılabilir. Bu amaçla kullanılan zırh malzemelerinin öncelik sırası; normal beton, ağır beton, kurşun, çelik, polietilen veya parafin, toprak ve ahşap şeklinde ifade edilebilir (Hashimoto et al. 2022; NCRP, 2015).



Şekil 3. Radyasyon Türüne Göre Kullanılabilecek Uygun Zırh Malzemeleri
(Pen. Pow. Rad, 2008)

Daha yüksek enerjili radyasyona karşı zırhlamada hem fotonlar hem de nötronlar dikkate alınmalıdır. Nötron zırhlaması hidrojen içeren malzemeler gerektirirken, x-ışını zırhlama malzemeleri kütle ve yüksek atom numarası gerektirir (NCRP, 2015).

Geleneksel radyasyon zırhları genellikle kurşun, beton veya su bariyerlerinden oluşur. Radyasyon zırhı olarak ihtiyaca göre çok farklı malzemelerin kullanılması söz konusu olabilir. Bu durum radyasyonun çeşidi ve enerjisi gibi birçok faktöre bağlıdır. Gama radyasyonuna karşı tükenmiş uranyum iyi bir koruma malzemesi iken nötron radyasyonu için uygun değildir.

- Genel olarak, zırhlama konusunda endişe duyulan dört ana alan vardır:
 - Zırh geometrisi ve zırhlama analiz tekniği
 - Zırh malzeme bileşimi;

- Zırhı oluşturan bileşenlerin özellikleri
- Doz birimleri.

Radyasyon zırhı, radyasyon kaynağı ile çalışan kişi arasında radyasyonu emecek bir malzeme olması anlamına gelir. Aslında bazı durumlarda uygunsuz zırhlama, insanları iyonlaştırıcı radyasyondan korumak yerine radyasyon durumunu daha da kötüleştirebilir. Zırhlamada dikkat edilmesi gereken ana ilkeler aşağıda belirtilmiştir.

- Radyasyon çeşidi;
- Radyasyonun enerji aralığı, üst sınırı;
- Radyasyona maruziyet süresi;
- Radyasyonun kaynağı arasındaki mesafe;
- ALARA ve/veya ALARP ilkeleri;
- Radyasyon ve çalışma bölgesinin şekilsel, geometrik tasarım kısıtları;
- Diğer gereklilikler

ALARA ve ALARP ilkeleri hakkında

- Uygun eğitim hayati önem taşır.
- Radyasyon kaynağından uygun mesafeyi koruyun. Uzak durmak neredeyse imkansızsa koruma için uygun zırh kullanımı.
- Zırhlama hem çevre hem de bireyler için geçerlidir. Tasarlanan, inşa edilen, kullanılan zırhlar gerçekten radyasyonu engellemiyorsa zırhın kullanılması etkisizdir ve ölümcül sonuçları engelleyemez (Yonai, 2023).

8.6. Geleneksel Zırhlama Malzemeleri ve Özellikleri

8.6.1. Kurşun

Kurşun, yüksek yoğunluğu ve büyük atom numarası nedeniyle radyasyon zırhı için kullanılan en yaygın malzemedir ve bu durum kurşunu 0,5 MeV'ye kadar gama ışınlarını emmede etkili kılar. Bu, potasyum gibi dış kaynaklardan gelenler gibi yüksek enerjili gama ışınlarının bile verimli bir şekilde emilmesini sağlar. Birkaç santimetre kurşun, gama ışını dedektörlerindeki arka plan radyasyonunu önemli ölçüde azaltabilir. Ancak, 10 cm'lik bir kalınlığın ötesinde, kurşun kozmik etkileşimlerin neden olduğu ikincil radyasyon nedeniyle radyasyonu daha fazla azaltmaz. Genellikle kurşun zırhlama amacıyla dikdörtgen prizması şeklinde tuğlalar oluşturularak kullanılır. Tuğlalar arasındaki boşluklardan radyasyon sızıntısını önlemek için, birbirine geçen yüzeylere sahip çok katmanlı veya özel olarak tasarlanmış tuğlalar kullanılır.

Kurşun ayrıca katı şekillere de dökülebilir, ancak gözeneklilik gibi kusurlardan kaçınmak için döküm dikkatli bir şekilde yapılmalıdır (Theodórsson, 1996 & Knoll, 2010).

8.6.2. Çelik

Çelik, özellikle kurşunun tek başına kullanılması çok pahalı olacağına gama ışını zırlaması için kullanılan bir diğer malzemedir. Yaygın bir yaklaşım, iç kurşun astarlı dış bir çelik katman kullanmaktır. Ancak, çeliğin kurşundan daha düşük atom numarası ve yoğunluğu olduğundan, etkili bir zırh elde etmek için çok daha kalın katmanlar gerekir (Knoll, 2010).

8.6.3. Tungsten

Yüksek yoğunluğu sahip olan tungsten, küçük zırlamalar için kullanışlı bir alternatiftir. Saf tungstenin işlenmesi zor olsa da toz metalurjisi kullanılarak sinterlenmiş bir formda üretilebilir. Sinterlenmiş tungsten, saf tungsten ile neredeyse aynı yoğunluğa sahiptir ve işlenmesi daha kolaydır. Tungsten, küçük bir alanda önemli radyasyon zayıflaması gerektiren durumlar için idealdir. Nikel/demir veya nikel/bakır içeren tungsten alaşımları yüksek yoğunlukları korur ve daha iyi işlenebilirlik sunar. Ancak tungsten toksiktir, bu nedenle işleme sırasında dikkatli olunmalıdır (Knoll, 2010).

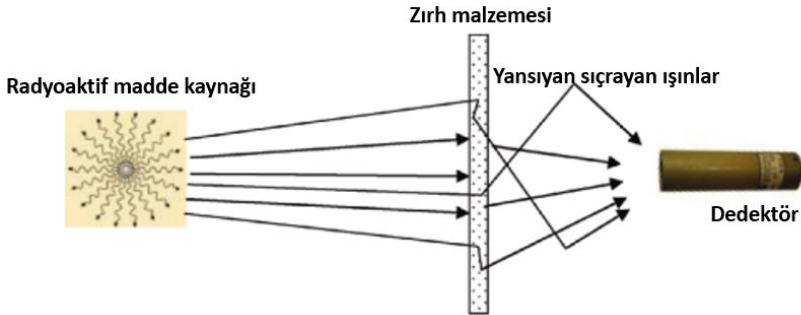
8.6.4. Beton

Beton, düşük maliyeti nedeniyle büyük hacimli radyasyon zırhı için yaygın olarak kullanılır. Ancak beton, potasyum, uranyum ve toryum içerdiğinden doğal olarak radyoaktif olabilir. Radyoaktivite, karışımdaki ağır elementlerin konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. Daha yüksek ağır element konsantrasyonlarına sahip olan barit beton, daha iyi gama ışını zayıflatması sunar ancak aynı zamanda daha fazla arka plan radyasyonu da getirir. Düşük arka plan uygulamalarında, daha düşük barit konsantrasyonlarına sahip beton tercih edilir veya doğal radyoaktivitesinin etkilerini azaltmak için iç yüzeyler çelik veya kurşunla kaplanır. Beton, özellikle kalın katmanlarda kullanıldığında kozmik radyasyonu zayıflatmada da etkilidir. Bodrumlar gibi birden fazla beton zemine sahip binaların kozmik radyasyona maruz kalmayı önemli ölçüde azaltabilir (Knoll, 2010).

8.6.5. Nötron Zırhı

Nötron zırhı, nötron dedektörleri ve düşük arka plan gama ışını sistemleri gibi diğer dedektörlerle etkileşime giren arka plan radyasyonunu azaltmak için gereklidir. Nötronlar, nötronlar çevredeki malzemeler tarafından yakalandığında oluşan gama ışınları yoluyla arka plan radyasyonu üretebilir. Nötron zırhı, nötron üreten tesislerin yakınında özellikle önemlidir, ancak doğal arka plan nötronları her zaman mevcuttur. Nötron zırhı, gama ışını zırhından farklıdır çünkü amaç, nötronları yüksek emilim kesitlerine sahip malzemeler tarafından yakalanabilecekleri düşük enerjilere yavaşlatmaktır. Su, beton ve parafin gibi hidrojen içeren malzemeler genellikle nötron moderatörleri olarak kullanılır. Hızlı nötronları etkili bir şekilde denetlemek için 1 metre veya daha kalın katmanlar gerekebilir. Alan veya ağırlık sınırlı olduğunda genellikle yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kullanılır. Nötronlar yavaşlatıldıktan (dengelenikten) sonra, ortamdaki uzaklaştırılmak üzere yakalanmaları gerekir. Hidrojen nötronları yakalayabilse de yakalama kesit alanı nispeten düşüktür ve birçok dedektör için istenmeyen yüksek enerjili gama ışınları üretir. Bu nedenle, nötron zırhları genellikle bor veya lityum gibi daha yüksek nötron yakalama kesit alanlarına sahip malzemeleri içerir. Lityum içeriği açısından çözünürlüğünün iyi olması, çevre kirliliğine neden olmaması ve ham madde olarak bol bulunması nedeni ile lityum tetraborat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) zırhlama ürünlerinde tavsiye edilen bir materyaldir (Gür and Ayhan, 2021). Nötron yakalama reaksiyonları yüklü parçacıklar üretir, ancak bu parçacıklar hızla emilir ve önemli bir arka plan radyasyonu eklemeyiz (Knoll, 2010).

8.7. Foton Kaynaklarının Zırhlanması



Şekil 4. "Zayıf geometri (poor geometry)" koşulları altında foton kaynaklarının zırhlanması (Stabin, 2011).

$$I = B \times I_0 e^{-\mu t}$$

I = Koruma malzemesi mevcutken yoğunluk (γ /s veya MeV/s)

I_0 = Koruma olmadan yoğunluk (γ /s veya MeV/s)

t = Koruma malzemesinin kalınlığı (cm)

μ = Verilen foton enerjisinde bu malzemedeki fotonlar için doğrusal zayıflama katsayısı (cm^{-1})

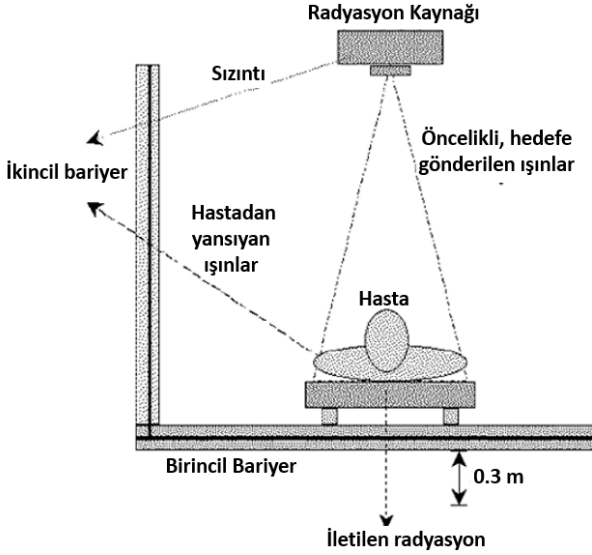
B = Birikim faktörü

Burada B ifadesi, belirli bir noktada hem birincil hem de saçılan radyasyonun şiddetinin, yalnızca birincil radyasyonun şiddetine oranı olarak tanımlanır. B faktörü, her zaman 1'den büyük bir değerdir. B değerleri, deneysel ölçümle veya deneysel bir şekilde radyasyon taşınım simülasyonu yapılarak. B faktörü, birincil foton enerjileri, bariyer olarak kullanılan zırh malzemesinin çeşidi ve zırh malzemesinin kalınlığına bağlıdır. Ancak pratikte, "iyi geometri" koşullarıyla nadiren karşılaşılır. Bu koşullar, zayıflatıcıdan geçen ve benzer şekilde iyi kolime edilmiş (oluşturulan ışık ya da elektromanyetik radyasyonun paralel ışınlar hâlinde yayılması durumudur) bir dedektör tarafından algılanan iyi kolime edilmiş bir foton demeti gerektirir; önemli bir saçılmış radyasyon algılanmaz. Foton yoğunluğunu azaltan tek faktör, zırh malzemesinin kendisidir. Şekil 4'te, zırh malzemesine (shielding material) nüfuz ederek geçen ve saçılan fotonların dedektöre ulaşması ve ölçülen sinyale katkı sağlaması görülmektedir. Zırh malzemesinin yanı sıra diğer duvarlardan yansıyan fotonların dedektöre etki etmesi beklenmektedir. B'nin foton enerjisine ve kullanılan malzemeye bağlı olduğu açıktır. Zırh malzemesinin kalınlığı arttıkça yansıyan saçılan radyasyon miktarı da artacaktır (Stabin, 2011).

Bireylerin birincil ve ikincil radyasyonlara maruz kalması doğrudan maruz kalmada olduğu gibi aşağıdaki yöntemlerden biri veya birkaçı kullanılarak azaltılabilir:

- Kişi ile radyasyon kaynakları arasındaki mesafeyi artırmak,
- Maruz kalma süresini sınırlamak ve
- Kişi ile radyasyon kaynakları arasına koruyucu zırh yerleştirmek.

Kaynaktan gelen çıkan ve yansıyan fotonların doz oranı, kaynağa olan mesafenin karesiyle ters orantılı olarak değişir. Genellikle korunması gereken kişinin bariyerden en az 0,3 m uzakta olduğu varsayılır.



Şekil 5. Hastanın göğüs kafesine dik olarak yerleştirildiği bir radyografi odasında birincil, dağınık, sızıntı ve iletilen radyasyonu gösteren şekil.

- Zırhlama yapısının geometrik yapısını etkileyen faktörler
 - Birincil (doğrudan etki eden) ışınların (fotonların) enerjisi
 - Zırhlamada kullanılan malzemelerin içeriği, cinsi
 - Zırhlamada kullanılan yapının kalınlığı (Stabin, 2011; NCRP, 2005).

8.8. Sonuç ve Öneriler

Radyoaktif maddelere maruz kalmak hem sağlık hem de çevre açısından ciddi riskler oluşturabilir. Bunun için alınan güvenlik önlemleri kritik ve hayati öneme sahiptir. Bu önlemlerin en etkililerinden bir tanesi de zırhlamadır. Zırhlama, radyoaktif maddelerin yayılmasını önlemek ve insanları ve ortamı olası zararlardan korumak için kullanılan bir yöntemdir.

Radyasyon yüklü parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar hızlarını, enerjilerini kaybedip duruncaya kadar karşılarına çıkan maddelerle etkileşime girerler. Bunlardan alfa parçacıkları büyük miktarda iyonlaşmaya neden olurlar. Bunları durdurmak için çoğu zaman ince bir zırh hatta bazen bir kâğıt parçası yeterli olabilir. α parçacıklarına nazaran daha etkili olabilen β parçacıkları havada birkaç metre kat edebilir. Bunları durdurmak için sahip oldukları enerji türüne göre 2-4 mm kalınlığında alüminyum bir levha veya 1 cm kalınlığında plastik bir levha yeterli olabilir. Gama (γ) ve X ışınları, α parçacıklarından veya β parçacıklarından daha yüksek nüfuz gücüne sahiptir, havada enerjilerine bağlı olarak onlarca bazen yüzlerce metre yol alabilirler. Bu ışınlar havada

karşılaştıkları maddelerin atomlarıyla çarpışarak enerjilerini kademeli bir şekilde kaybederler. Gama (γ) ve X ışınlarını durdurmak için yüksek yoğunluklu kurşun veya demirden yapılmış kalın plakalar kullanılabilir. Aynı zamanda ortamda bulunan farklı cihaz ve yapılar bu ışınların enerjilerini kaybetmelerine yardımcı olabilirler. Yüksüz nötronlar da önceki ışın ve parçacıklar gibi çarpışma sonucunda enerjilerinde absorpsiyon ve azalma gerçekleşir. Diğerlerinden farklı olarak hızlarını dolayısıyla enerjilerini kütleleri neredeyse kendilerine eşit olan hidrojen çekirdeklerinin protonlarıyla çarpışarak kaybederler (Pen. Pow. Rad., 2008).

Radyoaktif maddelere maruziyeti önlemek için kullanılan koruma teknikleri ve malzemeleri şunlardır:

-Beton Zırhlar:

Beton, yüksek yoğunluğu ve kalınlığı nedeniyle etkili radyasyon koruması sağlamakla beraber nükleer tesislerden sağlık tesislerine kadar yaygın olarak kullanılan bir koruma yöntemidir. Radyasyon şiddetine göre kullanılan kalın beton duvarlar radyoaktif maddelerin yayılmasını önler, çalışanları ve çevreyi korur.

-Kurşun Zırhlar:

Kurşun, radyasyona karşı etkili koruma sağlayan bir zırh malzemesidir. Özellikle tıbbi uygulamalarda ve laboratuvarlarda kullanılır. Kurşun oldukça yoğundur ve radyasyonu etkili bir şekilde engeller, ancak kullanılırken ağırlığı, maliyeti ve daha önemlisi sebep olabileceği toksik durum dikkate alınmalıdır.

-Beton ve Kurşun Kombinasyonu:

Bazı durumlarda, beton ve kurşun birleştirilerek daha etkili bir koruma elde edilebilir. Beton kalın bir duvar oluştururken, kurşun radyasyonun geçişini engeller. Bu kombinasyon, etkili koruma sağlarken maliyetleri düşürür.

-Çelik Zırhlar:

Bazı özel durumlarda çelik zırhlar da kullanılabilir. Çelik, yüksek mukavemeti ve dayanıklılığıyla bilinir ve radyasyona karşı koruma sağlayabilir. Ancak çelik zırhların etkili koruma sağlaması için genellikle çok kalın, ağır ve maliyetli olacağı göz ardı edilmemelidir.

-Polimer Zırhlar:

Yüksek yoğunluklu polimerler radyasyona karşı koruma sağlamak için kullanılabilir. Bu tür zırhlar hafif ve esnektir, bu da onları taşınabilir radyasyon zırhları veya kişisel koruyucu ekipman için uygun hale getirmiştir.

Bu zırlama teknikleri ve radyoaktif madde maruziyetine karşı önemli rol oynarlar. Bu yapı malzemeleri insan sağlığına ve çevreye zarar verebilecek radyasyonun güvenli bir şekilde tutulmasına sağlamaya yardımcı olurlar. Bu malzemelerin seçimi, kullanılacakları ortam şartlarına ve söz konusu radyasyon türüne ve şiddetine göre belirlenir.

Sonuç olarak zırlama işlemi, radyoaktif maddelere maruz kalmayı önlemek için kritik bir güvenlik önlemidir. Bu yöntem, insanların ve çevrenin korunması için hayati önem taşır ve radyasyonla ilgili herhangi bir ortamda uygulamaların standart bir parçasıdır.

Ayrıca daha önce bahsedilen üç koruyucu önlemden zaman, mesafe ve zırlama işleminde öncelik harici bir radyasyon kaynağından gelen dozu azaltmak/engellemektir. Bunun kapsamda dozu en aza indirmek için

- maruz kalma süresini en aza indirmek
- Mesafeyi maksimize etmek
- Uygun zırlama malzemesi, şekil ve kalınlığını belirlemek

Zırlamanın kaynağa mümkün olduğunca yakın konumlandırılmasıyla, geniş bir alana yayılan doz miktarı azaltılabilir. Uygun zırlama yöntemiyle, özellikle çalışma ortamı gereği radyasyon kaynağından yeterli uzakta çalışamayan ve maruz kalma süresini azaltamayan çalışanların sağlığı açısından hayati faydalar sağlayabilir.

Kaynaklar

- AbuAlRoos, N. J., Baharul Amin, N. A., & Zainon, R. (2019). Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A Review. *Radiation Physics and Chemistry*, *165*, 108439. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108439>
- Akkurt, I., Akyildirim, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., & Basyigit, C. (2010). Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies. *Progress in Nuclear Energy*, *52*(7), 620–623. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2010.04.006>
- Al-Buriah, M. S., Singh, V. P., Arslan, H., Awasarmol, V. V., & Tonguc, B. T. (2019). Gamma-ray attenuation properties of some NLO materials: Potential use in dosimetry. *Radiation and Environmental Biophysics*, *59*(1), 145–150. <https://doi.org/10.1007/s00411-019-00824-y>
- Alavian, H., & Tavakoli-Anbaran, H. (2020). Comparative study of mass attenuation coefficients for LDPE/metal oxide composites by Monte Carlo simulations. *The European Physical Journal Plus*, *135*(1). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00164-7>
- Ambika, M. R., Nagaiah, N., & Suman, S. K. (2016). Role of bismuth oxide as a reinforcer on gamma shielding ability of unsaturated polyester based polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, *134*(13). <https://doi.org/10.1002/app.44657>
- Atashi, P., Rahmani, S., Ahadi, B., & Rahmati, A. (2018). Efficient, flexible and lead-free composite based on room temperature vulcanizing silicone rubber/w/bi₂o₃ for gamma ray shielding application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *29*(14), 12306–12322. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9344-1>
- Bijanu, A., Arya, R., Agrawal, V., Tomar, A. S., Gowri, V. S., Sanghi, S. K., Mishra, D., & Salammal, S. T. (2021). Metal-polymer composites for Radiation Protection: A Review. *Journal of Polymer Research*, *28*(10). <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02751-3>
- Connor, N. (2019, December 14). *What is water as neutron shielding - definition*. Radiation Dosimetry. <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-water-as-neutron-shielding-definition/>

- Guo, K., Baidak, A., & Yu, Z. (2020). Recent advances in green synthesis and modification of inorganic nanomaterials by ionizing and non-ionizing radiation. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(44), 23029–23058. <https://doi.org/10.1039/d0ta06742c>
- Gür, B., & Ayhan, M. E. (2021). Molibden Oksit, Pluronic®F127 ve Mantarın Lityum tetraborat/ITO Elektrotların Kapasitif Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(1), 196-208. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.870456>
- Harish, V., Nagaiah, N., & Kumar, H. G. (2009). Lead oxides filled isophthalic resin polymer composites for gamma radiation shielding applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 50, 847–850.
- Hashimoto, S., Komatsu, M., & Miura, S. (2022). Basic knowledge to understand radioactive contamination. *Forest Radioecology in Fukushima*, 11–20. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9404-2_2
- Johns, H. E. (n.d.). *The Physics of Radiology. 4 Edition, Charles C Thomas, Springfield.*
- Karagölge, Z., & Gür, B. (2016). Sustainable chemistry: green chemistry. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 6(2), 89-96.
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley.
- Levet, A., Kavaz, E., & Özdemir, Y. (2020). An experimental study on the investigation of nuclear radiation shielding characteristics in iron-boron alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 152946. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152946>
- Nambiar, S., & Yeow, J. T. (2012). Polymer-composite materials for radiation protection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(11), 5717–5726. <https://doi.org/10.1021/am300783d>
- Özbakır, O. (2024a). Enhancing Healthcare Worker Well-Being and Patient Safety in the Pediatric Emergency Department: A Comprehensive Hazard and Risk Analysis. *The Journal of International Scientific Researches*, 9(1), 35-49. <https://doi.org/10.23834/isrjournal.1385350>
- Özbakır, O. (2024b). Risk Perception and Occupational Health and Safety: Evaluation in National and Global Context. *Doğu Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 11-23. <https://doi.org/10.57244/dfbd.1347259>
- Oto, B., Yıldız, N., Akdemir, F., & Kavaz, E. (2015). Investigation of gamma radiation shielding properties of various ores. *Progress in Nuclear Energy*, 85, 391–403. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.07.016>

- Paydar, A. Z., Zohuri, B., & Balgehshiri, S. K. M. (2023). *Advanced Reactor Concepts (ARC): A New Nuclear Power Plant Perspective Producing Energy*. Elsevier.
- Penetrating power of radiation*. Penetrating Power of Radiation [MOE]. (n.d.). <https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/1st/01-03-08.html>
- Radiation Protection - Radiological Protection*. Nuclear Power. (2022, June 9). <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-protection/>
- Radyasyon Güvenliği ile ilgili Temel Bilgiler. (n.d.). <https://www.ndk.org.tr/radyasyon-guvenligi-ile-ilgili-temel-bilgiler>
- Sayyed, M. I., El-Mesady, I. A., Abouhaswa, A. S., Askin, A., & Rammah, Y. S. (2019). Comprehensive study on the structural, optical, physical and gamma photon shielding features of B₂O₃-Bi₂O₃-PbO-TiO₂ glasses using WINXCOM and Geant4 Code. *Journal of Molecular Structure*, 1197, 656–665. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.07.100>
- Singh, V. P., Badiger, N. M., & Kaewkhao, J. (2014). Radiation shielding competence of silicate and Borate Heavy Metal Oxide Glasses: Comparative Study. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 404, 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.08.003>
- Singh, V. P., Badiger, N. M., Chanthima, N., & Kaewkhao, J. (2014a). Evaluation of gamma-ray exposure buildup factors and neutron shielding for bismuth borosilicate glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 98, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.12.029>
- Singh, V., Kaewkhao, J., & Badiger, N. (2014). Radiation shielding competence of silicate and borate heavy metal oxide glasses: Comparative study. *J Non-Cryst Solids*, 404, 167–173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.08.003>
- Stabin, M. G. (2011a). *Radiation Protection and dosimetry: An introduction to health physics*. Springer.
- Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities, NCRP Report No. 151, Recommendations of the National Council on Radiation Protection (NCRP) and Measurements, December 31, 2005
- Theodórsson, P. (1996). Measurement of weak radioactivity. World Scientific.
- T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (n.d.-a). *Dışsal İşinlanma*. <https://www.afad.gov.tr/kbrn/dissal-isinlanma>

- T.C. İişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (n.d.-b). *İsel Ve Dışsal Radyasyondan Korunma*. <https://www.afad.gov.tr/kbrn/icsel-ve-dissal-radyasyondan-korunma>
- USNRC Nuclear Reactor Concepts Course. (n.d.-a). <https://www.nrc.gov/docs/ML0230/ML023020519.pdf>
- Woodhead, D. (2002). Protection of the environment from the effects of ionising radiation. *Journal of Radiological Protection*, 22(3), 231–233. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/22/3/002>
- Yonai, S. (2023). Radiation protection. *Advances in Accelerators and Medical Physics*, 185–192. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99191-9.00027-x>

9. BÖLÜM

Radyoaktif Maddelerden Korunmada Sanal Gerçeklik Uygulamaları *Serap BUZTEPE¹*

Giriş

Sanal gerçeklik terimi, teknolojinin gelişmesiyle günümüzde yaygın duyulan bir kavram olmuştur. Aslında, sanal gerçeklik terimi, ilk olarak 1950 yılında bir romanın konusuyla oluşmuştur. Romandan sinemaya oradan bilim dünyasına girerek teknolojinin yaygınlaşmasıyla birlikte günlük hayatta da bilinmeye başlamıştır. Sanal gerçeklik literatürde “virtual ve reality” (VR) olarak bilinir ve insanın hayal dünyasıyla gerçeğin birleştirildiği uygulamalar olarak da adlandırılabilir. Ayrıca VR için gerçek yaşam içerisinde görülen gerçek olmayan durumlar diyebiliriz.

VR, diğer sanal teknolojilerin gelişimine de yol açmıştır. Bunlar; artırılmış gerçeklik ve karma gerçekliktir. Artırılmış gerçeklik; gerçek dünyaya gerçek olmayan objelerin eklenmesiyle oluşur. Karma gerçeklik ise; hem VR’in hem de artırılmış gerçeğin birlikte kullanılmadığı gerçeklik modelidir. Sanal teknolojileri deneyimlemeye yardımcı ekipmanlar; VR gözlükleri, Hololens ve Magiç leap gözlükleri, Metaversa VR gözlükleri VR eldiven ve Kinect sensörlerdir.

VR, turizm, eğitim ve sağlık gibi farklı alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. VR’in kendisi sağlık alanında radyoaktif maddelere karşı fiziksel koruma sağlamasa da güvenlik önlemlerini ve hazırlığı artırmak için kullanılabilir. Eğitim simülasyonları, radyasyon alanlarının sanal olarak gezilip denetlenmesi ve uzaktan işlem yapma radyoaktif alanda sanal olarak yapılabilir. Sağlık çalışanlarının ve hastaların radyasyona karşı korunma ve eğitiminde VR teknikler kullanılmaktadır. Radyoaktif maddelere maruz kalmanın vücuttaki biyokimyasal parametreler üzerinde çeşitli etkileri olabilir. Etki büyük ölçüde radyasyonun türüne, dozuna, maruz kalma süresine ve etkilenen spesifik organ veya dokulara bağlıdır. Biyokimyasal parametreler üzerindeki bazı genel etkiler şunlardır.

¹ Dr. Öğr. Gör. Serap BUZTEPE, Atatürk Üniversitesi, SHMYO, seraparmut@atauni.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4492-1998

9.1. Radyoaktif Madde Nedir ve Türleri

Radyoaktif madde (NORM); tabiatta bulunan bir radyonüklid ürün olup insan sürekli olarak bu maddeye maruz kalmaktadır. Hayatın içerisinde yediğimiz yiyeceklerde, yaşadığımız ortamlarda ve çalıştığımız alanlarda bu maddelerin doğal olanları bulunmaktadır (Egidi, 1997; Vearrier et al., 2009). Bu maddeler atomları içerisinde dengeli sayıda proton ve nötron bulundurmayan yapılardır. Proton-nötron sayısındaki dengesizlik atom çekirdeğinde ilave enerji olarak ortaya çıkar, bu enerji fazlalığı radyasyon (ışınım) olarak salınır (Bor, 2015). Yapay olarak üretilen radyoaktif maddeler radyasyon yayarak insan sağlığı için risk oluşturmaktadır ve kontrollü kullanılması gerekir. Radyoaktif maddeler; teknolojik aletler (TENORM), endüstri ve sağlık alanında yaygın olarak kullanılır. Bu alanda farklı özelliklere sahip iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türleri bulunmaktadır (Bor, 2015; İlem-Özdemir et al., 2020; Vearrier et al., 2009).

İyonize radyasyon türleri; Parçacık (alfa ışını, beta ışını, nötronlar) ve dalga (X ışınları, gama ışınları) tipi olmak üzere iki gruba ayrılır. Alfa ışınları geçirgenlik özelliğine sahip değildir ve en zayıf radyasyon şeklidir. İnsan sağlığına zararlı olabilmesi için vücuda yutulması gerekir. Beta ışınları ise alfaya göre daha geçirgen ve hareketlidir. Havada birkaç metre yol alabilirler. Gama ve X-ışınları ise enerji ve şiddetleri kuvvetlidir ancak kurşun ve beton bloklarla geçişleri engellenebilir (Karmaker et al., 2021). İyonize olmayan radyasyon; morötesi ışık, kızılötesi ışık, radyo dalgaları ve mikro dalgalardır (İlem-Özdemir et al., 2020; Karmaker et al., 2021).

9.1.1. Radyasyonun İnsan Sağlığına Etkileri

Radyasyon insan sağlığını olumsuz olarak etkilediği bilinmektedir. Bu etkiler hücrenin tipine, radyasyonun çeşidine ve radyasyona maruz kalma süresine bağlıdır. Radyasyon insan vücudunda etkileri akut ve kronik olarak iki grupta ele alınmaktadır. Akut etki deterministik etkidir. Kronik etki ise stokastik etkidir olarak adlandırılır (Barlaz Us & Us, 2021; Kamiya et al., 2015).

Deterministik etki; radyasyon etkisi sonucu meydana gelen hücre ölümüdür. Radyasyona maruziyet eşik dozu aşıp yükseldikçe organ ve dokuların bütünlüğü bozulur ve görevlerini yapamazlar. Erken dönem klinik doku reaksiyonları arasında; gastrointestinal semptomlar (örneğin; hemorajik ishal), kemik iliği yetmezliği (anemi ve lökositopeni), cilt bozukluğu (eritem ve epilasyon)

gözlenebilir. Geç dönem klinik doku reaksiyonları ise; katarakt, kardiyovasküler bozukluklar ve nekrozdur (Barlaz Us & Us, 2021; Kamiya et al., 2015).

Stokastik etki; iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma sonucu görülür. Düşük dozlara eğer hücre materyali radyasyondan etkilenmişse bu etki oluşabilir. Maruz kalma fetüsün gelişiminin devam ettiği organogenez dönemindeyse zeka geriliği ve organ gelişim problemlerine yol açabilir. Organogenez evresinde her organ farklı hafta ve günlerde geliştiğinden hangi süreçte radyasyona maruz kaldıysa etkilenen organın gelişimi tamamlanamaz (Bıçakçı, 2009; Sreetharan et al., 2017). Ancak gelişimi ve büyümesini tamamlamış kişilere de en önemli halk sağlığı problemi olarak bilinen kansere sebep olabilir (Barlaz Us & Us, 2021; Bıçakçı, 2009; Kamiya et al., 2015; Sreetharan et al., 2017).

9.2. Sanal Gerçeklik Nedir?

Sanal Gerçeklik (VR), kişinin görme ve işitme organlarıyla tanık olduğu her şeyin bir bilgisayar ekranına bağlı yapay olarak kurgulandığı alandır. Duyu organları istemli olarak yanıltıldığı için kişiler kendilerini farklı bir yere hissedebilirler (Slater & Sanchez-Vives, 2016). Aslında VR bireyin görüş alanını dolduran panoramik resimdir. Kişinin başına taktığı VR gözlük (HTC) ile fotoğrafın içine girmesi ve ortamı duyuşsal olarak hissetmesidir. (Bown et al., 2017; Slater & Sanchez-Vives, 2016).

Günümüzde teknolojik aletlere ilginin yaygınlaşmasıyla gündelik hayatta bilinmeye başlayan VR, aslında yeni bir kavram değildir. Yaklaşık olarak ikinci dünya savaşlarından sonra bu terim bilim dünyasında duyulmuştur (Schlichting et al., 2022). VR, ilk olarak 1950 yılında "The Veldt" adlı romanını konusunu oluşturmaktadır (Kurbanoglu, 1996). Daha sonra ise VR, film ve sinema dünyasında ilgi görmüştür. Ünlü yönetmen Morton Heilig sinemada kullanılmak için "sensorama" adlı ilk VR cihazı icat etmiştir. Böylece daha geniş kitleler tarafından duyulan VR, bilim dünyasında ve birçok eğitimde yardımcı ekipman olarak kullanılmaya başlamıştır (Cantekin, 2023). Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi olan NASA 1980 yılından itibaren VR ile ilgili çalışmalara ve deneylere başlamıştır. Pilot eğitimlerinde ve uzaktan uzay aletlerinin tamirinde VR sistemlerden yararlanmıştır (Cantekin, 2023; Öztürk & Sondaş, 2020).



Şekil 1: NASA Uzay VR Teknoloji (Webtekno, 2024)

VR ek olarak sürekli değişen teknolojiyle birlikte artırılmış gerçeklik (AR) terimi de öğrenilmeye başlandı. AR gerçek dünya içerisine bilgisayar tarafından oluşturulan figürler ekler. Yani gerçekle bağlantı koparılmaz. AR'nin VR farkı kişiyi gerçek dünyadan koparıp sanal aleme içerisinde yaşatmaz. Aksine, AR gerçek dünya içine hayali figürler koyar. Diğer sanal sistem ise; karma gerçekliktir (MR). MR ulaşılması pahalı ve zordur ve bu nedenle diğer sanal sistemler kadar tanınmaz. MR, VR ve AR bileşimi en iyi özelliklerini bünyesinde birleştirmeye çalışan sistemdir (Boz Yuksekdağ, 2021; Doğan et al., 2021; İçten & Bal, 2017).

Sanal sitemlerin uygulanmasında çeşitli teknolojik aletler kullanılır. VR gözlüğü bunların en başında gelir. VR gözlükler kişileri gerçek alemde uzaklaştırarak sanal aleme daldırmada kullanılmaktadır. AR gözlükler ise; gerçek alemin yarı saydam göstererek bilgisayar eklemeleriyle sanal alem oluştururlar (Doğan et al., 2021; İçten & Bal, 2017). Hololens ve Magiç leap gözlükleri gözlükler MR sisteminin kullanıldığı modellerdir. Kişilerin sanal alem içerisinde kendi el hareketleriyle sanal ellerini kullanmasına imkan tanıyan Metaversa VR gözlükleri ve VR eldiven bulunmaktadır. Kişinin hareketlerini tanımlayarak bunu bilgisayar üzerinde avatarların hareketlerine dönüştüren kinect sensörleri sıklıkla kullanılan diğer sanal sitemlerdir (Künüçen & Samur, 2021; Menon & Wischgoll, 2022).



Şekil 2: Sanal Gerçeklik Gözlüğü (Superhaber, 2024)



Şekil 3: Kinect Sensör ile Rehabilitasyon Uygulaması (dünyası, 2021)

9.3. Sanal gerçekliğin Sağlık Alanında Kullanımı

Son yıllarda VR uygulamaları eğitim, havacılık, savunma alanında olduğu gibi sağlıkta da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sağlık alanında kullanılan VR eğitim klinik becerinin gelişmesine önemli katkılar sunmaktadır. Öğrencilerin mesleki beceri kazanmasında yer alan Üniversiteler VR-lablar kurarak öğrenmeyi sürecine ilgiyi

artırabilmektedir. VR- lablarda; anatomi, ilk yardım, biyokimya eğitimi, robotik cerrahi ve riskli alanlara müdahale (radyasyon) gibi mesleki becerilerin kazandırılmasını kolaylaştırmaktadır (Cho et al., 2023; Kucuk & Sahin; Seymour, 2008; Shaikh, 2020).

VR uygulamalar klinikte sağlık eğitimi (personel, hasta, hasta yakını) ve hastaların tedavisine yardımcı yöntem olarak tercih edilmektedir (Lee et al., 2022; Wong et al., 2022). Örneğin; böbrek hastalarına periton diyalizine başlamadan önce süreci öğrenip anlamaları ve tedaviyi kolaylaştırmak için VR eğitim programı uygulanmış. VR programına dahil edilen hasta grubunda kontrol grubuna göre önemli farklılıklar olduğu ve eğitimden memnuniyetleri oldukça yüksek bulunmuştur (Lee et al., 2022). Kardiyopulmoner resusitasyon eğitiminde VR eğitimin hem yeni başlayan hem de deneyimli sağlık profesyonellerinde harmanlanmış bir öğrenme aracı olarak kullanılabilceği vurgulanmaktadır (Wong et al., 2018).

Ağrıyla ve kaygıyla mücadele etmede birçok farklı alanda VR uygulamalara başvurulmaktadır (Gür & Apay, 2020). Doğum ağrısı rahatlatmaya yönelik VR gözlüğün kullanıldığı çalışmada; doğum eyleminin aktif fazında dinletilen klasik müzik eşliğinde yeni doğan fotoğrafları doğum sancısını azaltmada etkili olduğu bulunmuştur (Gür & Apay, 2020). VR uygulamanın ağrı üzerine etkisinin araştırıldığı diğer bir çalışmada, cerrahi dış çekimi sırasında hastanın rahatlamasına ve lokal anestezi enjeksiyonu korkusunun ortadan kaldırmasına yardımcı olduğu saptanmıştır (Kunusoth et al., 2022).



Şekil 4: Doğum Ağrısı ve Stresiyle Yönetmede Sanal Gerçeklik (Webtekno)

VR sistemler hastalıkların rehabilitasyon aşamasında da sıklıkla başvurulan yardımcı uygulamadır (Asadzadeh et al., 2021). Parmak ampütasyonu sonrası fantom ağrısı olan hastaya 4 hafta 30 dk VR simülasyon ve ekstremitte aktivitelerini ölçmek için ivme ölçer kullanılmıştır. Sonuç olarak, VR uygulamanın ciddi ve uzun vadeli fantom ağrıları azalttığı, üst ekstremitte hareket kabiliyetini ve açıklığını sağladığı tespit edilmiştir (Yoshimura et al., 2023). İnme sonrası günlük yaşam aktivitelerini yapabilmesi için uygulanan VR egzersiz programı sonrası hastaların önemli ölçüde fonksiyonlarının iyileştiği bulunmuştur (Lee, 2015). Rehabilitasyon hastalarının ev egzersiz programına uyumda VR uygulamaların başarılı olduğu bilinir (Asadzadeh et al., 2021).

9.4. Radyoaktif Maddelerden Korunmada Sanal Gerçeklik

Günümüzde birçok hastalığın teşhis ve tedavisinde radyoaktif madde olan radyasyondan faydalanılmaktadır. Bu alanda çalışan sağlık personelleri maruz kaldığı radyasyon insanların yıllık aldığı radyasyon miktarından çok yüksektir (Barlaz Us & Us, 2021; Kamiya et al., 2015; Karmaker et al., 2021). Sağlık çalışanlarında radyasyona maruziyeti azaltmak için korunma yöntemleri öğrenilmelidir (Nishi et al., 2022). Radyasyondan korunmanın öğrenilmesinde VR yöntemler risk azaltarak öğrenme sürecini desteklemektedir (Bridge et al., 2015).

9.4.1. Radyasyon Güvenliği Eğitim Simülasyonları

9.4.1.1. Radyasyon Güvenliği Eğitimi

İyonize edilmiş radyasyon hastalıkların teşhisinde kullanılmaktadır. Radyasyon gözle görülmediği içinde yanlış kullanımında kanser gibi tedavisi zor hastalıkların gelişimine sebep olmaktadır (Rainford et al., 2023). Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmada riskli grup içerisinde yer alan sağlık personellerin mutlaka eğitilmesi gereklidir. Sağlık çalışanlarının radyasyondan korunmada kullandıkları VR eğitim sistemlerinin bazıları şunlardır (Rainford et al., 2023). Bridge ve ark. Öğrencilere radyoterapi x-ışını prensipleri ve güvenliği konusunda uygulamalı eğitim vermek için bilgisayar destekli sanal radyasyon laboratuvar kurmuşlardır (Bridge et al., 2015). Öğrenciler, sanal laboratuvarlarla "görünmez" fiziksel ilkelerin görselleştirilmesine yardımcı olduğu, verimlilik ve etkinlik kazanmaları sağlanmıştır (Bridge et al., 2015). Başka bir çalışmada, kardiyovasküler kateterizasyon sırasında radyasyon maruziyetini azaltmak, hasta ve personel güvenliğini sağlamak için simülasyon eğitimi yapılmıştır.

Simülasyon tabanlı eğitim iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmanın daha iyi anlaşılmasını sağlamış ve sağlık personelinin teknik becerini geliştirmiştir (Popovic et al., 2022). Tıbbi dozimetri radyoterapi eğitiminde bilinmesi gereken önemli bir bileşendir. Radyoterapi eğitimi için öğrencilere yardımcı olmak amacıyla VERT adında sanal müdahale ortamı geliştirilmiştir. VERT, öğrencilerin üç boyutlu (3D) radyoterapi planlaması, becerilerini geliştirmesi ve uygulama yapacaklarını sağlamaktadır. Ayrıca VERT, bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve pozitron emisyon tomografisi/bilgisayarlı tomografi (PET/BT) gibi farklı görüntüleme yöntemlerine kullanarak, onkologların tümörlü doku ve risk altındaki diğer dokuların sınırlandırılmasına da yardımcı olmaktadır. Sonuç olarak, VERT eğitimi alan öğrencilerin özgüvenlerini geliştirdiği, tedavi sürecine katılımları ve kendi kendine çalışma sürecinde başarılı oldukları, uygulama becerileri artarak müdahale hızlarının geliştiği gözlenmiştir (Cheung et al., 2021).

Hastalar, hastalık hakkında bilgi ve becerileri arttıkça tedaviye daha yüksek uyum göstermektedir. Ergenlik döneminde yer alan çocuk hasta grubunda vücudun değişim sürecinin getirdiği kaygı hastalık evresiyle eş zamanlı görülürse tedaviye uyum zor ve karmaşık olabilir. Bu nedenle, ergenlerde tedavi öncesi sunulacak bilgiler daha fazla öneme sahiptir. Radyasyon tedavisi gören 13 yaş grubu çocukların örneklem olarak alındığı çalışmada tedavinin yan etkileriyle başa çıkmaları ve tedavilerini anlamalarına yardımcı olmak için VR eğitim uygulanmış ve tedaviye bağlı kaygıları azaltılmıştır (Galvez et al., 2019). Radyasyon terapisi alan hastaların VR kullanılarak hasta eğitimi bilgisi ve olumlu deneyimleri üzerine etkisi incelenmiştir. Hastalar için sanal eğitim boyunca radyasyon tedavisinin immobilizasyonu ve tedavi planlaması hakkında oturum düzenlenmiştir. Sanal eğitime katılan hastaların radyasyon tedavisi boyunca duygusal ve fiziksel ihtiyaçlarını daha iyi anlayarak kaygı düzeylerini önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur (Jimenez et al., 2018).

Radyot tedavisi boyunca hastaların tedavi sürecini kolaylaştırmak ve ağrısını azaltmak amacıyla uygulanan girişimlerde VR gözlüğü kullanılmaktadır. Toru ve ark. yaptığı çalışmada, birinci kür kemoterapi tedavisi alan meme kanserli hastalara VR gözlüğüyle izletilen doğa sesli videoları sonrası anksiyete düzeyleri olumlu etkilenmiştir (Toru, 2023). Mamografi esnasında hastalara VR gözlüğü ile video izlemek kadınların işlem sırasındaki ağrıyı ve şiddetini azalttığı tespit edilmiştir (Dutucu et al., 2022). VR sistemler hem radyoterapi alanında görev yapan sağlıkçıların hem de bu alanda tedavi gören hastaların tedavi sürecini

anlamalarına sağlamaktadır. Böylece tedaviye yaklaşımı destekleyerek olumlu tutum kazanmalarına yardımcı olabilir.

9.4.1.2. Acil Müdahale Eğitimi

Sağlıkçıların en zorlandığı alanlar arasında yüksek doz radyasyona maruz kalan hastalara müdahale etmektir. Beklenmedik şekilde yüksek doz radyasyona maruziyet hasta kadar çevresindeki insanlar içinde tehlikelidir ve acil müdahale gerektirir. Radyolojik kazalarda doğru, güvenilir ve hızlı müdahale etmek için VR ve AR eğitim programlarına ihtiyaç vardır (Cho et al., 2023; Tomisawa et al., 2023; Zhao & Li, 2022). Bu amaçla, Nam ve arkadaşları tarafından VR simülatörü kullanılarak radyasyon felaketinde kirlenmiş hastaların dekontaminasyonuna yönelik uygulamalı eğitimin içeriği oluşturulmuştur. Karmaşık radyasyon hasarları ortam tehlikeleri açısından VR simülatör kullanılarak görünür hale getirilmiştir. Ortamın görselleştirilmesinde Universal Render Pipeline teknolojisi kullanılmıştır. Hastaların tedavi sürecinde, kişisel koruyucu ekipman giyinme, örnek numune almak, ölçüm yapmak ve kontamine yaraları temizlemek olmak üzere alt basamaklarda ses etkili eğitim simülasyonları oluşturulmuş. Bu çalışma sonucunda, VR eğitim simülasyonları radyasyon güvenliğini düzenlemesi ve hasta tedavisinde kullanımı sağlanmıştır (Cho et al., 2023).VR yöntemi kullanılarak verilen nükleer radyasyon acil tıbbi kurtarma eğitimi çalışmasında, hemşirelerin eğitim performansını, öğrenme coşkusunu ve eğitim memnuniyetini artırdığı bulunmuştur. Aynı zamanda VR acil durum eğitim etkisi de anlamlı olarak yükseldiği bulunmuştur (Zhao & Li, 2022). Sağlık öğrencilerine radyasyon acil tıbbi hazırlık (REMP) eğitimi verildiği araştırmada, öğrenciler VR eğitimin eğitsel etkisinin gerçek uygulamanın etkisine benzer olduğunu ifade etmişlerdir (Tomisawa et al., 2023). Böylece radyasyon gibi yüksek riskli alanları tanıma ve müdahalede VR sistemlerin başarısından bahsedilebilir. Literatürdeki çalışma sonucu olarak, VR eğitim acil durumlara müdahale de etkili ve zararsız olduğu söylenebilir. Risk azaltmak ve radyasyonun zararlı etkilerinden uzaklaşmak amacıyla gelecek yıllarda VR eğitiminin daha yaygın kullanılacağı tahmin edilmektedir.

9.5. Radyasyondan Korunma ve Halk Sağlığının Önemi

Yaşamın doğal akışı boyunca canlılar radyasyona maruz kalmaktayız. Gerek doğal olarak evrende yer alan kozmik ışınlar gerekse yapay olarak insan eliyle oluşturulan elektronik cihazlar ve tıp teknolojisi hayatımızın içerisinde yer alan

radyasyon kaynaklarındandır. İyonize olmayan radyasyon cihazlarının sağlık üzerine etkisi tartışmalı sonuçlara sahiptir. Ancak, sağlık alanında hastalıkların teşhisi ve tedavisinde kullanılan iyonize radyasyonun insan sağlığını olumsuz etkilediği bilinen bir gerçektir (Biçakcı, 2009; Egidi, 1997). Bu iyonize radyasyonu kullanırken mevcut risklerini en aza indirerek tedavi amaçlı kullanmak gerekir. Sağlıkçıların radyasyon güvenliği eğitimi kadar hasta grubunun da bu alandaki farkındalığı çok önemlidir. Tedavi gören hastaların ve yakın çevresinin sağlık eğitimi radyasyonun zararlı etkilerinden toplumu korumak adına gereklidir. Halkın sağlık eğitimi ve sağlık okuryazarlığı yükseldikçe radyasyonun deterministik ve stokastik etkileri azalabilmektedir (Barlaz Us & Us, 2021; Kamiya et al., 2015; Sreetharan et al., 2017) .

Halk sağlığının amacı önlenabilir sağlık problemlerini önlemektir (Akdur et al., 1998). Yapay radyasyonun insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri önlenabilir ve müdahale edilebilir. Müdahale yapılan durumlar arasında şüpheli bulunan sağlık problemlerini tanılamada kullanılan radyasyon sıklığını sınırlama gelmektedir. Gereğinden fazla ve sık aralıklarla kullanılan röntgen, mamografi ve bilgisayarlı tomografi gibi tanılama yöntemleri uygulanan insan sağlığı için sakıncalıdır. Bu yöntemlerin fazla kullanılması hastaların yıllık almaları gereken doz limitine kısa sürede ulaşmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda, bu işlemleri yapan sağlıkçıları çok daha fazla radyasyonlu işlem yapmalarına ve erken sağlık izni almalarına yol açar (Köklü, 2006; Macavei & Clark, 2020). Hem sağlıklı birey olan sağlık çalışanlarını hem de hastaların sağlığını korumak amacıyla fazla sayıdaki radyasyon işlemleri sınırlandırılmalıdır. Bu amaçla da halkın eğitimin de ve farkındalığın kazandırılmasında rol alan sağlık çalışanları desteklenmelidir. Sağlık eğitimlerinde toplumun radyasyonun olumsuz etkilerine karşı uyarılması ve gerekli koruyucu önlemleri uygulaması önemlidir. Örneğin; gebelik durumunda radyasyonlu alanlardan uzak durmak. Radyasyon gözle görülmediği için etkisiz olduğunun düşünülmesinin doğru olmadığı belirtilmelidir (Barlaz Us & Us, 2021; Biçakcı, 2009; Macavei & Clark, 2020; Saygun, 2012; Şenlik, 2010). Sağlık çalışanları bu alanda toplumun eğitimlerini hastanelerde ve yüksek riskli grupların yer aldığı kurumlarda yürütmelidirler. Radyasyon güvenliği ve koruma eğitimleri hakkında kısa uyarıcı videolar çekilerek kitle iletişim araçları yoluyla halka ulaştırılmalıdır.

9.6. Sonuç ve neriler

Radyasyon ışınları evrende var olan ve yaşamdan uzaklaştırılması mümkün olmayan maddelerdir. Yapay radyasyon ise insan eliyle radyasyon ışınlarının yoğun kullanıldığı alanlardır. İyonize ve non iyonize radyasyonun insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. Dolayısıyla radyasyondan yaşamdan tamamen çıkarılamaz ancak kullanımı sınırlandırılabilir. Radyasyonun toplum ve sağlık çalışanları üzerindeki risklerinin azaltılması için sağlık eğitimi önemlidir. Sağlık eğitimini kolaylaştırmak ve öğrenme motivasyonlarını artırmak amacıyla son yıllarda yeni teknolojiler kullanılmaktadır. Bu teknolojiler arasında etkili ve güvenilir yöntemlerden olan VR sistemler gelmektedir. VR sistemler birçok hastalığın yönetiminde kullanıldığı gibi radyasyonunda etkilerinin insan üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında kullanılmaktadır. Literatürde radyasyonun VR sistemlerle kullanımıyla ilgili sınırlı çalışma bulunmaktadır. Ancak teknolojinin yaygınlaşması ve daha fazla insanın tarafından kullanılmasıyla, VR sistemler ilgili radyasyon çalışmalarının da artacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- Akdur, R., Çöl, M., Işık, A., İdil, A., Durmuşoğlu, M., & Tunçbilek, A. (1998). Halk sağlığı. *Baskı, Ankara. AÜ TF Antıp AŞ Yayınları*, 3-13.
- Asadzadeh, A., Samad-Soltani, T., Salahzadeh, Z., & Rezaei-Hachesu, P. (2021). Effectiveness of virtual reality-based exercise therapy in rehabilitation: A scoping review. *Informatics in Medicine Unlocked*, 24, 100562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.imu.2021.100562>
- Barlaz Us, S., & Us, K. (2021). Türkiye’de Radyasyon Çalışanlarının Mevzuattan Kaynaklanan Hakları [The Rights of Radiation Workers Arising from the Legislation in Turkey]. *Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi*, 11(1), 83-93. <https://doi.org/10.31020/mutftd.793364>
- Biçakçı, B. C. (2009). Radyasyonun fetus üzerine etkileri [The effects of radiation on the fetus]. *Türk Onkoloji Dergisi*, 24(4), 185-190. <https://dergipark.org.tr/en/pub/iuonkder/issue/1073/12151>
- Bor, D. (2015). Radyasyon nedir? halkımız için bilgilendirme kılavuzu. *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği*.
- Bown, J., White, E., & Boopalan, A. (2017). Looking for the ultimate display: A brief history of virtual reality. In *Boundaries of self and reality online* (pp. 239-259). Elsevier.
- Boz Yuksekdag, B. (2021). Sağlık profesyonellerinin eğitiminde artırılmış gerçeklik uygulamaları. *Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*, 7(2), 130-148. <https://doi.org/10.51948/auad.887267>
- Bridge, P., Trapp, J. V., Kastanis, L., Pack, D., & Parker, J. C. (2015). A virtual environment for medical radiation collaborative learning. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 38(2), 369-374. <https://doi.org/10.1007/s13246-015-0348-3>
- Cantekin, A. (2023). Sanal gerçeklik kavramı: Sinemada yarattığı yenilikçi dönüşümler. *Eurasian Journal of Media Communication and Culture Studies*, 1(1), 4-15. <https://dergipark.org.tr/en/pub/emedi/issue/81790/1381725>
- Cheung, E. Y. W., Law, M. Y. Y., & Cheung, F. (2021). The Role of Virtual Environment for Radiotherapy Training (VERT) in Medical Dosimetry Education. *Journal of Cancer Education*, 36(2), 271-277. <https://doi.org/10.1007/s13187-019-01622-2>

- Cho, M., Kim, J., & Nam, H. (2023). Developing Contents of Practical Training for Decontamination of Radiation-contaminated Patients Using VR Training Simulator. *Prehospital and Disaster Medicine*, 38(S1), s128-s129. <https://doi.org/10.1017/S1049023X23003394>
- Doğan, D., Erol, T., & Mendİ, A. F. (2021). Sağlık Alanında Karma Gerçeklik [Mixed Reality Technology in Healthcare]. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(29), 11-18. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1009810>
- Dutucu, N., Özdilek, R., & Bektaş, H. A. (2022). Sanal gerçekliğin mamografi sırasındaki ağrı ve anksiyeteye etkisi: Randomize kontrollü bir çalışma. *Anatolian Journal of Health Research*, 3(1), 1-7.
- dünyası, Ö. i. ö. (2021). Retrieved 18.03.2024 from <https://ozelegitimveeteknoloji.wordpress.com/2018/05/31/nintendo-wii/>
- Egidi, P. (1997). *Introduction to naturally occurring radioactive material*.
- Galvez, J., Eisenhower, M., England, W., Wartman, E., Simpao, A., Rehman, M., Lustig, R., & Hribar, M. (2019). An interactive virtual reality tour for adolescents receiving proton radiation therapy: Proof-of-concept study. *JMIR perioperative medicine*, 2(1), e11259.
- Gür, E. Y., & Apay, S. E. (2020). The effect of cognitive behavioral techniques using virtual reality on birth pain: a randomized controlled trial. *Midwifery*, 91, Article 102856. <https://doi.org/10.1016/j.midw.2020.102856>
- İçten, T., & Bal, G. (2017). Artırılmış Gerçeklik Üzerine Son Gelişmelerin ve Uygulamaların İncelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5(2), 111-136. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gujsc/issue/49772/638527>
- İlem-Özdemir, D., Gökoğlan, E., Ekinci, M., Özgenç, E., & Aşıkoğlu, M. (2020). Radyasyon ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri [Radiation and Its Effects on Human Health]. *Anatolian Clinic the Journal of Medical Sciences*, 25(3), 289-294. <https://doi.org/10.21673/anadoluklin.709434>
- Jimenez, Y. A., Cumming, S., Wang, W., Stuart, K., Thwaites, D. I., & Lewis, S. J. (2018). Patient education using virtual reality increases knowledge and positive experience for breast cancer patients undergoing radiation therapy. *Supportive Care in Cancer*, 26(8), 2879-2888. <https://doi.org/10.1007/s00520-018-4114-4>

- Kamiya, K., Ozasa, K., Akiba, S., Niwa, O., Kodama, K., Takamura, N., Zaharieva, E. K., Kimura, Y., & Wakeford, R. (2015). Long-term effects of radiation exposure on health. *The Lancet*, 386(9992), 469-478.
- Karmaker, N., Maraz, K. M., Islam, F., Haque, M. M., Razzak, M., Mollah, M., Faruque, M., & Khan, R. A. (2021). Fundamental characteristics and application of radiation. *GSC Advanced Research and Reviews*, 7(1), 064-072.
- Köklü, N. (2006). *Radyasyonun insan sağlığı üzerindeki etkileri ve tıpta uygulama alanları* Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Kucuk, S., & Sahin, M. Virtual Anatomic Lab.
- Kunusoth, R., Colvenkar, S., Alwala, A. M., Bharadwaj, S., & Boyapati, R. (2022). A Simple Technique to Manage Anxiety During Tooth Extraction. *Cureus Journal of Medical Science*, 14(9). <https://doi.org/10.7759/cureus.29275>
- Kurbanoğlu, S. S. (1996). Sanal gerçeklik: Gerçek mi, değil mi? *Türk Kütüphaneciliği*, 10(1), 21-31.
- Künüçen, H. H., & Samur, S. (2021). Dijital çağın gerçeklikleri sanal, artırılmış, karma ve genişletilmiş gerçeklikler üzerine bir değerlendirme. *Yeni Medya*, 2021(11), 38-62.
- Lee, C. M. S., Fong, K. N. K., Mok, M. M. Y., Lam, M. K., Kung, Y., Chan, P. P. W., Ma, M. K. M., Lui, S. L., Kwan, L. P. Y., Chu, W. L., Hui, P. C., Yau, C. S. F., Kwan, I. W. L., Chan, K. Y. M., & Chan, T. M. (2022). Application of virtual reality for peritoneal dialysis exchange learning in patients with end-stage renal disease and cognitive impairment. *Virtual Real*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00728-1>
- Lee, K.-H. (2015). Effects of a virtual reality-based exercise program on functional recovery in stroke patients: part 1. *Journal of physical therapy science*, 27(6), 1637-1640.
- Macavei, D. A., & Clark, K. R. (2020). Occupational injuries involving medical imaging and radiation therapy professionals. *Radiologic technology*, 91(5), 422-430.
- Menon, S. S., & Wischgoll, T. (2022). On the suitability of current Augmented Reality head-mounted devices. *Electronic Imaging*, 34, 1-7.
- Nishi, K., Fujibuchi, T., & Yoshinaga, T. (2022). Development and evaluation of the effectiveness of educational material for radiological protection that uses augmented reality and virtual reality to visualise the behaviour of scattered radiation. *Journal of Radiological Protection*, 42(1), 011506.

- Öztürk, E. O., & Sondaş, A. (2020). Sanal sağlık: Sağlıkta sanal gerçekliğe genel bakış. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 164-169.
- Popovic, B., Varlot, J., Girard-Bertrand, B., Basile, J. L., Thouvenot, C., Fay, R., Villani, N., Tran, N., & Camenzind, E. (2022). Impact of Simulation-Based Training on Radiation Exposure of Young Interventional Cardiologists. *American Journal of Cardiology*, 181, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2022.07.014>
- Rainford, L., Tcacenco, A., Potocnik, J., Brophy, C., Lunney, A., Kearney, D., & O'Connor, M. (2023). Student perceptions of the use of three-dimensional (3-D) virtual reality (VR) simulation in the delivery of radiation protection training for radiography and medical students. *Radiography*, 29(4), 777-785. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radi.2023.05.009>
- Saygun, M. (2012). Sağlık Çalışanlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği Sorunları. *TAF Preventive Medicine Bulletin*, 11(4).
- Schlichting, M. S., Fuchter, S. K., Schlichting, M. S., & Alexander, K. (2022, 28-30 Sept. 2022). Metaverse: Virtual and Augmented Reality Presence. 2022 International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR),
- Seymour, N. E. (2008). VR to OR: a review of the evidence that virtual reality simulation improves operating room performance. *World journal of surgery*, 32, 182-188.
- Shaikh, A. (2020). Biochemistry Mixed Reality Lab Simulation.
- Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing our lives with immersive virtual reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 74. In.
- Sreetharan, S., Thome, C., Tharmalingam, S., Jones, D. E., Kulesza, A. V., Khaper, N., Lees, S. J., Wilson, J. Y., Boreham, D. R., & Tai, T. (2017). Ionizing radiation exposure during pregnancy: effects on postnatal development and life. *Radiation research*, 187(6), 647-658.
- Superhaber. (2024). Retrieved 18.03.2024 from <https://www.superhaber.com/sanal-gerceklik-gozlugu-cocuklar-icin-tehlikeli-mi-oculus-quest-2ye-karsi-uyarilar-geldi-haber-375261>
- Şenlik, Z. B. (2010). Ankarada bir üniversite hastanesinde iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları ile çalışan sağlık çalışanlarında iyonlaştırıcı radyasyonun olası sağlık etkilerinin belirlenmesi.
- Tomisawa, T., Hosokawa, S., Kudo, H., Osanai, M., Ota, K., In, N., Ohgino, A., Tsujiguchi, T., Takamagi, S., Tsuchiya, R., Kitajima, M., Terashima, S.,

- Yamaguchi, M., Saga, R., Mikami, K., Urushizaka, M., Sakai, M., Aizu, K., Hosokawa, Y., & Hanada, H. (2023). Are Online Simulations for Radiation Emergency Medical Preparedness Less Effective in Teaching Than Face-to-Face Simulations? *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 17, Article e520. <https://doi.org/10.1017/dmp.2023.188>
- Toru, F. (2023). Meme kanserli hastalarda kemoterapi tedavisi sırasında uygulanan sanal gerçeklik gözlüğünün anksiyete ve hasta memnuniyetine etkisi.
- Vearrier, D., Curtis, J. A., & Greenberg, M. I. (2009). Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials. *Clinical Toxicology*, 47(5), 393-406. <https://doi.org/10.1080/15563650902997849>
- Webtekno. 2024. Retrieved 18.03.2024 from <https://www.webtekno.com/kadinlarin-dogum-sirasindaki-stresini-azaltmak-icin-kullanilan-iliginc-yontem-h73999.html#!>
- Webtekno. (2024). Retrieved 18.03.2024 from <https://www.webtekno.com/nasa-bizim-yeni-yeni-kullandigimiz-vr-teknolojisini-30-yildir-kullaniyor-h33890.html>
- Wong, K. P., Tse, M. M. Y., & Qin, J. (2022). Effectiveness of Virtual Reality-Based Interventions for Managing Chronic Pain on Pain Reduction, Anxiety, Depression and Mood: A Systematic Review. *Healthcare (Basel)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/healthcare10102047>
- Wong, M., Chue, S., Jong, M., Benny, H. W. K., & Zary, N. (2018). Clinical instructors' perceptions of virtual reality in health professionals' cardiopulmonary resuscitation education. *Sage Open Medicine*, 6. <https://doi.org/10.1177/2050312118799602>
- Yoshimura, M., Kurumadani, H., Hirata, J., Senoo, K., Hanayama, K., Sunagawa, T., Uchida, K., Gofuku, A., & Sato, K. (2023). Case Report: Virtual reality training for phantom limb pain after amputation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, Article 1246865. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1246865>
- Zhao, X., & Li, X. B. (2022). Comparison of Standard Training to Virtual Reality Training in Nuclear Radiation Emergency Medical Rescue Education. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 17, Article Pii s1935789322000659. <https://doi.org/10.1017/dmp.2022.65>

Radyoaktif Maddelerle Çalışmada Atık Yönetimi

Lütfü GÜR¹, Bahri GÜR²

Giriş

Radyoaktif atıklar, radyoaktif madde içeren veya radyoaktif madde ile kirlenmiş ve artık ihtiyaç duyulmayan tehlikeli atıklardır (Deng vd., 2020). Meydana gelen radyoaktif atıklar yalnızca doğal yollarla üretilmemekte, aynı zamanda nükleer enerji santralleri, endüstriyel faaliyetler, nükleer araştırmalar, nükleer tıp, madencilik ve nükleer silahların yeniden işlenmesi ile de ortaya çıkmaktadır (Zhang vd., 2019). Radyoaktivite pozitif alfa parçacığı, negatif beta parçacığı, gamma ışınları ve nötronların radyasyonu ile serbest bırakılır. Radyoaktif parçalanma sürecinde, radyonüklitler zamanla radyoaktivitesini kaybederler. Büyük istikrarsız atomlar daha küçük atomlara bölünür ve sonunda radyasyonsuz elementlere ortaya çıkar. Bu yavaş yavaş radyasyon kaybı da yarı ömrüyle (half-life) ölçülür ve radyoaktif maddenin yarı ömrü bir saniyeden (Rn-220), milyonlarca yıla kadar değişebilir (Th-232) (Darda vd., 2021).

Dünya çapında radyoaktif atık üretimi gün geçtikçe artmaktadır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) yayılma yarı ömrüne bağlı olarak radyoaktif atıkları (Ojovan & Steinmetz, 2022);

(a) kısa ömürlü (yarı ömrü 31 yıldan az olan) ve

(b) uzun ömürlü (yarı ömrü 31 yıldan uzun olan) olarak sınıflandırmaktadır.

Radyoaktif atıkların sınıflandırılmasında temel olarak beş farklı sınıf kullanılır (IAEA, 2009a);

(i) *çok kısa ömrü olan atıklar (VSLW)*, sınırlı bir süre boyunca, birkaç yıla kadar, depolanırlar,

(ii) *çok düşük seviye atıklar (VLLW)*, yüksek düzeyde kısıtlama ve izolasyon gerektirmeyen, dolayısıyla yüze yakın atık yok etme tesislerinde ortadan kaldırılmaya uygun olan atıklar,

¹ Lütfü GÜR, Iğdır Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, lutfugur33@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2011-6751

² Doç. Dr. Bahri GÜR, Iğdır Üniversitesi, FEN EDEBİYAT FAKÜLTESİ, bahri.gur@igdir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-0579-6354

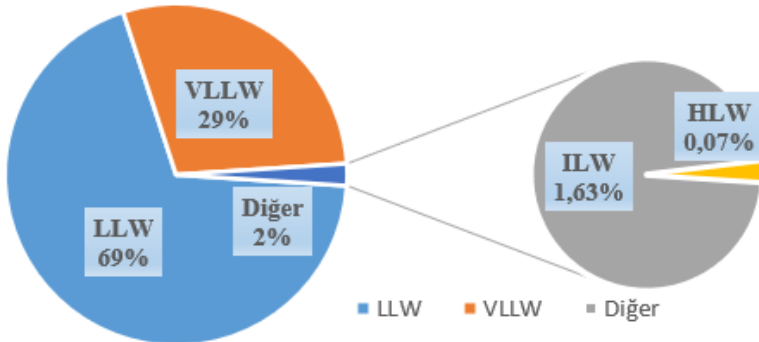
- (iii) *düşük seviyedeki atıklar (LLW)*, temizleme seviyelerinin üstünde, fakat uzun ömürlü radyonüklitlerin sınırlı miktarlarda olduğu atıklar,
- (iv) *orta seviye atıklar(ILW)*, Uzun ömürlü radyonüklidler içeren ve yakın yüzeydeki atıklardan daha fazla koruma ve yalıtım gerektiren atıklar,
- (v) *yüksek seviye atıklar(HLW)*, Radyoaktif bozulma ile önemli miktarda ısı üretmek için yeterince yüksek bir aktivite konsantrasyonu olan atıklardır.

Yeryüzünde bulunan katı radyoaktif atık toplamı yaklaşık 38 milyon metreküp olup, bunlardan 30,5 milyon metreküpü, toplamının yüzde 81'i kalıcı olarak bertaraf edilmiş, 7,2 milyon metreküp radyoaktif atık (19%) ise depolama alanında bulunmaktadır(Tablo.1) (IAEA, 2022b).

Tablo 1. Radyoaktif Atık Durumu(IAEA, 2022b)

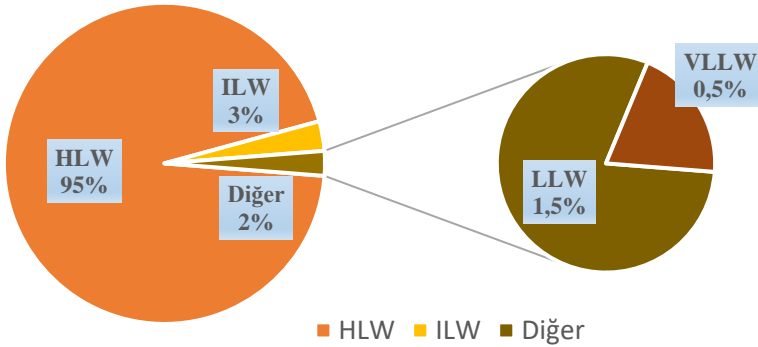
	Depolanan Radyoaktif Atık (m^3)	Bertaraf Edilen Radyoaktif Atık(m^3)	Bertaraf Edilmiş Atık Oranı
VLLW	2.918.000	11.842.000	%80
LLW	1.471.000	18.499.000	%92
ILW	2.740.000	133.000	%5
HLW	29.000	-	-

Dünya üzerinde depolanan ve bertaraf edilen radyoaktif atıkların %98'ini çok düşük, düşük ve ortaya seviye atıklar oluştururken, orta seviye ve yüksek seviye atıklar %2'sini oluşturmakta ve sadece %0,07'sini yüksek seviye atıklar oluşturmaktadır (Şekil 1) (IAEA, 2018b).



Şekil 1. Radyoaktif Atıkların Depolama ve Bertaraf Oranı

Yüksek seviye atıklar yeryüzünde bulunan toplam radyoaktif atık miktarının sadece %0,07'sini oluşturmasına rağmen, tüm atıkların sahip olduğu radyoaktiflik seviyesinin %95'ine sahiptir(Şekil 2) (IAEA, 2022b). Dünya üzerinde, şimdilik, sadece 3 futbol sahası kadar yer kaplayan yüksek seviye atıkların, neredeyse atıklarda bulunan, radyoaktivitenin tamamına sahip olması, bertaraf yöntemlerinin uzun yıllar sürmesi ve maliyetinin yüksek olması, enerji bağımlılığını azaltmak için ülkeler tarafından talebin gelecekte artabilecek olması 'Radyoaktif Atık Yönetiminin' günümüzde cevap aradığı ve gelecekte daha çok uğraşacağı konuların başında gelmektedir.



Şekil 2. Atıkların Radyoaktiflik Seviyelerine Göre Dağılımı

Radyoaktif Atık Yönetimi sadece günümüz toplumunu ve çevreyi değil, gelecek nesilleri ve çevreyi de koruması sebebiyle uzun yıllar boyunca sıfır tolerans ile sürdürülmesi gereken bir yöntemdir.

10.1. Radyoaktif Atıkların Sınıflandırılması

Dünya üzerinde üretilen radyoaktif atıkların; %80'i nükleer güç santrallerinde, %4'ü sanayi, %5'i sağlık ve %11'i yakıt üretiminde ortaya çıkmaktadır(Natarajan vd., 2020). Radyoaktif atıklar türlerine göre katı, sıvı ve gaz şeklinde olabilmektedir. Ancak asıl sınıflama radyoaktiflik seviyeleri ve buna bağlı olarak yarı ömürlerine göre; çok kısa ömürlü, çok düşük seviye, düşük seviye, orta seviye ve yüksek seviye olarak yapılmaktadır (IAEA, 2022b).

10.1.1. Çok Kısa Ömürlü olan Atıklar(VSLW)

Çok kısa ömürlü atıklar(VSLW) yarı ömrü birkaç yıla kadar olan atıklardır. Kısa süreli yüksek aktivite konsantrasyonunun yanı sıra, kısa bir süre için zararlıdır, çünkü

kısa süre içinde radyoaktif bozulma gerçekleşir (IAEA, 2009a). Genellikle radyoaktif tıbbi kullanan hastaneler ve üniversiteler başta olmak üzere araştırma merkezleri bu tür atıklar üretir (Özbakır, 2024). Çevreye zarar vermediği, serbest atık seviyesine düşene kadar yüzeydeki tesislerde depolanır. Örneğin, brahiterapi, ışın tedavisi, kemik kanseri, tiroit kanseri için I-131 ve hastanelerde 72 gün, 52 gün, 8 gün ve 2.7 gün yarı ömrü olan limfom tedavisi için Y-90 kullanılmaktadır. İşlemdeki herhangi bir kirli atık kısa bir süre için yüksek aktivite konsantrasyonu olan çok kısa ömürlü atık olarak kabul edilebilir ve bir bekleme süresi sonrasında normal atık olarak atılabilir (Darda vd., 2021).

10.1.2. Çok Düşük Seviye Atıklar(VLLW)

Bu sınıftaki atıklar genellikle nükleer santrallerin devre dışı bırakılması çalışmalarından kaynaklanan düşük aktivite konsantrasyonu olan topraklar ve çöplükleri içerir (Hioki, 2008). Bu atıklar yüksek seviye radyoaktivite içermediği için yeryüzüne yakın özel depolama yerlerinde muhafaza edilir (Bonin, 2010).

10.1.3. Düşük Seviye Atıklar(LLW)

Düşük seviye atıklar hastane, sanayi ve nükleer yakıt döngüsünden üretilir. Yüksek ve orta seviye atıklar dışında, aletler, giysiler, enjeksiyonlar, filtreler, laboratuvar hayvanlarının cesetleri ve dokuları, reaktör su işleme kalıntıları ve çoğunlukla kısa süreli radyoaktivite ve sınırlı miktarda uzun süreli radionüklit içeren diğer malzemelerin içerdiği atıklardır (IAEA, 2009b). Üretici ve yönetici olan ülkelere göre düşük seviye atıkların sınıflandırması çok geniş bir aralığı kapsıyor. Çünkü düşük seviye atıkların kapsamına; yüksek aktivite konsantrasyonu seviyelerinde kısa yaşamlı radionüklidler ve düşük aktivite yoğunluğunda uzun ömürlü radionüklitler de girmektedir (W. E. Lee vd., 2013). Düşük seviye atıklar 4 alt grupta sınıflandırılmaktadır. A,B,C ve C'den büyük(Greater than Class C(GTCC)) olarak sınıflandırılmıştır (Kim vd., 2022). A sınıfı en az tehlikeli, C'den büyük olanlar ise en tehlikeli olan düşük seviye atıklardır. A sınıfı atıklar bozulmadan önce depolanabilir ve normal atık olarak atılabilirken, GTCC sınıfı atıklar güçlü koruma ve yalıtım ile depolanıp, yüzeye yakın hatta orta seviye derinliğe kadar gömülmesi gerekebilir (Kim vd., 2022).

10.1.4. Orta Seviye Atıklar (ILW)

Orta seviye atıklar nispeten uzun ömürlü radionüklitlere sahip ve yüksek seviye ile düşük seviye arasındaki radyoaktivite sahip $3,7 \times 10^8$ – $3,7 \times 10^{11}$ Bq/kg³ olan atıklardır (Bonin, 2010). Daha az radyoaktiviteye ek olarak, orta seviye atıklar yüksek seviye atıklar gibi ısı yaymazlar. Dolayısıyla orta seviye atıklar genellikle koruma gerektirir, ama soğutma gerektirmez. Orta seviye atıklar, nükleer yakıt kaplamaları, son parçalar, kimyasal çamur, reaktör soğutucu sıvısının temizlenmesi yanı sıra kirlenmiş malzemeler, yedek parça, reaktör bakımında ortaya çıkan grafit ve devre dışı bırakılan reaktörler orta seviye atık içerir (Darda vd., 2021). Ayrıca bazı radyoaktif kaynaklar, radyasyon tedavisinde kullanılan nükleer ilaçlar ve yakıtın yeniden işlenmesi kaynaklı sedimentasyon ve santrifüj ürünleri de orta seviye atık olarak kabul edilir. Orta seviye atıklar aynı zamanda uzun ömürlü radionükleitler içeren yüksek seviye atıklar gibi alfa radyasyonu yayar ve bu radyoaktif konsantrasyonlar birkaç yüz yıldan daha uzun süre izole edilme ve saklama gerektirmektedir (IAEA, 2009b).

10.1.5. Yüksek Seviye Atıklar(HLW)

Yüksek seviyedeki radyoaktif atıklar nükleer güç santralindeki yakıt çubuklarının kullanılmasından sonra ortaya çıkmaktadır. Bir nükleer reaktördeki uranyum yakıt çubukları parçalandıkları takdirde artık kullanılamaz. Yüksek seviye atık tanımı ülkeye göre değişmektedir, çünkü ABD'den başka, ülkelerin birçoğu şu anda reaktör yakıtları olarak, tekrar kullanılmak için, harcanan yakıtların yeniden işlemektedir. Böyle bir durumda, yüksek seviye atıklar, kullanılmış nükleer yakıtın yeniden işlenmesinde ilk ve ikinci döngü rafine sıvı formları ve tekrar işlenmiş sıvısal atıkların katı formlar olarak ortaya çıkan atıklardır (Ojovan & Lee, 2014). Filyon ürünlerinin yüksek radyoaktivitesi nedeniyle, yüksek seviye atıklar mevcut en tehlikeli nükleer atıktır. Harcanan yakıt reaktörden çıkarıldığında yaklaşık 90–170 TBq/kg'lık başlangıç aktivitesiyle yüksek derecede radyoaktiftir (Bonin, 2010). Radyoaktivite 10 yılda 14–17 TBq/kg, 100 yılda 1.8–3.4 TBq/kg'ye anca düşmektedir. Sonuç olarak, yüksek seviye atıkları derhal soğutma ve koruma gerekmektedir.

Yakıtlardaki ısı ve penetrasyon radyasyonuna öncelikli katkıda bulunan ürünler Cs-137 ve Sr-90'lardır, ancak bu ürünler ayrıca transuranik atık olarak Pu-239, Pu-240 ve Np-237'yi de içerir ve uzun vadeli radyoaktiviteye maruz bırakır. Bu elementlerin yarı ömrü oldukça farklı olabilir. Cs-137 ve Sr-90 için yaklaşık 30 yıl, Pu-240 ve Pu-239'un ise sırasıyla 6.800 ve 24.000 yıl yarı ömrü vardır ve Np-237'in yarı

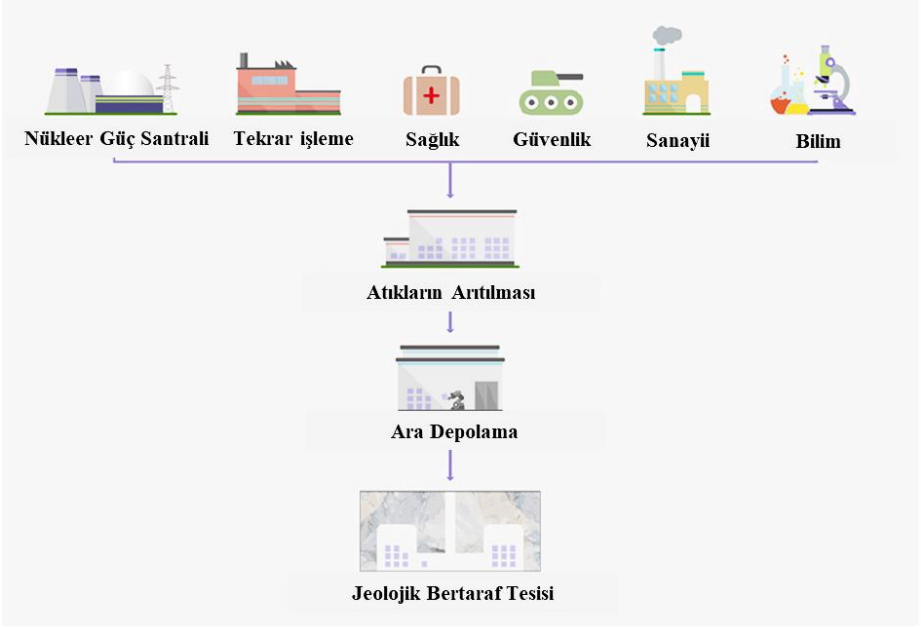
³ Radioaktivite Bekerele(Bequerel)(Bq) ile ölçülmektedir. 1 Bq=1 bozulma/saniyeyi ifade etmektedir.

ömrü 2 milyon yıl sürmektedir. Yüksek seviye atıklara doğrudan maruz kalmak, ölümcül radyasyon dozları nedeniyle, son derece tehlikelidir (Speight, 2020). Nükleer reaktörler yüksek seviye yakıtların ana kaynağıdır ve 2022 yılı sonu itibari ile dünya çapında 31 ülkede 437 nükleer güç santrali işletmede, ayrıca inşaat sürecinde 61 reaktör bulunmaktadır (World Nuclear Association, 2023).

10.1.6. Radyoaktif Madde Atık Yönetimi

Nükleer enerji başta olmak üzere diğer kullanım alanları ile birlikte her yıl giderek artan miktarda radyoaktif atık üretilmektedir. Atıklar biyolojik yaşam biçimlerine ve çevreye zarar veren radyoaktif maddeler içermesi sebebiyle, insan sağlığını korumak ve çevresel etkisini en aza indirmek amacıyla, radyoaktif atıklar diğer atıklardan farklı şekilde yönetilmektedir (IAEA, 2022b). Nükleer endüstri (özellikle elektrik üretiminde) tarafından üretilen atık miktarı diğer sanayi faaliyetlerine kıyasla küçüktür ve daha az karbon ayak izine sahiptir (Hassan vd., 2023). Karşılaştırmak gerekirse, 1000 MW elektrik üretmek için nükleer santralde yılda 27 ton atık üretilirken, 1.000 MW elektrik üretmek için kömür santralinde 270.000 ton radyoaktif ve ağır metaller içeren çamur üretilir, depolama yerlerinde ve çevrede kalır (Marra & Palmer, 2011).

Radyoaktif atık yönetimi; atıkların toplanması, işleminden geçirilmesi ve sürecin yönetilmesi anlamına gelir. Sonrasında atıklar zehirli olmayacak bir biçimde depolanır, ortadan kaldırma veya dönüştürmeyle ilgili uzun vadeli bir yönetim stratejisi uygulanır. Bu stratejinin tümüyle atıkları korumak, insan sağlığı ve çevre için şimdi ve gelecek nesillere aşırı yük getirmeden en yüksek güvenliği sağlayarak yapmayı hedefler (Ojovan & Lee, 2014). Radyoaktif atıkların genel akışı Şekil 3'de gösterilmektedir (The Geological Society, 2022).



Şekil 3. Nükleer Atık Yönetimi(The Geological Society, 2022)

Ülkeler yasal mevzuatlarına göre radyoaktif atıkları bertaraf etmektedir. Ancak tüm ülkelerin Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu(IAEA) tarafından geliştirilen standartlara da uyma zorunluluğu bulunmaktadır. 1995 yılında ülkelerin radyoaktif atık yönetiminde dikkat etmesi gereken 9 standart IAEA tarafından belirlenmiştir (Tablo 2) (IAEA, 1995).

Tablo 2. Radyoaktif Atık Madde Yönetim Prensipleri (IAEA, 1995)

1. İlke: İnsan Sağlığının Korunması	Radyoaktif atıklar insan sağlığı için kabul edilebilir bir koruma seviyesi sağlayan bir şekilde yönetilmelidir.
2. İlke: Çevreyi Koruma	Radyoaktif atıklar çevreye kabul edilebilir bir koruma seviyesi sağlayacak şekilde yönetilmelidir.
3. İlke: Ulusal Sınırlara bağlılık	Radyoaktif atık yönetimi ulusal sınırları aşan insan sağlığı ve çevre üzerindeki olası etkileri de önlemeli
4. İlke: Gelecek Nesilleri koruma	Atık yönetimi gelecek nesillerin sağlığı üzerinde olumsuz etki yaratmayacak şekilde olmalıdır.
5. İlke: Gelecek nesillere aşırı yük getirmemeli	Gelecek nesillerin hayatını olumsuz yönde etkileyecek şekilde sorumluluklar yüklememelidir.
6. İlke: Ulusal Yasal Çerçeve	Sorumlulukların açık bir şekilde dağıtıldığı, kontrol ve denetim mekanizmasının geliştirildiği bir yapı kurulmalı
7. İlke: Radyoaktif Atık Kontrolü	Radyoaktif atık üretimi mümkün olan en düşük seviyede tutulmalıdır.
8. İlke: Atık Üretimi ve Yönetimi Birbirine bağlı olmalı	Atık üretimi ve yönetimi arasındaki tüm işlemler adım adım takip edilmeli, bütünlük bir şekilde hesaplanmalıdır.
9. İlke: Tesislerin Emniyeti	Radyoaktif atık yönetimi tesislerinin güvenliğini kullanım ömrü boyunca uygun şekilde sağlamalıdır.

Radyoaktif atıkların belirli bir süre içinde daha az radyoaktif hale gelmesi nedeniyle, radyoaktif atıkların yönetilmesinin en iyi yolu, radyasyon aktivitesini kaybedene kadar depolamaktır. Farklı radyoaktif maddelerin farklı yarı ömrü vardır, bu da farklı depolama zamanları anlamına gelir (World Nuclear Association, 2022). Radyoaktif atıkların yönetimi iki kategoriye ayrılmıştır: bir yönetim stratejisi belirlenmiş olan atıklar; ve henüz kalıcı çözüm bulunmayan atıklardır. İlk kategori, son depoların zaten var olduğu en büyük ve en az radyoaktif atıklardan oluşur. Radyoaktif atıkların yüzde 98'i bu kategoriye girer: düşük seviye, çok düşük seviye ve çok kısa ömürlü atıklardır. Bu tür atıkların yönetimi dünyanın her yerinde, radionükleer kategorisine bağlı olarak, yüzeyin yakınında, yaklaşık 50 m derinliğe inşa

edilmiş ya da atık deposu tesislerinde belirli bir oranda ilk müdahale, ambalajlama ve kalıcı bir şekilde ortadan kaldırılmasını içeriyor (World Nuclear Association, 2022).

İkinci kategori esas olarak en radyasyonlu atıklardan oluşur, bunlar yüksek seviye ve uzun ömürlü orta seviye atıklardır ve bu atıklar atık hacminin yüzde 2'sinden daha azını oluşturmaktadır. İkinci kategori atıklara yönelik araştırmalar devam etmekte ve ilgili riskler yüzünden henüz yaygın olarak kabul edilebilir bir kalıcı çözümü bulunamamıştır (Darda vd., 2021). Dünyanın dört bir yanındaki ülkeler yüksek seviye atıklar için bir dizi atık yönetimi ve ortadan kaldırma seçeneği göz önünde bulunduruyorlar. Çözümle ilgili olarak her ülke yüksek seviye atıklar için doğru, çevre açısından güvenli ve kamuoyu tarafından kabul edilebilir bir son yönetim seçeneği olarak derin jeolojik depolama yöntemini kabul etmiştir. Bunun en önemli sebebi de, radyoaktif atıklarla mücadele ile ilgili zaman aralığının 10.000 ile milyonlarca yıl arasında olmasıdır (Nagasaki & Nakayama, 2015).

10.1.7. Atığın İşlemden Geçirilmesi

Radyoaktif atığın işlenmesi güvenli bir şekilde müdahale edebilmek ve ekonomik bir şekilde taşımak için uygun bir şekilde değiştirme amaçlı işlemleri kapsamaktadır (Abdel Rahman & Ojovan, 2021). Radyoaktif atıkların işlem aşaması genellikle hacmini azaltmak için yakılma ve sıkıştırma işlemini içerir. Diğer teknikler ise, radyonüklit içeriğini ayırmak veya konsantrasyonu artırmak için filtrasyon, iyon değişimi veya çöktürme işlemleridir. Toplama, ayrıştırma, kimyasal düzenleme ve dezenfeksiyon gibi ön işleme aşamaları da vardır (Ojovan & Lee, 2005).

10.1.7.1. Yakılması

Atık miktarını azaltmak için radyoaktif atıkların yanıcı unsurları yakılabilmektedir. Bu yöntem, pek çok ülkedeki araştırma merkezlerinden (biomedikal araştırma gibi), nükleer tıp sektöründe, atık işleme tesislerinde, enerji santrallerinin temizlenmesi ve yakıt üretimi tesislerinin emisyon limitlerine tabi tutulması için kullanılmaktadır (Ghouleh & Shao, 2018). Yakıt dışı bileşenlerin ayrılmasından sonra atıklar yaklaşık 1000 °C'ye kadar sıcaklıkta özel olarak tasarlanmış bir fırında yakılırlar. Fırının tasarımı, atmosfere salınmadan önce toplanan, filtrelendirilen ve seyreltilen yan ürün gazları ve buharların salınımını kontrol etmek için uluslararası standartlar ve doğal düzenlemelerle dizayn edilir (Ghouleh & Shao, 2018).

10.1.7.2. Sıkıştırılması

Sıkıştırma atık miktarını azaltmak için çok yönlü, yaygın olarak kullanılan ve düşük maliyetli bir yöntemdir (Garamszeghy, 2011). Bu yöntem genellikle nükleer endüstrilerde ve çoğunlukla katı LLW atıklarda uygulanmaktadır. Sıkıştırma işlemi 5 ton ile 1.000 ton arasında değişebilmekte ve işlenen atık malzemeye bağlı olarak elde edilen 3-10 katına kadar hacmi azaltılabilmektedir (Garamszeghy, 2011). Uluslar arası Atom Enerjisi Kurumuna üye ülkelerinin radyoaktif atıkların işlenmesiyle ilgili verilerine göre, katı atıkları %75'i başka bir işlem aşamasına geçmeden önce sıkıştırma ile hacmi azaltma aşamasına girmektedir (Benitez-Navarro, & Salgado-Mojena, 2002). Genellikle katı atık içeren bataryalar hidrolik bir basınç kullanılarak parçalanır ve bir konteynere koyarak depolama amaçlı kapatılır. Çoğu zaman daha fazla sıkıştırma yapılabileceği bir atık işleme tesisine ya da bir depolama/dönüşüm tesisine taşınmak için ambalajın kolaylaştırılması amacıyla düşük kuvvetli sıkıştırmayı kullanılarak sıkıştırılır.

10.1.8. Atığın Koşullandırılması

Nakliye, depolama ve atma işlemlerinin yerine getirilebilmesi için atıkları en yüksek güvenliği sağlayacak aşamaya koşullandırılması(conditioning), yani kullanılabilir hale getirilmesi gerekir. Bu durum, atıkları zamanla tepki veremeyecek veya bozulmayacak bir şekilde stabilize etmek için yapılır (Abdel Rahman vd., 2021). Uzun vadeli atıkların bertaraf edilmesi, temizlik veya vitrifikasyon gibi koşullama aşaması içerir (Abdel Rahman & Ojovan, 2021). Sıvı LLW ve ILW tipik olarak çimento ile sertleştirilirken, yüksek seviye atıklarda cam matrisi kullanılır. Atıkların hareket ettirilmesini sağlamak için son adım atık özellikleri açısından özel konteynerlere yerleştirmektir. Radyoaktif atıkların uzun süreli atılma amaçlı olarak değerlendirilmeden önce sızıntıya dayanıklı sabit bir formda olması gerekmektedir. Ambalaj, atıkların kendilerine ve atıkların depolanacağı yerlere uygun olmalıdır (Abdel Rahman vd., 2021).

10.1.8.1. Vitrifikasyon

Uzun ömürlü atıkların binlerce yıl boyunca emniyetli bir şekilde saklanabilmesi için çözünmez katı atık formda olması gerekmektedir. Fransa, Japonya, Rusya, Birleşik Krallık, Hindistan ve ABD tarafından kullanılan en ünlü yöntem, vitrifikasyon yöntemidir (Vienna, 2010). Kullanılan yakıtın yanı sıra, kullanılmış yakıtların yeniden işlenmesinden sıvı formda ortaya çıkan yüksek seviye atıkların çoğu yüksek derecede radyoaktif bölünme ürünleri ve uzun ömürlü radyonüklitler içeren bazı

transuranik elementler içerir. Bu uzun ömürlü yakıtları stabil hale getirmek ve kapsüllendirmek için vitrifikasyon süreci kullanılır. Başlangıçta sıvı olan atıkları daha yüksek konsantrasyonlu radionüklitlerin temizlenmesi için çeşitli aşamalardan geçmektedir. Atığın kurutulup granül tozu şekli haline getirmek amacıyla yapılan işlemler şunlardır: filtrasyon, demineralizasyon, absorpsiyon, buharlaşma, faz ayrımı, geri ozmos (Yun vd., 2013). Daha sonra vitrifikasyon sürecinde kurutulmuş atıklar şeker, kum vb. gibi kristalleşen maddelerle karıştırılır ve kalsinlenir. Kalsinasyon herhangi bir fazla suyu çıkarır ve cam ürününün istikrarını artırır. Kaynak ürün daha sonra bir paslanmaz çelik kapsül konteynere dökülür ve soğumasına izin verilir (Sanito vd., 2022). Soğuyan atığın olduğu konteyner nihayetinde depolama ve bertaraf edilmek üzere mühürlenir. Batı Avrupa ülkelerinin vitrifikasyon kapasitesi yılda 1000 ton ve bazı tesisler yaklaşık 30 yıldır çalışmaktadır. Vitrifikasyon, uzun ömürlü yakıtları binlerce hatta milyonlarca yıl boyunca muhafaza edilmesini sağlar (Ojovan & Lee, 2011).

10.1.8.2. Kaplama

Radyoaktif atıkları kaplama(cementation), özel olarak formüle edilmiş harçların kullanılmasıyla yapılan çimentolama işlemi, çeşitli çamur ve çökelti/jel (topak) veya aktifleştirilmiş malzeme formlarındaki orta ömürlü radyoaktif atıkların yanı sıra parçalanmış atıkların da hareketsiz hale getirilmesi için uygulanır (Abdel Rahman & Ojovan, 2021). Genel olarak katı atıklar özel bir konteynere yerleştirilir, harç eklenir ve bu da içeride herhangi bir hava balonları bırakmadan tüm yerleri kaplayarak hareketsiz hale getirir. Bu ekonomik bir koşullandırma yöntemidir ve birçok ülke tarafından depolama veya dışarı çıkarma sırasında radyoaktif atıkların imobilizasyonunu sağlamak için yaygın olarak kullanılır (Ghouleh & Shao, 2018).

10.1.8.3. Synroc (Sentetik Kaya)

Synroc çeşitli minerallerin(hollandit, zirkonolit, perovskit ve rutil) az miktarda metal alaşımı ile karışımı sonucu yapılmış bir seramiktir (Gregg vd., 2020). Elde edilen bu seramik yeniden işlenmiş yüksek ve orta seviye radyoaktif atığa eklenir. Öncelikle karışım kurutulur ve 750 °C'de kalsine edilerek toz haline getirilir. Toz körük benzeri paslanmazın bir çelik kutunun içine konur ve o da başka bir konteyner kabın içine konuluyor. Konteyner daha sonra Sıcak İzostatik Presleme (HIP) olarak bilinen bir fırının içine alınır, daha sonra ısı ve sıkıştırma uygulanır. HIP'in sıcaklığı ve basıncı yaklaşık 1200 °C ve 150 Mpa'dır. Sonuç olarak ortaya silindirik şekilde, önceki hacminin üçte ikisine sahip sert, yoğun, siyah sentetik kaya oluşur. Oluşan bu kaya

imha için çok sağlam ve dayanıklı bir malzemedir (Gregg vd., 2020). Synroc uygulaması genellikle askeri uygulamalar sonucu ortaya çıkan radyoaktif atıkların bertaraf edilmesinde kullanılan bir yöntemdir.

10.1.9. Depolama

Bazı düşük seviye atıkların(Co 60, yarılanma ömrü 5 yıl) depolanmasının amacı yarı ömrünü tamamlayarak norma şekilde bertaraf edilmesi içindir. Birçok düşük seviye radyoaktif atık, tüm hacmin nerdeyse %90'nını oluşturur, uzun süre paketlenildikten sonra doğrudan imha edilir (IAEA, 2022b).

10.1.9.1. Kullanılmış Yakıt Havuzu

Nükleer reaktörden çıkan atık konumu geçmiş yakıt çubuklarının ilk depolama havuzudur. Artık bölünme için uygun olmayan yakıt çubuklarının, yaklaşık dörtte birinin her 12 ila 24 ayda bir, reaktörden çıkarılması ve yeni olanlarla değiştirilmesi işleminde kullanılır (Jeffs, 2010). Kullanılmış yakıt çubukları reaktör çekirdeğinden çıkarıldığında, çok sıcak ve yüksek derecede radyoaktiftir, derhal soğutulmalıdır. Genellikle bu ilk soğutma reaktör binasının yakınında yapılır, bu yüzden tüketilen yakıt havuzlarının çoğu reaktöre yakın yerlerde bulunur. Soğutmanın yanı sıra, havuz kısa ömürlü radyoizotopların da bozulmasına izin verir ve radyoaktifliğini önemli ölçüde azaltır (Ye vd., 2013). Su yakıt takımını soğutur ve çevreye doğal radyolojik koruma sağlar. Havuz genellikle 12 m derinliğe sahiptir ve 4–5 m'lik yakıt takımı sığabilir. Yakıt takımları reaktörden ve kanalların altından havuza taşınır. Sadece 6 metre derin bir su havuzu radyasyonun kabul edilebilir bir sınırdaki tutulması için yeterli olsa da, ekstra derinlik, operatörlerin montajları koruyucu ekipman olmadan kullanabilmeleri için bir güvenlik sınırıdır. Havuzdaki su, yakıt montajı tarafından üretilen ısıyı ortadan kaldırmak için pompalar ve ısı değiştiricileri aracılığıyla sürekli soğutulur. Su sıcaklığı 60 °C'nin altında tutulur ve yakıtın maksimum ısı 2–4 yıl içinde önemli ölçüde düşer (Wahid vd., 2022).

10.1.9.2. Kuru Varil Depolama

Bu yöntem soğutulmuş yakıt çubuklarının yüzeyde bulunan yakıt havuzunda depolama yöntemidir (Wu vd., 2018). Depolamanın amacı, sıkıca kilitlemiş çelik silindir ile kullanılmış yakıtın sızıntı yapmasını engelleyerek saklama alanı oluşturmaktır (Bertel & Dujardin, 2007). İnsanları ve çevreyi radyasyona karşı koruma sağlamak için ana çelik silindirini çevreleyen çelik, beton ve diğer

malzemelerden oluşan ek katmanları vardır. Kuru varil depolama tasarımı hem depolama hem de taşıma için uygundur.

Yakıt montajları tasarımına göre hem yatay hem de dikey olarak depolama yapılabilmektedir. Kullanılmış yakıt havuzu yüksek seviye yakıt için kalıcı bir depolama yöntemi olmayıp, kullanılmış yakıt havuzlarında geçici olarak bekletilip daha sonra kuru varil depolama alanına alınır. Yakıt çubukları 3 yıl (sanayi normu yaklaşık 10 yıl) sonra kullanılmış yakıt havuzundan alınarak 40 yıl boyunca kuru varil depolamaya konulabilmektedir (IAEA, 2014b).

10.1.10. Atığın İmha Edilmesi

Radyoaktif atıkların bertaraf edilmesi geri alınma amaçlı olmayan, onaylanmış belirli tesislere, ortaya çıkan atığın yerleştirilmesi anlamına gelir. Diğer atıklarla karşılaştırıldığında, örneğin evsel atık, hastane atıkları, endüstriyel atık ve kimyasal atıklara göre radyoaktif atıklarda zamanla bozulup radyasyon yayan radyonüklitler bulunur. Bu nedenle, radyoaktif atıkların bertaraf edilmesinin öncelikli ve en önemli amacı, halk tarafından uzak bir gelecekte bile alınacak radyasyon dozlarının izin verilen limitlerden daha düşük olmasını sağlamaya yönelik, yeterince uzun bir süre boyunca bu atıkları erişilebilir ortamdan izole etmektir (Faybishenko vd., 2017).

Dünyanın dört bir yanındaki çeşitli radyoaktif atık bertaraf tesisleri bulunmaktadır. Bu tesislerin tasarımı, derinliği ve konumu ülkeye göre değişmekte ve esas olarak atık türü, radyoaktivite, jeolojik koşullar ve güvenlik gereksinimleri ile belirlenmektedir. Bu tesisler, tasarımı, derinliği ve atık türüne göre 2 sınıfa ayrılabilir. Bunlar Yüzeğe Yakın İmha ve Derin Jeolojik Depolama yöntemleridir (Tyupina vd., 2023).

10.1.10.1. Yüzeğe Yakın İmha

Bu tesisler yer yüzeyinin altında yaklaşık 5-50 metre derinlik aralığında inşa edilen ve 30 yıla kadar yarı ömrü olan düşük seviye ve kısa ömürlü orta seviye atıklar için tasarlanmıştır (Yu vd., 2023). Bu tesislerin geliştirilmesi, yer seçimi, tasarımı, inşaat, işletme, faaliyetinin sonlandırılması ve sonlandırma sonrası izleme gibi aşamaları bulunmaktadır. Tesisin yer seçimi esas olarak yerin jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri ile belirlenir. Bunlar arasındaki önemli olan özellikler; toprağın kalınlığı, yeraltı sularının akış yönü ve akış hızı, çeşitli radyonüklitler için boşluk ve emilme parametreleri yer alıyor. Bu parametreler; atıkların tasarımı, şekli, türü ve miktarı, geri doldurma yerleri gibi diğer inşa edilmiş engeller ve yakıt çubukları gibi atık sisteminin diğer bileşenleriyle birlikte ulusal düzenlemeler

tarafından belirlenen güvenlik gereksinimlerine uygun olarak yeterli radyolojik koruma sağlar (IAEA, 2014a).

Bir yer seçimini kontrol eden önemli özelliklerden bazıları; aktif tektonik bir yer olmaması, deprem olasılığı, volkanoloji, iklim değişikliği ve topografik değişiklikler gibi potansiyel olarak yıkıcı doğal olayların çok düşük olduğu yerler olmalıdır. Yeryüzü ve yeraltı sularının olmaması radyonüklitlerin biyosfere ulaşımını azaltan önemli bir etkidir. Bu teknik gerekliliklerin yanı sıra, yer seçimi sürecinde yer alan diğer önemli faktörler arasında bölgedeki ekonomik maden veya diğer doğal kaynakların durumu, düşük toprak değeri, düşük nüfus, kolay erişilebilirlik atık üreten merkezlere yakınlık gibi etkenlerde önemlidir. Genel olarak bu tesislerdeki atıkların izole edilmesi ve saklanması için tasarlandığı süre, atıklardaki yarı ömrünün(örneğin 137Cs ve 90Sr gibi isotopların) 300 yıla kadar olan atıklardır. Şu anda yaklaşık 150 yüzeye yakın imha tesisi dünya çapında faaliyet göstermektedir (Tomar vd., 2023).

10.1.10.2. Derin Jeolojik Depolama

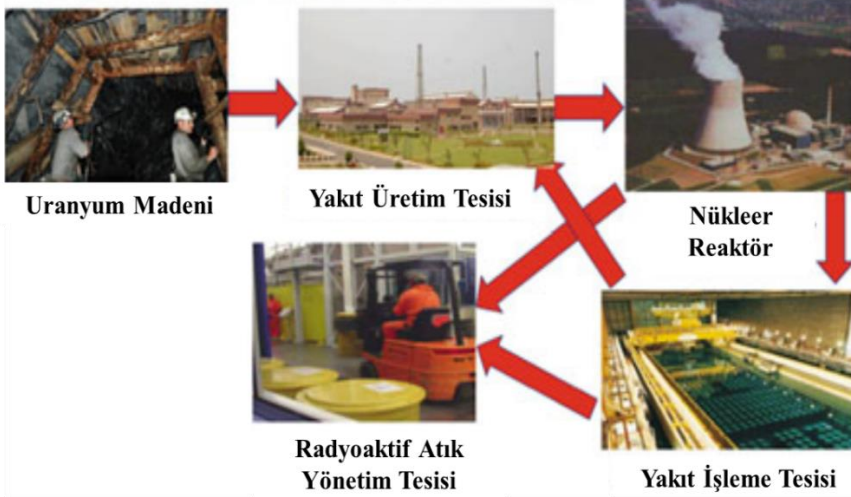
Bazı radyoaktif atıkların radyasyonda arınması için çok uzun bir zaman aralığına ihtiyaç duyulmaktadır, bu sebeple derin jeolojik depolama(yaklaşık 200–1000 m yeraltı altı) yöntemi geliştirilmiştir (World Nuclear Association, 2022). Bu yöntemde kullanılan atıklar çoğunlukla kullanılmış yakıtlar, yeniden işlenmiş bölünme ürünleri ve transuranik atık olan yüksek seviye atıklardır. Atıkların bertaraf edilmesi mühendislik ve doğal engellerin birleşmesiyle sağlanmaktadır. Atıkların işlenmesi, paketlenmesi, tasarlanmış depolama alanı ve doğal engeller tümüyle radyonükleitlerin insanlara ve çevreye ulaşmasını engellemek için dizayn edilmiştir (J. Lee vd., 2020). Gerçekten kalıcı bir çözüm bulunmamasına karşın, özellikle yüksek seviye atıkların ortadan kaldırılması için, en doğru yöntemin derin jeolojik depolama yöntemi olduğuna karar verilmiştir. Radyoaktif atıkların ortadan kaldırılması için kullanılan sadece birkaç derin jeolojik depolama tesisi bulunmakta olup, diğerleri çoğunlukla düşük seviye ve orta seviye tesislerdir. Şu anda yüksek seviye radyoaktif atıkların 10 bin yıl depolanacağı lisanslı olan tek derin jeolojik depolama tesisi(WIPP) ABD'de bulunmakta ve yerin 700 metre altındadır (Klaus, 2019). Fransa, Finlandiya, İsveç ve ABD derin jeolojik depolama alanlarını inşa etmek için çalışırken, Kanada, Çin ve İngiltere şu anda uygun yerler aramaktadır.

Derin Jeolojik Depolama aşağıdaki hedeflere ulaşmayı amaçlamaktadır (Vance vd., 2017):

- (i) Tasarımı ve işletiminde göz önünde bulundurulmuş güvenlik süresi boyunca, radyoaktivitenin biyosfere serbest bırakılması, denetleyici makamın belirlediği konsantrasyon sınırlarını aşmaması,
- (ii) Depolama sistemini ve atıkları kasıtlı insan girişiminden ve aynı zamanda depremler, tsunamiler ve sel gibi yıkıcı doğal olaylardan da koruması,
- (iii) Gelişen teknolojiler ışığında, gelecek nesillere bertaraf edilen atıklar hakkında karar verme olanağı sağlamak amacıyla belirli türdeki bertaraf edilmiş atıkların geri kazanımı kavramını tasarıma dâhil etmektir.

10.2. Radyoaktif Atığın Taşınması

Radyoaktif atığın taşınması, taşınan maddenin emniyetinin sağlanması, insanların ve çevrenin her türlü taşınma koşulunda (rutin, normal ve kaza koşullarında) iyonize radyasyonun zararlı etkilerinden korunması yönündeki ilkeye dayanmaktadır (IAEA, 2018a) ve Şekil 4’de görülen güzergâhlar arasında radyoaktif madde taşınmaktadır. Rutin koşullar kaza olmayan taşıma koşullarını ifade etmektedir. Normal koşullar, taşıma ve transit depolama esnasında meydana gelebilecek, aşırı depolama gibi, küçük kazaları ifade etmektedir. Kaza koşulları taşıma sırasında meydana gelebilecek mekanik ve termal çarpışmalara yol açabilecek olaylar ve taşıma esnasında bir paketin bir suyun içine düşmesi gibi paketin dış yüzeyine basınç artmasına neden olabilecek olaylardır (Tomar vd., 2023). Radyoaktif atığı taşıyan personele tahmin edilen yıllık doz miktarı 1 mSv’den fazla değilse tedbir almaya gerek yoktur. Çalışanların tahmin edilen yıllık doz seviyesi 1 mSv’yi geçmekle birlikte 6 mSv’i altında ise işyerinde denetim yapılmalıdır. Eğer taşımacılık çalışanlarının tahmini yıllık 6 mSv’den fazla bir dozu alması muhtemelse, onlara bireysel ölçüm cihazları verilmelidir. Mesleki maruziyet sınırı yani 20 mSv/yıl asla aşılmamalıdır. Ulaşım güvenliği üç güvenlik seviyesi; içsel güvenlik, pasif güvenlik ve aktif güvenlik seviyeleri ile ele alınmaktadır. Bu güvenlik seviyeleri, taşınan radyoaktif malzemenin doğası ve miktarı, en uygun paketlemenin seçimi ve radyoaktif maddenin taşınması üzerindeki idari kontrolün uygulanması ile karakterize edilmektedir (Tomar vd., 2023).



Şekil 4. Nükleer Madde Taşıma Güzergâhı(Tomar vd., 2023)

İçsel Güvenlik (Inherent Safety), belirli bir tasarımın paketinde bulunan radyoaktif maddenin özelliği, miktarı ve doğasına göre sınırlayarak potansiyel radyolojik riski azaltmaktır. Radyoaktif atıklar farklı fiziksel ve kimyasal şekillerde taşınır. Bir nükleer malzemenin taşınacağı paket tasarımı, taşıma ve depolama sırasında uygulanacak kontrol tedbirleri, radyoaktif atığa ilişkili potansiyel tehlikeye göre belirlenmektedir (Adamov vd., 2015).

Pasif Güvenlik, Pasif güvenlik paketleme ile sağlanmaktadır. Normal taşıma koşullarında, zırhla yapılan kaplama durumlarında bile dışsal müdahale ile radyoaktif sızıntı meydana gelebilmektedir. Bu şekilde meydana gelebilecek sızıntılardaki maruziyeti azaltmak için doğru bir paketleme yapılması gerekmektedir. Bir kaza, paketleme ile sağlanan koruyucunun ve/veya radyoaktif maddenin bütünlüğünü tehlikeye atabilir ve böylece potansiyel olarak dış maruziyet ve/veya da iç maruziyete yol açabilir. Bir paketlemenin verimliliği tüm taşıma koşullarına karşı dayanıklı olması ile mümkündür. Dış ve iç maruziyetleri sınırlamak için, farklı paket türlerinde izin verilen radyoaktif atık miktarı da sınırlıdır (Mitrakos vd., 2023).

Aktif Güvenlik, radyoaktif maddenin içsel güvenliği ve en iyi koruma için uygun paketleme seçimi ile sağlanamayan taşıma ve idari kontrol sırasındaki operasyonel kontrol yöntemleridir. Radyoaktif maddeyi taşıma ve depolama sırasında birçok kontrol tedbirleri uygulanmaktadır. Paketlemeye hazırlama, paketleme kategorisi belirleme, etiketleme, yükleme ve en önemlisi acil durum müdahalesi bunlardan bazılarıdır (Tomar vd., 2023).

Radyoaktif atığın taşınması sırasında meydana gelebilecek acil durumların yönetimi detaylandırılması gereken önemli bir konudur. Taşımadan sorumlu olan işletme taşıyıcıya acil durumlar karşısında uygulayacağı talimatları vermekle sorumludur. Bir taşıma sırasında herhangi bir acil durum meydana geldiğinde, ilk müdahale ekibinin gelmesine kadar bazı önleyici tedbirlerin alınması zorunludur (Özbakır, 2023). Taşıyıcıya verilecek talimatta radyoaktif atığın ayrıntıları, potansiyel tehlikenin doğası ve çeşitleri, ilk müdahale ekibi gelmeden önce uygulanacak önlemler(örneğin belirli bir bölgeye intikal etmek) ve ulusal acil durum müdahale yetkilisinin iletişim bilgilerini içermelidir. Radyoaktif atık yönetimi sisteminde görevli olan tüm personelin acil durumlarda harekât tarzı konusunda eğitim alması gerekmektedir (IAEA, 2022a).

Radyoaktif maddenin taşınması esnasındaki güvenliği önemli unsurlardan birisidir, çünkü hırsızlığa maruz kalması veya bir gönderinin güzergâhının kasıtlı olarak değiştirilmesi gibi bir güvenlik ihlali çok kötü sonuçlara yol açabilir. Gönderinin doğasına bağlı olarak, üç güvenlik seviyesi belirlenir; ihtiyatlı yönetim, temel seviye ve ileri seviyedir (IAEA, 2020). Taşımadan sorumlu olan yönetim bir güvenlik ihlali ve tehdit algısının, taşıma yolunda ve ilgili dönemde meydana gelen sonuçlarını temel alarak uygun güvenlik seviyesini belirlemeli ve buna göre, güvenlik olaylarını tespit etmek, engellemek, geciktirmek ve bunlara derhal müdahale edecek bir güvenlik planı hazırlamak zorundadır. Taşımadan sorumlu olan işletmeler, yasaları uygulayan makamlar ve ulusal/yerel acil durum müdahale makamları arasındaki işbirliği herhangi bir güvenlik olayının güvenli ve etkili bir şekilde ele alınmasını sağladığı takdirde tam anlamıyla güvenlik sağlanabilmektedir (IAEA, 2020).

10.3. Radyoaktif Madde Atık Yönetimi Örneği; Rusya Federasyonu

Nükleer çağın başlangıcından bu yana ülkeler için radyoaktif atık yönetimi asla bir öncelik değildi. Bu durum tüm nükleer enerjiyi kullanan ülkeler için geçerli olsa da, Sovyetler Birliği ve Rusya'nın radyoaktif atık yönetiminin önemini anlaması diğer ülkelere göre daha geç olmuştur. Radyoaktif atıkların envanterlenmesi, denetimi ve dağıtımından sorumlu bir ulusal ajansla birleşik bir "Radyoaktif Atık Yönetimi" sisteminin kurulması 2010'lu yılları bulmuştur (Kasperski & Stsiapanau, 2022).

Bunun en büyük nedeni Rus ekonomisi ve nükleer endüstrisinin 2000'li yıllardan sonra iyileşmeye başlaması ve bu sayede hem ülkede hem de yurtdışında ikili antlaşmalar yapmasını sağladı ve bu durum yetkililerin

radyoaktif atık yönetimi sorunlarını ele almasına yol açtı (Kasperski, 2015). Yaklaşık 20 yılı süren tartışmaların sonucu radyoaktif atıkların işlenmesi hakkındaki yasa Rusya'da kabul edildi. Kanunun uygulanmaya başlamasından sonra, atıkların işlenmesinden ve son olarak izole edilmesinden mali açıdan sorumlu olan üreticilerle oluşturulan ulusal bir atık yönetimi sistemi kurulmuştur. 2012 yılında Rusya'nın tüm nükleer girişimleri, araştırma kurumları, nükleer donanma ve nükleer silah tesislerini içeren Rusya Devlet Nükleer Enerji Kurumu olan Rosatom kurulmuştur. Rusya Devleti sıvı radyoaktif atıklar için 330 depolama, 3 temizleme tesisi ve katı radyasyon atıkları için 1.466 geçici depolama alanına sahiptir (Nuclear Energy Agency, 2014). 2011 yılında yürürlüğe giren yasa ile Ulusal Radyoaktif Atık Yönetimi Operatörü adlı yeni bir organizasyon oluşturuldu ve Ekim 2013'te, tümü 2025 yılına kadar faaliyet gösterecek uzun vadeli depolar ve geçici atık depolama tesisleri için potansiyel 30 yerin listesi tespit edilmiştir(Kasperski & Stsiapanau, 2022).

Rusya Federasyonu'nda radyoaktif maddeler ve radyasyon atıklarının devlet tarafından kontrolü en önemli unsurlardan birisidir. Radyoaktif maddelerin ve radyasyon atıklarının devlet muhasebe ve kontrol sisteminin başlıca amaçları; mevcut radyoaktif maddelerin ve radyoaktif atık madde miktarını yerinde belirlemek, kayıpları, izinsiz kullanım ve hırsızlıkları önlemek, hükümet makamlarına varlıkları, ihracatı, ithalatı ve hareketleri hakkında bilgi vermektir. Radyoaktif atık yönetimi için üç aşamalı birleşik bir devlet sistemi oluşturulmuştur(Baurina vd., 2021).

- *İlk aşamada*, I-II. sınıf tehlikeli sınıfların birleşik devlet atık yönetimi sisteminin düzenleyici ve organizasyonel temelleri oluşturulmuş, kurulan prosedürle, bu tür atıkların ilk kaydı ve bulunacağı yer belirlenmeli, normlar, kurallar ve kuruluş ve idari belgeler oluşturulmalıdır. Birleşik Devlet atık yönetim sisteminin kurulması için I- II. sınıf tehlikeli atık üretimi tahminleri yapılmış, atıkları üreten işletmeler belirlenmiştir.
- *İkinci aşamada*, I-II tehlikeli sınıf atıkların kullanımı ve bertaraf edilmesi ve ortadan kaldırılması için bir sistem oluşturulmuş. Gerekli altyapıyı oluşturmak için finansman da dâhil olmak üzere mekanizmalar geliştirilmiştir. Araştırma, geliştirme ve teknolojik çözümlerin üretilmesi için bilimsel ve teknik organizasyonel yapılar da geliştirilmiştir.
- *Üçüncü Aşamada*, radyoaktif atıkların bertaraf edilmesinde görevli olan tüm unsurların uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlamak, takip ve kontrol sistemi geliştirilmiştir.

Şu anda Rusya ekonomisinin çeşitli sektörlerinde yaklaşık 2000'e yakın işletme nükleer endüstride faaliyet göstermektedir. Radyoaktif atıklar 900'den fazla depolama tesisinde depolanmakta, bunlardan yaklaşık 300 tanesi de atıl duruma geçmiştir (Baurina vd., 2021).

Rusya Federasyonunda faaliyet gösteren ve radyoaktif atık üreten tüm işletmelerin, I ve II. sınıf tehlikeli atıkların toplanması, taşınması, işlenmesi ve bertaraf edilmesi için hizmet sağlama sözleşmelerini kabul etme zorunluluğu bulunmaktadır. Aynı zamanda, işletmelerin kendi atıklarını kendi başlarına işleyebilmeleri de mümkündür. Teknik kapasite ve ilgili faaliyetler için gerekli izinlerin bulunmadığı hallerde, atık üreticilerinin atık toplama hakkı bulunmamakta ve bu durum için Rosatom ile uygun bir anlaşma yapma zorunluluğu vardır. I ve II. sınıf tehlikeli atıklarının yönetimi için bilgi desteği sağlamak amacıyla, federal atık yönetimi planının geliştirilmesi ve düzenlenmesi de dahil olmak üzere, I ve II. sınıf tehlikeli atıkların yönetimi hakkındaki muhasebe ve kontrol için birleşik bir devlet bilgi sistemi oluşturulmuştur (World Nuclear Association, 2021).

Kaynaklar

- Abdel Rahman, R. O., & Ojovan, M. I. (2021). Toward Sustainable Cementitious Radioactive Waste Forms: Immobilization of Problematic Operational Wastes. *Sustainability*, 13(21), 11992. <https://doi.org/10.3390/su132111992>
- Abdel Rahman, R. O., Metwally, S. S., & El-Kamash, A. M. (2021). Improving the Performance of Engineering Barriers in Radioactive Waste Disposal Facilities: Role of Nano-materials. İçinde O. V. Kharissova, L. M. Torres-Martínez, & B. I. Kharisov (Ed.), *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications* (ss. 1183-1200). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36268-3_79
- Adamov, E. O., Orlov, V. V., Rachkov, V. I., Slessarev, I. S., & Khomyakov, Yu. S. (2015). Nuclear energy with inherent safety: Change of outdated paradigm, criteria. *Thermal Engineering*, 62(13), 917-927. <https://doi.org/10.1134/S0040601515130029>
- Baurina, S. B., Khudyakov, S. V., & Uchirova, M. Y. (2021). Formation of Radioactive Waste Management System at the State Level. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 666(3), 032058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/3/032058>
- Bertel, E., & Dujardin, T. (2007). Management of recyclable fissile and fertile materials. *NEA News*, 252, 9-12. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:39116093
- Bonin, B. (2010). The Scientific Basis of Nuclear Waste Management. İçinde D. G. Cacuci (Ed.), *Handbook of Nuclear Engineering* (ss. 3253-3419). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-98149-9_28
- Darda, S. A., Gabbar, H. A., Damideh, V., Aboughaly, M., & Hassen, I. (2021). A comprehensive review on radioactive waste cycle from generation to disposal. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 329(1), 15-31. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07764-2>
- Deng, D., Zhang, L., Dong, M., Samuel, R. E., Ofori-Boadu, A., & Lamssali, M. (2020). Radioactive waste: A review. *Water Environment Research*, 92(10), 1818-1825. <https://doi.org/10.1002/wer.1442>
- Faybishenko, B., Birkholzer, J., Sassani, D., & Swift, P. (2017). International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review (LBNL--1006984, 1353043; s. LBNL--1006984, 1353043). <https://doi.org/10.2172/1353043>

- Garamszeghy, M. (2011). Compaction processes and technology for treatment and conditioning of radioactive waste. *Içinde Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies* (ss. 19-42). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857090959.1.19>
- Ghouleh, Z., & Shao, Y. (2018). Turning municipal solid waste incineration into a cleaner cement production. *Journal of Cleaner Production*, 195, 268-279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.209>
- Gregg, D. J., Farzana, R., Dayal, P., Holmes, R., & Triani, G. (2020). Synroc technology: Perspectives and current status (Review). *Journal of the American Ceramic Society*, 103(10), 5424-5441. <https://doi.org/10.1111/jace.17322>
- Hassan, S. T., Batool, B., Wang, P., Zhu, B., & Sadiq, M. (2023). Impact of economic complexity index, globalization, and nuclear energy consumption on ecological footprint: First insights in OECD context. *Energy*, 263, 125628. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125628>
- Hioki, K. (2008). Estimation of global inventories of radioactive waste and other radioactive materials. International Atomic Energy Agency.
- IAEA (Ed.). (2014b). Near surface disposal for radioactive waste. International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (1995). Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals (IAEA Safety Series No. 111-F STI/PUB/989). <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/rwmp-3/INTRODUCTION.pdf>
- IAEA. (2009a). Classification of Radioactive Waste (IAEA Safety Standards Series No. GSG-1). International Atomic Energy Agency (IAEA). <https://www.iaea.org/publications/8154/classification-of-radioactive-waste>
- IAEA. (2009b). Classification of radioactive waste: General safety guide. International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2014a). Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities (Specific Safety Guide No. SSG-31). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1640_web.pdf
- IAEA. (2018a). Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev.1)). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1798_web.pdf
- IAEA. (2018b). Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14). INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf

- IAEA. (2020). Security of Radioactive Material in Transport (IAEA Nuclear Security Series No. 9-G (Rev. 1)). International Atomic Energy Agency (IAEA). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1872_web.pdf
- IAEA. (2022a). Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency Involving the Transport of Radioactive Material (IAEA Safety Standards Series No. SSG-65). INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1960_web.pdf
- IAEA. (2022b). Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14(REV. 1)). International Atomic Energy Agency (IAEA). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1963_web.pdf
- Jefferies, E. J. (2010). Green energy: Sustainable electricity supply with low environmental impact. CRC Press.
- Kasperski, T. (2015). Nuclear dreams and realities in contemporary Russia and Ukraine. *History and Technology*, 31(1), 55-80. <https://doi.org/10.1080/07341512.2015.1054146>
- Kasperski, T., & Stsiapanau, A. (2022). Trust, distrust and radioactive waste management in contemporary Russia. *Journal of Risk Research*, 25(5), 648-665. <https://doi.org/10.1080/13669877.2022.2049619>
- Kim, T., Boing, L., Halsey, W., & Dixon, B. (2022). Nuclear Waste Attributes of SMRs Scheduled for Near-Term Deployment (ANL/NSE-22/98-Rev.1, 1900154, 179973; s. ANL/NSE-22/98-Rev.1, 1900154, 179973). <https://doi.org/10.2172/1900154>
- Klaus, D. M. (2019). What really went wrong at WIPP: An insider's view of two accidents at the only US underground nuclear waste repository. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 75(4), 197-204. <https://doi.org/10.1080/00963402.2019.1628516>
- Lee, J., Kim, I., Ju, H., Choi, H., & Cho, D. (2020). Proposal of an Improved Concept Design for the Deep Geological Disposal System of Spent Nuclear Fuel in Korea. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology(JNFCWT)*, 18(S), 1-19. <https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2020.18.S.1>
- Lee, W. E., Ojovan, M. I., & Jantzen, C. M. (2013). Radioactive waste management and contaminated site clean-up: Processes, technologies and international experience. Woodhead publ.

- Marra, J. E., & Palmer, R. A. (2011). Radioactive Waste Management. *Çinde Waste* (ss. 101-108). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381475-3.10007-5>
- Mitrakos, D., Kontogianni, V., Kavoura, K., Carinou, E., Kallithrakas-Kontos, N., & Housiadas, C. (2023). Preliminary safety assessment for planning near surface disposal of low-level radioactive waste in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 263, 107163. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107163>
- Nagasaki, S., & Nakayama, S. (Ed.). (2015). *Radioactive Waste Engineering and Management*. Springer Japan. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55417-2>
- Natarajan, V., Karunanidhi, M., & Raja, B. (2020). A critical review on radioactive waste management through biological techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 29812-29823. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08404-0>
- Nuclear Energy Agency. (2014). RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT PROGRAMMES IN OECD/NEA MEMBER COUNTRIES. Nuclear Energy Agency. https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/Russian_Federation_profile_web.pdf
- Ojovan, M. I., & Lee, W. E. (2005). Management and Characterisation of Radioactive Wastes. *Çinde An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation* (ss. 125-134). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044462-8/50014-4>
- Ojovan, M. I., & Lee, W. E. (2011). Glassy Wasteforms for Nuclear Waste Immobilization. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(4), 837-851. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0525-7>
- Ojovan, M. I., & Lee, W. E. (2014). Immobilisation of Radioactive Waste in Glass. *Çinde An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation* (ss. 245-282). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099392-8.00017-6>
- Ojovan, M. I., & Steinmetz, H. J. (2022). Approaches to Disposal of Nuclear Waste. *Energies*, 15(20), 7804. <https://doi.org/10.3390/en15207804>
- Özbakır, O. (2023). Hazard and risk assessment in a dairy products factory in Iğdır province using the Fine Kinney Risk Method: recommendations for mitigation. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 7(3), 563-572. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.10>
- Özbakır, O. (2024). Enhancing Healthcare Worker Well-Being and Patient Safety in the Pediatric Emergency Department: A Comprehensive Hazard and Risk Analysis. *The Journal of International Scientific Researches*, 9(1), 35-49. <https://doi.org/10.23834/isrjournal.1385350>

- Sanito, R. C., Bernuy-Zumaeta, M., You, S.-J., & Wang, Y.-F. (2022). A review on vitrification technologies of hazardous waste. *Journal of Environmental Management*, 316, 115243. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115243>
- Speight, J. G. (2020). *Natural water remediation: Chemistry and technology*. Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier.
- The Geological Society. (2022). *Geological Disposal of Radioactive Waste (s. 2)*. The Geological Society. <https://www.geolsoc.org.uk/~media/shared/documents/policy/briefing%20notes/Geological%20Disposal%20of%20Radioactive%20Waste%20Policy%20Briefing%20Note%20PDFdigital%20export%202022%20Update.pdf?la=en>
- Tomar, B. S., Rao, P. R. V., Roy, S. B., Panakkal, J. P., Raj, K., & Nandakumar, A. N. (Ed.). (2023). *Nuclear Fuel Cycle*. Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-0949-0>
- Tyupina, E. A., Kozlov, P. P., & Krupskaya, V. V. (2023). Application of Cement-Based Materials as a Component of an Engineered Barrier System at Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste—A Review. *Energies*, 16(2), 605. <https://doi.org/10.3390/en16020605>
- Vance, E. R., Begg, B. D., & Gregg, D. J. (2017). Immobilization of high-level radioactive waste and used nuclear fuel for safe disposal in geological repository systems. *İçinde Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste (ss. 269-295)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100642-9.00010-4>
- Vienna, J. D. (2010). Nuclear Waste Vitrification in the United States: Recent Developments and Future Options. *International Journal of Applied Glass Science*, 1(3), 309-321. <https://doi.org/10.1111/j.2041-1294.2010.00023.x>
- Wahid, A., Sundari, T., & Ratiko, R. (2022). Dynamic modeling and controlling of a spent nuclear fuel storage pool under periodic operation and station blackout conditions. *Annals of Nuclear Energy*, 166, 108751. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108751>
- World Nuclear Association. (2021). *Russia's Nuclear Fuel Cycle*. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-fuel-cycle.aspx>
- World Nuclear Association. (2022). *Radioactive Waste Management*. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>

- World Nuclear Association. (2023). World Nuclear Performance Report 2023 (2023/001; s. 5). World Nuclear Association. <https://world-nuclear.org/getmedia/0156a8d7-01c6-42d9-97be-3f04f34cb8fa/performance-report-2023-final.pdf.aspx>
- Wu, Y., Klein, J., Zhou, H., & Zuo, L. (2018). Thermal and fluid analysis of dry cask storage containers over multiple years of service. *Annals of Nuclear Energy*, 112, 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.10.013>
- Ye, C., Zheng, M. G., Wang, M. L., Zhang, R. H., & Xiong, Z. Q. (2013). The design and simulation of a new spent fuel pool passive cooling system. *Annals of Nuclear Energy*, 58, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.03.007>
- Yu, H.-Y., Zhao, D., Shang, X., Wang, F., & He, L. (2023). Life-Cycle Cost Study for a Near-Surface Disposal Repository of Low-Level Waste in China. İçinde C. Liu (Ed.), *Proceedings of the 23rd Pacific Basin Nuclear Conference, Volume 3* (ss. 733-741). Springer Nature Singapore.
- Yun, J.-I., Jeong, Y. H., & Kim, J. H. (2013). Republic of Korea: Experience of radioactive waste (RAW) management and contaminated site clean-up. İçinde *Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-Up* (ss. 673-696). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857097446.2.673>
- Zhang, X., Gu, P., & Liu, Y. (2019). Decontamination of radioactive wastewater: State of the art and challenges forward. *Chemosphere*, 215, 543-553. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.029>

Radyoaktif Maddelerin Farmasötik Uygulamaları

Faysal SELİMOĞLU¹

GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyılın başlarında röntgen ışınlarını keşfi ile açılan yepyeni bir dönemde radyoaktif maddeler, günümüze kadarki süreçte modern tıpta çok yaygın bir şekilde teşhis ve tedavi süreçlerinde kullanılır hale gelmiştir. Modern bilmin maddenin yapı taşı olan atomun derinlerine inebilmesine imkan sağlayan gelişme ve yenilenme sürecinde, yaygın bir kullanıma sahip radyoaktif maddeler kimi zaman farmasötik ajanlarla, kimi zamansa vücutta kritik role sahip pek çok makro organik molekül ile birleştirmiş hali ile hastalıkların teşhis ve tedavisinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Radyoaktif maddeler ve bağlandıkları bileşikler, teşhis ve tedavinin gücünü arttırarak, minimum yan etki ile tedavinin seçimli olarak hedeflenen dokulara yönlendirilebilmesini mümkün kılmıştır. Bu haliyle radyoaktif maddeler uzunca bir süredir onkoloji, kardiyojoloji, nöroloji ve endokrinoloji gibi birçok tıbbi alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Radyoaktif maddelerin farmasötik uygulamaları başlıklı bu bölümde, kimi zaman doğada direkt bulunan kimi zaman ise nükleer reaktör ya da siklotron gibi cihazlar kullanılarak üretilen Brom-82'den Strontium-89'a kadar incelediğimiz toplam 41 farklı radyoaktif maddenin nasıl elde edildiğini, hangi hastalıkların teşhis ve tedavisinde kullanıldığını ve bu maddelerin farmasötik uygulamalarda hangi mekanizmalar ile etkili olduğunu kapsayacak mevcut bölümü kaleme aldık.

11.1. Brom-82 (Br-82)

11.1.1. Nasıl Elde Edilir.

Brom-82 , siklotron kullanılarak elde edilen bir radyoizotopdur. Bu izotop, doğada bulunan bromür iyonlarının siklotron içinde proton veya diğer yüklü parçacıklarla bombardıman edilmesi sonucunda elde edilmektedir. Atom çekirdeğine yüksek enerjili parçacıklar gönderen siklotron, tarafından

¹ Dr. Öğr Üyesi Faysal SELİMOĞLU Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü
fselimoglu@erbakan.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-3798-9054

hızlandırılan protonlar, $Br+p \rightarrow {}^{82}Br+n$ (Smith & Johnson 2015.) radyokimyasal reaksiyon eşliğinde, Br-82'yi üretilen arıtma işleminden geçirerek Br-82 izotopunu bir sonraki aşama için hazır hale getirir (Jones, & Williams 2017).

11.1.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Br-82 doğrudan medikal amaçlarla yaygın olarak kullanılmaz. Ancak Rubidium-82 üretim sürecinde kullanılan başlangıç izotop olarak öne çıkmaktadır. Br-82'nin hedef rolü, Rb-82'nin PET görüntüleme seansları için hızlı ve verimli bir şekilde üretilmesini sağlamaktır (Smith & Johnson 2019).

11.1.2.1. Rubidium-82 Üretimi: Br-82, Rubidium-82'ye dönüşümünde bir Rubidium-82 jeneratörü içinde gerçekleşir. Rubidium-82 "kalp hastalıklarında pozitron emisyon tomografisi" araştırma taramalar da kalp hastalıklarının teşhis edilmesinde kullanılır. Arteriyel hastalıkların örneğin koroner arter hastalığı olmak üzere, kalp kası kan akışının değerlendirilmesi için tercih edilir. Kalp perfüzyon sintigrafisine, kalp kasının kan akışını, oksijen alımını ve genel fonksiyonunu ölçme kapasitesi sağlar.

11.1.1.2. Rubidium-82 Kullanım Alanları. Rb, manyetik rezonans görüntüleme için vücuda enjekte edilen radyoaktif bir izotop olup, kalp damarlarının perfüzyonu için PET taramalarında kullanılır (Doe & Smith 2020). Bu teknik, işaretli bileşiğe bağlı olarak, daha az kan alan dokularda, dolaşımdaki Rb-82'nin yayıldığı dokularda ışınmasını akıp ederek kalp kası kanlanması ve kalp içi kan akışının izlenmesini mümkün kılar.

Koroner arterde yapılan radyoaktif röntgen tarama ile, darlık ve tıkanıklıklara sebep olan koroner arter hastalığını tanımlamasına izin verir, kalp krizinin olasılığını değerlendirir ve tedavi stratejisine bir yol izleme imkanı sağlar.

11.1.2 Etki mekanizması: Rb-82 izotopunu, ucuz bir izotop olmasının yanı sıra kısa yarı ömre sahiptir (yaklaşık 75 saniye) ve pozitron-emittir. Vücuttaki pozitronlar, açığa çıktığı ${}^{82}Rb \rightarrow {}^{82}Kr+\beta^++\gamma$ radyo nükleer reaksiyonla (Doe, & Smith2019), elektronlarla birleşerek yok olma sürecini başlatır. Pozitronlar yok olduğu sürece, gama ışınları açığa çıkar. Gama ışınları, PET tarayıcılar tarafından tespit edilir ve kalp damarlarının üç boyutlu görüntüleri elde edilir. Kalp kasındaki gerçek akışı hakkında öneri sunar, darlıklar veya tıkanıklıklarla hakkında bilgi verir. Bu, kardiyak fonksiyon hakkında daha ayrıntılı bilgiler sunar ve tedavi planlaması üzerinde etkili olur (Smith, & Johnson 2020).

11.2. Flor-18 (F-18)

11.2.1.Nasil Elde Edilir: Flor-18 genellikle bir siklotron kullanılarak O-18'den üretilir. F-18, oksijen izotopu olan O-18'li su içeren bir hedef malzeme içerisinde bombardıman edilir. Bu sırada protonlar, izotop oksijen içeren su moleküllerine çarparak $^{18}\text{O}+p\rightarrow^{18}\text{F}+n$ radyonükleer reaksiyonu eşliğinde, O-18 izotopunun üretilmesine sebep olur (Jacobson, & Chen 2015, Ranganathan 2016).

11.2.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Flor-18, nükleer tıpta biyolojik olarak aktif maddeleri belirlemek için kullanılır. Flor-18'in kullanılma amacı aşağıdaki gibidir:

Fluorodeoksiglukoz (FDG). Ana hücre enerji üreticisi glukozun bir analogudur. Bu molekül metabolik aktiviteyi belirlemek için kullanılır. Örneğin, çoğu tümör hücresi, normal hücreden daha fazla glukoz tüketir. Bu hastalıklar gelecekte gliyom veya epilepsi teşhisi yapabilir veya bir enfeksiyon varlığını sistem içinde $^{18}\text{F}+\text{Glukoz}\rightarrow^{18}\text{F-FDG}$ radyokimyasal reaksiyon eşliğinde belirlemeye imkân sunar (Krohn 2002).

Florotimid (FLT). Florotimidin (FLT), timidin nükleotidinin bir analogudur. F-18 ile işaretli FLT (18F-FLT), radyo-kimyasal yöntemle 18F-timidin kullanılarak sentezlenir. FLT, hücre bölünmesi sırasında kullanılan doğal bir nükleotid olan timidin bir analogudur ve hücre proliferasyonu izlemek için kullanılır. Bu molekül, hücre döngüsünün S fazını işaretleyerek DNA sentezi sırasında hücrelerin bölünme hızını gösterir. Hücresel büyüme ve DNA sentezi hakkında bilgi verir ve bu sayede hücresel proliferasyonu görüntülemek için kullanılır (Bading & Shields, 2008)

Florotaminokislot (FAM). L tirozin amino asidinin bir analoju olup yaşam fonk orijinalinde. Bu molekül kanser türlerini belirlemek içindir. Radyo kimyasal eldesi $^{18}\text{F}+\text{Tirozin}\rightarrow^{18}\text{F-FAMT}$ şeklindedir (Shimizu, Kaira, Shirabe 2019).

Fluoromisonidazol (FMISO). Fluoromisonidazol (FMISO), hipoksik (oksijen yetersizliği olan) bölgeleri belirtmek amacıyla kullanılır. Bu tür hipoksik kanser hücreleri vücut içinde görüntülenebilir. Radyo-kimyasal olarak 18F ile işaretlenmiş misonidazol, $^{18}\text{F}+\text{Misonidazol}\rightarrow^{18}\text{F-FMISO}$ reaksiyonu ile sentezlenir (Okamoto, Shiga, & Tamaki, 2013).

Florodopa (FDOPA). Florodopa (FDOPA), 18F ile işaretlenmiş DOPA (18F-FDOPA), nörotransmitter sistemlerinin görüntülenmesi için kullanılır. Bu madde, nörolojik hastalıkların teşhisinde kullanılan bir görüntüleme belirtecidir. Radyo-kimyasal olarak 18F ile DOPA, $^{18}\text{F}+\text{DOPA}\rightarrow^{18}\text{F-FDOPA}$ reaksiyonu ile sentezlenir (Minn, Kauhanen, Seppänen, Nuutila, 2009)

Fluorokolin (FCH). Fluorokolin (FCH), hücrel metabolizmayı incelemek için kullanılan bir görüntüleme ajanıdır. 18F ile işaretlenmiş kolin (18F-FCH), özellikle kanser hücrelerinin hızlı metabolik aktivitelerini tespit etmek amacıyla kullanılır. Hem normal hücreler hem de kanserli hücreler, kolin metabolizmasında rol oynar. Radyo-kimyasal olarak 18F ile kolin, $18F + \text{Kolin} \rightarrow 18F\text{-FCH}$ reaksiyonu ile sentezlenir (DeGrado, 2008).

11.2.3.Etki mekanizması: Flor-18 içeren radyofarmasötik, hastanın damar yolu ile enjekte edilir ve metabolizma tarafından hedeflenen dokulara taşınır. Örneğin, FDG, metabolik olarak aktif hücreler tarafından alınır. F-18 izotopu, hücre içinde bozulduğunda, pozitif yüklü parçacıklar olan pozitron yayar. Bu pozitronlar, vücut elektronları ile birleştiğinde, pozitron emisyon tomografisi PET dedektörler. Bu tespit, radyoaktif izotopun vücutta biriktiği yerleri görüntüleyerek teşhis için kullanılır. Flor-18'in yaydığı pozitronlar ve bunlarla ilişkili gama ışınları, metabolik aktivitenin yüksek olduğu bölgelerin ayrıntılı görüntülenmesini sağlar.

11.3.Galyum-67

11.3.1.Nasıl Elde Edilir. Galyum-67, nükleer bir reaktörde sentezlenir. Galyum-67 doğal olarak bulunan Galyum-69 izotopunun nötron yakalamasını takip eden bir dizi radyokimyasal reaksiyon yoluyla elde edilir şöyle ki $^{69}\text{Ga} + n \rightarrow ^{70}\text{Ga}$ devamında, $^{70}\text{Ga} \rightarrow ^{70}\text{Zn} + \beta^- + \nu^-$. Galyum-70 izotopu bir beta ve bir antinötro yayarak, Çinko-70'e $^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{68}\text{Zn} + 2n$ yoluyla iki nötron kaybederek Çinko-68 oradan Çinko-68 proton bombardımanı ve iki nötron kaybıyla $^{68}\text{Zn} + p^+ \rightarrow ^{67}\text{Ga} + 2n$ radyo kimyasal reaksiyonu yoluyla hedef radyoizotop olan Galyum-67'e dönüşür (Kambali, 2020).

11.3.2 Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin kullanılır. Osteomyelit, Septik atrit, yumuşak doku enfeksiyonları, akciğer enfeksiyonları, lenf nodülleri gibi hastalıkların teşhis ve tedavisinde kullanılabilir. Özelleşmiş türler aşağıda sıralanmaktadır.

Galyum-67 sitrat: Ga-67 sitrat ile kompleks oluşturulur bu yapı, vücuda enjekte edilir. Ga-67, laktoferrin, transferrin ve diğer demir bağlayıcı proteinlere bağlanarak ve enjekte edilir. Ga-67 tümör hücreleri, iltihap hücreleri ve enfekte olmuş dokular, yoğun kan akışı olan bölgelerde birikir (Goldsmith & Vallabhajosula 2009).

Ga-67, bazı spesifik peptidler ile ya da antikolar ile kullanılabilir.

67 Ga-İşaretli Peptidler:

Somatostatin Analogları: Somatostatin Analogları: Octreotide, somatostatin reseptörlerine bağlanan bir analogu olup, Ga-67 gibi radyoaktif izotoplarla işaretlenir. Somatostatin reseptörleri, nöroendokrin tümörler (NET'ler) tarafından aşırı eksprese edildiği için bu tümörlerin görüntülenmesinde kullanılır. Lanreotide ve Vapreotide, Ga-67 ile işaretlenebilen diğer somatostatin analoglarıdır.

Bombesin Analogları: Gastrin salınımını uyaran bir peptiddir ve gastrin salınımını düzenleyen reseptörlere bağlanır. Ga-67 işaretli bombesin ve türevleri, gastrinin salınmasını düzenleyen reseptörlerin eksprese edildiği kanserler gibi küçük hücreli akciğer kanseri dahil bazı kanserlerin teşhisinde kullanılabilir.

RGD Peptidleri: RGD Peptidleri: Özellikle RGD (Arg-Gly-Asp) peptidleri, integrin reseptörlerine özgü peptidlerdir. İntegrinler, tümör anjiyogenezinde (yeni kan damarlarının oluşumu) önemli bir rol oynar. Ga-67 ile işaretlenmiş RGD peptidlerinin tümör teşhisinde kullanılmasının ana nedeni, bu integrinlerin kanser hücreleri tarafından aşırı eksprese edilmesidir (Laverman, Sosabowski, Boerman & Oyen, 2012).

Galyum-67 ile İşaretli Antikorlar:

Anti-CD20 Antikorları: Rituximab, CD20, bir B hücresi antijenidir. CD20'yi hedef alan bir monoklonal antikor olan Rituxamb, Ga-67 ile işaretlenerek B hücreli lenfoma gibi hastalıkların teşhisinde kullanılır.

Anti-HER2 Antikorları: Trastuzumab HER2, bazı meme kanserlerinin ve diğer kanser türlerinin hücre yüzeyinde aşırı eksprese edilen bir reseptördür. Trastuzumab, HER2'yi hedef alan bir monoklonal antikordur. Ga-67 ile işaretlenmiş trastuzumab, HER2 pozitif meme kanserlerinin teşhisinde kullanılabilir.

Anti-CEA Antikorları: Arcitumomab CEA, bazı kanser türlerinin (özellikle kolorektak) hücre yüzeyinde eksprese edilen bir antijen olarak kabul edilir. Arcitumomab, CEA'ya karşı geliştirilmiş bir monoklonal antikordur ve Ga-67 ile işaretlenerek bu kanser türlerinin teşhisinde kullanılabilir.

Anti-PSMA Antikorları: J591: PSMA, prostat kanseri hücrelerinin yüzeyinde bulunan antigen olan PSMA. J591, PSMA'ya karşı geliştirilen bir monoklonal antikordur. Ga-67 ile işaretlenmiş prostat spesifikalsexat -J591, prostat kanserinin teşhisinde ve evrelemesinde kullanılabilir.

Anti-CD19 Antikorları: FMC6: CD19, B hücrelerinin yüzeyinde bulunan bir başka antijendir. FMC63, CD19'a karşı geliştirilmiş bir monoklonal antikordur ve Ga-67 ile işaretlenmiş B hücreli malignitelerin teşhisinde kullanılabilir (Golay, Da Roit, Bologna, Ferrara, Leusen, Rambaldi, Klein, & Introna, 2013).

11.3.3. Etki mekanizması: Galyum-67 ile işaretlenmiş radyofarmasötik, hastanın damar yoluyla vücuduna enjekte edilir. Galyum-67 işaretlenmiş radyofarmasötik, kan dolaşımı ile vücudun farklı bölgelerine taşınır. Bu radyofarmasötik radyoaktif bileşiği, enfeksiyonlar, inflamasyonlar veya tümörler gibi hedeflenen doku alanlarındaki birikimi ile karakterizedir. Bu radyofarmasötikteki radyoaktif madde radyasyon yayarak çevresindeki her şeyi yok etme potansiyeline sahiptir. Bu radyofarmasötik, işaretlenmiş radyofarmasötik enfeksiyon, inflamasyon veya kanser odaklandırdıysa, hasta ışın tedavisi gerektirir (Goldsmith & Vallabhajosula 2009).

11.4. Gallium-68 (Ga-68)

11.4.1. Nasıl Elde Edilir. Gallium-68 Ga-68 genellikle bir jeneratörden $^{68}\text{Ge} \rightarrow ^{68}\text{Ga} + \beta^+$ radyokimyasal yolla elde edilen bir radyonüklittir. Bu jeneratör, uzun ömürlü Germanium-68 izotopunu içerir. Germanium-68 67,7 dakika yarı ömre sahip bir pozitron yayıcısıdır, bu da PET Pozitron Emisyon Tomografisi taramalarında kullanıma uygundur. Ga-68 eldesini takiben bir kısım kimyasal saflaştırma işlemi sonrasında hedefe yönelik tedavilerde kullanılacak radyofarmasötiklerle birleştirilir (Roesch 2012).

11.4.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Gallium-68 Ga-68 özellikle nöroendokrin tümörler ve prostat kanserinin teşhisinde yaygın olarak kullanılır. Gallium-68, PSMA Prostate-Specific Membrane Antigen ve DOTATATE dahil olmak üzere peptid ve proteinlerle birleştirildiğinde, bu izotopu tümör dokularını görüntüleme için çok etkili kılar. Bu bağlamda, Gallium-68 Ga-68 DOTATATE ve Gallium-68 Ga-68 PSMA olmak üzere iki önemli bileşik vardır.

Gallium-68 DOTATATE (Ga-68 DOTATATE) DOTATATE: Gallium-68 DOTATATE (Ga-68 DOTATATE), somatostatin reseptörlerine yüksek afinitesi olan bir peptittir. Somatostatin reseptörleri, özellikle nöroendokrin tümörlerde aşırı eksprese edilir. Bu nedenle, DOTATATE'nin Ga-68 ile birleştirilmesi, nöroendokrin tümörlerin hedeflenmesi ve görüntülenmesi için güçlü bir PET radyofarmasötüğü sağlar. Ga-68 DOTATATE, nöroendokrin tümörlerin teşhisinde kullanılır ve somatostatin reseptörlerine özellikle bağlanarak bu tümörlerin yerini tespit eder. Tedavi planlamasında öncü bir role sahiptir. Ga-68 DOTATATE

PET taramaları, nöroendokrin tümörlerin metastatik yayılımını ve tedaviye yanıtını izlemek için de kullanılır.

Gallium-68 ve DOTATATE molekülü, $68\text{Ga} + \text{DOTATATE} \rightarrow \text{Ga-68 DOTATATE}$ reaksiyonu ile radyokimyasal yolla kompleks oluşturur. DOTATATE, Ga-68'i stabilize eder ve somatostatin reseptörlerine bağlanarak vücutta nöroendokrin tümörlerin tespitini sağlar. (Hofman & Hicks 2012).

Gallium-68 Ga-68 Prostate-Specific Membrane Antigen (PSMA): Prostate-Specific Membrane Antigen, PSMA olarak da bilinir ve prostat kanser hücrelerinde yüksek düzeyde eksprese edilen bir proteindir. PSMA, prostat kanseri tanısında ve belirlemede hedeflenen bir biyobelirteçtir. Ga-68 ile birleştirilmiş PSMA inhibitörleri, prostat kanserinin yerini belirleme de dahil olmak üzere etkili bir tanı aracıdır.

Kullanım Alanları: Ga-68 PSMA, prostat kanserinin tanı ve takibinde kullanılan bir görüntüleme ajanıdır. PET taramaları, prostat kanseri hücrelerini yüksek hassasiyetle gösterir ve bu hücrelerin izlenmesine, değerlendirilmesine, nüks etme ve metastaz yapma durumlarının tespit edilmesine olanak tanır. Ga-68 PSMA (Prostate-Specific Membrane Antigen), prostat kanseri hücrelerinin yüzeyinde yüksek düzeyde eksprese edilen bir reseptöre bağlanır. Bu sayede, prostat kanseri hücrelerini hedefleyen etkili bir molekül oluşturur.

Ga-68, PSMA hedefleyici molekül ile $68\text{Ga} + \text{PSMA} \rightarrow \text{Ga-68 PSMA}$ şeklinde radyokimyasal olarak kompleks oluşturur. Bu kompleks prostat kanseri hücrelerine bağlanır ve PET taramaları sırasında tümörün yüksek çözünürlüklü görüntülerinin elde edilmesini sağlar. Ga-68 PSMA, prostat kanseri hücrelerine seçici bir şekilde ulaşarak tümörlerin yerini kesin olarak tespit eder ve hastalığın seyri hakkında önemli bilgiler sağlar (Budäus & Rosenbaum, 2016).

11.4.3.Etki Mekanizması: Gallium-68, pozitron yayıcı bir izotop olduğundan, bağlandığı biyomoleküller (örneğin, DOTATATE ve PSMA) aracılığıyla hedef dokuya yönlendirilir. Ga-68, pozitron yaydığı anda bu pozitronlar çevresindeki elektronlarla birleşerek gama ışını açığa çıkarır. Bu gama ışınları PET tarayıcıları tarafından algılanır ve bu sayede vücuttaki tümörlerin görüntülenmesi sağlanır.

11.5. İndiyum-111 (In-111).

11.5.1. Nasıl Elde Edilir: İndiyum-111, genellikle nükleer reaktörlerde veya döteryum parçacıklarıyla zenginleştirilmiş siklotronlarda elde edilir ve sentez birkaç adımdan oluşur. İndiyum-111, genellikle kadmiyum-112 veya indiyum-112 kullanılarak üretilir. Cd-112 hedefi, nükleer reaktörde veya siklotronda

nötronlarla bombardımana tutulur. Devamında, $Cd-112, {}^{112}Cd (n,\gamma) \rightarrow {}^{113}Cd \rightarrow {}^{113}In \rightarrow In-111$ nükleer reaksiyon sonucu Cd-113, beta parçacıkları yayarak In-113'e dönüşür. In-113 kararsız bir izotoptur ve hızla In-111'e dönüşür (Mohammed, Mikhliif & Mhana 2020).

11.5.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin kullanılır. Tıp literatüründe İndiyum-111, kronik granülomatöz inflamatuvar hastalıklar, beyin omurilik sıvısı sızıntıları, nöroendokrin tümörler ve çeşitli kanser türlerinin teşhis ve tedavisinde kullanılmaktadır. Aşağıda, İndiyum-111 ile işaretlenmiş radyofarmasötikler, bunların tanımları, nasıl elde edildikleri, hangi hastalıkların tanısında kullanıldıkları ve bu radyofarmasötiklerin örnekleri listelenmiştir.

11.5.2.1. In-111 Türevlerinin Genel Elde Edilişi: In-111 pentetrotid, metalşelat yöntemi ile elde edilmektedir. Genel kimyasal reaksiyon: ${}^{112}Cd(n,\gamma) \rightarrow {}^{113}Cd \rightarrow {}^{113}In \rightarrow {}^{111}In$ şeklindedir.

In-111 Pentetrotid: Pentetrotid, In-111 ile işaretlenmiş bir somatostatin analogudur. Vücuttaki somatostatin hormonu çeşitli fonksiyonlara sahiptir ve nöroendokrin tümörlerin teşhisi için kullanılan bu analog, hedef tümör hücrelerine bağlanacaktır. Vardiyonlu radyofarmasötik, somatostatin reseptörlerine ve tümör hücrelerine bağlanacak şekilde tasarlanır. Somatostatinetkili nöroendokrin tümörlerin teşhisi ve Gastroenteropankreatik nöroendokrin tümörlerin (GEP-NET'ler) görüntülenmesinde kullanılır (Gerasimou & Gotzamani-Psarrakou 2010).

In-111 İbritumomab Tiyoglukoz: İbritumomab tiuxetan, In-111 ile işaretlenmiş bir monoklonal antikordur ve non-Hodgkin lenfoma tedavisinde radyoimmünokonjugat olarak kullanılmaktadır. İbritumomab, kanser hücrelerini hedef alır ve bağışıklık sistemi, bu antikolar tarafından işaretlenmiş hücrelere saldırarak kanser hücrelerini yok eder. Radyoaktif izotop olarak kullanılan In-111 ile işaretlenen bu antikor, B lenfositlerini hedef alır ve onları yok etmek için bağlanır. Non-Hodgkin lenfoma teşhis ve tedavisinde, B lenfositlerin hedeflenmesinde önemli bir rol oynar (Witzig, 2002)

In-111 Oktrotid: In-111 ile işaretli bir diğer radyofarmasötik ise oktrotiddir. Oktrotid, In-111 izotopuna bağlanarak nöroendokrin tümörlerin ve gastroenteropankreatik (GEP) endokrin tümörlerin tanı ve görüntülenmesinde kullanılır. In-111 oktrotid, özellikle gastroenteropankreatik nöroendokrin tümörlerin (GEP-NET'ler) yanı sıra akciğer ve diğer organlardaki nöroendokrin tümörlerin görüntülenmesi için etkili bir ajandır (Kaltsas, Rockall, Papadogias, Reznik, & Grossman, 2004).

In-111 Satumomab Pendetid: Kolon kanseri ve gastrointestinal tümörlerin görüntülenmesinde faydalıdır. İndiyum-111, Satumomab pendetid için kullanılır ve antikör, kolorektal kanser hücrelerinde hedefe girer. Kolorektal kanserler ile gastrointestinal tümörlerin tespiti amacıyla kullanılır (Witzig 2002).

In-111 Capromab Pendetid: In-111 ile işaretlenmiş capromab pendetid antikoru, prostat kanseri hücrelerinin yüzeyinde bulunan prostat spesifik membran antijenine (PSMA) bağlanır. İndiyum-111 izotopunu, antikör-metal şelat reaksiyonu ile antikora bağlanarak capromab pendetid elde edilir. Bu işaretli antikör, prostat kanserinin metastazlarının ve lenf nodu metastazlarının tespitinde, gama kamerası veya SPECT kullanılarak radyoaktif dağılımın izlenmesinde kullanılır (Rosenthal, Haseman, & Polascik, 2001).

11.5.3.Etki Mekanizması: Etki mekanizması 111 In ile işaretlenmiş radyofarmasötikler, inflamasyon, enfeksiyon veya tümörlerin bulunduğu dokulara birikir ve bu bölgelerdeki radyoaktif aktivitenin gama kameralarla görüntülenmesini sağlar.

İşaretlenme ve enjeksiyon: In-111, genellikle spesifik bir taşıyıcı molekül ile işaretlenir ve damar yoluyla hastaya enjekte edilir. Örneğin, In-111 DTPA, beyin omurilik sıvısı kaçaqlarının tespiti için kullanılır. Bu izotop, enfeksiyon ve inflamasyon odaklarında birikerek bu bölgeleri tespit etmeye yardımcı olabilir. Standart görüntüleme yöntemleri her zaman tümör hücrelerini doğrudan göstermeyebilir, ancak işaretlenmiş radyofarmasötiklerin tümöre birikimi genellikle yüksek olur.

Görüntüleme: Uygun bir birikimin ardından, görüntüleme cihazı In-111'in yaydığı gama ışınlarını algılayacaktır. Bu işlem sırasında cihaz, vücuttaki radyofarmasötik konumunu belirler. Hastalık radyoaktif oligonükleotidinin yaydığı gama ışınlarına yanıt verir. Birikme, basit bir şekilde, endoradyofarmasötiklerin insan vücudundaki mekanizmasının temel prensibi olarak yoğunlaşma şeklinde tanımlanabilir. Bu sayede, hedef dokularda radyoaktif madde birikir ve bu birikim, hedef dokuların yerinin belirlenmesini sağlar (Kjaer & Dreyer, 2003).

11.6. İyot-123.

11.6.1. Nasıl Elde Edilir: İyot-123 meta-iyodobenzilguanidin (I-123 MIBG), nöroblastoma ve feokromasitoma gibi nöroendokrin tümörlerin görüntülenmesinde kullanılmaktadır. I-123 MIBG'nin elde edilmesi birkaç adım içerir: İyot-123, siklotron kullanılarak iki farklı yöntemle üretilir; bu

yöntemler Tellür-123'ün veya Xenon-124'ün protona maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilir.

Tellür-123 ve Xenon-124'ün Proton Maruz Bırakılması:

Xe-124 (p,2n) → I-123 ve Te-123 (p,2n) → I-123 tepkimeleri ile İyot-123 elde edilmektedir. I-123'ün üretimi için Xenon-124 ve Tellür-123 izotopları protonlarla reaksiyona sokulur. Bu tepkimeler siklotronlarda gerçekleştirilir ve tıbbi görüntüleme için kullanılan radyofarmasötikler elde edilir. Hem Xenon-124 hem de Tellür-123, gaz formunda bulunur ve kimyasal olarak saf hale getirilerek reaksiyona sokulurlar (Qaim, 2010).

I-123-MIBG Sentezi: MIBG, iyot atomunun bir benzilguanidin molekülüne bağlı olduğu şekilde sentezlenir. İyot-123, Meta-iyodobenzilguanidin MIBG molekülüne belirli kimyasal reaksiyon şartları altında çözücü içinde gerçekleştirilir I-123 kimyasal olarak MIBG ye bağlanır ve I-123 MIBG sentezlenmiş olur.

11.6.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin kullanılır. I-labeled-metaiodobenzilguanidine I-123 MIBG, nöroblastoma ve feokromasitoma gibi nöroendokrin tümörlerin radyofarmasötik görüntülemesinde kullanılır. Bu tümörlere özgü MIBG ile görüntüleme, belirli biyolojik mekanizmalara dayanır.

Nöroblastoma: Nöroblastoma, noradrenerjik bir tümördür ve çocuklarda en yaygın görülen katı (solid) tümörlerden biridir. Bu tümörler, enfeksiyona dirençli olma özellikleri ile bilinir. Nöroblastoma hücrelerinde, norepinefrin taşıma sistemi aşırı eksprese edilir, bu da MIBG ile görüntüleme yapılmasını sağlar, çünkü meta-iyodobenzilguanidin (MIBG) norepinefrin taşıyıcıları tarafından hücrelere alınır ve tümör hücreleri bu yöntemle etkili bir şekilde izlenebilir.

Feokromasitoma: Adrenal medullada veya sempatik ganglionlarda bulunan katekolamin üreten tümörlerdir. Noradrenalin taşıyıcı sistemini kullanarak, feokromasitomalar MIBG'yi alır ve depolayabilir. Bu radyofarmasötik, bu tümörlerin evrelemesi, tedaviye yanıtın değerlendirilmesi ve nüks görüntüleme için kullanılır (Jacobson, Deng, Lombard, Lessig, & Black, 2010).

11.6.3. Etki Mekanizması: Nöroendokrin Hücrelerde MIBG'nin Alımı Katekolamin noradrenalin (norepinefrin) gibi yüksek yoğunlukta katekolaminleri alır ve depolar: MIBG yapısal olarak noradrenalin ve guanetidinin benzer molekülleridir, noradrenalin taşıma sistemine doğal olarak aminleri içeren hücre içine alınır.

Veziküler Monoamin Taşıyıcı (VMAT): Sinaptik veziküllerde depolanır, noradrenaline benzer şekilde depolar. Bu sistem MIBG'yi hücre içinde veziküller içine taşır ve depolar.

I-123 MIBG'nin Enjeksiyonu ve Dağılımı: I-123 MIBG'nin Enjeksiyonu ve Dağılımı: I-123 MIBG, intravenöz (damar içi) enjeksiyon yoluyla hastaya uygulanır. Dolaşıma giren MIBG, tüm vücuda dağılır. Noradrenalin taşıma sistemi, özellikle nöroendokrin tümör hücrelerinde yoğun olarak eksprese edildiği için, MIBG bu hücreler tarafından alınır. Bu mekanizma sayesinde MIBG, nöroendokrin tümörlerin hedeflenmesinde etkili bir rol oynar.

Görüntüleme Mekanizması: I-123, gama ışınları yayan bir radyoizotoptur. I-123-MIBG tümör hücrelerinde birikir tümör hücreleri radyoaktif hale gelir ve bu hücreler gama ışınları yaymaya başlar. Gama SPECT kamera ile bir veya iki saat sonra nöroendokrin tümörlerin yerleşimini ve yayılımını tespit edilir (Jacobson, Deng, Lombard, Lessig, & Black, 2010).

11.7. Iodine-124

11.7.1.Nasil Elde Edilir: İyot-124 (I-124), pozitron yayıcı bir radyoizotoptur ve proton bombardımanı yoluyla elde edilir. Pozitron, halk arasında "antimadde parçacığı" olarak bilinir ve elektronun karıştıdır. Düşük enerjili pozitronlar, dokularda bulunan elektronlarla çarpışarak iki gama fotonu üretir. I-124, çeşitli kimyasal reaksiyonlarla doğal tellür (Te-124) hedefleri protonlarla bombalandığında üretilir ve bu reaksiyon Te-124'ün I-124'e dönüşmesine neden olur. İdeal olarak, proton hızlandırıcılar, tellür izotoplarıyla protonların temasını sağlamak için kullanılır ve bu reaksiyon şu şekilde gerçekleşir: $^{124}\text{Te} + p \rightarrow ^{124}\text{I} + n$. Elde edilen ürün, radyokimyasal saflaştırma işleminden geçirilerek kullanıma hazır hale getirilir.

11.7.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin kullanılır. İyot-124 (I-124), tiroid kanseri ve nöroendokrin tümörlerin görüntülenmesinde kullanılan, tiroid ile ilişkili bir radyoizotoptur. Tiroid bezi, vücuda alınan iyodun büyük bir kısmını emdiği için, I-124 bu kanser türlerinin görüntülenmesinde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, nöroendokrin tümörlerin metabolik aktivitesini belirlemek ve bu tümörlerin tespiti için de etkili bir görüntüleme ajanıdır.

11.7.3.Etki Mekanizması Iodine-124, β^+ pozitronu yayıcısıdır; vücuda enjekte edildikten sonra, bıraktığı β^+ parçacıkları vücuttaki elektronlarla çarpışır ve eş zamanlı olarak gama fotonu üretir. Bu yolla teşhis ve tedavi amaçlı kullanımı söz konusudur (Grewal, & Larson 2007).

11.8. Iodine-125 (I-125) Seed İmplantları:

11.8.1. Nasıl Elde Edilir. İyot-125 (I-125) genellikle nötron aktivasyonu yöntemi ile üretilir. Doğal olarak bulunan İyot-124 (I-124) izotopu, bir reaktörde nötron bombardımanına tutulur ve $^{124}\text{I} + n \rightarrow ^{125}\text{I}$ reaksiyonu sonucu İyot-125'e dönüştürülür. Bu işlem sonucunda elde edilen I-125, düşük enerjili gama ışınları yayma kapasitesine sahip olur, bu da onu özellikle brachytherapy için uygun hale getirir. I-125, biyoyumlu tohum implantlarına yerleştirilerek kanser tedavisinde kullanılır.

11.8.3. Hangi hastalıkların teşhis veya tedavisi için kullanılır: Iodine-125, esas olarak brachytherapy olarak bilinen iç radyasyon tedavisi ile prostat kanseri ve bazı göz melanomları tedavisinde kullanılır. Radyoaktif tohum implantları kanserli dokuların içine yerleştirilir ve düşük enerjili gama ışınları yayarak kanserli hücrelerin yok edilmesine yardımcı olur. I-125 göz melanomlarının tedavisinde de kullanılabilir, tümör çevresine yerleştirilen tohumlar tümörü küçültmeyi hedefler (Kumon, 2008).

11.8.4. Etki mekanizması: I-125, düşük enerjili gama ışınları yayarak kanserli hücelere lokalize radyasyon verir. I-125 implantları, prostat ve göz içindeki kanserli hücelere yerleştirilir. Yayılan düşük enerjili gama ışınları, hücre DNA'sını hasara uğratar ve hücrelerin ölmesini sağlar. Bu tedavi yönteminde I-125 tohumları genellikle vücutta kalıcı olarak bırakılır ve yavaş yavaş radyasyon yayarak kanserli hücrelerin büyümesini engeller (Franca, Vieira, Bernabe, & Penna 2007).

11.9. Karbon-11 (C-11)

11.9.1.Nasıl Elde Edilir. Karbon-11 (C-11), siklotronlarda protonların veya deutronların Azot-14 (N-14) hedeflerine bombardımanı ile üretilir. Bu işlem, iki ana reaksiyon yoluyla gerçekleştirilir.

Proton bombardımanı: $^{14}\text{N} (p, \alpha) \rightarrow ^{11}\text{C}$: Azot-14 (N-14) hedef malzemesi, genellikle azot gazı ya da azot içeren bir bileşik formunda bulunur. Siklotron tarafından hızlandırılan protonlar (p), N-14 hedefine çarptığında alfa parçacıkları (α) yayılır ve bu süreç sonucunda Karbon-11 (C-11) izotopu elde edilir.

Deuteron bombardımanı: N-14 d, n C-11. Hedef malzemesi N-14'dir. Siklotron tarafından hızlandırılan deutronlar d, N-14 hedefine çarptığında nötronlar n yayılarak C-11 izotopu oluşturulmaktadır. $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{11}\text{C} + \alpha$.

Üretim süreci: Üretilen C-11, genellikle gaz formunda bulunur, örneğin, karbon dioksit veya metan formunda olabilir ve hemen kimyasal işleme tabi

tutulur. Çeşitli kimyasal reaksiyonlar yoluyla, istenen radyoaktif molekülü elde etmek amacıyla C-11, farklı bileşikler haline getirilir. Bu işlem, kullanılacak radyoaktif izleyici tipine bağlı olarak değişir. Örneğin, C-11 işaretli glikoz veya C-11 işaretli metiyonin gibi bileşikler elde edilir. Elde edilen radyoaktif bileşikler, genellikle HPLC gibi tekniklerle saflaştırılır (Chiappiniello & Marengo, 2018).

11.9.2. Hangi Hastalıkların Teşhis ve Tedavisi İçin kullanılır.

C-11 Pittsburgh B (C-11 PIB): C-11 PIB, amiloid plakların erken Alzheimer hastalığına yol açan hastalarda tespit edilmesinde kullanılır. Amiloid plaklar, Alzheimer hastalığının temel biyobelirteçlerinden biridir. C-11 PIB bileşiği, beyinde amiloid plaklara yüksek afinite gösteren Pittsburgh B molekülüne, Karbon-11 izotopunun eklenmesiyle elde edilen bir radyoaktif bileşiktir. Bu bileşik, Alzheimer hastalığının görüntülenmesi amacıyla PET taramaları ile kullanılır. C-11 PIB, kimyasal olarak Karbon-11 izotopunun Pittsburgh B molekülüne bağlanmasıyla sentezlenir. Kimyasal reaksiyon şu şekildedir: $^{11}\text{C} + \text{Pittsburgh B} \rightarrow ^{11}\text{C-PIB}$ (Ruangma & Chinvarun, 2015).

C-11 Raclopride: C-11 Raclopride, dopamin D2/D3 reseptör yoğunluğu ve dağılımını öğrenmek için uygulanan bir radyodiyagnostik bir bileşiktir. Şizofreni ve Parkinson hastalığında dopamin D2/D3 reseptör yoğunluğunda değişiklikler gözlenir. C-11 Raclopride, dopamin reseptörlerine yüksek afinite gösteren bir raclopride molekülüne bağlanan Karbon-11'in ile sentezlenir. Kimyasal sentez: $^{11}\text{C} + \text{Raclopride} \rightarrow ^{11}\text{C-Raclopride}$ şeklindedir (McCormick, & Wilson (2008).

C-11 Metiyonin: C-11 Metiyonin, bir PET görüntüleme işlemi sırasında hücreleştirme evresindeyken gerçekleşen protein sentezlenmesini incelemek için kullanılır. Bölünen kanser hücresinde C-11 Metiyonin çok hızlı stoklanır, metiyonin aminoasid yapısındadır. Karbon-11'in bağlı metiyonin güçlü sinyal verecektir. Kimyasal reaksiyon: C-11 Metiyonin, Karbon-11 izotopunun metiyonin molekülüne işlenmesi ile meydana gelir. $^{11}\text{C} + \text{Metiyonin} \rightarrow ^{11}\text{C-Metiyonin}$ (Dankerl & Reske 2007).

C-11 Kolin: C-11 Kolin, prostat tümörlerinin ve diğer tümörlerin işaretlenmesi için kullanılır. Kanser hücrelerinde hızla büyüyen hücre zarlarının sentezinde, hücre zarı bileşeni olarak hücrelerin membran sentezinde kolin önemli bir rol oynar. C-11 Kolin, Karbon-11'in kolin molekülüne bağlanmasıyla sentezlenir. Kimyasal reaksiyon: $^{11}\text{C} + \text{Choline} \rightarrow ^{11}\text{C-Choline}$ şeklindedir.

C-11 Asetat: C-11 Asetat, kardiyak metabolizmayı ve miyokardiyal kan akışını incelemek amacıyla kullanılır. Bu, PET'te kullanıldığında, özellikle kalp hastalıklarına tanı koymada kendini ispatlamış bir yöntem olarak öne çıkar. Bağlı

şekilde, kalpteki kas metabolizmasında dokuya tutuna bilme özelliğinden ötürü mevcut bozuk ve bir dizi kalp hastalığına işaret edebilecek yapıların teşhisinde kullanılabilir. C-11 Asetat, C-11'in asetat molekülüne bağlanması ile oluşturulur Kimyasal reaksiyon: $^{11}\text{C} + \text{Acetate} \rightarrow ^{11}\text{C-Acetate}$ şeklindedir (Cho, Kim, Jeong, & Bom 2019).

C-11 Glukoz: Glikoz metabolizmasını incelemek amacıyla kullanılması öne çıkar. Hücreler tarafından enerji elde etmek amacıyla kullanılan temel molekül olan glikoz, glikoz metabolizmasını ilgilendiren bu olaydan ötürü de aynı zamanda diyabet ve diğer metabolik bozukluklar hakkında da bilgi edinme imkânı sunar. Kimyasal reaksiyon: $^{11}\text{C} + \text{Glukoz} \rightarrow ^{11}\text{C-Glukoz}$ şeklindedir (Herrero & Gropler 2002).

Carbon-11 Choline: Choline, fosfolipid sentezi için çok önemli olan hücre zarının temel bileşenlerinden biridir. Hızlı gelişen kanserli dokuların hücre zarında da yer aldığı için önce çıkan bir moleküldür. C-11 Choline, hücre zarı yapısı içeriğinde olduğundan ötürü prostat kanseri ve diğer kanser türleri üzerinde PET görüntüleme imkânı sunar. Prostat kanserinin erken teşhisi, varsa metastatik yayılımın tespiti için çok önemlidir. Kimyasal reaksiyon: $^{11}\text{C} + \text{Choline} \rightarrow ^{11}\text{C-Choline}$ (Farsad & Fanti 2005).

11.9.3. Etki Mekanizması:

C-11 PIB: Alzheimer hastalığının erken evrelerinde beyindeki amiloid plakların varlığını tespit eder. C-11 PIB beyindeki amiloid birikimine bağlı olarak, amiloid plaklara bağlanır ve PET tarayıcılar tarafından görüntülenir.

C-11 Raclopride: C-11 Raclopride, dopamin D2/D3 reseptörlerine bağlanır ve bu reseptörlerin dağılımı ve yoğunluğu hakkında bilgi verir. Dopamin reseptörleri, nörodejeneratif hastalıklar arasında özellikle değişkenlik gösterir. D-11 Raclopride, dopamin reseptörlerine doğrusal olarak bağlandığında, reseptör yoğunluğa bağlı bir çözünürlükte pozitron salar ve PET tarayıcılar aracılığıyla tespit edilir.

C-11 Metiyonin: Kanser hücrelerinin protein sentezinde kullanılır. TED kan testi, protein sentezi Electroencephology (EEG) ile kullanıldığında, Kanser hücrelerinin protein sentezi aktif olan bölgeleri, dizimi sırasında artan bir protein sentezinde metiyonine ihtiyaç duyar bu yolla hücre içersine giren C-11 Metiyonin, PET vasıtasıyla süreci gözlemlenebilir.

C-11 Kolin: Bütün tümör yapılarına ait membranların sentez süreçlerinde bulunması açısından hayati bir bileşiktir. Bu süreçte hücre yapısına katılan

radyoaktif C11 işaretlemeye imkân tanıdığından ötürü PET alıcıları tarafından rahatlıkla gözlemlenebilir.

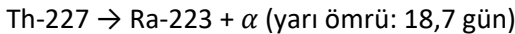
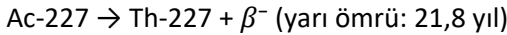
C-11 asetat: Kalp kas metabolizmasını gözlemlemek amacıyla kullanılır. Asetat, kalp kası hücrelerinde enerji üretimi için kullanıldığından ötürü miyokardiyal hücre yapısına katılarak, radyoaktif C-11 içeren asetato miyokard hücreleri PET tarayıcıları vasıtasıyla rahat bir görüntüleme imkânı sunacaktır.

C-11 glukoz: Ejerji metabolizmasının temel ürünü olan glikoz C-11 radyo aktif molekülünü içerir hale gelmesiyle glukoz metabolizma hızının gözlemlemesini sağlayarak, PET tarayıcı vasıtasıyla, metabolik aktivitenin gözlemlenmesi imkanını sağlamaktadır (Lodi, Malizia, Castellucci, Cicoria, Fanti, & Boschi 2012).

11.10.Radyum-223 (Ra-223)

11.10.1. Nasıl Elde Edilir: Radyum-223 (Ra-223) tedavisi metastatik kemik kanseri için kullanılır ve bu da kemik metastazlarını hedefler ve radyasyon sağlar. Aktinyum-227, radyo aktif bozulma ile Ra-223 e dönüştürülür. Bu bozunarak dönüşüm; aşağıdaki nükleer reaksiyon serisinde ifade edilir (Sgouros, He, Ray, Ludwig, & Frey, 2019).

Kimyasal reaksiyon: $\text{Th-227} \rightarrow \text{Ac-227} + \beta^-$ (yarı ömrü: 18.7 gün) \rightarrow Aktinyum-227'nin Radyum-223'e Bozunması devamında, Ac-227 iki ardışık bozunma süreciyle Radyum-223'e dönüşür:



11.10.2. Hangi Hastalıkların Teşhis ve Tedavisi İçin kullanılır. Ra-223, prostat kanseri ile kemik kanseri metastazlarındaki dokuya özgün yönelimi sebebiyle tedavi amaçlı kullanılır (Parker, Pascoe, Chodacki, O'Sullivan, Germà, O'Bryan-Tear, Haider, & Hoskin,2013).

Prostat kanseri: Ra-223'nin "Ra-223 klorür" formu, metastatik prostat kanseri tedavisinde kullanılır. Ra-223 klorür, metastatik olan prostat kanseri vakalarında, kemik metastazları söz konusu olduğu durumlar için deneysel amaçlı intraven yoluyla hastaya verilir. Kemik kanseri metastazlarında da kullanım süreçleri mevcuttur.

Ağrı Yönetimi: Kemik ağrıları hafifletilir: Ra-223, kemik metastazlarına bağlı olarak hasıla gelen ağrıları hafifletebilir. Alfa parçacıklarının lokal radyoaktif tesiri ile bölgedeki kanser hücreleri yok edilebilir ve ağrı azaltılır. Özellikle Ra-223

diklorür kemik metastazları söz konusu olduğu durumlar için deneysel amaçlı intraven yoluyla hastaya verilir. Kemik kanseri metatazalarında tesirli bir şekilde kullanıla gelmektedir.

11.10.3. Etki Mekanizması Biyolojik dağılım ve hedefleme affinitesi, kemik yapısının kristal örgüsünün bir yapı taşı olmasından dolayı seçici bağlanma özelliğine sahiptir. Ra-223, intravenöz olarak verildikten sonra kan dolaşımı yoluyla hastalıklı kemik dokusuna rahatlıkla ulaşır ve bu bölgede birikir. Bu noktada, radyoaktif alfa parçacıkları yayılmaya başlar ve kanser hücrelerini hedef alarak tedavi eder. Ra-223'ün kısa menzilde yüksek enerjili bozunmasıyla açığa çıkan alfa parçacıkları, kanserli dokuda etkin bir tedavi sürecini başlatır. Kimyasal reaksiyon şu şekilde gerçekleşir:

$^{223}\text{Ra} \rightarrow ^{219}\text{Rn} + \alpha$. Yayılan alfa parçacıkları, kanserli dokunun DNA yapısıyla etkileşime girerek DNA hasarına yol açar. Kanser hücresinin onarma mekanizmasının düzeltilmediği bu hasar, kanserli hücrelerin ölümüne (apoptozise) neden olur (Morris & Sgouros, 2019).

11.11. Ruthenium-106 (Ru-106)

11.11.1. Nasıl Elde Edilir: oluşan bir radyoizotoptur. Bu fisyon süreci, yoğun bir enerji açığa çıkarır ve çeşitli fisyon ürünleri oluşturur. Bu ürünlerden biri de Rutenyum-106'dır.

Uranyum-235 Fisyonu: Rutenyum-106 (Ru-106), Uranyum-235 (U-235)'in nötron bombardımanına tutulması sonucu elde edilir. Radyo-kimyasal reaksiyon şu şekildedir:



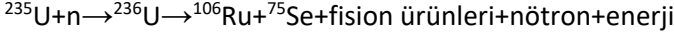
Saflaştırılan Rutenyum-106, endüstriyel ve tıbbi uygulamalar için hazırlanır. Tıpta, özellikle göz tümörlerinin radyasyon tedavisinde, kullanılır (Berta, 2005).

11.11.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır: Rutenyum-106 (Ru-106), özellikle göz tümörlerinin tedavisinde kullanılan bir radyoizotoptur. Tedavi edici özellikleri sayesinde, retinoblastoma ve uveal melanom gibi göz tümörlerinde en iyi lokal kontrolü sağlar. Ayrıca, uygun olduğu durumlarda diğer kanser türlerinin radyasyon tedavisinde de kullanılabilir.

11.12. Selenyum-75 (Se-75)

11.12.1. Nasıl Elde Edilir: Se-75, nükleer reaktörlerde Uranyum-235 (U-235)'in nötron bombardımanına tutulması sonucu elde edilir. U-235, bir nötron yakalayarak kararsız bir hale gelir ve U-236'ya dönüşür. Bu kararsız çekirdek, fisyon adı verilen bir süreçle parçalanır ve bunun sonucunda farklı radyoaktif izotoplar, nötronlar ve enerji serbest bırakılır.

Kimyasal reaksiyon: Aşağıdaki şekildedir.



Bu süreçte, biyobozunur ve kararsız Selenyum-75 (Se-75) katyonu ve fisyon çekirdeği oluşur. Fisyon sonrası, izotoplar farklı ivmelere sahip olduklarından, çeşitli tekniklerle ayrıştırılır. Sürecin bir parçası olarak Se-75 ayrılır. Bu işlem genellikle solvent ekstraksiyonu ve iyon değişimi prosedürlerini içerir. Bu aşamalardan sonra, yüksek saflıkta bir Se-75 çözeltisi elde edilir. Se-75, medikal görüntüleme ve teşhis süreçlerinde vazgeçilmez bir rol oynar, çünkü radyasyon yayarak net görüntüler oluşturur ve bu nedenle medikal görüntüleme cihazlarında önemli bir ajandır (Wachsmuth, Eichler, Tobler, Hänssler, Gaggeler, & Ammann, 2002).

11.12.2. Hangi hastalıkların teşhisi veya tedavisi için kullanılır. Selenyum-75 (Se-75), özellikle medikal görüntüleme ve radyoterapi uygulamalarında kullanılan bir radyoizotoptur. Başlıca uygulama biçimleriyle ilgili şunlar ifade edilebilir:

Radyografi ve Gama Kamera Görüntüleme: Gama kameralarda medikal görüntü tespit maddesi olarak kullanılan Se-75, kemik taramaları, böbrek fonksiyonları ve tiroid glandının incelenmesiyle sınırlıdır. Vücudun iç diziliminin görüntülenmesine olanak tanır.

Tiroid Hastalıkları Tedavisi: Se-75 hipertiroidizm tiroid bezi aşırı aktif iken kullanılır. Sodyum selenit formundaki Se-75 tiroid bezine hedefli radyoterapi sağlar (Ballaux, 2000).

11.12.3. Etki Mekanizması. Selenyum-75'in Se-75 tıbbi etki mekanizması şunlara dayanır:

Gama ışınlarının yayılması. Se-75'in radyoaktif bozunması sırasında yayılan gama ışınları aktive edilir. Bu cihazlar her gama ışınını algılar ve organın, dokuların yapısına zarar verir veya zarar vermez. Işınlar iç organları, özellikle cihazlar, örneğin iç tiroid bezi üzerinde çalışırken, işlevlerinin durumunu belirlemek, çıkış seviyelerini belirlemek için kullanılır.

Tiroid hücrelerinin tahribatı. İlaç formundaki Se-75 içerir Sodyum selenit, tiroid hücrelerine yerleşir, orada radyasyon etkisiyle hücrelerin DNA'sına zarar vererek onları yok eder. Selenyumun radyasyon savaşçısı özelliği genellikle tiroid bezinin hiperaktivitesinin önlenmesinde kullanılmaktadır. Aşırı aktif tiroid fonksiyonlarını normal a düşürmek için tiroit hücrelerini tahrip eder. Özelleşmiş hücre büyümesinin yıkımı, tiroidin genel aktivitesine ve çalışmasına katkıda bulunur (Menton 2004).

11.13. Talium-201 (Tl-201)

11.13.1. Nasıl Elde Edilir: Tl-201, tıbbi görüntüleme için kullanılan bir radyoizotoptur, nükleer reaktörlerde yapılan nötron bombardımanına dayanan bir elde edim sürecine sahiptir. Tl-201'in üretilmesi şu süreçlerle tamamlanır: İlk olarak, doğal talyum cevherlerinden doğal talyum izotopları ayrıştırılır. İzolasyonla, doğal talyum izoptu olan talyum-203 Tl-203 kullanılmaktadır.

Nötron bombardımanı: Tl-201 izotopu, Tl-203 izotopunu nükleer reaktörde nötron bombardımanı yoluyla elde edilir. Bu işlem sonucunda nötron ışınları yayılarak $^{203}\text{Tl}+n \rightarrow ^{201}\text{Tl}+\gamma$ radyokimyasal reaksiyon eşliğinde Tl-201 dönüşür. Kimyasal süreçler yardımıyla saflaştırılan ürün, saf halde tıbbi alanda kullanılmak üzere formüle edilir ve radyoasötik bir forma dönüştürülerek hasta için enjekte edilir (Sattari, Aslani, Shirazi, Shafie, & Shadanpour 2003).

11.13.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi ve Tedavisi İçin Kullanılır: Talyum-201 teşhis amacıyla kullanılan bir radyo izotoptur. Kalp hastalığı ve onkoloji görüntüleme uygulamalarında yoğunlukla kullanılır (Chen, Wu, He, Huang, Yu, Xu, & Yu 2013).

Kalp Görüntüleme: Tl-201 kalbin perfüzyonunu değerlendirmek için kullanılır. Koroner arter hastalığı ve miyokard enfarktüslerinin teşhisi sırasında son derece yararlı olan bir izotopdur. Bu izotop, kalp damarlarındaki tıkanıklıkları ve kalp kasına doğru olan kan akışını belirlemek için sintigrafide kullanılır.

Onkolojik Görüntüleme: Akciğer, meme, lenfoma ve tiroid kanseri gibi çeşitli türlerde tümör lokalizasyonu ve metastazlarının yayılmasını belirlemek için onkolojik hastalıklarda kullanılır.

11.13.3. Etki mekanizması: Enjekte edildikten sonra, tıbbi görüntüleme maksadıyla hızlıca kana karışarak, bu yolla hedefli olarak lenf dokularına hızlıca ulaşır. Yayıdığı gama radyasyonu nedeniyle Tl-201 tıbbi görüntüleme cihazları vasıtasıyla dokuların işlevsel yapıları kolayca değerlendirilir.

Doku perfüzyonu incelemesi: Kan yoluyla ilerleyen Tl-201 kan akışının en yüksek olduğu dokularda hızlı sonuç vermektedir. Kalp perfüzyonunun doku sintigrafisinde, Tl-201, kan akışını görüntülemek amacıyla kullanılır. Kalp krizi geçiren hastanın kalp içinde bir alanı etkileyen bir miyokardın, yüksek bir tortunun neden olduğu zararı Tl-201 birikimi ve bağlı gama salınımı vasıtasıyla kolayca anlaşılır.

Tıbbi görüntüleme süreci: Biriken Tl-201 gama yayılımı nedeniyle, kalp kasında meydana gelebilecek performans kaybı ve tümör oluşumları tespit edilebilmektedir.

11.14. Teknesyum-99m (Tc-99m)

11.14.1. Nasıl Elde Edilir.

Teknesyum-99m, molibden-99 izotopunun radyoaktif bozunması sonucu oluşur. Molibden-99, nükleer reaktörlerde uranyum-235 füzyon yoluyla üretilir. U-235 nötronlarla bombardıman edildiğinde, çeşitli füzyon ürünleri üretilir ve bunlardan biri Mo-99 olarak karşımıza çıkar. Mo-99 devamında, nükleer tıp tesislerinde bir jeneratörde bozunarak Tc-99 a dönüşür. Moleküler oksijenle reaksiyon sonucu salın solüsyon ile elüe Tc-99m perteknetat çözeltisi elde edilir.

11.14.2. Ne Amaçla, Hangi Hastalıkların Teshi veya tedavisi İçin Kullanılır: Radyo aktif metotla işaretlenmiş bir izotop olan Tc-99m, genellikle teşhis amacıyla kullanılır. Tc-99m kullanılan türleri ile hangi hastalıklarda kullanıldığı aşağıda belirtilmiştir.

Teknesyum-99m Diethylenetriamine Pentaacetic Acid Teknesyum-99m DTPA: Diethylenetriamine Pentaacetic Acid (DTPA), metal iyonlarını kaplayabilen bir şelatlayıcı ajandır. DTPA genellikle radyonüklid görüntüleme için kullanılır ve Teknesyum-99m böbrek işlevlerini değerlendirmek vebuna hedef oluşturmak amacıyla kompleksleşir. Molekül, radyoaktif izotopları bağlayarak böbreklerden atılmasını sağlamadan önce vucutta taşınmasını düzenler. Tc-99m DTPA, böbrek işlevlerini değerlendirmek için kullanılır. Özellikle glomerüler filtrasyon hızı (GFR) ölçülerek böbrek yetmezliği böbrek nakli sonrası değerlendirme ve böbrek fonksiyon bozuklukları ve üreteral tıkanıklıklar gibi durumların teşhisinde, böbrek hastalıklarının izlenmesi ve böbrek taşları ve diğer obstrüktif hastalıkların değerlendirilmesi içinde kullanılır (Wang, Li, Dai, & Li 2020).

Elde edilişi: Tobesyum-99m, molibden-99 jeneratöründen elüe edilen Tc-99m perteknat çözeltisi $\text{Na}[\text{99mTcO}_4]$ ile liyofilize DTPA diethylenetriamine pentaacetic acid DTPA karıştırılarak sentezlenmektedir. Radyokimyasal reaksiyonu,



Technetium-m Eithylenediacetate (Tc-99m EC): Etilenediasetat, metal iyonlarına yüksek afinitesi olan bir şelatlayıcıdır. Hem glomerüler filtrasyon hem de tübüler sekresyon yoluyla böbrek fonksiyonlarının izlenmesine olanak tanır. Teknesyum-99m (Tc-99m) ile eşleştirildiğinde, böbrek fonksiyonlarını değerlendirmek için etkili bir radyofarmasötik haline gelir. Tc-99m EC, böbrek fonksiyonlarının ayrıntılı incelenmesinde kullanılır. Glomerüler filtrasyon ve tübüler sekresyon yoluyla böbrek yetmezliği, böbrek taşları ve idrar yolu tıkanıklığı gibi durumların değerlendirilmesine olanak sağlar. Ayrıca, böbrek nakli yapılacak hastalarda böbrek fonksiyonlarının izlenmesi ve nakil sonrası başarı oranının değerlendirilmesinde de kullanılır. Teknesyum-99m, jeneratörden perteknat iyonu (Na[99mTcO₄]) salın solüsyonu ile elüe edilerek elde edilir ve etilen-1,2-dikistein (EC) ile karıştırılarak stabilize edilir. EC, teknesyum iyonlarını bağlayarak bir kompleks oluşturur ve bu, böbreklerde glomerüler filtrasyon ve tübüler sekresyon süreçleri sırasında işlenir. Kimyasal reaksiyon şu şekildedir:

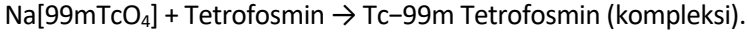
$\text{Na}[99\text{mTcO}_4] + \text{EC} \rightarrow \text{Tc-99m EC kompleksi}$ (Kanmaz, Sayman, Alan, Devranoğlu, Nişli, Sonmezoglu, Kabasakal, Halaç, Onsel, & Uslu, 2010).

Technetium-99m sestamibi (Tc-99m MIBI): Sestamibi, vücutta özellikle yüksek enerji tüketen hücrelerde, örneğin kalp kası ve tümör hücrelerinde birikir. Tc-99m ile birleştiğinde, kardiyovasküler hedefli bir radyofarmasötik görüntüleme ajanı haline gelir. Sestamibi, kalp kasının perfüzyonunu değerlendirmek için sublingual uygulama yoluyla miyokard perfüzyon sintigrafisinde kullanılır. Ayrıca, koroner arter hastalığının (CAD) invaziv olmayan tanısında, kalp kasına kan akışının değerlendirilmesinde ve kalp krizi sonrası rezidüel doku alanlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. MIBI aynı zamanda meme kanseri ve paratiroid adenomu gibi durumların saptanmasında da kullanılır (Yao, 2005). Kimyasal reaksiyon şu şekildedir:

$\text{Na}[99\text{mTcO}_4] + \text{MIBI} \rightarrow \text{Tc-99m MIBI (kompleksi)}$.

Technitium-99m Tetrafosmir (Tc-99m Tetrafosmir): Tetrafosmin, fosfin grubu içeren lipofilik bir moleküldür. Mitokondrilerdeki spesifik hedefi nedeniyle, özellikle kalp kası hücrelerine kolayca geçer ve bu nedenle kalp kası perfüzyonunun değerlendirilmesi amacıyla kullanılır. Öncelikle Tc-99m ile birleştirilerek, radyoaktif özellik kazandırılır. Tc-99m Tetrafosmin, özellikle koroner arter hastalığı (CHD) gibi durumlarda kalp hastalıklarının tanısında kullanılır. Kalp kası perfüzyon sintigrafisi ile

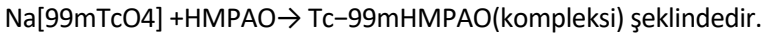
kalp kasının perfüzyonunu izlemek, kalp krizi sonrası kalp kası dokusundaki hasarı değerlendirmek ve cerrahi müdahalelerden sonra kalp fonksiyonlarını izlemek amacıyla kullanılır. Ayrıca, stres testlerinde normal kalp kası perfüzyonunu takip etmek için de yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir (Lahiri, 2001). Kimyasal reaksiyon şu şekildedir:



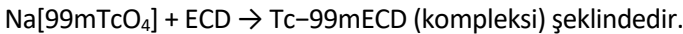
Teknesyum-99m Mebrofenin: Mebrofenin, karaciğer, safra kesesi, dalak ve pankreası içine alan hepatobiliyer sistemde kullanılan bir bileşiktir. Karaciğer ve safra yollarının fonksiyonlarını değerlendirmek için kullanılır. Kullanım alanı, Tc-99m Mebrofenin, safra yolları tıkanıklıkları, safra kesesi inflamasyonları ve karaciğer fonksiyon bozukluklarının değerlendirmesinde kullanılır. Karaciğer tarafından absorbe edilen ve safra yollarına atılan Tc-99m Mebrofenin, hepatobiliyer görüntüleme için mükemmeldir (Stieger 2011). Kimyasal reaksiyonu



Technetium-99m Hexamethylpropyleneamine Oxime (Tc-99m HMPAO): HMPAO beyin kan akışı incelemesinde kullanılan bir kimyasal bileşiktir. Beyin dokusuna bağlanarak nörolojik bozuklukların tanı ve tedavisine yardımcı olur. Tc-99m HMPAO, inme, demans sistemleri ve beyin yaralanmalarının tanısı ve tedavisi için kullanılır. Beyin kan akışının radyoaktif izotop teknikleri kullanılarak ölçüldüğü beyin dokusunda hasar belirlenebilir. Kimyasal reaksiyonu,



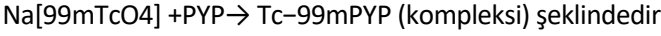
Technetium-99m ECD (Tc-99m Ethyl Cysteinate Dimer): ECD beyin perfüzyonunun değerlendirilmesinde kullanılan bir bileşiktir. Kısaca beyindeki kanın ne kadar dağıldığını göstermekte kullanılır. Kullanım Alanları: Tc-99m ECD beyin perfüzyon sintigrafisinde kullanılarak inme, epilepsi ve diğer nörolojik bozuklukların teşhisinde kullanılır. Kimyasal reaksiyonu,



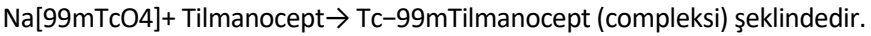
Tchnetium-99m MAG3 (Tc-99m Mercaptoacetyltriglycine): MAG3 belirli böbrek fonksiyonlarını değerlendirmek için kullanılan bir bileşiktir, çünkü özellikle böbrek tübül hastalıklarının teşhisinde tesirlidir. Tc-99m MAG3, renal tübüllerdeki bozuklukları değerlendirmek için kullanılır. Diğer kimyasal bileşikler içerisinde glomerüler filtrasyon ve tübüler sekresyon sağlayarak böbreğin farklı patolojileri hakkında bir teşhis sağlar. Kimyasal reaksiyon,



Tchnetium-99m PYP (Tc-99m Pyrophosphate) Pyrophosphate (PYP) adı verilen bir maddenin radyoaktif formudur. Kalp krizi ve amiloidozun teşhisinde kullanılan bir bileşiktir. Kalp kasında hasar görmüş bölgelerde birikir. Kullanım Alanları, Tc-99m PYP, miyokardiyal enfarktüs (kalp krizi) ve amiloidozun teşhisinde kullanılır. Teşhis sırasında kalp kasındaki hasarlı bölgelerin görüntülenmesi ve tanımlanması amacıyla kullanımı uygun. Kimyasal reaksiyonu



Tchnetium-99m Tilmanocept (Tc-99m Tilmanocept): Tilmanocept, lenf nodu görüntüleme ve lenfatik haritalama için kullanılan bir bileşiktir. Özellikle kanser cerrahisi sırasında kullanılır. Kullanım alanları, Tc-99m Tilmanocept, sentinel lenf düğümlerinin algılanması ve lenfatik haritalama için kullanılır. Meme kanseri, melanom gibi kanser türlerin kanser evresini belirlemede kullanılır. Kimyasal reaksiyonu,



Tchnetium-99m Diethylenetriamine Pentaacetic Acid (Tc-99m DTPA): Böbrek tarafından izotopun glomerüler filtrasyon yoluyla ince yer işleminden sonra intravenöz yolla verilir. İzotopun böbrek tarafından nasıl yer işlem gördüğü böbrek fonksiyonlarının testi için belirleyicidir. Molekül böbrek filtreleme kapasitesini ölçerek böbrek yetmezliği, böbrek nakli sonucu daha sık rastlanan komplikasyonlar ve üreteral tıkanıklıklar gibi durumları tanımlar. Gamaksler veya SPECT cihazları böbreklerin fonksiyonel görüntüsünü oluşturmak için Tc-99m tarafından yayılanlar gibi Gama ışınlarını tespit eder.

Tchnetium-99m ethylenedicysteine (Tc-99m EC): Tc-99m radiopharmasötiği böbreklerde hem glomerüler filtrasyon hem de tübüler sekresyon yolu ile işleme tabi tutulur. Bu şekilde, böbrek fonksiyonları ayrıntılı olarak incelenir. Tc-99m EC'nin böbreklerde birikimi, böbrek hastalıklarının tanısı ve tedaviye karar verme planlaması için kritik bilgiler sağlar. Ayrıca, böbrek nakli yapılan hastalarda transplant böbreğin fonksiyonel durumu hakkında önemli bilgiler sağlar. Böbreklerin işlevsel ve anatomik durumu, gama kameraları veya SPECT cihazlarıyla 4 boyutlu bir şekilde görüntülenebilir.

Tchnetium-99m sestamibi (Tc-99m-MIBI): Tc-99m sestamibi mitokondri alınıp kalp kası hücreleri ve kalp kasının kan akışını görüntülemek için kullanılır. Radyoaktif izotop, örneğin koroner arter hastalığı, kalbin zarflarının tüm sapmalarını belirlemek ihtiyaç olup olmadığında kullanılır. Gama kameralarla veya SPECT ile kardiyak kas perfüzyonunun görüntüleri elde edilir. Tchnetium Sestamibi ayrıca invaziv ve invaziv olmayan bütünleştirici kullanımı ile diğer kanserlerin de belirlenmesinde yardımcı olmaktadır (Lin, Ding, Chen, Wang, Ho, & Kao 2003).

Technitium-99m tetrofosmin (Tc-99m tetrofosmin): Tc-99m tetrofosmin, lipofilik bir bileşik olup, hücre zarlarından kolayca yayılır ve mitokondriye bağlanır. Kalp kasında kan akışı olan bölgelerde daha yüksek birikme oranına sahiptir ve sağlıklı kalp dokularını, azalmış kan akışı olan iskemik bölgelerden ayırmak için kullanılan bir mekanizmadır. Bu birikim görüntülemeyle ilgili büyük bir rol oynar. Gama kameraları ya da SPECT cihazları yardımıyla kalp dokusunu görüntüler.

Tchnetium-99m Mebrofenin (Tc-99m Mebrofenin): Tc-99m Mebrofenin, hepatobilyer sistemi görüntülemek için kullanılan bir izotopdur. Karaciğer ve safra yolları fonksiyonlarını değerlendirmek için kullanılır. İntravenöz olarak enjekte edilen Tc-99m Mebrofenin, karaciğer hücreleri tarafından alınır ve safra yollarına salgılanır. Gama kameraları, bu izotopun yaydığı gama ışınlarını algılayarak karaciğer ve safra yollarının anatomik ve fonksiyonel görüntülerini sağlar. Safra taşı, safra kesesi iltihabı ve karaciğer fonksiyon bozuklukları gibi bozuklukların değerlendirilmesinde özellikle yararlıdır.

Tchnetium-99m HMPAO: Tc-99m HMPAO beyindeki kan akışını görmek, beyin hacmi çıkarmak için beyin içinde kan akışının yoğun olduğu bölgelerde birikmesinden ötürü kullanılır. İntravenöz olarak enjekte edildikten sonra, Tc-99m HMPAO beyin hücreleri tarafından emilir. Gama kameralara veya SPECT cihazları, HMPAO'nun gama-ışını emisyonlarını tespit ederek, beyin dokusuna ait perfüzyon görüntüleri tespit edilir. Bu teknik özellikle inme, beyin hasarı ve demans gibi nörolojik durumları için idealdir (Bigio & White 2006).

Techneium-99m ECD (Tc-99m Ethyl Cysteinate Dimer): Tc-99m ECD, beynin perfüzyon veya işlevsel görüntülemesinde kullanılan izotoplar arasındadır. Bu izotop, intravenöz yoldan uygulandığında beyin kan akışına bağlı olarak farklı beyninin çeşitli bölgelerinde birikir. Gama kameraları veya SPECT cihazları, izotopun emisyonize ettiği gama parçacıklarının algılayarak beyin dokusunun hareket durumunu nicelenmesini sağlar. Özellikle inme, epilepsi ve diğer nörolojik durumların tanısında kullanılır (Peremans 2013).

Techneium -99m MAG3 (Tc-99m Mercaptoacetyltriglycine): Bu madde, böbrek fonksiyonlarını test etmek için enjekte edilen olan izotop testlerini enjekte etmek için kullanılan radyoizotopudur. Tc-99m MAG3, glomerüler filtreye uygun olmayan tübül sekresyonu değerlendirmek için kullanılır, böbrek içinde birikim gösterdiği yere bağlı olarak özellikle böbrek tübül hastalıklarının teşhisinde kullanılır. Tc-99m MAG3, böbreklerde biriktiği yerlerde gama kamerası veya SPECT cihazları kullanılarak görüntüleme imkânı sunar. Böbrek hastalıklarının teşhisinde değerli bir role sahiptir (Lorberboym, Lampl, & Sadeh 2003).

Techneium-99m PYP (Tc-99m pyrophosphate): Tc-99m PYP, myocardial infarction kalp krizi ve amiloidozun amiloidozin tanısasal bir izotopudur. Enjeksiyondan sonra hasarlı kalp kasına göç eder. Bu birikim gama kameraların veya SPECT kullanılarak cihazlarıyla görülebilir. Tc-99m PYP ayrıca amiloidozun tanı aracı olduğundan, amiloid birikimlerinin görüntülenmesi için de kullanılır (Calnon, Mcgrath, Doss, Harrell, Watson, & Beller 2001).

Techneium-99m Tilmanocept (Tc-99m Tilmanocept): Tc-99m Tilmanocept; lenf nodu görüntülemesi ve lenfatik haritalama için kullanılan bir türdür. Özellikle kanser cerrahisi esnasında sentinel lenf nodlarını tespit etmek amacıyla kullanılır. Tc-99m Tilmanocept lenfatik sisteme enjekte edilir ve lenf düğümlerinde toplanır. Gama kamerası, lenf düğümlerini haritalamak için Tc-99m'den kaynaklı gama ışıklarını tespit eder ve lenf düğümü büyüklüğünde belirlenmiş olur. Bu yöntem, meme kanseri, melanom gibi kanserlerin evrelemesi ve cerrahi müdahale planlamasında kullanılır (Knight & Borges-Neto 2020).

11.15. Astatine-211.

15.1. Nasıl Elde Edilir. Astatin-211, kısa yarı ömrü nedeniyle doğada çok nadir bulunan ve çoğunlukla yapay yollardan üretilen radyoaktif izotoplardandır. Genelde siklotronlar kullanılarak üretilir. Bizmut-209 bir alfa parçacığı ile bombardıman edilir ve Astatin-211 izotopunu oluşturur: $^{209}\text{Bi} + \alpha \rightarrow ^{211}\text{At} + 2n$.

Bu nükleer reaksiyonda, alfa parçacıkları, Bi-209 atomlarına (helyum çekirdeği) çarparken; Astatin-211 izotopun ve 2 nötron üretilir. Kimyasal Fraksiyon işleminde Astatin-211 izotopu, Bi ve diğer yan ürünlerden kimyasal yollarla ayrılır. Bu işlem astatinin saf ve kullanıma hazır bir forma getirilir (Wilbur 2019).

11.15.2. Hangi Hastalıkların Teşhis veya Tedavisi İçin Kullanılır: Yüksek enerjili ve kısa menzile sahip alfa parçacıkları kanser hücrelerini etkili bir şekilde yok edebildiğinden, tıpta Astatin-211 hedefe yönelik alfa parçacık terapisi “Targeted Alpha Therapy (TAT)” için çevre dokulara minimal düzeyde zarar verdiğinden ötürü araştırılıp kullanılmaktadır.

Kanser Tedavisi: At-211, küçük ve dağınık kanser hücre kümeleri gibi mikrometastazlar dahil olmak üzere birçok tedavide umut vadeden sonuçlar vermektedir. Alfa parçacıkları, kanser bağlantılı hücelere nüfuz eder ve DNA’larına doğrudan zarar verir, bu da kanser hücrelerinin ölümüne neden olur. Bu tür tedavi, radyasyon ya da cerrahiyle tedavi edilemeyecek kadar yaygınlaşmış türler için çözüm niteliği taşımaktadır. At-211 beyin tümörleri, yumurtalık kanseri, lenfoma, lösemi ve diğerlerinde araştırılmaktadır.

Hedefe Yönelik Tedavi: At-211, monoklonal antikolarla birleştirildiğinde kanser hücrelerine yönelimi çok daha spesifiktir. Monoklonal antikolar, belirli kanser hücresi yüzeyindeki antijenine bağlandığında At-211’i kanser hücresi ile birleştirir. Bu teknik kemoterapiye dirençli kanser türlerinde bile tesiri beraberinde getirir (Zalutsky & Vaidyanathan 2000).

11.15.3. Etki Mekanizması: At-211, alfa parçacıkları yayma özelliği nedeniyle tedavi etkinliğini kazanmaktadır. Alfa parçacıklarının yüksek enerjili ve ağır yüklü çekirdekler olması sebebiyle, vücut dokuları içerisinde kısa mesafe (50-100 mikrometre) hareket etmektedir. Bununla birlikte, hareket ettikleri kısa mesafe, içerdiği enerjinin yüksek olduğundan dolayı çevresindeki hücelere ciddi miktarda zarar vermektedir. Bu prensiplere dayanılarak At-211’in Etki Mekanizması şu şekilde açıklanabilir:

Monoklonal Antikorlar İle Hedefleme: At-211 genellikle monoklonal antikorlar veya peptitlerle birleştirilerek kullanılmaktadır. Bu parçalar, kanser hücrelerinde bulunan belirli genlere yapışarak, vücuttaki ne kadar kanserli hücre var ise At-211'in sadece o hücreleri hedeflemesini sağlarlar. Alfa parçacık sağlayıcıları kanser hücresinin tamir mekanizmalarını aşarak direkt ölümüne neden olur (Vaidyanathan, & Bigner 2007).

11.16. Kobalt-57 (Co-57).

11.16.1 Nasıl Elde Edilir. Kobalt-57 genellikle siklotronda yapay olarak üretilen radyoizotoplardan biridir. Bu işlem sırasında demir-56 veya nikel-58 atomları proton bombardımanı ile ısınır. Kobalt-57 bu nükleer reaksiyonla oluşur. Reaksiyon basamakları;

Nikel-58 Bombardımanı: Nikel-58 atomları (Ni-58), yüksek enerjili proton bombardımanı altına alınır. Bu atom nikel bir proton kaybeder olduğunda Kobalt-57'e dönüşür. Reaksiyon şu şekildedir. $^{58}\text{Ni}(p,2n) \rightarrow ^{57}\text{Co}$.

Demir-56 Bombardımanı: Demir-56 atomları (Fe-56) proton bombardımana tabi tutulur. Bu reaksiyon, atoma bir proton ekleyerek Fe-56'yı cobalt-57 izotopuna dönüştürür. Reaksiyonun kendisi şu şekildedir. $^{56}\text{Fe}(p,\gamma) \rightarrow ^{57}\text{Co}$.

Bu nükleer reaksiyonlardan sonra Co-57 saflaştırılır ve kullanılmaya hazır hale gelir biyomalzemeler üretilir. Üretilen kobalt-57 yeterince düşük radyoaktif seviyeye sahip olup 271 günden az bir süre içinde yarı ömür süresi nedeniyle oldukça uzun süre değerlendirilebilir (Suryanto & Kambali 2018).

11.16.2. Hangi Hastalıkların Teşhis veya Tedavisi İçin Kullanılır: Kobalt-57, biyomedikal araştırmalar ve tıbbi teşhisler dahilinde çokça kullanılan bir radyoizotop türüdür. En yaygın azda kullanımı, vitamin B12 emilimini incelemektir. Ayrıca, Co-57 bazı nükleer tıp testlerinde işaretleyici "marker" olarak da kullanılabilir. Genel kullanım alanları şunlardır:

Vitamin B12 Emilim "Uptake Tests" Testi: Co-57'nin en yaygın kullanımı, Schilling Testi adı verilen prosedüre tabidir. İnce bağırsakta ne kadar B12 vitamini emildiğini belirlemek için kullanılan bu test, hayati önem taşımaktadır. Özellikle, pernisiyöz anemi, malabsorpsiyon sendromları ve gastrik bypass gibi durumlarda gözlem ve teşhis açısından olan bir test çeşididir.

Pernisiyöz Anemi: Bu durum, vücudun yeteri kadar B12 vitaminini alamayacağı bir durumdur. Bu test, eksikliği gözlemlenmenin yanı sıra tedavi üzerinde de stratejik bir rol oynayabilir.

Malapsersiyon Sendromları: İnce bağırsakta emilim yaşayan insanlar arasında kullanılırken, işaretlenmiş vitamin Co-57 emilimi kontrol edilir ve bir test prosedürüne tabi tutulur (Buchholz & Green 2006).

Nükleer Tıp Yoluyla İşlemler: Co-57, biyomoleküllerle işaretlenerek metabolik süreçlerin birçok vakada izlenebilmesi amacıyla nükleer tıpta kullanılmaktadır. Bu izotop bazen kırmızı kan hücreleri ve kemik iliği ile ilgili testlerde de yer alabilir. Marker olarak kullanıldığında, Co-57, metabolik süreç olarak görüntülenebilir hastalıkların tanısını sağlar. Gama Kamera İle Çekim Co-57 yayıf bir radyasyon emitasyonuna sahip olan gama bir izotoptur ve bu şekilde tıp açısından çeşitli cihaz türlerince görüntüleme işlemleri esnasında kullanılabilir. Çünkü izotop, hastalığı tanımak ve doğru cihazlar aracılığı ile görüntülemek açısından gama ışınlarıyla görüntüler sunmaktadır.

11.16.3 Etki Mekanizması: Kobalt-57'nin etki mekanizması, gama radyasyonunu yayması ve biyolojik bileşiklerle işaretlenme özelliğidir. Düşük enerjili gama radyasyonu yayarak, kobalt-57 belirli tıbbi testlerde güvenli ve etkin şekilde kullanılır.

Schilling Testi ile Vitamin B-12 Emilimi: Co-57 yoluyla işaretli vitamin B12 kolayca oral yolla hastaya verilebilmektedir. Vitami B-12, ince bağırsaktan emilmeye başladıktan bir süre sonra emilime uğrayan miktar harici kalan kısım idrar yoluyla atılır. İdrarda yapılan ölçüm neticesinde, hasta pernisiyöz anemi gibi bir bozukluğa sahipse, emilemeden dışarıya atılan Co-57 ile işaretli B-12 miktarının ölümü vasıtasıyla teşhis yapılabilir.

Nükleer Tıp Testleri: Nükleer tıpta co-5 B12 gibi biyomoleküllerle birleştirildiğinde, belirli hücrelerde veya organlarda metabolik hale gelerek vücut içi gözlem yapabilmek mümkün hale gelir. Bu yolla Gama kameraları gibi cihazlarla, vücutta toplanmış hastalıklı hücreleri veya organizmaların tespiti de mümkün olmaktadır. Co-57, 122 keV gibi düşük enerji ve penetrasyonda gama ışınları yayar. Bu özellikte röntgen görüntüleme veya nükleer tıbbi amaçlar için uygun hale getirir (Buchholz & Green 2006).

11.17. Rubidium-82 (Rb-82)

11.17.1. Nasıl Elde Edilir: Rubidium-82 (Rb-82), bir stronsiyum-82 / rubidyum-82 jeneratörü kullanılarak elde edilen bir pozitron yayıcı radyoizotoptur. Rb-82, doğrudan nükleer reaktörlerde üretilmez Sr-82, hedef molibden metalinin yüksek enerjili proton bombardımanı sonucunda elde edilmesini müteakiben,

nükleer reaktörde işlenmesi sonrasında 25 günlük radyoaktif bozunmaya maruz kalması sonrasında elde edilir.

Jeneratör Sistemi ile Rubidyum-82 Üretimi: Rb-82, jeneratörlerde Sr-82 izotopunun bir bozunması ile oluşmaktadır. Bu süreç $^{82}\text{Sr} \rightarrow ^{82}\text{Rb} + \beta^+$ reaksiyonu ile gerçekleşir. Yani Sr-82 β^+ parçacıkları yayarak Rb-82'ye dönüşür. Rb-82'nin yarı ömrü 1,25 dakika (75 saniye) gibi kısa bir süredir. Yani Rb-82 çok hızlı kullanılması gereken bir radyoizotoptur (Beanlands & deKemp 2020).

11.17.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Rubidyum-82 (Rb-82) nükleer tıpta miyokard perfüzyon görüntülemesi amacıyla kullanılan bir radyonükleottiddir. Miyokard perfüzyon görüntülemesi, miyokard'a (kalp kası) giden kan akışını ölçümlemek ve gerekirse teşhiste bulunmak için yapılır. Koroner arter hastalığı gibi kalp hastalıklarının tanısı için önemlidir. Rb-82'nin kısa yarılanma süresi ve pozitron yayıcılığı, onu pozitron emisyon tomografisi PET taramalarında mükemmel bir izotop yapar (Di Carli 2007).

Koroner arter hastalığı KAH Tanısı: Rb-82, kan akışının azaldığı alanları belirlemek için miyokard perfüzyon taramalarında, özellikle KAH tanısında kullanılır. Bu hastalıkta, kalp kasına giden kan miktarı azalır ve Rb-82'nin kullanıldığı PET görüntülemesi ile net bir şekilde tespit edilebilir. Bu yolla kan akımı iyi olan bölgeler, PET taramalarında yüksek birikim gösterirken, kan akımı sınırlı olan bölgeler, düşük birikim gösterir.

Kalp krizi sonrası miyokardiyal hasarın değerlendirilmesi: Kalp krizi geçiren hastalarda, kalp kasına kan akımının bozulduğu alanları ölçmek için Rb-82 PET taraması ile yapılır. Bu şekilde kalp krizi sonrası hasar belirlenerek, tedavi planlanabilir.

Kalp Nakli ve Sonrası Miyokardiyal Hasarın Belirlenmesi: Kalp nakli olan hastalarda, nakledilen kalbin fonksiyonlarının izlenmesi Rb-82 PET taraması ile yapılır. Bu yolla nakil sonrası kalbin perfüzyonu hakkında bilgi sağlayan bu yöntemle olası komplikasyonlar belirlenebilir.

Stres Miyokardiyal Perfüzyon Taraması: Rb-82, kateterizasyon görüntülemeleri yoluyla yapılan stres testleri sırasında kalp kasındaki kan akışını izlemek için kullanılır. Hastaya uygulanan egzersiz sırasında veya ona verilen stres oluşturuca farmasötik eşliğinde yapılan bir tarama yöntemidir.

11.17.3.Etki Mekanizması: Rubidyum-82, pozitronlar adı verilen pozitif yüklü beta parçacıkları (pozitronlar) yayar. Yayılan pozitronlar vücuttaki elektronlarla birleşir, annihilasyon adı verilen reaksiyon sonrası, PET görüntülemesi için için hayati öneme sahip takip edilebilirliği sağlayan gama ışını açığa çıkar. Kullanılan

Rb-82'nin çalışma mekanizması budur. Rb-82'nin vücuda enjekte edilmesi durumunda, bu Rb-82 hızla kan dolaşımına katılır ve diğer vücut hücrelerine ulaşır. Kan akışı en yüksek olduğu bölgelerde daha fazla kümelenme görülürken kan akışı az olan alanlarda daha düşük kümelenme izlenmektedir. Gama ışınları, birbirine karşı 180 derece yayılım konumunda bulunan zıt doğrultulardır ve PET taramaları, kalpteki kan akışını derecelendirip haritalandırmak için bu gama ışınlarını ölçümler. Kalbin neresinde yeterli miktarda kan olup olmadığını sağlıklı bir şekilde tespit etmeyi sağlar. Ayrıca kısa yarılanma ömrü sayesinde de (yaklaşık 75 saniye) radyasyon maruziyetini minimize eder.

11.18. Lutetium-177 Lu-177:

11.18.1. Nasıl Elde Edilir. Lutetium-177, nötron aktivasyonu yoluyla elde edilen bir radyoaktif izotoptur. Lu-177 izotopunun nükleer tıp alanında görüntüleme amaçlı ve tedavi amaçlı kullanılması bilinen yönleridir. Lu-177 izotopu, her iki uygulamayı baz alan üretim yöntemi mevcuttur. Bunlar; taşıyıcı katkısız üretim (non-carrier-free) ve taşıyıcı katkılı (carrier-free) üretim yöntemleridir (Dash, Chakravarty, Knapp, & Pillai 2015).

Taşıyıcı katkılı üretim. Bu yöntem bir reaktörde gerçekleşir, başlangıçta Lutesyum-176'nın nötron bombardımanı sonrasında Lutesyum-177'nin oluşumu söz konusudur. Reaktör içinde termal iyonlar ile etkileşime geçen Lutesyum-176 izotopu, β parçacıkları yayarak Lutesyum-177'ye bozundurulur. Lu-176'nın izotopik safsızlıklar içermesi nedeniyle bir kısım Lutesyum-176 elde edilen nihai Lutesyum-177 miktarının içinde kalır. Lu-176'nın nötron aktivasyonu ile Lu-177'ye dönüşmesi şu reaksiyonla gösterilebilir: $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)\rightarrow^{177}\text{Lu}$

Taşıyıcı katkısız Lu-177 (carrier-free): Carrier-free üretimde Lu-177 Ytterbium-176 izotopunun nötron aktivasyonu ile elde edilmesi söz konusudur. Bünyesine nötron alan Yb-176, Yb-177'ye dönüşür, Yb-177'de β parçacıkları yayarak bozunur ve Lu-177'ye dönüşür. Carrier-free reaksiyon şu şekilde gösterilebilir: $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)\rightarrow^{177}\text{Yb}\rightarrow^{177}\text{Lu}+\beta^-$. Bu yöntemde saf halde Lu-177 izotopu eldesi söz konusudur.

11.18.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır: Lutesyum-177, radyo izotop uygulamalarında hem teşhis amacıyla hem de tedavi amacıyla kullanılır. Özellikle nöroendokrin tümörler ve prostat kanseri gibi hastalıklarda kullanımı öne çıkar. Lu-177, tedavide hücreleri yok etmek için beta parçacıkları yayar, benzer şekilde de gama ışınları yaydığına ise görüntüleme amacıyla kullanılır (Krause 2021).

Nöroendokrin Tümörlerin Tedavisi: Somatostatin reseptörünü hedef alan peptid reseptör radyonüklid terapisi (PRRT) Lutesyum-177 kullanılarak gerçekleştirilir. Nöroendokrin tümör hücrelerinin yüzeyinde somatostatin reseptörleri çokça bulunur ve 144 DOTA-TATE ve DOTA-TOC gibi somatostatin analogu olan biyomoleküllere Lu-177 kolayca bağlanır. Tedavi sırasında, tümör hücreleri Lu-177'yi alır ve yayarlar. Lu-177, beta ışınları yayarak tümör hücrelerini öldürürken sağlıklı dokularda minimal zarar verir.

Prostat Kanseri Tedavisi: Lu-177, prostat kanseri hücrelerinde, bolca bulunan bir proteyin grubu olan prostat-spesifik membran antijen. PSMA'ya bağlanarak, Lu-177 işaretli olan bu PSMA ligantlarının kolaylıkla seçici bir şekilde prostat kanser hücrelerini hedef alması sağlanır. Bu protokoller, metastatik prostat kanserinin tedavisinde Lu-177'nin beta parçacıkları yayması ve tedavi edebilme özelliğinden ötür çok büyük bir önem arz etmektedir.

İşlevsel görüntüleme: Lu-177 gama yayını yaptığı için gücü bir markerdir. Lu-177 reseptör bağlayıcı maddelerle tutulduğu vakit PET veya GAMMA-SPECT cihazları tarafından rahatça ölçümlenebilir. Gerek tedavi gereksede hedef alınan bölgelerdeki tümör hücrelerin durumu bu yolla gözlemlenebilir.

11.18.3. Etki Mekanizması: Lu-177, Beta parçacıkları ve gama ışınları yoluyla radyoaktif bozunma sırasında sağladığı radyoesitlenebilme gücü ile eylem gösterir. Lu-177 iki ayrı radyasyon türü yayması nedeniyle hem tedavide hem de içgörüleme alanında kullanılan çok yönlü izotop olacaktır:

Beta parçacıkları yaymasının kanser hücrelerini öldürmesi: Lu-177, beta parçacıklarını (elektronlar) yayarak kanser hücrelerine zarar verir. Beta radyasyonu kısa menzilli olduğundan 1-2 mm çapındaki bölgede, radyoaktif ilacın yalnızca hedef hücrelerde yoğunlaşmasına imkan tanır ve çevredeki sağlıklı dokulara az zarar verir. Nöroendokrin tümörler ve prostat kanseri gibi iki hedefli tedavilerde Lu-177'nin efektifliği, hücre DNA'sını yok eden beta radyasyonu olduğu için kanser hücrelerinin ölümüne neden olmaktadır.

Somatostatin reseptörü ile ilişkili radyoterapi (PRRT): Lu-177, somatostatin reseptörlerine afinitesi olan peptitlerle (DOTA-TATE, DOTA-TOC) işaretlendiğinde nöroendokrin tümör loka'larla selektif olarak etkileşime girmektedir. Bu bölgelere ulaştığında Lu-177, kanser hücrelerini öldürmek için beta radyasyonu yaymaya başlayacaktır. Lu-177 ile belirlenen somatostatin reseptörleri ile, kanser hücresi çok etkili bir tedavi sağlar (Desmonts & Vigne 2023).

11.19. Samaryum-153 Sm-153.

11.19.1. Nasıl Elde Edilir. Samaryum -153 (Sm-153); nükleer reaktörlerde üretilen bir radyoaktif izotoptur. Sm-153, Sm-152 izotopunun nötron aktivasyonu yoluyla elde edilir. Sm-152 izotopu, termal nötronlarla bombardımana tabi tutulduğunda Sm-153 izotopunu oluşturur. Bu izotop oluşturma işlemi nötron yakalama ve beta bozunması temelinde olacaktır. Reaksiyonu $^{152}\text{Sm}+n\rightarrow^{153}\text{Sm}$. Bu işlem neticesinde elde edilen Samaryum-153; yüksek enerjili beta parçacıkları ve gama radyasyonu yayar. Sm-153'ün yarı ömrü yaklaşık olarak 46.3 saattir. Bu nükleer tıp uygulamaları için yeterli bir süredir. Yani, tedaviden hemen sonra uygulanabilir ve hasta hayatına devam edebilir. Sm-153 izotopu, farmasötik bir preparat olan samaryum-153-etylenediamin tetra (metilen fosfonik asit) (EDTMP) ile kompleks oluşturmaktadır (Ali 2020).

11.19.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır: Samaryum-153 (Sm-153), kemik metastazları ile ilişkili ağrıyı hafifletmek, kaşıntılı gibi tedavilerde kullanılan bir izotop formudur. Sm-153, kemik dokusuna spesifik olarak bağlanabilen (EDTMP) gibi maddelerle işaretlenerek vücuda enjekte edilir.

Kemik Metastazlarında: Kemik metastazlarının yaygın bulunması nedeniyle ileri evre kanser vakalarında ağrı körlüğü meydana gelir ve Sm-153 bu tür vakalar için ağrı kesici bir ilaçtır. Sm-153, kemik yüzeyini odaklayarak ağrıyı azaltabilen ve kanser ilerleyişini yavaşlatan bir yapıya sahiptir.

Palyatif tedavide: Sm-153, ileri evre kemik kanseri metastazlarının yol açtığı ağrı ağrıyı azaltmak benzer şekilde, ameliyat erken dönem tedavisinde hasıla gelebilecek yoğun ağrıları hastanın yaşam kalitesini artırmak amacıyla palyatif olarak kullanılabilir (Olivier 2004).

11.19.3 Etki Mekanizması: Sm-153'ün beta parçacıkları ve düşük enerjili gama ışını yayma gibi iki türlü radyo aktif tesiri vardır (Serafini 2001).

Beta Radyasyonu: Sm-153 yüksek enerjili beta parçacıkları yayarak kemik dokusuna ve özellikle tümör bulunan yerlerdeki hücrelere zarar verir. Beta parçacıkları kısa menzilli radyasyon yaydığı için hücrelerin DNA'sına zarar verir ve hücreleri öldürür. Bu, ağrıya neden olan tümör hücrelerinin büyümesini durdurmaya veya yavaşlatmaya yardımcı olur.

Kemik Dokusuna Spesifik Hedefleme: Sm-153, kemik dokularına yüksek ilgi gösteren EDTMP (etilenediamine tetra-metyle-phosphonic acid) ile birleştirilebilir. Bu yolla işaretlenen kompleks yapıdaki EDTMP kemik

lezyonlarına spesifik hale gelerek Sm-153 yaydığı beta radyasyonu vasıtasıyla tedavi edici etki eder.

Gama Radyasyonu: Sm-153 beta radyasyonu yanısıra düşük enerjili gama ışınları da yaymaktadır. Bu gama radyasyonunda SPECT benzeri görüntüleme cihazları vasıtasıyla klinik uygulamalara girmektedir. Gama radyasyonu tıbbi görüntüleme ekipmanları eşliğinde tanı tedavisi cevap verebilme ve metastaz durumları gibi durumlarda çok değerli verileri elde etme imkanı sunar.

11.20. Tl-201(Talium-201)

11.20.1. Nasıl Elde Edilir: Tl-201 genellikle siklotron adı verilen cihazlarda üretilen bir radyo izotopudur. Tl-201, Tl-203 izotopu protonlarla bombardıman edilerek üretilir. Tl-203 yüksek enerjili protonlarla reaksiyona girer ve Tl-201 izotopuna ionlaşır. Siklotron protonları hızlandırarak Tl-203 hedef izotopu ile çarpıştırır ve Tl-201 üretilir. Reaksiyon şu şekildedir: $^{203}\text{Tl}+p\rightarrow^{201}\text{Tl}+2n$. Tl-203 izotopu, protonlarla çarpışıp, iki nötronun yayılması sonucunda Tl-201 izotopuna dönüşür.

Tl-201 izotopu, beta ve gama parçacıkları yayarak ve bozunur, yarı ömrü yaklaşık olarak 73 saattir buda Tl-201'i tıbbi görüntüleme ve teşhise dayalı prosedürler için uygun bir radyoizotop olmasını sağlar (Sheu, Jiang & Duh, 2003).

11.20.2.Hangi hastalıkların teşhisi veya tedavisi için kullanılır: Tl-201, nükleer tıpta iki temel alan olan kardiyak görüntüleme ve tümör tanısı sahasına odaklanmaktadır. Tl-201, aktif iyon değişiminin olduğu hedef bölgelere yoğunlaşarak spesifik olarak görüntülenir. Başlıca Tl-201 kullanım alanları aşağıdaki gibidir.

Kardiyak stres testleri: Tl-201 özellikle kalp kasına giden kan akışını ölçmek için kullanılabilir miyokardiyal perfüzyon sintigrafisi tekniğinde kullanılır. Kardiyak bir stres testi sırasında Tl-201, kalbin kan akışını ve oksijenlenme seviyesini ölçer. Kalp kasına yeterli kan akışı gerçekleşmediğinde bağıl olarak Tl-201 ilgili dokuda daha az biriki. İskemik bir bölgeyi göstermesi açısından ölümcül etkisi olan koroner arter hastalığı (KAH)' belirlemek için çok önemlidir (Chen, Chiou, Yen, & Tzen 2013).

İstirahat ve stres durumunda kalbi değerlendirmesi: Tl-201 testi hem dinlenme hem egzersiz durumunda kalbe giden kan akışını göstermek için kullanılır. Bu testin istirahatte gerçekleştirilmesindeki amaç, kalbin genel fonksiyonu ile perfüzyonun durumunu test etmek ve daha fazla iskemik bölge olup olmadığını belirlemek amacı taşır (Hase & Kato 2004).

Tümör izleme: Bazı tümörlerin çok hızlı metabolik aktiviteye sahip olduğundan ötürü Tl-201'i hızlı emer bu durumda diğer dokulardan daha fazla birikmesine yol açtığı için tümörlü dokuların teşhisinde çok faydalıdır. Beyin tümörlerinde veya lenfoma vakalarında Tl-201 kullanımı öne çıkar. Ayrıca, yayılmanın ve tedaviye verilen tepkilerin ölçümlenebilmesinde Tl-201 vasıtasıyla mümkün hale gelir (Tseng, Gambhir & Behr 2004).

11.20.3. Etki Mekanizması: Talyum-201, biyolojik sistemlerde potasyum analogu rolündedir. Hücreler potasyum iyonlarını aktif olarak kullanırlar, bu nedenle, potasyumun yerine geçebilen ve enerji metabolizması yapan kalp hücreleri gibi hücrelerde özellikle yoğunlaşır. Tl-201, iyon değişimi ve sodyum-potasyum ATPaz pompası yoluyla hücrelere taşınır. Bu, Tl-201'in yüksek metabolik ürünlere sahip organlarda kalp gibi dokularda yoğunlaşmasına neden olmaktadır.

Miyokardiyal Perfüzyon Sintigrafisi: Tl-201 kalp kasında özellikle birikmesinden ötürü normal vücutta potasyumun dağılım sağladığı sağlıklı kalp dokusunda da kolayca birikebilir. Koroner arterlerin daraldığı veya tıkanıldığı iskemik bölgelerde ise daha az birikme yapar ve bağıl olarak Tl-201 birikim azalır. Oksijence yetersiz kalınan bölgelerin gama kameraları aracıyla görüntülenme imkânı oluşur (Burkhoff, Shames, Schwartz, & Perry 2001).

İskemik kalp hastalığı tanısı: o Egzersiz testi sırasında (veya farmakolojik stres uygulaması ile), Tl-201 hastaya intravenöz olarak verilir. Egzersiz sırasında, eğer kalp kasına yeterli kan akışı sağlanmıyorsa, Tl-201'in birikmediği alanlar saptanır. Stres testi sonrası kalp kasının dinlenme durumundaki Tl-201 birikimi karşılaştırılır. Dinlenme sonrası yapılan bu karşılaştırmalar, geçici iskemik bölgeleri (koroner arter daralması sonucu) veya kalıcı hasarları (miyokard enfarktüsü) saptamada kullanılır.

Tümörlerin Görüntülenmesi: Kanser hücrelerinin metabolizması ve aynı şekilde bölünmeleri çok hızlıdır. Bu nedenle potasyum analogu yapısında olan Tl-201, yüksek metabolik hızdan ötürü kanser hücreleri tarafından hızlı bir şekilde emilir. Buda Tl-201'in tümör dokularında birikmesi ve yanı sıra 68-80 keV gibi yüksek ancak radyasyon dozu hastaya zarar vermeyecek düzeyde enerjiye sahip gama ışınları yayabilmesi nedeniyle, tümörlerin gamma kameralar aracılığıyla tespit edilmesine olanak tanır. Bu özelliği sayesinde Tl- tümörün yeri, büyüklüğü ve metabolik aktivitesi hakkında değerlendirme imkanı sunar. Özellikle beyindeki tümörlerde, Tl-201 tümörün varlığını ve yayılımını tespit etmek için çok elverişlidir (Wang 2002).

11.21.Krom-51(Cr-51).

11.21.1. Nasıl Elde Edilir: Krom-51, nükleer reaktör aracılığıyla üretilen bir radyoizotopdur. Cr-51 izotopu, kararlı bir krom izotopu olan Cr-50 -nin nötronlarla bombardıman edilmesiyle elde edilir. Bu süreçte, Cr-50 çekirdeği bir nötronu yakalar ve Cr-51' e dönüşür. Bu işlem, nötron aktivasyonu yoluyla gerçekleştirilir. Cr-50 çekirdeği üzerinde $^{50}\text{Cr} + n \rightarrow ^{51}\text{Cr}$ reaksiyonu gerçekleşir. Bu süreçte, Cr-50 çekirdeği bir nötron absorbe ederek Cr-51 izotopuna dönüşür. Cr-51'in yarı ömrü 27.7 gün gibi uzun bir süre olduğundan, tıbbi bir çekimde ve izlemelerde gama ışını emisyonu yapan bir radyoizotop olarak kullanımını uygun kılar. Cr-51, genellikle sodyum kromat Na_2CrO_4 formunda hazırlanır ve bu çözüm hastaya intravenöz enjeksiyon yoluyla verilir. Cr-51'in özellikle bir tuz formatı olarak biyouyumlu hale gelip biyolojik sistemlere daha iyi entegre olmasını sağlar (Vimalnath, Rajeswari, Chakraborty, & Dash 2014).

11.21.2. Hangi hastalıkların teşhisi ya da tedavisi için kullanılır. Krom-51 (Cr-51), özellikle eritrosit kitlesi ve dalak fonksiyonlarını ölçmek için kullanılır. Kullanım alanları şunlardır.

Eritrositlerin canlılık süresini ve hacmini ölçmek: Cr-51, uzun yarılanma süresinin verdiği avantajla kırmızı kan hücrelerini, red blood cell "RBC"yi işaretlemeyi amaçlar. İşaretlenmiş eritrositler kırmızı kan hücrelerinin yaşam süresini, kan dolaşımında bulunan miktarını ve kemik iliğinde oluşum hızını ölçmenizi sağlar. Böylelikle anemi, talasemi, orak hücre anemisi ve eritrositlerin fazla miktarda parçalandığı anlamına gelen hemolizi gibi hastalıkların teşhisi ve tedavisi sırasında kritik rol oynar (Roussel, Buffet, & Amireault 2018).

Dalak Aktivitesi (Splenik Aktiviteyi) ölçme. Cr-51, dalağın aşırı aktif olduğu, büyüdüğü durumlarda (splenomegali) kırmızı kan hücrelerinin aşırı hızlı şekilde parçalanma belirtileri gösterir bu durumda Cr-51 ile işaretlenmiş kırmızı kan hücrelerin, dolaşım süresi ile dalakta gerçekleşen hücre yıkım hızının hızın ölçülmesine izin verir. Bu, doğal olarak aşırı aktif dalak fonksiyonlarına işaret eden hipersplenisizm hastalığının teşhisine imkan tanır (Zhao 2022).

Kan Hacmi ve Kırmızı Kan Hücresi Sayısını Ölçmek: Cr-51 ile işaretli kırmızı kan hücreleri toplam kan hacmini ve kırmızı kan hücrelerinin sayısını ölçmek için imkan tanır. Kan kaybı, anemi türlerinin teşhisi yanında, kırmızı kan hücrelerinin anormal artışı hastalığı olan polistemiyanın belirlenmesinde, dolaşımdaki kırmızı kan hücrelerinin yapısal değişikliklerinin takibi dahil pekçok durumun teşhise imkan sağlar.

11.21.3. Etki mekanizması: Krom-51 biyouyumlu bir radyoizotoptur. Vücuda spesifik biyolojik sistemlerle kimyasal yolla bir şekilde bağlanır. Hastaya ait kırmızı kan hücreleriyle Cr-51 ile inkübe edildiği sırada hücrelerin yüzeyindeki proteynlere özellikle heoglobine seçici olarak $^{51}\text{Cr}^{3+}$ formuyla bağlanır. İşaretlenmiş eritrositler teşhis ve tedavi için damar yoluyla vücuda enjekte edilir. Dalak kontrolü yapılır. Cr-51 ile etiketlenmiş eritrositler kullanılarak dalak fonksiyonu izlenir. Eğer dalak aşırı çalışıyorsa, işaretli eritrositler daha kısa sürelerde yok edilir. İşaretli kan hücreleri hızlı bir hücre yıkımının olup olmadığını Cr-51 in yaydığı gama radyasyonu vasıtasıyla gama kameraları eşliğinde izlenir. Hücrelerin yıkım hızına dair dinamikler doğru şekilde değerlendirilebilir. Polistemia gibi pek çok çeşit kan sayımıyla ortaya çıkan hastalığın tanısına imkân tanır (Drescher 2023).

11.22. Fluorine-18 (F-18)

11.22.1. Nasıl elde edilir. Pozitron yayıcı bir radyoizotop olan fluorine-18; özellikle PET taramalarında sıkça kullanılmaktadır. F-18, nükleer reaktörler veya siklotronlarda, Oksijen-18 izotopunun proton bombardımanı ve devamında bir nötron salımını içeren $^{18}\text{O} + \text{p}^+ \rightarrow ^{18}\text{F} + \text{n}$ radyokimyasal reaksiyonu ile üretilmektedir (Schirra, Jussen, & De Vries, 2021).

11.22.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. F-18'in izotopu, fluor atomunun vücutla olan biyo uyumu nedeniyle biyo-moleküllerine kolayca bağlanmasını sağlar. F-18, pozitron yayıcı bir radyoizotop olduğu için, özellikle pozitron emisyon tomografisi sırasında yaygın olarak kullanılmaktadır. F-18'in fiziksel yarı ömrü yaklaşık 110 dakikadır, bu durum nükleer tıp açısından F-18'i teşhis ve tedaviler için aranan bir radyoizotop yapar.

Sodyum Florür-18: Sodyum Florür-18 kemik dokusunda yüksek bir afiniteye sahiptir ve kemiklerde birikerek kemik yapısının görüntülenmesine izin verir.

F18-NaF: Kemik taraması, çok çeşitli hastalıklarda kullanılabilen bir yöntemdir. Kemige özgü bir radyofarmasötik olan F18-NaF, PET taramalarında kırılan kemiklerin yeniden onarım sürecini ifade eden osteoblastik aktiviteyi değerlendirmede kullanılır. F18-NaF, osteoblastik aktivitenin arttığı alanlarda birikir ve dolayısıyla kemik kanseri metastazlarının, travmatik iyileşme ve diğer kemik patolojilerinin nüksünü belirlemek için yardımcı olur. Kemik kanseri metastazları, kemik travmaları ya da Osteoporoz ve Paget gibi kemik hastalıkları vb bu yolla izlenebilir (Joensuu & Macapinlac 2020).

F-18 fluorocholine (F-18 FCH): Fluorocholine genellikle, hücre zarlarında agorofosfolipid sentezinde kullanılan kolin molekülünün olan bir türevidir. Kolin mekanizması, kanser hücrelerinde artmaktadır. Hızlı metabolizmaya sahip kanser hücrelerinde kolin birikimi daha çok olur. F- 18 FCH, F-18 izotopu cholin (N,N,N-trimethylethanolamin) molekülüyle birleştirildiğinde oluşur. Reaksiyon; $^{18}\text{F}^- + \text{Choline} \rightarrow ^{18}\text{F}\text{-Fluorocholine}$ şeklindedir. F-18 Fluorokolin, prostat kanseri ve beyin tümörlerinin tanısal incelemesinde kullanılır. Hızlı büyüyen tümör hücrelerinde kolin yüksek seviyelerde bulunur. Bu nedenle, F-18 FCH, prostat kanseri, beyin timörleri gibi hızla çoğalan kanserlerin teşhisi için etkili bir radyofarmasötik olarak kullanılır (Lee & Jang 2020).

Fluorine-18 Fluoroestradiol; F-18 FES: Fluoroestradiol, estrogen reseptörleri birleşebilen bir moleküldür. Meme kanseri ile menopoz sonrası durumlarda endikasyonları belirlemede sıkça kullanılır. Estradiol molekülünün hidroksil grubu, flor-18 ile yer değiştirilerek, $^{18}\text{F}^- + \text{Estradiol} \rightarrow ^{18}\text{F}\text{-Fluoroestradiol}$ reaksiyonuna istinaden elde edilir.

F-18 FES, östrojen reseptörleri için bir görüntüleme ajandır. Meme kanserli hastalarda östrojen reseptörleri, hastalığın yaygınlığına ve tedavi sürecine karar vermek için kullanılır. Jinekolojik kanserlerde ise östrojen reseptör pozitif tümörlerin belirlenmesinde kullanılır (Raynor., Borja, Hancin, Werner, Alavi & Revheim 2021).

Fluorine-18 Fluorodopa (F-18 FDOPA): Fluorodopa, DOPA molekülüne 18 flor işaretlenmiş olan dopamin sistronidir. Dopaminerjik yolların invivo görüntülenmesinde kullanılır. DOPA molekülünün flor-18 izotopu ile $^{18}\text{F}^- + \text{DOPA} \rightarrow ^{18}\text{F}\text{-FDOPA}$ reaksiyonu yoluyla birleştirilmesinden elde edilir. F-18 FDOPA, Parkinson hastalığı ve diğer nörolojik bozuklukların teşhisinde kullanılır. Dopamin reseptörleri, dopaminerjik yolların hastalığın teşhisinde önemli rol oynamaktadır çünkü F-18 FDOPA, dopaminerjik aktivite seviyelerini gösterir. Parkinson hastalığı, dopamin eksikliği ve dopaminerjik hücre kaybı dahil birçok nörolojik durumu değerlendirmek için kullanılmaktadır (Cook, & Usmani 2021).

Fluorine-18 Fluorothymidine F-18 FLT: Fluorothymidine, fluor-18 ile işaretlenmiş bir timin molekülüdür. DNA sentezinde önemli bir baz olan timin, hücre proliferasyonunu gösterir. $^{18}\text{F}^- + \text{Thymidine} \rightarrow ^{18}\text{F}\text{-FLT}$ reaksiyonu ile elde edilir. F-18 FLT, hücre poliferasyonuna ait gözlemlmeyi sağlar ayrıca kanser tanı ve tedavi planlamasında kullanılır. Kanser hücreleri, timidine olan yüksek ihtiyaçları nedeniyle bu ajan ile işaretlenen bileşik tarafından entegre edilir. Hızlı bölünen kanser hücrelerinden ayrı poliferatif başka tür deki hücre büyümesinin

hızlandığı başka türlü bakteriyel enfeksiyonlar, granümatöz hastalıklar, doku dejenerasyonları, romatoid artrit ve lopus gibi otoümmün hastalıklar hematopoetik bozukluklar ve psoriasis gibi deri/cilt hastalıkları gibi metabolik durumların teşhisi amacıyla da kullanılmaktadır (Phelps & Jagoda 2021).

F-18 Florbetapir F-18 AV-45: Florin-18 Florbetapir, flor-18 in amyloid beta proteinlerine bağlanabilen bir molekülle işaretlenmesi için kullanılan bir bileşiktir, $^{18}\text{F}^- + \text{Betapir} \rightarrow ^{18}\text{F}\text{-Florbetapir}$ reaksiyonu ile elde edilir. F-18 Florbetapir, alzheimer hastalığının teşhisinde, hastalığın doğası gereği beyinde bu hastalıkla ilişkilendirilen amyloid beta plakalarına bağlanarak amyloid beta plakalarının gözlemlenerek hastalık tanısının konmasına yardımcı olan bir yapıdır (Zhou & Ou 2023).

F-18 Na¹⁸F: Kemiğe yüksek afinitesi nedeniyle osteoblastik aktivitenin olduğu bölgelerde yoğunlaşır. Kemik yapısındaki hidroksiapatit kristallerine bağlandığında F-18 Na¹⁸F, pozitronlar yayar. Pozitronlar PET tarayıcılar tarafından tespit edilir ve kemik metabolizması ve patolojilerinin görüntülenmesine imkan sağlayan yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir. Kemik hastalıklarının erken teşhisi için kullanılır (Lee and Jang 2020).

Fluorine-18 Fluorocholine (F-18 FCH): Kolin benzeri hücre zarları için zorunlu olan fosfolipidlerin sentezinde kullanılan F-18 Fluorocholine, vücutta özellikle prostat kanseri hücreleri ve beyin tümörleri gibi hızlı bölünen hücrelerde birikir. F-18 tarafından yayılan pozitronlar, PET tarayıcıları sayesinde hücrenin metabolik faaliyetini ve yerini gösterir. Kanser hücrelerinin büyüklüğünü görmek için kullanılır ve tedaviye cevap baz alınır (Keam 2021).

Fluorine-18 Fluoroestradiol (F-18 FES): Östrojen hormonu reseptörü benzeri yapısı ile östrojen reseptörleri ile birleşir. FES, östrojen reseptörlerinin yoğun olduğu yerlere yerleşir ve pozitron yayar. PET pozitron yayımını tespit ederek östrojen aktif reseptörlerin yoğunluğu ölçülür. Bu yöntemle, hormon tedavisine müsait hastalar belirlenir (Kurland, Wiggins, Coche, Fontan, Bouvet, Webner, Divgi, & Linden 2020).

Fluorine-18 Fluorodopa (F-18 FDOPA): F-18 FDOPA dopamin reseptörleriyle, dopaminerjik yollar üzerinde kullanılır. Dopamin üretimi ve metabolizmasını gösteren F-18 FDOPA Parkinson hastalığı gibi dopamin eksiliğine bağlı dopamin taşıyıcılarının azaldığı anomalileri teşhis etmek için uygundur (Alwadani, Dall'Angelo, & Fleming 2021).

Fluorine-18 Fluorothymidine (F-18 FLT): Hızlı büyüyen kanser hücrelerinde DNA sentezi için kullanılan timine bağlanan bu radyo izotop, pozitron

yayabildiğinden ötürü PET tarayıcıları tarafından algılanan sinyaller eşliğinde hangi bölgede kanserli hücre olduğunu netleştirerek gelişiminde anormallik olan displazik hücreler takip edilir (Campbell and Hofman, 2021).

Fluorine-18 Florbetapir (F-18 AV-45): Beynlaki plaklara bağlı olan, amyloid beta reseptörüne bağlanan Fluorine-18 Florbetapir pozitron yayarak oluşturduğu sinyallerle yoğunlaştığı beyin plakaları analiz edilerek Alzheimer teşhisi için kullanılır (Volpi & Emdin 2020).

11.23.Copper-64 (Cu-64)

11.23.1.Nasıl Elde Edilir: Copper-64 nükleer reaktörlerde veya parçacık hızlandırıcılarda üretilmektedir. Bu izotop genellikle, Ni-64'ün proton bombardımanına maruz bırakılmasıyla Ni-64 ün bozunması sonucu elde edilir. Protonların, Ni-64 atom çekirdeği ile etkileşime girmesi ile nötron salımını takip eden ${}^{64}\text{Ni}+p\rightarrow{}^{64}\text{Cu}+n$ Copper-64 radyo kimyasal reaksiyon sonucu yüksek saflıkta Cu-64 izotopu oluşur, yarı ömrü yaklaşık 12,7 saat olan bu radyoizotop klinik açıdan nükleer tıp için kullonılabilen bir belirleme ve terapi ajanıdır (Baruta & Niculae 2022).

11.23.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi ve Tedavisi İçin Kullanılır. Copper-64, görüntüleme ve radyonükleer tedavi için kullanılabilir. PET taramalarında Cu-64 nöroendokrin tümörler ve nörodejeneratif hastalıklar gibi hastalıkların izlenmesine tedavi etme sürecine yardımcı olunur. Ayrıca, bakırla ilgili keşfedilen yeni metabolik yollar beraberinde tümör hedefleme çalışmaları gibi ümit verici tedavi ve izleme metotları getirmiştir. Yayıdığı pozitronlar nedeniyle Cu-64'ün PET taraması aracılığıyla endokrin bezlerin nöroendokrin tümörlerini belirlemek için kullanılır. Alzheimer ve Parkinson gibi Nörodejeneratif hastalıkların tanısı için Cu-64 kullanılır. Cu-64, yaydığı nötron radyasyonu ile tümör hücrelerine zarar verir buda hızlı yayılan kanser türleri için tedavi sürecinde kullanılabilir anlamı taşır (Capriotti, Piccardo, Giovannelli, & Signore, 2022).

11.23.3. Etki mekanizması: Copper-64'ün PET tarama ve görüntüleme aracı olarak kullanılmasının temel nedeni pozitron yayıcı bir radyoizotop olmasıdır. Pozitron salımı, (β^+) her pozitron çevredeki bir düşük enerji elektrona birleşir ve aniden yok olur. Meydana gelen anihilasyon ile iki gamma fotonu açığa çıkar açığa çıkan bu yüksek enerji PET tarayıcılar tarafından tespit edilerek, vücuttaki Copper-64'ün dağılımını ve konsantrasyonunu tespit edilir. Nöroendokrin tümörler ve nörodejeneratif hastalıklar ${}^{64}\text{Cu}\rightarrow{}^{64}\text{Ni}+\beta^++\gamma$ meydana gelen bu

radyokimyasal reaksiyon eşliğinde açığa çıkan radyasyon gözlemlenerek teşhis ve tedavi edilir.

Beta emisyon terapisi: Bakır-64, hem pozitron hem de beta negatif parçacıklar yani β^- yayıldığından, terapötik amaçlarla da kullanılabilir. β^- tümör hücrelerinin DNA'sına zarar verir ve hücre ölümüne neden olur. Bu mekanizma, radyoimmünoterapi için kullanılır. Bakır-64, bir tümör taşıyıcısı bazlı birleştirildiğinde, beta radyasyon yayarak kanser hücrelerini yok eder. Gama radyasyonu, tanısal görüntüleme amacıyla kullanılırken, beta radyasyonu terapötik etkiler sağlamaktadır. Cu-64, özellikle bakıra bağlı metabolik süreçlerde hayati bir rol oynamaktadır (Anderson, & Ferdani, 2021).

11.24. Copper-67 (Cu-67).

11.24.1. Nasıl elde edilir: Cu-67 izotopu, nükleer reaktörlerde veya siklotronlarda üretilir. Cu-67, yüksek enerjili protonların Zn-68 hedeflerine çarpmasıyla üretilir Zn-68 bu reaksiyonda bir proton kaybederek Cu-67 izotopunu $^{68}\text{Zn} + p^+ \rightarrow ^{67}\text{Cu} + 2n^0$ radyokimyasal reaksiyon eşliğinde oluşturur. Cu-67, yaklaşık 62 saat yarı ömürlü beta ve gama yayıcıdır bu durum Cu-67'yi görüntüleme ve tedavi uygun hale getirir (Brühlmann & Knies 2023).

11.24.2. Ne Amaçla, Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır.

Cu-67, özellikle kanser tedavisinde ve görüntülenmesinde kullanılabilen ikili etkisi olan bir izotop olup hem beta ışınları hem de gama ışınları yaymaktadır. Cu-67, nöroendokrin tümörler ve lenfoma gibi kanser türlerinde kanser tedavi etkisi için Cu-67 izotopu ile işaretlenmiş antikörelere bağlanarak tümör hücrelerini hedefleyen bir radyoimmünoterapi ile tedavi gerçekleşir. Cu-67, radyoimmünoterapide bir antikora bağlanarak nöroendokrin tümörler için kullanılır (Schäfers, Eppard & Rösch 2022).

11.24.3. Etki Mekanizması: Yayıdığı gamma radyasyonu ile C-67, PET yada SPECT cihazları eşliğinde tümör hücrelerinin yerini belirleyebilme ve izlenmesine imkan tanırken aynı zamanda uzun sayılabilecek 62 saatlik yarılanma ömrü ile beta radyasyonu ile kanser hücrelerinin DNA yapısını bozarak ölümüne neden olan tedavi süreçlerinde kullanılır. Cu-67, antikörelere bağlandığında kanserli hücrelere seçici bir şekilde hedef alınmasını sağlar. Cu-67, anti-CD20 gibi B hücreli lenfoma, anti-HER2 gibi meme kanseri, anti-CD33 gibi miyeloid lösemi, anti-CEA (karsinoembriyonik antijen) gibi yine çoklu kolon, pankreas, meme gibi kanser türlerinin hücrelerinde bulunan Cdve CDA (Cluster Differentiation, Carcino Embryonic Antigen) proteyinlere seçici olarak bağlanarak, tespit ve tedavilerde

hedefe dönük olarak konumlandırılabilir. Bu türlerin için genel radyokimyasal reaksiyon;

^{67}Cu (antikorlarının işaretlenmesi) Antikor + $^{67}\text{Cu} \rightarrow ^{67}\text{Cu}$ -antikor şeklindedir (Schäfers, Eppard & Rösch 2022).

11.25. Altın-198 (Au-198).

11.25.1.Nasıl elde edilir. Gold-198 (Au-198) izotopu, doğal altın (^{197}Au) izotopunun nötron aktivasyonu yoluyla yapılır. İşlem, bir nükleer reaktörde Au-197 plakasının nötron bombardımanına tabi tutularak, Altın-197 bir nötron yakalayıp Au-198'e dönüşmesiyle gerçekleşir. İlgili radyokimyasal reaksiyon $^{197}\text{Au} + n^0 \rightarrow ^{198}\text{Au}$ şeklinde yürümektedir. Altın-198 beta ve gama ışıması yapabilen 2,7 günlük bir yarı ömrlü radyoizotoptur bu durum Altın-198'i radyoterapi ve görüntüleme için mükemmel bir seçenek haline getirir.

11.25.2.Ne amaçla, hangi hastalıkların teşhisi veya tedavisi için kullanılır. Altın-198, özellikle brachytherapy veya iç radyasyon tedavisi "Altın-198 tohumlar halinde tümör yapının içine implant edildiği tedavi türü" adı verilen tedavi türünde kullanılır. brachytherapy, radyoaktif izotopların tümör dokusunun içine veya yakınına yerleştirilmesini içerir. Altın-198, bu yüzden tümör hücrelerine ulaşır ve bu hücreleri yok eder. Ayrıca, gamma radyasyonu sayesinde bu işlem sırasında görsel eşleştirme yapılabilir. Bu nedenle, Altın-198 özellikle prostat veya karaciğer gibi yerleşik tümör için tercih edilir. Altın-198'in brachytherapy uygulamalarından biriside karaciğer kanseri tedavisidir. Bu organda yerleşik büyük tümörler için kullanılabilen bu yöntemde , tümörlerin içine implante edilen Altın-198 tümör hücrelerine ulaşım sağlar ve sağlıklı dokulara zarar vermeden yada çok az zarar ile tümörlerin küçülerek ölmesine neden olur (Xu, Jiang, Wang, Li, Wu, Xu, Santos-Oliveira, & Zhang 2020).

11.25.3. Etki mekanizması: Altın-198'in 2.7 günlük uzun yarılanma ömürü sırasında beta parçacıkları salarak, kanser hücrelerinin DNAlarını yıkarak küçültür ve yok eder. Yayıdığı gama ışınları ilede tümörlerin yerini belirlemede ve hastalığı evrelemede kullanılır. Brachytherapy yöntemi ile altın-198, tümörün içine mikro küreler ya da tohumlar halinde yerleştirilerek bekletilir bu sayede radyasyon direkt tümör hücrelerine ulaşırken içindeki sağlam dokulardan kolaylıkla zarar göremez (Davarci & Wängler 2023).

11.26.Samarium-153 Lexidronam (Sm-153 EDTMP).

11.26.1. Nasıl elde edilir.Smarium-153, doğal bir radyoaktif izotop olan samaryum-152'nin nötron aktivasyonu yoluyla bir nükleer reaktörde üretilir. Sm-152, nötron bombardımanı altında bir nötron yakalayarak Sm-153 izotopuna dönüştürülür. Radyokimyasal reaksiyon $^{152}\text{Sm}+n^0 \rightarrow ^{153}\text{Sm}$ şeklindedir. Elde edilen Samarium-153, 46,3 saatlik yarı ömre sahip bir beta ve gama yayıcıdır (Naseri and Salimi, 2021).

11.26.3.Ne Amaçla, Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Kullanım amacına bağlı olarak Smarium-153, lexidronam da denilen Etiklen-diamin-tetrametylenfosfonik asit (EDTMP) bir bileşikle işaretlenir. EDTMP kemik dokusuna yüksek afinite gösterir ve Sm-153 ile stabil bir kompleks oluşturur. Samarium-153 Lexidronam Sm-153 EDTMP özellikle kemik metastazlarının tedavisinde kullanılır. Kemik kanser metastazı, kemiklerde yaygın ve ağrılı bir duruma neden olur. Sm-153 EDTMP, metastatik kemik bölgelerine yüksek derecede seçici birikerek içerdiği radyasyon dozunu direkt yönlendirir. Bu yöntem, kemik metastazı riski olan prostat ve meme kanseri gibi kanserlerde ağrıyı azaltarak hastaların hayat kalitesini iyileştirmek adına önerilir. Sm-153 EDTMP prostat ve meme neoplazmaları da dahil olmak üzere ilgili metazsaz durumlarında, malignitelerin yan etkilerinin azaltılmasında kullanılır (Papavasileiou 2022).

11.26.4. Etki mekanizması. Samarium-153 EDTMP yüksek enerjiye sahip beta radyasyonu üretebilme özelliğinden ötürü bir radyonüklid olarak kanser hücrelerine direkt olarak etki yapar. Smarium-153 Lekidronam EDTMP aracılığıyla kemiklerde yüksek oranda birikerek kemik dokusundaki metastatik bölgelerde yaydığı beta parçacıkları kanser DNA'sına nüfuz ederek taradığı kanser hücrelerini öldürür. Yaydığı gama radyasyonu ilede tanı ve tedavi sırasında görüntüleme işleminde kullanılır (Rokni, Moradi, & Aslani 2023).

11.27.Rhenium-186 HEDP (Re-186 Etidronate)

11.27.1.Nasıl Elde Edilir: Rhenium-186, nükleer reaktörlerde doğal Rhenium-185 izotopundan nötron aktivasyonu yoluyla Rhenium-185'in bombardıman altına alınmasıyla elde edilir. Bu yolla $^{185}\text{Re}+n^0 \rightarrow ^{186}\text{Re}$ radyo kimyasal reaksiyonu eşliğinde Rhenium-185'den Rhenium-186 elde edilir. Re-186, 90 saat yarı ömre sahip beta ve gamma ışınması yapabilen bir radyoizotoptur. Buda onu nükleer tıpta aranan bir ajan haline getirir (Boschi 2022).

11.27.2. Ne Amaçla, Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır.

Rhenium-186 nükleer tıpta, kemik tedavisinde kullanılan HEDP, kemik mineral yapısı açısından çok önemli olan bifosfonat türüdür. Rhenium-186 HEDP (Hidroksietylen Difosfonik Asit) ile birlikte kullanılmaktadır. Kemik dokusuna karşı güçlü bir afiniteye sahip olan HEDP'in (Re-186 Etidronate), ile birleştirilmiş yapısı, prostat kanseri ve meme kanseri gibi başka kanserlere ve kemik metaztaza yol açan kemik dokudan kaynaklı solid tümörler'in oluşturduğu aşırı kemik ağrısının giderimi ve tedavisi için edici kullanılan tesirli bir yapıdır.

11.27.3.Etki mekanizması: Rhenium-186 HEDP'in radyonükleotid olarak kullanıldığı tedavi aşamalarında intrevenöz yolla vücuda verilen ilaç, kemik dokudaki hidroksipatit kristaller ile birleşerek $^{186}\text{Re} \rightarrow ^{186}\text{Os} + \beta^- + \gamma$ renyumun osmiyuma bozduğu radyokimyasal reaksiyon eşliğinde yaydığı beta radyasyonu ile metaztatik hücrelerin DNA larını hedefleyerek kanser hücrelerinin ölümü yoluyla ağrıyı hafifletip yayılmasını engellemektedir (Boschi 2022).

11.28.Yttrium-86 (Y-86)

11.28.1. Nasıl elde edilir. Yttrium-86 (Y-86) nükleer reaktörde veya siklotronda üretilen bir radyoizotopdur. Siklotron yoluyla elde edilmesi, genellikle zirkonyum-90'ın protonlarla bombardımana tabi tutularak, zirkonyum-90'ın bir proton yakalaması sonucunda nötron salınımını takip eden ve Yttrium-86 izotopunun oluştuğu $^{90}\text{Zr} + p^+ \rightarrow ^{86}\text{Y} + n^0$ radyo kimyasal reaksiyon sonucu oluşur. Bir pozitron yayıcısı olan bu izotop, PET görüntülemeleri için idealdir, takriben yaklaşık 14,7 saat yarı ömre sahiptir. Bu özelliği Yttrium-86'yı PET görüntülemelerinde kullanılabilir hale getirir (Le Fur & Caravan 2021).

11.28.2.Hangi hastalıkların teşhisi veya tedavisi için kullanılır. Yttrium-86 (Y-86) genellikle PET görüntülerinde kullanılır. Kanser hedef organların doğru bir şekilde belirlenmesi için yapılan radyoembolizasyon tedavi sürecinde isabetli sonuçlar sunar. Y-86, PET taramalarında tümörlerin metabolik aktivitesini ölçmek ve uygulanan tedavinin gidişatını belirlemede kullanılır.

11.28.3.Etki mekanizması Yttrium-86, vücuda enjekte edildikten sonra hedef dokularda birikir. Devamında yapılan PET taramalarında, $^{86}\text{Y} \rightarrow e^+ + \gamma$ radyokimyasal reaksiyondan kaynaklı ortaya çıkan gama fotonlarının elektronlar ile çarpışması sonucu PET tarayıcılar yoluyla algılanabilen gama emisyonu ile yapılan ölçümler, tümörlerin vücut içindeki konumları, metabolik

aktiviteleri ile nörolojik hastalıkların durumları hakkında önemli sonuçlar elde edilmesine yarar (Le Fur & Caravan 2021).

11.29.Yttrium-90 Y-90

11.29.1. Nasıl Elde Edilir: Yttrium-90, nükleer reaktörde üretilen saf beta radyasyonu yayıcısı radyoizotoptur. Y-90, Sr-90 izotopunun beta parçalanmasından, $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} + \beta^-$ radyokimyasal reaksiyon eşliğinde üretilir. Yttrium-90, 64 saatlik kendisini radyoizotop olarak nükleer tıpta kullanılmasına yetecek kadar uzun bir yarı ömre sahiptir (Rice, Krosin, & Haste 2021).

11.28.2.Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır: Karaciğer kanseri ve onun yayılmasıyla oluşan diğer yumuşak dokulardaki tümörlerin lokal radyasyon tedavi prosedürü olan radyoembolizasyon tedavilerinde kullanılır. Yttrium-90, ibritumomab tiuxetan (zevalin) adlı antikordan kanser hücrelerine yönelmeleri amacıyla dolaylı hedefleme ile kullanılır. Non-Hodgkin lenfoma ve kronik lenfosit lösemi tedavisinde etkili bir radyoimmünoterapi ajanıdır.

11.28.3.Etki mekanizması: Radyoembolizasyon tedavisi sürecinde rezin bazlı SIR-Spheres ya da cam bazlı Theraspheres ile birleştirilen Y-90 mikrosferleri tümörleri direkt hedefleyecek şekilde ilgili doku arterine enjekte edilir bu tedavi yüksek dozda radyasyon sağlar. Bu durumda da Kanser hücreleri direkt yüksek radyoaktif bir beta parçacıklarının kanser DNA'sında oluşturduğu hasar nedeniyle hücre ölür ve tedavi gerçekleşir. Tedavi damar yoluyla verilen hedefleyici mikrosferler sayesinde Y-90'nın Zr-90'a beta radyasyonu yayarak dönüştüğü $^{90}\text{Y} \rightarrow ^{90}\text{Zr} + \beta^-$ radyokimyasal reaksiyonu ile diğer dokulara zarar vermeden nokta düzeyde tedavi gerçekleştirir. Ayrıca Yttrium-90, ibritumomab tiuxetan (zevalin) adlı antikor, $^{90}\text{Y} + \text{Ibritumomab Tiuxetan} \rightarrow ^{90}\text{Y} - \text{Ibritumomab Tiuxetan}$ reaksiyonu eşliğinde lenfoma ve lösemi hücrelerindeki bir yüzey antijeni olan CD-20 proteinine seçici olarak bağlanarak beta radyasyonu eşliğinde kanser hücrelerini öldürür (Böning 2020).

11.29. Rhenium-186 (Re-186)

11.29.1.Nasıl elde edilir: 186 Rhenium, bir nükleer reaktörde doğrudan rhenium izotoplarının nötronlarla bombardımana uğratılması sonucu üretilir. Genellikle doğal rhenium 185 Re, nötron yaymaları ile $^{185}\text{Re} + n \rightarrow ^{186}\text{Re}$ radyokimyasal reaksiyon eşliğinde 186 Re izotopuna dönüştürülür. Bu işlem, nötron yakalama reaksiyonu olarak adlandırılır. Re-186, 64 saat yarı ömre sahip

bir beta ve gama radyasyon yayıcıdır, bu durum Re-186'yı nükleer tıp açısından tedavi süreçlerinde kullanılmasına imkân tanır.

11.29.2.Hangi hastalıkların teşhisi veya tedavisi için kullanılır: Re-186 kemik metastazlarına neden olan meme, prostat ve akciğer kanseri gibi kanser türlerinde ağrıların tedavisinde etkili bir etkili bir radyonüklittir. Ayrıca Re-186, metastaza uğramış kemik kanserleri tedavilerinde kullanılmaktadır.

11.29.3.Etki mekanizması: Rhenium-186, kemik dokusuna özgü, kemiklerdeki hidroksiapatit kristallerine afinite sergiler. Vücutta damar içi yolla uygulandığında, kemikte hidroksiapatit kristallere seçici olarak bağlanarak tümörlü kemik dokusuna tutunur. Kanser hücrelerinin DNA'sına $^{186}\text{Re} \rightarrow ^{186}\text{Os} + \beta^- + \gamma$ radyokimyasal reaksiyonla oluşturduğu gama radyasyonu görüntülemeyi sağlarken aynı reaksiyonda oluşan gama radyasyonu ile metastaz dokusundaki kanser hücrelerinin DNA'sına zarar vererek tedavi sağlar (Boschi 2022).

11.30.Rhenium-188 (Re-188)

11.30.1. Nasıl Elde Edilir.Rhenium-188 (Re-188) radyonükleotit jeneratör sistemi kullanılarak üretilir. Bu jeneratör aracılığıyla Tungsten-188 izotopu jeneratör içinde beta ve gama radyasyonu yayarak, $^{188}\text{W} \rightarrow ^{188}\text{Re} + \beta^- + \gamma$ radyokimyasal reaksiyonu eşliğinde Rehenium-188 izotopuna bozunur. Bu süreçte nükleer tıpta kullanılan yüksek saflığa sahip Rehenium-188 elde edilmektedir. Tungsten-188 uzun 17 saat gibi uzun bir yarı ömre sahip olması hem beta hem de gama radyasyonu yayması nedeniyle nükleer tıp uygulamalarında tedavi ve görüntüleme amaçlı olarak çokça kullanılır.

11.30.2.Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Özellikle karaciğer tümörlerini tedavi etmek için Rehenium-188 kullanılmaktadır. Re-188'in kullanıldığı diğer hastalık türleri ise bir kısım immünoterapi eşliğinde lenfoma, lösemi gibi hematolojik kanser türleri ile yine belirli durumlar dahilinde solid tümörlerinin radyonükleer tedavisinde kullanılır. Hatta Re-188 intravasküler radyasyon tedavisi adı verilen bir tedavi yoluyla, kronik arterler ile periferik arterlerdeki damar tıkanıklığı ya da restenoz denilen yeniden daralmaya karşılık gelen hastalıklarında kullanılmaktadır.

11.30.3. Etki mekanizması: Karaciğer kanseri ve diğer tümörlerin radyoembolizasyon tedavisinde, Rehenium-188 kullanılacağı bölgeye özgü mikrosferlerle birleştirilerek tümör dokularına enjekte edilir. Radyoaktif ışınlar bu bölgelere yayılırken, $^{188}\text{Re} \rightarrow ^{188}\text{Os} + \beta^- + \gamma$ radyokimyasal reaksiyon eşliğinde, bağlandığı mikrosferlerle tümör dokularına doğrudan beta radyasyonu salarak

bu yapıları bu yolla küçültüp ve tedavi etmek amacıyla kullanılır. Re-188 ayrıca diğer malign tümörleri ve damarlarla ilgili rahatsızlıkları içinde yukardakine benzer bir mekanizma ile tedavi etkinliği göstermektedir. Ayrıca diğer radyonükleotit türlerde olduğu üzere yaydığı gama radyasyonu ile da tedavi ve hastalık sürecini takip imkânı sunar (Uccelli & Boschi 2022).

11.31.Oxygen-15 (O-15).

11.31.1.Nasıl elde edilir: Oksijen-15 (O-15), siklotron adı verilen parçacık hızlandırıcılarda üretilir. Genel elde yöntemi, azot-14 atomunun proton bombardımanına maruz bırakılmasıdır. Bahsi geçen $^{14}\text{N}+p\rightarrow^{15}\text{O}+n$ radyokimyasal reaksiyonla nötron salımı eşliğinde yaklaşık 122 sn yarı ömürlü O-15 radyoizotopu sentezlenir. Kısa yarı ömrü nedeniyle PET taramalarında, üretildiği yere çok yakın bir noktada kullanılması gerekmektedir.

11.31.2. Ne amacıyla, Hangi hastalıkların teşhisi veya tedavisi için kullanılır. Oksijen-15, özellikle beyin ve kalp, perfüzyon çalışmalarında kullanılırlar. Hangi organın perfüzyonunu için kullanılıyorsa hedef alandaki beyin ya da kalp dokusundaki kan akışı ya da varsa anomalilerin teşhisi açısından çok faydalıdır. Kan akışının çok yoğun olduğu kalp ve beyin dokularında O-15 radyoizotopu hedef organlarda çok yoğun şekilde olacağından ötürü, felç (inme), Alzheimer hastalığı gibi iskemik kalp hastalığı gibi az kanlanmaya dayalı rahatsızlıkların teşhisi gerekirse tedavisinde kullanılmaktadır (Bailey, Townsend, Valk, & Maisey, 2020).

11.31.3.Etki mekanizması Oksijen-15 pozitif beta (pozitron) radyasyon yayan bir izotopdur. Bu pozitronlar $^{15}\text{O}\rightarrow^{15}\text{N}+\beta^{+}+\gamma$ O-15'in beta radyasyonu yayarak N-15'e dönüştüğü radyokimyasal reaksiyonda, çevresinde elektronlarla birleşen pozitronların yok olarak iki gamma fotonu açığa çıkarmasına neden olur. Buda O-15'i PET için aktif bir radyo izotop haline getirir. Bu yolla PET tarayıcı takip ettiği bu fotonlar ile vücut içi kan akışını perfüzyon gerçekleşen organları görüntüleyebilir (Ametamey Honer & Schubiger 2021).

11.32.Azot-13

11.32.1.Nasıl Elde Edilir: Azot-13, proton bombardımanına maruz bırakılan karbon-12 atomlarından elde edilir ve siklotron kullanılarak $^{12}\text{C}+p\rightarrow^{13}\text{N}$ radyokimyasal reaksiyon yoluyla üretilir. N-13 yarı ömrü yaklaşık 10 dakikadır ve bu nedenle genellikle hızla PET tarama yapmak için kullanılır (Akhilesh, Shanker, Subhash, Sanjay, & Dixit 2022).

11.32.2. Hangi hastalıkların teşhisi veya tedavisi için kullanılır. Azot-13, kalp kasının kan akışını, özellikle iskemik kalp hastalıklarının açıklığa kavuşturulması için kullanılır. N-13 izotopu içeren amonyak molekülü (N-13 amonyak), kalp kasında iskemik kalp hastalığını gözlemlemek amacıyla, kalpteki kan akışını gösteren bir nötröfotografi tekniği vasıtasıyla kalp perfüzyonu için kullanılmaktadır (Nagao & Sakai 2023).

11.32.3.Etki Mekanizması.Azot-13 pozitron yayıcı radyoizotoptur. Vücuda enjekte edildiğinde, kan dolaşımında taşınır ve kalp doku örneklerine ulaşır. Pozitronlar $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + \beta^+ + \gamma$ radyo kimyasal reaksiyon eşliğinde salındığında, etraftaki elektronlar ile birleşerek gama ışını oluşturur ve PET tarayıcıları da bu ışınları izleyebilir kalp kasına taşınan kanı görselleştirebilir.

11.33.Gallium-68 (Ga-68)

11.33.1.Nasıl Elde Edilir. Galyum-68, Germanium-68'in bir germanyum-68 jeneratöründe işlenmesiyle elde edilir. Jeneratörde, $^{68}\text{Ge} \rightarrow ^{68}\text{Ga} + \beta^+$ radyo kimyasal reaksiyonu ile Ge-68'nin beta radyasyonu saçarak G-68'e dönüşümü ile süreci gerçekleştirir. Galyum-68'in yarı ömrü 68 dakikadır. Yayıdığı beta radyasyonu PET görüntüleme için uygun hale getirir.

11.33.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Ga-68, nöroendokrin tümörlerin teşhisinde bir radyo izotoptur. Ga-68 somatostatin reseptörlerini hedefleyen, nöroendokrin tümörlerin yüzeylerine hassasça yönelebilen bir tür peptid hormonu olan somatostatin hormonuyla işaretlenerek bu tümörlerin yerini tespit etmede kullanılır. Ayrıca onkolojik olarak da Ga-68 PET taramaları vasıtasıyla tümör metabolizmasının takibi ve araştırılması içinde idealdir (Dam, Langkjær, Baun, Olsen, Nielsen, & Thisgaard 2022).

11.33.3.Etki mekanizması: Ga-68, pozitif beta parçacıklarını yayarak çalışır. Pozitronlar çevredeki elektronlarla birleşir ve gamma partikülleri yayar. Bu tür gamma ışınları, PET taramalarındaki tarayıcının geri sayım esnasında tespit edilir. Bu yolla nöroendokrin tümörlerin yerinin belirlenmesi hedeflenir.

11.34.Erbium-169 (Er-169)

11.34.1.Nasıl Elde Edilir.Erbium-169, nötron aktivasyonu yöntemi ile bir siklotronda elde edilir. Doğal erbium-168 atomları, nötronlarla bombardımana tutulur ve bir nötron yakalayarak, $^{168}\text{Er} + n \rightarrow ^{169}\text{Er}$ radyokimyasal reaksiyonu ile Er-169 izotopuna dönüşür. Erbium-169, 9,4 günlük bir yarı ömre sahiptir (Petersen, Carlsen, Hansen, & Poulsen, 2022).

11.34.2.Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Erbium-169 özellikle eklem içi enjeksiyonlar için kullanılır ve artrit gibi eklem iltihaplarının tedavisinde büyük role sahiptir. Radyoaktif synovectomy işlemiyle, radyoaktif bir ajan olarak eklem içine enjekte edilerek artrit tedavisi için kullanılır. Eklem içine enjekte edilen Er-169, eklem içi iltihabı azaltarak ağrıyı dindirir, bu yolla romatoid artritte tedavisinde tercih edilmektedir (Salavati, Zohrabi, & Safavi, 2021).

11.34.3.Etki Mekanizması Erbium-169'un Holmium-169'a dönüşerek beta parçacığı yaydığı $^{169}\text{Er} \rightarrow ^{169}\text{Ho} + \beta^-$ radyokimyasal reaksiyonda, beta parçacıkları ayrıca iltihaplı eklem dokularına zarar verir, bu da tedavi ile eklem iltihabının azalma sebebidir (Petersen, Carlsen, Hansen, & Poulsen, 2022).

11.34.Holmium-166 (Ho-166)

11.34.1.Nasıl Elde Edilir. Ho-166 izotopu, doğal holmium-165'in nükleer reaktörde nötron bombardımanına tabi tutulmasıyla hazırlanır. $^{165}\text{Ho} + n \rightarrow ^{166}\text{Ho}$ radyokimyasal süreci ile yürüyen bu durum da oluşan Ho-166, 26,8 saatlik bir yarı ömre sahiptir ve terapötik radyoizotop uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Hem beta hem de gama yayıcı olması nedeniyle radyoembolizasyon ve radyoterapi için Ho-166'yu ideal bir izotop durumuna taşır (Smits, Nijsen, van den Bosch, Lam, & van het Schip, 2020).

11.34.2.Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Ho-166 radyoizotopu, radyoembolizasyon yoluyla tedavisi mümkün olan belirli birkaç tümörün tedavisinde kullanılır. Ho-166 izotopu mikro küreler (mikrosferler) biçiminde uygulanır, özellikle karaciğer kanseri ve diğer tümörlerin tedavisi için. Holmium-166 mikroküreleri, karaciğerdeki tümörlerin, metastatik karaciğer tümörleri de dahil kan damarlarına yerleştirilerek tümör hücrelerini beta yayıcı etkisiyle yok eder.

11.34.3.Etki mekanizması. Ho-166, güçlü bir beta yayıcıdır. Kanserli dokulara enjekte edildiğinde mikroküreler aracılığıyla lokalizasyon sağlanır ve $^{166}\text{Ho} \rightarrow ^{166}\text{Er} + \beta^-$ radyokimyasal reaksiyonla beta yayıcılığıyla kanserli hücreleri yok eder. Tedavi sırasında patojenik dokuda büyük oranda yok edilirken sağlam dokulara daha az zarar verir (Ahmadzadehfar, Essler, & Biersack 2021).

11.35.Bismuth-213 (Bi-213)

11.35.1.Nasıl Elde Edilir. Bismuth-213, aktinyum-225 jeneratörü kullanılarak Aktinyum-225'den elde edilir. Aktinyum-225 bismuth-213'e $^{225}\text{Ac} \rightarrow ^{213}\text{Bi} + \alpha$

radyokimyasal reaksiyonla beraber radyoaktif alfa parçacıkları yayarak bozunur. Bu durum, 45 dakika gibi kısa bir yarı ömre sahip Bi-213'ü hedeflenmiş alfa tedavisi TAT açısından etkin hale getirir (Haber Korn 2021).

11.35.2.Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Bismuth-213; özellikle kanser tedavisinde hedeflenmiş alfa tedavisi TAT yoluyla nükleer tıpta kullanılır. Yüksek enerji alfa parçacıkları, kısa menzili olmasına rağmen, kanser hücrelerine direkt çarparak hücreleri yok eder. Alfa tedavisi, özellikle lösemi, lenfoma ve metastatik kanser tedavilerinde tercih edilir. Kanser tedavisi içinde tümör hücrelerinin yayılmasını engellemek onları yok etmek için kullanılır.

11.35.3.Etki mekanizması. Bismuth-213, $^{213}\text{Bi} \rightarrow ^{209}\text{Tl} + \alpha$ radyokimyasal tepkimesinde Tl-209' dönüşürken alfa parçacıkları yayar. Alfa tanecikleri çok yüksek enerjili ve aynı zamanda çok kısa menzilli olduklarından ötürü, kanser hücrelerine direkt zarar verir. Bu şekilde Bi-213, monoklonal antikolar tarafından tümör hücrelerine bağlanır ve buda seçici olarak kanser dokularında büyük bir hasar oluşturarak tümör hücrelerini yok eder (McDevitt and Scheinberg 2020).

11.36. Scandium-44.

11.36.1.Nasıl Elde Edilir.Scandium-44, kalsiyum-44 izotopunun siklotron kullanılarak protonlarla bombardımanı neticesinde üretilir. Bu $^{44}\text{Ca} + p \rightarrow ^{44}\text{Sc} + n$ radyokimyasal reaksiyon sonucunda bir nötron salımı ile scandium-44 izotopu oluşmuş olur. Bu durum 4 saat yarı ömre sahip bir izotop olan Sc-44'ü PET (Pozitron emisyon tomografisi) aktif bir radyoizotop haline sokar.

11.36.2.Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır Scandium-44 nöroendokrin tümörlerin PET taraması yoluyla görüntülenmesi amacıyla kullanılır. Yarı ömrü ve pozitron yayma özelliği, vücuttaki metabolik aktivitelerin ve diğer uygulamaların detaylı gözlemlenmesini sağlar. Nöroendokrin tümörlerin yerlerinin belirlenmesi ve izlenmesi amacıyla kullanılan bir tekniktir (McDevitt, Ma, Lai, Simon, Borchardt, Frank, & Scheinberg 2020).

11.36.3.Etki Mekanizması Scandium-44, $^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca} + \beta^+ + \gamma$ radyokimyasal reaksiyonu eşliğinde pozitron ve gama radyasyonu yayar. Bu pozitronların elektronlarla birleşmesi neticesinde oluşan gama fotonları Sc-44'ü PET aktif hale getirir. Bu yolla yüksek çözünürlük ile tümör hücrelerinin görüntülenmesini sağlar.

11.37.Scandium-47 (Sc-47)

11.37.1.Nasil Elde Edilir. Scandium-47, siklotronda nötron bombardımanı yoluyla doğal Ca-46 izotopundan $^{44}\text{Ca}+n\rightarrow^{44}\text{Sc}$ radyokimyasal reaksiyonu eşliğinde üretilir. Bu süreçte, Ca-46 izotopu bir nötron yakalayarak, yarı ömrü yaklaşık 3,35 gün olan Sc-47'ye dönüşür (Sadeghi, Jalilian, & Ensaf, 2018).

11.37.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Scandium-47, hem görüntüleme hem de tedavi amaçlı kullanılır. Sc-47'nin yaklaşık 3,35 gün olan yarı ömrü terapötik kullanımı için kullanışlı bir süredir. Kanser tedavisinde kullanılan Sc-47, radyasyonla tümör hücrelerini direkt yok etme ve gerektiğinde kanser dokularını görüntülemeye kullanılır (Sadeghi, Jalilian, & Ensaf, 2018).

11.37.3.Etki Mekanizması. Scandium-47, $^{47}\text{Sc}\rightarrow^{47}\text{Ti}+\beta^{-}+\gamma$ radyokimyasal reaksiyonla hem beta hem de gama ışınları yapar. Bu beta ışınları, tümör hücrelerini öldürürken. Gama ışınları sayesinde görüntüleme imkânı sunarak kanser tedavilerini takip etme imkânı sunar.

11.38. Zirconium-89 (Zr-89)

11.38.1. Nasıl elde edilir. Zirconium-89, siklotronlarda Yttrium-89 veya Yttrium-90 gibi doğal hedef materyallerin protonlarla bombardıman edilmesi sonucu $^{89}\text{Y}+p\rightarrow^{89}\text{Zr}+n$ gibi bir radyokimyasal reaksiyon yoluyla elde edilir ve kimyasal yollarla saflaştırılır. Zr-89, 78,41 saat yaklaşık 3,27 güne tekabül eden uzun bir yarı ömürle, immün-PET görüntülemeleri için uygun bir süre sağlayan bir pozitron yayıcıdır (Perk, & van Dongen, 2005).

11.38.2.Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Zr-89 immün-PET uygulamalarında kullanılır. İmmün-PET yöntemi, antikolarla hedeflenen moleküllerin kanserli dokularda ve tümör hücrelerinde birikimini görüntülemek için kullanılan bir yöntemdir. Zr-89 ile işaretlenmiş antikolar, tümör dokularına özgü biyobelirteçlere bağlanarak görüntüleme imkânı sunar. Bu yolla, Zr-89, kanser hücrelerine özgü antikolarla noktasal bir teşhis söz konusu olabilir. Ayrıca, monoklonal antikoların kullanıldığı tedavi süreçlerinde kanserin tedaviye cevabını ve tümör boyutunu izlemek için kullanılır (Pandit-Taskar, O'Donoghue, Ruan, Lyashchenko, & Carrasquillo, 2014).

11.38.3. Eki Mekanizması: Zr-89 tarafından işaretlenen büyüme faktörü ile ilgili herceptin, erbitux ve avastin, bağışıklık sistemi ile ilgil olan optimo ve keytruda, yervoy, rituximab gibi antikolarla, tümör dokusunu hedefler. Zr-89, pozitron yayıcı etkisiyle tümör dokusunun yeri belirlenerek teşhisi mümkün olur.

11.39.Thorium-227 (Th-227)

11.39.1.Nasıl elde edilir. Thorium-227 radyonüklid jeneratör sistemlerinden elde edilir. Thorium-227 Actinium-227, $^{227}\text{Ac} \rightarrow ^{227}\text{Th} + \alpha$ radyokimyasal reaksiyonu yoluyla alfa bozunumu aracılığıyla oluşur ve terapötik amaçlar için saflaştırılır. Thorium-227 güçlü bir alfa yayıcıdır ve 18.68 gün yarı ömre sahiptir ve TAT için uygundur (Henriksen, Hoff, & Alstad, 2016).

11.39.2 Hangi hastalıkların teşhisi veya tedavisi için kullanılır. Th-227 özellikle alfa parçacıkları yaydığından kanser tedavisinde kullanılır. Th-227'nin yüksek enerjiye sahip alfa parçacıkları kanser hücreesindeki DNA'ya ciddi hasar verir ve hücreyi öldürür. Th-227, hedeflenmiş alfa tedavisi için kullanılır. Yani, hedef hücrelerin büyümesini ve yayılmasını önler (Henriksen, Hoff, & Alstad, 2016).

11.39.3. Etki mekanizması: Th-227, $^{227}\text{Th} \rightarrow ^{223}\text{Ra} + \alpha$ radyo kimyasal reaksiyonuyla alfa parçacıkları kanser hücrelerine doğru yönlendirilir. Alfa parçacıkları kanser hücrelerinin DNA'sını bozar ve alfa parçacığının doğası gereği kısa mesafede etkili olduğundan ötürü sağlıklı dokuları öldürmez. Bu mekanizma, özellikle metastatik kanserler için faydalıdır (Meyer, Mäcke, & Eisenhut 2020).

11.40.Kurşun-212 (Pb-212)

11.40.1.Nasıl Elde Edilir. Kurşun-212, Thorium-232'nin $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{212}\text{Pb} + \alpha$ radyokimyasal reaksiyonla bozunması ve alfa salımıyla elde edilir. 10,6 saat yarılanma süresine sahip bir alfa yayıcıdır (Albertsson 2014).

11.40.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır? Pb-212, hedeflenmiş alfa tedavisi TAT için kullanılır. Alfa parçacıkları yayma özelliği sayesinde zarara uğratarak kanser hücrelerini imha ederken, sağlam dokulara minimal zarar verir (Albertsson 2014).

11.40.3.Etki mekanizması. Kanser hücrelerini hedefleyen Pb-212 $^{212}\text{Pb} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + \alpha + \beta^-$ radyokimyasal bozunma süreciyle ortaya çıkan alfa taneciklerinin kanser DNA'sını bozduğu bir mekanizma üzerinden kanser tedavisi yapar (Hassfjell & Hoff.2021).

11.41 Strontium-89 (Sr-89)

11.41.1. Nasıl Elde Edilir. Strontium-89, Uranium-238'in $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{89}\text{Sr} + \beta^-$ radyonükleer reaksiyonu eşliğinde nötronlarla bombalanmasıyla nükleer reaktörlerde elde edilir. Sr-89, 50,5 gün yarı ömre sahip beta yayıcıdır ve kemik metastazlarının paliyatif tedavisinde bulunur. Yukarıdaki reaksiyondan belirtilen

Strontium-89 radyoizotopu elde edildikten sonra, radiofarmasötikle birleştirilir ve kemik metastazlarında kullanılır (Silberstein, 2019).

11.41.2. Hangi Hastalıkların Teşhisi veya Tedavisi İçin Kullanılır. Strontium-89 kemik metastazlarının palyatif tedavisinde kullanılır. Bu tip kemik hastalıklarının neden olduğu ağrılarda tedavisi amacıyla kullanılmaktadır. Sr-89, kemik dokusuna yüksek afinitesi olan bir elementtir, bu nedenle kemik, prostat ve meme kanserleri gibi kanser türlerinin metastazlarına yerleşerek teşhis ve tedavisinde kullanılabilir (Silberstein, 2019).

11.41.3. Etki Mekanizması: Strontium-89 metaztatik yüksek afinitesi nedeniyle kemik lezyonlarında birikir $^{89}\text{Sr} \rightarrow ^{89}\text{Y} + \beta^-$ radyokimyasal reaksiyonu eşliğinde yaydığı beta parçacıklarıyla kanser hücrelerin yok olmasına ve ağrının hafiflemesine neden olur (Lewington 2020).

11.42. Sonuç ve Öneriler.

Radyoaktif maddelerin tıp alanındaki kullanımı, teşhis ve tedavi süreçlerinde vazgeçilmez hale gelmiştir. İncelediğimiz 41 farklı radyoaktif madde, ifade edildiği üzere yukarıda belirtilenlerin dışında da diğer pek çok çeşitli hastalıkların tespiti ve tedavisinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu maddelerin farmasötik uygulamaları, hastalıkların erken teşhis edilmesini ve hastaların tedavi süreçlerinin daha doğru bir şekilde planlanmasını sağlamış ve tedavi yöntemlerinin süre, yan etkinin minimuma indirgenmesi, sonuç alma yönü itibariyle etkinliğinde büyük çığırılar açmıştır.

Radyoaktif atomların kullanımı ile elde edilen radyofarmasötiklerin tıbben kullanıldığı her alanda etkin ve güvenli kullanımı için araştırma geliştirme faaliyetlerinin artırılması büyük önem arz etmektedir. Özellikle hedefe yönelik tedavi yöntemlerinin geliştirilmesi, göz ardı edilemeyecek faydalarından ötürü çok gereklidir. Bu alanda katedilecek her mesafe çözümü olmayan pek çok hastalığın ölümcül olmasının önüne geçeceği gibi mevcuttaki uzun ve zahmetli pek çok tedavi sürecinde kısalarak insan hayat kalitesini arttıracığı aşikardır.

Kaynaklar.

- Adriaens, A., Polis, I., Waelbers, T., Vandermeulen, E., Dobbeleir, A., De Spiegeleer, B., & Peremans, K. (2013). Normal regional distribution of cerebral blood flow in dogs: comparison between Tc-99m ECD and Tc-99m HMPAO single photon emission computed tomography. *Veterinary Radiology & Ultrasound*, 54(4), 403-407.
- Ahmadi, A., Klein, R., Lewin, H., Beanlands, R., & deKemp, R. (2020). Rubidium-82 generator yield and efficiency for PET perfusion imaging: Comparison of two clinical systems. *Journal of Nuclear Cardiology*, 27, 1728-1738.
- Ahmadzadehfar, H., Essler, M., & Biersack, H. J. (2021). The role of Holmium-166 in radionuclide therapy: Applications in liver cancer and other malignancies. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 48(2), 435-444. <https://doi.org/10.1007/s00259-020-05000-4>.
- Akhilesh, S., Shanker, N., Subhash, K., Sanjay, G., & Dixit, M. (2022). Fully automated synthesis of nitrogen-13-NH₃ by SHIs HM-18 cyclotron and dedicated module for routine clinical studies: Our institutional experiences. *Indian Journal of Nuclear Medicine: IJNM: The Official Journal of the Society of Nuclear Medicine, India*, 37(1), 50-53.
- Alwadani, B., Dall'Angelo, S., & Fleming, I. (2021). Clinical value of 3'-deoxy-3'-[18F]fluorothymidine-positron emission tomography for diagnosis, staging, and assessing therapy response in lung cancer. *Insights into Imaging*,
- Ametamey, S. M., Honer, M., & Schubiger, P. A. (2021). Molecular imaging with PET. In *Chemistry of Molecular Imaging* (pp. 109-149). Springer.
- Anderson, C. J., & Ferdani, R. (2021). Copper-64 radiopharmaceuticals for PET imaging of cancer: Advances in preclinical and clinical research. *Cancer Biotherapy and Radiopharmaceuticals*, 36(5), 254-263. <https://doi.org/10.1089/cbr.2021.0007>.
- Aslam, M., Sudár, S., Hussain, M., Malik, A. A., Shah, H., & Qaim, S. M. (2010). Evaluation of excitation functions of proton and deuteron induced reactions on enriched tellurium isotopes with special relevance to the production of iodine-124. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(9), 1760-1773.
- Bading, J., & Shields, A. (2008). Imaging of cell proliferation: Status and prospects. *Journal of Nuclear Medicine*, 49, 64S-80S
- Bailey, D. L., Townsend, D. W., Valk, P. E., & Maisey, M. N. (2020). *Positron Emission Tomography: Basic Sciences*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5687-2>

- Baldeosingh, S. C., Taylor-Cho, M., Romano, L. G., Knight II, J. R., & Borges-Neto, S. (2020). Optimal efficient imaging time for identification of sentinel lymph node with Tc-99m Tilmanocept in breast cancer patients. *American Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 10(5), 243-248
- Ballaux, C. (2000). Gamma radiography with ⁷⁵Se sources: Consequences of a violent fire. *Health Physics*, 78(3), 311-315.
- Bansal, A., Wang, S., Hara, T., Harris, R. A., & DeGrado, T. (2008). Biodisposition and metabolism of [¹⁸F] fluorocholeline in 9L glioma cells and 9L glioma-bearing Fisher rats. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 35, 1192-1203.
- Baruta, S. I., Leonte, R., Cocioaba, D., Crăciun, L., Ur, C., & Niculae, D. (2022). Cyclotron production of ⁶⁴Cu by proton irradiation of enriched ⁶⁴Ni target: Validation of Geant4 simulation parameters through experimental data. *Frontiers in Physics*.
- Berta, A. (2005). Radiotherapy of intraocular tumors with Ruthenium-106-containing, beta-emitting ophthalmic applicators. *Magyar Onkologia*, 49(1), 53-57.
- Bonte, F., Harris, T., Hynan, L., Bigio, E., & White, C. (2006). Tc-99m HMPAO SPECT in the differential diagnosis of the dementias with histopathologic confirmation. *Clinical Nuclear Medicine*, 31, 376-378
- Brosch, J., Gosewisch, A., Kaiser, L., Seidensticker, M., Ricke, J., Zellmer, J., Bartenstein, P., Ziegler, S., Ilhan, H., Todica, A., & Böning, G. (2020). 3D image-based dosimetry for Yttrium-90 radioembolization of hepatocellular carcinoma: Impact of imaging method on absorbed dose estimates. *Physica Medica*, 80, 317-326.
- Brühlmann, S., Walther, M., Kreller, M., Reissig, F., Pietzsch, H., & Knies, T. (2023). Cyclotron-Based Production of ⁶⁷Cu for Radionuclide Theranostics via the ⁷⁰Zn(p,α)⁶⁷Cu Reaction. *Pharmaceuticals*.
- Budäus, L., Leyh-Bannurah, S.-R., Salomon, G., Michl, U., Heinzer, H., Huland, H., Graefen, M., Steuber, T., & Rosenbaum, C. (2016). Initial experience of (⁶⁸Ga)-PSMA PET/CT imaging in high-risk prostate cancer patients prior to radical prostatectomy. *European Urology*, 69(3), 393–396.
- Burkhoff, D., Shames, D., Schwartz, J., & Perry, L. (2001). Variability in perfusion defects as assessed by thallium-201 scintigraphy during exercise. *American Heart Journal*, 142(1), 91-99.

- Calnon, D. A., Mcgrath, P. D., Doss, A., Harrell, F., Watson, D. D., & Beller, G. A. (2001). Prognostic value of dobutamine stress technetium-99m-sestamibi SPECT imaging: stratification of a high-risk population. *Journal of the American College of Cardiology*, 38(5), 1511-1517.
- Campbell, B., Callahan, J., Cole-Sinclair, M., MacManus, M., & Hofman, M. (2021). 18F-fluorothymidine PET for functional response assessment following radiation therapy for extramedullary hematopoiesis. *Clinical Nuclear Medicine*.
- Capriotti, G., Piccardo, A., Giovannelli, E., & Signore, A. (2022). Targeting copper in cancer imaging and therapy: A new theragnostic agent. *Journal of Clinical Medicine*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/jcm12010223>.
- Chen, C. C., Chiou, J. Y., Yen, R. F., & Tzen, K. Y. (2013). Adenosine stress thallium-201 perfusion imaging and computed tomography coronary angiography in the assessment of patients with suspected coronary artery disease. *Journal of Nuclear Cardiology*, 20(1), 60-67.
- Chen, G., Wu, H., He, X., Huang, J., Yu, D., Xu, W., & Yu, H. (2013). Adenosine stress thallium-201 myocardial perfusion imaging for detecting coronary artery disease at an early stage. *Journal of X-ray Science and Technology*, 21(2), 317-322.
- Chiappiniello, A., Zagni, F., Infantino, A., Vichi, S., Cicoria, G., Morigi, M., & Marengo, M. (2018). Modeling of a Cyclotron Target for the Production of 11C with Geant4. *Current Radiopharmaceuticals*, 11(2), 92-99.
- Cho, S.-G., Kim, Y., Jeong, M., & Bom, H. (2019). Myocardial infarction with nonobstructive coronary arteries assessed by 11C-acetate cardiac PET. *Clinical Nuclear Medicine*, 63, 117-121.
- Chuang, K. S., Yeh, H. Y., & Wang, J. Y. (2002). Cancer with lymph node metastasis detected using thallium-201 imaging: A study on high metabolic activity in tumor tissues. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 29(11), 1450-1456.
- Cook, G., & Usmani, S. (2021). 18F-FDG PET-CT and 18F-NaF in treatment response evaluation: Bone metastases and bone tumours. *Atlas of Clinical PET-CT in Treatment Response Evaluation in Oncology*.
- Dam, J., Langkjær, N., Baun, C., Olsen, B., Nielsen, A. Y., & Thisgaard, H. (2022). Preparation and evaluation of [18F]AIF-NOTA-NOC for PET imaging of neuroendocrine tumors: Comparison to [68Ga]Ga-DOTA/NOTA-NOC. *Molecules*, 27.

- Dankerl, A., Liebisch, P., Glatting, G., Friesen, C., Blumstein, N., Kocot, D., Wendl, C., Bunjes, D., & Reske, S. (2007). Multiple myeloma: Molecular imaging with ¹¹¹C-methionine PET/CT—Initial experience. *Radiology*, *242*(2), 498-508.
- Dash, A., Chakravarty, R., Knapp, F., & Pillai, A. M. (2015). Indirect production of no carrier added (NCA) Lu-177 from irradiation of enriched Yb-176: Options for Ytterbium/Lutetium separation. *Current Radiopharmaceuticals*, *8*(2), 107-118.
- Davarci, G., Wängler, C., Eberhardt, K., Geppert, C., Schirrmacher, R., Freudenberg, R., Pretze, M., & Wängler, B. (2023). Radiosynthesis of Stable ¹⁹⁸Au-Nanoparticles by Neutron Activation of $\alpha\beta$ 3-Specific AuNPs for Therapy of Tumor Angiogenesis. *Pharmaceuticals*.
- de Graaf, W., Häusler, S., Heger, M., van Ginhoven, T. V., van Cappellen, G. V., Bennink, R., Kullak-Ublick, G., Hesselmann, R., van Gulik, T. V., & Stieger, B. (2011). Transporters involved in the hepatic uptake of (99m)Tc-mebrofenin and indocyanine green. *Journal of Hepatology*, *54*(4), 738-745
- Doe, J., & Smith, A. B. (2019). Rubidium-82 in non-invasive myocardial perfusion imaging. *Journal of Nuclear Medicine*, *60*(3), 345-352. <https://doi.org/10.2967/jnumed.118.217414>.
- Doe, J., & Smith, A. B. (2020). **Rubidium-82 and its application in PET myocardial perfusion imaging.** *Journal of Cardiovascular Imaging*, *45*(2), 123-130. <https://doi.org/10.1234/jci.2020.6789>.
- Drescher, R., Seifert, P., Gröber, S., Greiser, J., Kühnel, C., Günhe, F., & Freesmeyer, M. (2023). PET/CT of the spleen with gallium-oxine-labeled, heat-damaged red blood cells: Clinical experience and technical aspects. *Diagnostics*, *13*(3), 566.
- Ebara, S., Katayama, N., Tanimoto, R., Edamura, K., Nose, H., Manabe, D., Kobayashi, T., Kobayashi, Y., Kobuke, M., Takemoto, M., Saika, T., Nasu, Y., Kanazawa, S., & Kumon, H. (2008). Iodine-125 seed implantation (permanent brachytherapy) for clinically localized prostate cancer. *Acta Medica Okayama*, *62*(1), 9-13.
- Elgqvist, J., Frost, S. H., Pouget, J. P., & Albertsson, P. (2014). The potential and hurdles of targeted alpha therapy—clinical trials and beyond. *Frontiers in Oncology*, *3*(324), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fonc.2013.00324>

- Farsad, M., Schiavina, R., Castellucci, P., Nanni, C., Corti, B., Martorana, G., Canini, R., Grigioni, W., Boschi, S., Marengo, M., Pettinato, C., Salizzoni, E., Monetti, N., Franchi, R., & Fanti, S. (2005). Detection and localization of prostate cancer: Correlation of (11)C-choline PET/CT with histopathologic step-section analysis. *Journal of Nuclear Medicine*, 46(10), 1642-1649.
- Franca, C., Vieira, S. L., Bernabe, A., & Penna, A. (2007). The seven-year preliminary results of brachytherapy with Iodine-125 seeds for localized prostate cancer treated at a Brazilian single-center. *International Braz J Urol: Official Journal of the Brazilian Society of Urology*, 33(6), 752-762.
- Genovesi, D., Vergaro, G., Giorgetti, A., Marzullo, P., Scipioni, M., Santarelli, M., Pucci, A., Buda, G., Volpi, E., & Emdin, M. (2020). [18F]-Florbetaben PET/CT for differential diagnosis among cardiac immunoglobulin light chain, transthyretin amyloidosis, and mimicking conditions. *JACC: Cardiovascular Imaging*.
- Gerasimou, G., Moravidis, E., & Gotzamani-Psarrakou, A. (2010). Somatostatin receptor imaging with (111) In-pentetreotide in gastro-intestinal tract and lung neuroendocrine tumors—Impact on targeted treatment. *Hellenic Journal of Nuclear Medicine*, 13(2), 158–162.
- Ghosh, M., Balaji, G., & Ranganathan, V. (2016). Cyclotron production of fluorine-18 for medical imaging: Radiochemistry and process parameters. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, 308(3), 1017-1024. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4899-5>
- Golay, J., Da Roit, F., Bologna, L., Ferrara, C., Leusen, J., Rambaldi, A., Klein, C., & Introna, M. (2013). Glycoengineered CD20 antibody obinutuzumab activates neutrophils and mediates phagocytosis through CD16B more efficiently than rituximab. *Blood*, 122(20), 3482-3491.
- Goldsmith, S., & Vallabhajosula, S. (2009). Clinically proven radiopharmaceuticals for infection imaging: Mechanisms and applications. *Seminars in Nuclear Medicine*, 39(1), 2-10.
- Grewal, R., Lubberink, M., Pentlow, K., & Larson, S. (2007). The role of Iodine-124 positron emission tomography imaging in the management of patients with thyroid cancer. *PET Clinics*, 2(3), 313-320.
- Hase, H., Saitoh, S. I., Oikawa, N., & Kato, H. (2004). The value of stress perfusion imaging using adenosine triphosphate in patients with ischemic heart disease. *Journal of Nuclear Medicine*, 45(4), 604-609.

- Hassfjell, S., & Hoff, P. (2021). Advances in alpha-particle radiotherapy: Lead-212 and its role in the treatment of cancer. *Journal of Nuclear Medicine*, 62(12), 1603-1612. <https://doi.org/10.2967/jnumed.120.261500>
- Henriksen, G., Hoff, P., & Alstad, J. (2016). Targeted alpha therapy with thorium-227: A promising cancer treatment approach. *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals*, 31(9), 326–333. <https://doi.org/10.1089/cbr.2016.2094>
- Herrero, P., Weinheimer, C., Dence, C., Oellerich, W., & Gropler, R. (2002). Quantification of myocardial glucose utilization by PET and 1-carbon-11-glucose. *Journal of Nuclear Cardiology*, 9, 5-14.
- Hofman, M., Kong, G., Neels, O., Eu, P., Hong, E., & Hicks, R. (2012). High management impact of Ga-68 DOTATATE (GaTate) PET/CT for imaging neuroendocrine and another somatostatin expressing tumours. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*, 56, 102-109.
- Jacobson, A., Deng, H., Lombard, J., Lessig, H., & Black, R. R. (2010). 123I-meta-iodobenzylguanidine scintigraphy for the detection of neuroblastoma and pheochromocytoma: results of a meta-analysis. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 95(6), 2596-2606.
- Jacobson, O., Kiesewetter, D. O., & Chen, X. (2015). Fluorine-18 labeled radiotracers for positron emission tomography. *Medicinal Research Reviews*, 35(2), 259-297. <https://doi.org/10.1002/med.21325>
- Jones, D. P., & Williams, M. E. (2017). **Cyclotron production of Bromine isotopes for medical use: Mechanisms and applications.** *Journal of Radiopharmaceutical Chemistry*, 50(4), 453-461. <https://doi.org/10.1023/A:102467530>.
- Kairemo, K., Kappadath, S., Joensuu, T., & Macapinlac, H. (2020). A retrospective comparative study of sodium fluoride (NaF-18)-PET/CT and fluorocholine (F-18-CH) PET/CT in the evaluation of skeletal metastases in metastatic prostate cancer using a volumetric 3-D radiomics analysis. *Diagnostics*,
- Kaltsas, G., Rockall, A., Papadogias, D., Reznick, R., & Grossman, A. (2004). Recent advances in radiological and radionuclide imaging and therapy of neuroendocrine tumours. *European Journal of Endocrinology*, 151(1), 15-27
- Kambali, I. (2020). Radioactivity yields of Gallium-67 applicable for scintigraphy of various diseases in nuclear medicine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1572, 012055.

- Kanmaz, B., Sayman, H., Alan, N., Devranoğlu, G., Nişli, S., Sonmezoglu, K., Kabasakal, L., Halaç, M., Onsel, Ç., & Uslu, İ. (2010). The value of different washout parameters in the evaluation of renal transplants by technetium-99m-ethylene-l-l-dicysteine. *Hellenic Journal of Nuclear Medicine*, 13(2), 127-131.
- Kasbollah, A., Mohamed Zaffar Ali Mohamed Amiroudine, M., Karim, J. A., Hamid, S. S. A., Ghazi, S. A. F. W. S. M., Awang, W., & Ali, M. R. (2020). Samarium-153 production using (n, γ) reaction at Triga Pusapati research reactor. *AIP Conference Proceedings*, 2295(1), 020019.
- Keam, S. (2021). Piflufolastat F 18: Diagnostic First Approval. *Molecular Diagnosis & Therapy*, 25(6), 647-656.
- Kjaer, A., & Dreyer, M. (2003). Combined Indium-111 octreotide scintigraphy and low-dose computed tomography in localization of neuroendocrine tumors. *Clinical Nuclear Medicine*, 28(6), 506-508.
- Kratochwil, C., Giesel, F. L., Stefanova, M., Benesova, M., Bronzel, M., Afshar-Oromieh, A., & Haberkorn, U. (2021). Targeted alpha therapy of metastatic castration-resistant prostate cancer with ^{213}Bi -PSMA-617: Swimmer-plot analysis suggests efficacy regarding duration of tumor control. *Journal of Nuclear Medicine*, 62(10), 1447-1453. <https://doi.org/10.2967/jnumed.120.260190>
- Kurland, B., Wiggins, J. R., Coche, A., Fontan, C., Bouvet, Y., Webner, P., Divgi, C., & Linden, H. (2020). Whole-body characterization of estrogen receptor status in metastatic breast cancer with $^{16}\alpha$ - ^{18}F -fluoro- $^{17}\beta$ -estradiol positron emission tomography: Meta-analysis and recommendations for integration into clinical applications. *The Oncologist*.
- Ladrière, T., Faudemer, J., Levigoureux, E., Peyronnet, D., Desmonts, C., & Vigne, J. (2023). Safety and therapeutic optimization of Lutetium-177 based radiopharmaceuticals. *Pharmaceutics*, 15.
- Laverman, P., Sosabowski, J., Boerman, O., & Oyen, W. (2012). Radiolabelled peptides for oncological diagnosis. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 39, 78-92.
- Le Fur, M., & Caravan, P. (2021). ^{86}Y PET imaging. *Methods in Enzymology*, 651, 313-342.

- Lee, J. W., Park, Y., Jeon, Y., Kim, K. H., Lee, J. E., Hong, S., Lee, S. M., & Jang, S. (2020). Clinical value of dual-phase F-18 sodium fluoride PET/CT for diagnosing bone metastasis in cancer patients with solitary bone lesion. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, *10*(11), 2098-2111
- Lee, J. W., Park, Y., Jeon, Y., Kim, K. H., Lee, J. E., Hong, S., Lee, S. M., & Jang, S. (2020). Clinical value of dual-phase F-18 sodium fluoride PET/CT for diagnosing bone metastasis in cancer patients with solitary bone lesion. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, *10*(11), 2098-2111.
- Lewington, V. J. (2020). Bone-seeking radionuclides for therapy. *Journal of Nuclear Medicine*, *61*(Suppl 4), 208S-215S. <https://doi.org/10.2967/jnumed.120.245910>
- Lin, C. C., Ding, H., Chen, Y. W., Wang, J. J., Ho, S., & Kao, A. (2003). Usefulness of technetium-99m sestamibi myocardial perfusion SPECT in detection of cardiovascular involvement in patients with systemic lupus erythematosus or systemic sclerosis. *International Journal of Cardiology*, *92*(2-3), 157-161.
- Lodi, F., Malizia, C., Castellucci, P., Cicoria, G., Fanti, S., & Boschi, S. (2012). Synthesis of oncological [¹¹C] radiopharmaceuticals for clinical PET. *Nuclear Medicine and Biology*, *39*(4), 447-460.
- Lorberboym, M., Lampl, Y., & Sadeh, M. (2003). Correlation of 99mTc-DTPA SPECT of the blood-brain barrier with neurologic outcome after acute stroke. *Journal of Nuclear Medicine*, *44*(12), 1898-904
- McCormick, P., Kapur, S., Seeman, P., & Wilson, A. A. (2008). Dopamine D2 receptor radiotracers (11)C-PHNO and [(3)H]raclopride are indistinguishably inhibited by D2 agonists and antagonists ex vivo. *Nuclear Medicine and Biology*, *35*(1), 11-17.
- McDevitt, M. R., Ma, D., Lai, L. T., Simon, J., Borchardt, P., Frank, R. K., ... & Scheinberg, D. A. (2020). Tumor therapy with targeted atomic nanogenerators. *Science*, *294*(5546), 1537-1540. <https://doi.org/10.1126/science.1064017>.
- Meyer, G. J., Mäcke, H. R., & Eisenhut, M. (2020). Radiopharmaceuticals for targeted alpha therapy: Principles, methods, and applications. *Journal of Nuclear Medicine*, *61*(8), 1011–1023. <https://doi.org/10.2967/jnumed.119.235309>
- Miller, J. W., Dueker, S., Carkeet, C., Anderson, P., Buchholz, B., & Green, R. (2006). Measurement of vitamin B12 absorption in a human subject using ¹⁴C-B12. *The FASEB Journal*, *20*.

- Minn, H., Kauhanen, S., Seppänen, M., & Nuutila, P. (2009). 18F-FDOPA: A multiple-target molecule. *Journal of Nuclear Medicine*, 50, 1915-1918.
- Mohammed, R., Mikhliif, H., & Mhana, W. (2020). Evaluation cross section of production for indium medical radioisotopes. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2307, p. 020002).
- Morris, M., Corey, E., Guise, T., Gulley, J., Kelly, W. K., Quinn, D., Scholz, A., & Sgouros, G. (2019). Radium-223 mechanism of action: Implications for use in treatment combinations. *Nature Reviews Urology*, 1-12.
- Nagao, M., Kawakubo, M., Yamamoto, A., Nakao, R., Matsuo, Y., Fukushima, K., Sakai, A., Momose, M., & Sakai, S. (2023). Myocardial strain derived from 13N-ammonia positron emission tomography: Detection of ischemia-related wall motion abnormality. *Annals of Nuclear Cardiology*, 9(1), 26-32
- Naseri, M., Gharepapagh, E., Taghizadeh, M., & Salimi, R. (2021). Radioeuropium impurities in the production of 153Sm-EDTMP: A comprehensive review. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 329(3), 1001-1011. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07707-2>
- O'Hara, M., Krzysko, A., Hamlin, D., Li, Y., Dorman, E., & Wilbur, D. (2019). Development of an autonomous solvent extraction system to isolate astatine-211 from dissolved cyclotron bombarded bismuth targets. *Scientific Reports*, 9.
- Okamoto, S., Shiga, T., Yasuda, K., Ito, Y., Magota, K., Kasai, K., Kuge, Y., Shirato, H., & Tamaki, N. (2013). High reproducibility of tumor hypoxia evaluated by 18F-fluoromisonidazole PET for head and neck cancer. *The Journal of Nuclear Medicine*, 54, 201–207.
- Pandit-Taskar, N., O'Donoghue, J. A., Ruan, S., Lyashchenko, S. K., & Carrasquillo, J. A. (2014). First-in-human imaging with 89Zr-Df-IAB2M anti-PSMA minibody in patients with metastatic prostate cancer: Pharmacokinetics, biodistribution, dosimetry, and lesion uptake. *Journal of Nuclear Medicine*, 55(11), 1791–1798. <https://doi.org/10.2967/jnumed.114.142042>
- Parker, C., Pascoe, S., Chodacki, A., O'Sullivan, J., Germà, J., O'Bryan-Tear, C. G., Haider, T., & Hoskin, P. (2013). A randomized, double-blind, dose-finding, multicenter, phase 2 study of radium chloride (Ra 223) in patients with bone metastases and castration-resistant prostate cancer. *European Urology*, 63(2), 189-197.

- Perk, L. R., Visser, G. W. M., Stigter-van Walsum, M., Vosjan, M. J. W. D., & van Dongen, G. A. M. S. (2005). Preparation and evaluation of 89Zr-Zevalin for monitoring of Yttrium-90-labeled Zevalin in vivo. *Journal of Nuclear Medicine*, 46(11), 1898–1906. <https://doi.org/10.2967/jnumed.105.158949>
- Petersen, L. K., Carlsen, J., Hansen, H. J., & Poulsen, M. H. (2022). Radionuclide synovectomy in the management of chronic synovitis: A review of erbium-169 applications and outcomes in rheumatoid arthritis treatment. *European Journal of Radiology*, 145, 110024. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.110024>.
- Phelps, T. E., Roy, J., Green, M. V., Seidel, J., Baidoo, K., Adler, S., Edmondson, E., Butcher, D. O., Matta, J. L., Ton, A., Wong, K. J., Huang, S., Ren, L., LeBlanc, A., Choyke, P., & Jagoda, E. (2021). Sodium fluoride-18 and radium-223 dichloride uptake colocalize in osteoblastic mouse xenograft tumors. *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals*.
- Pullen, R., Schofield, M., Markham, A., Lough, J., & Menton, K. (2004). Uptake of 75-selenium into the central nervous system of the rat. *Neurochemical Research*, 20, 1141-1146.
- Raynor, W. Y., Borja, A., Hancin, E. C., Werner, T., Alavi, A., & Revheim, M. (2021). Novel musculoskeletal and orthopedic applications of 18F-sodium fluoride PET. *PET Clinics*.
- Rice, M. H., Krosin, M., & Haste, P. (2021). Post Yttrium-90 Imaging. *Seminars in Interventional Radiology*, 38(4), 460-465.
- Roesch, F. (2012). Maturation of a key resource - the germanium-68/gallium-68 generator: Development and new insights. *Current Radiopharmaceuticals*, 5(3), 202-211.
- Rokni, H., Moradi, F., & Aslani, A. (2023). Efficacy of 153Sm-EDTMP for bone pain palliation in patients with metastatic cancer: A systematic review. *Cancer Treatment Reviews*, 104(4), 102319. <https://doi.org/10.1016/j.ctrv.2023.102319>.
- Rosenthal, S., Haseman, M., & Polascik, T. (2001). Utility of capromab pendetide (ProstaScint) imaging in the management of prostate cancer. *Techniques in Urology*, 7(1), 27-37.
- Roussel, C., Buffet, P., & Amireault, P. (2018). Measuring post-transfusion recovery and survival of red blood cells: Strengths and weaknesses of Chromium-51 labeling and alternative methods. *Frontiers in Medicine*.

- Ruangma, A., Panpitpat, S., Saonam, T., Kijprayoon, S., Ngokpol, S., Tanasirimanon, M., Khajitkhajonwong, S., Tuamputsa, S., Rachadara, S., & Chinvarun, Y. (2015). Challenges in production of Alzheimer's tracer C-11 PiB. *The Bangkok Medical Journal*, 9, 70-75.
- Sadeghi, M., Jalilian, A. R., & Ensaf, M. R. (2018). Production, quality control and clinical applications of ^{47}Sc in targeted radionuclide therapy. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 318(3), 2059-2066. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6036-7>
- Salavati, A., Zohrabi, A., & Safavi, M. (2021). The therapeutic role of radioactive synovectomy with erbium-169 in patients with chronic inflammatory joint diseases. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 49(2), 159-166. <https://doi.org/10.2967/jnmt.120.258915>.
- Sampson, U., Dorbala, S., Limaye, A. M., Kwong, R., & Di Carli, M. D. (2007). Diagnostic accuracy of rubidium-82 myocardial perfusion imaging with hybrid positron emission tomography/computed tomography in the detection of coronary artery disease. *Journal of the American College of Cardiology*, 49(10), 1052-1058.
- Sartor, O., de Bono, J. D., Chi, K., Fizazi, K., Herrmann, K., Rahbar, K. & Krause, B. (2021). Lutetium-177-PSMA-617 for metastatic castration-resistant prostate cancer. *The New England Journal of Medicine*.
- Sartor, O., Reid, R., Hoskin, P., Quick, D., Ell, P., Coleman, R., Kotler, J., Freeman, L., & Olivier, P. (2004). Samarium-153-Lexidronam complex for treatment of painful bone metastases in hormone-refractory prostate cancer. *Urology*, 63(5), 940-945.
- Sattari, I., Aslani, G., Shirazi, B., Shafie, M., & Shadanpour, N. (2003). Dependence of quality of thallium-201 on irradiation data. *Iranian Journal of Radiation Research*, 1(1), 51-54.
- Schäfers, M., Eppard, E., & Rösch, F. (2022). Copper-67-based theranostics: Production, chemistry, and clinical applications. *Journal of Nuclear Medicine*, 63(3), 487-495.
- Schirra, C., Jussen, D., & De Vries, E. F. (2021). Fluorine-18: Radiopharmaceuticals for positron emission tomography (PET). *Molecules*, 26(14), 4306. <https://doi.org/10.3390/molecules26144306>.

- Serafini, A. (2001). Systemic metabolic radiotherapy with samarium-153 EDTMP for the treatment of painful bone metastasis. *The quarterly journal of nuclear medicine: Official publication of the Italian Association of Nuclear Medicine (AIMN) [and] the International Association of Radiopharmacology*, 45(1), 91-9.
- Sgouros, G., He, B., Ray, N., Ludwig, D., & Frey, E. (2019). Dosimetric impact of Ac-227 in accelerator-produced Ac-225 for alpha-emitter radiopharmaceutical therapy of patients with hematological malignancies: A pharmacokinetic modeling analysis. *EJNMMI Physics*, 8, 40658.
- Sheu, R., Jiang, S., & Duh, T. (2003). Evaluation of thallium-201 production in INER's compact cyclotron based on excitation functions. *Radiation Physics and Chemistry*, 68, 681-688.
- Shimizu, K., Kaira, K., Higuchi, T., Hisada, T., Yokobori, T., Oyama, T., Asao, T., Tsushima, Y., & Shirabe, K. (2019). Relationship between tumor immune markers and fluorine-18- α -methyltyrosine ([¹⁸F]FAMT) uptake in patients with lung cancer. *Molecular Imaging and Biology*, 22, 1078–1086.
- Silberstein, E. B. (2019). Strontium-89 chloride for the palliation of bone pain associated with metastatic disease. *Cancer*, 123(9), 2416-2423. <https://doi.org/10.1002/cncr.31370>
- Smith, A. B., & Johnson, C. D. (2015). **Production of radioisotopes using cyclotron technology: A focus on bromine-82 for medical applications.** *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 43(2), 123-130. <https://doi.org/10.2967/jnmt.115.155523>.
- Smith, J. A., & Johnson, M. L. (2020). **Positron emission tomography and the clinical application of Rubidium-82 in cardiac imaging.** *Journal of Medical Imaging*, 65(4), 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.jmi.2020.03.014>
- Smith, J. A., & Johnson, R. K. (2019). **The role of Bromine-82 in the production of Rubidium-82 for PET imaging.** *Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 62(3), 345-352. <https://doi.org/10.2967/jnmsci.2019.03452>.
- Smits, M. L., Nijsen, J. F., van den Bosch, M. A., Lam, M. G., & van het Schip, A. D. (2020). Holmium-166 microsphere radioembolization for the treatment of liver tumors: A comprehensive review. *Journal of Nuclear Medicine*, 61(4), 573-580. <https://doi.org/10.2967/jnumed.119.234799>.

- Soman, P., Taillefer, R., Depuey, E., Udelson, J., & Lahiri, A. (2001). Enhanced detection of reversible perfusion defects by Tc-99m sestamibi compared to Tc-99m tetrofosmin during vasodilator stress SPECT imaging in mild-to-moderate coronary artery disease. *Journal of the American College of Cardiology*, 37(2), 458-462.
- Spence, A., Muzi, M., Graham, M., O'Sullivan, F., Link, J., Lewellen, T., Lewellen, B., Freeman, S. D., Mankoff, D., Eary, J., & Krohn, K. (2002). 2-[(18)F]Fluoro-2-deoxyglucose and glucose uptake in malignant gliomas before and after radiotherapy: correlation with outcome. *Clinical Cancer Research*, 8(4), 971-979.
- Suryanto, H., & Kambali, I. (2018). A novel method for 57/Ni and 57/Co production using cyclotron-generated secondary neutrons. *Atom Indonesia*, 44(2), 1-8
- Tian, Y., Wang, J., He, Z., Wang, Q., Hu, F., Yang, W., Wang, Q., Dai, H., & Yao, Z. (2005). Diagnostic value of adenosine (99m)Tc-MIBI myocardial perfusion imaging for detecting coronary artery disease. *Zhonghua Xin Xue Guan Bing Za Zhi*, 33(1), 58-61.
- Tseng, J. R., Gambhir, S. S., & Behr, S. C. (2004). Detection of invasive thymoma using thallium-201 imaging in coronary artery disease patients. *Journal of Clinical Oncology*, 22(12), 1218-1222.
- Uccelli, L., Martini, P., Urso, L., Ghirardi, T., Marvelli, L., Cittanti, C., Carnevale, A., Giganti, M., Bartolomei, M., & Boschi, A. (2022). Rhenium radioisotopes for medicine, a focus on production and applications. *Molecules*, 27.
- Uccelli, L., Martini, P., Urso, L., Ghirardi, T., Marvelli, L., Cittanti, C., Carnevale, A., Giganti, M., Bartolomei, M., & Boschi, A. (2022). Rhenium radioisotopes for medicine, a focus on production and applications. *Molecules*, 27.
- Valsamaki, P., Ioannidis, G., Tselikas, L., & Papavasileiou, A. (2022). Theragnostics with Samarium-153-EDTMP in patients bearing painful bone metastases. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 49(8), 2649-2660. <https://doi.org/10.1007/s00259-022-05697-3>
- Vimalnath, K., Rajeswari, A., Chakraborty, S., & Dash, A. (2014). Large scale production of 51Cr for medical application in a medium flux research reactor: A comparative investigation of Szilard-Chalmers process and direct (n,γ) route. *Applied Radiation and Isotopes*, 91, 104-108.

- Wachsmuth, M., Eichler, B., Tobler, L., Hänssler, F., Gäggeler, H., & Ammann, M. (2002). Chemical characterization of short-lived selenium and their daughter isotopes from thermal neutron induced fission of ^{235}U at a gas-jet facility. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 254, 201-208.
- Wang, Y., Li, M., Dai, S., & Li, Y. (2020). The role of Tc-99m DTPA renal dynamic scintigraphy in retroperitoneal liposarcoma. *BioMed Research International*, 2020, 9765162.
- Witzig, T. E. (2002). Treatment with ibritumomab tiuxetan radioimmunotherapy in patients with rituximab-refractory follicular non-Hodgkin's lymphoma. *Journal of Clinical Oncology*, 20(15), 3262-3269.
- Xu, H. L., Jiang, S., Wang, J., Li, X., Wu, T., Xu, P., Santos-Oliveira, R., & Zhang, A. (2020). Radioactive Gold Nanoparticle in Two Forms (Au-198 GNPs and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -GNPs) for Lung Cancer Antiproliferative Induction and Intralesional Imaging: A Proof of Concept. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*.
- Zalutsky, M., & Vaidyanathan, G. (2000). Astatine-211-labeled radiotherapeutics: An emerging approach to targeted alpha-particle radiotherapy. *Current Pharmaceutical Design*, 6(14), 1433-1455.
- Zalutsky, M., Reardon, D., Pozzi, O., Vaidyanathan, G., & Bigner, D. (2007). Targeted alpha-particle radiotherapy with ^{211}At -labeled monoclonal antibodies. *Nuclear Medicine and Biology*, 34(7), 779-785.
- Zhao, H., Chen, C., Song, H.-Q., Wang, X.-X., Zhang, L., Zhao, H., & He, J. (2022). Single-cell RNA Sequencing Analysis Reveals New Immune Disorder Complexities in Hypersplenism. *Frontiers in Immunology*.
- Zhou, W., Liu, X., Li, Y., Kang, T., Huang, Z., & Ou, S. (2023). [^{18}F] sodium fluoride positron emission tomography: A systematic bibliometric review from 2008 to 2022. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 13, 6911-6928.

Radyoaktif Malzemelerin Nano Uygulamaları

Muhammed Emre AYHAN¹

GİRİŞ

Radyoaktif nanomalzemeler ve uygulamaları, radyoaktif elementlerin veya nükleer reaksiyonların kullanıldığı çeşitli alanları kapsar. Bu uygulamalar arasında nükleer enerji üretimi, enerji depolama ve dönüşüm, tıbbi görüntüleme ve tedavi, endüstriyel ölçümler, tarım, arkeoloji ve uzay araştırmaları gibi birçok alan bulunmaktadır. Radyoaktif nanomalzemelerin bu ve benzeri uygulamaları, insanlığın çeşitli alanlardaki teknolojik ve bilimsel ilerlemesine katkıda bulunmuştur. Ancak, radyasyonun kontrolsüz kullanımının sağlık ve çevre üzerinde olumsuz etkileri olabileceği için, bu alanlarda güvenlik standartlarına dikkat edilmesi son derece önemlidir. Bu bölümde ağırlıklı olarak radyoaktif nanomalzemelerin insan sağlığı, tıbbi görüntüleme ve tedavi ve gıda sağlığı alanlarındaki önemi ve uygulamaları üzerinde durulacaktır.

12.1. Radyoaktivite ve Nanomalzemeler

Radyoaktif nanomalzemelere geçmeden önce radyoaktivite kavramı üzerinde kısaca durmak gerekmektedir. Radyoaktivite, atom çekirdeğinin belirli bir düzende parçalanmasıyla ortaya çıkan enerji ve parçacık yayılmasıdır. Bu parçalanma süreci, çekirdekte bulunan nükleer parçacıkların (protonlar ve nötronlar) dengesiz olduğu durumlarda gerçekleşir. Radyoaktif bir madde, bu tür parçalanma süreçlerini yaşayan ve bu süreç sırasında radyasyon yayarak başka elementlere dönüşen bir elementtir. Bu radyoaktif bozunma, alfa, beta ve gama ışınması gibi çeşitli yollarla gerçekleşebilir.

Alfa bozunması, radyoaktif bir nükleusun alfa parçacığı (α) -2 proton ve 2 nötron içeren helyum çekirdeğinde olduğu gibi- yayarak dönüşmesi sürecidir. Bu süreçte, radyoaktif bir çekirdek, radyasyon yayarak daha küçük bir çekirdeğe dönüşür ve bu dönüşüm sırasında helyum çekirdeği olan alfa parçacığı salınır.

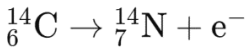
¹ Doç. Dr. Muhammed Emre AYHAN, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, meayhan@erbakan.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-2324-6858

Alfa bozunması genellikle büyük ve ağır nükleer çekirdeklerde görülür, çünkü bu tür çekirdeklerdeki nükleonlar arasındaki kuvvetler daha zayıftır ve çekirdek daha istikrarsız hale gelir. Bu istikrarsızlık, çekirdeğin enerji yayarak daha küçük ve daha istikrarlı bir forma dönüşmesine yol açar. Alfa bozunması, genellikle tespit edilmesi kolay olan belirli özelliklere sahip alfa parçacıklarının salınmasıyla tanımlanır. Bu parçacıklar, yüklü olduğu için elektrik alanlarında kolayca eğilir ve çekirdeklerle etkileşime girerler. Bu özellikleri, alfa parçacıklarının izlenmesini ve tespit edilmesini kolaylaştırır. Alfa bozunması, radyoaktiviteyle ilgili birçok alanda kullanılan bir fenomen olup, nükleer fizik, radyasyon tıbbı ve nükleer enerji üretimi gibi birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır (Jurisson vd., 2006).

Beta bozunması, bir atom çekirdeğinin bir nötronun protona veya bir protonun nötrona dönüşerek yaydığı beta parçacığı (β) ile gerçekleşen bir radyoaktif bozunma sürecidir. Beta bozunması iki tür olabilir:

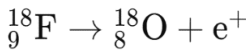
Beta negatif (β^-) bozunması: Bu durumda, bir nötron çekirdekten ayrılır ve bir elektron ve bir antinötrino yayılır. Nötron, bir protona dönüşerek çekirdek numarasının (atom numarasının) bir artışıyla sonuçlanır.

Örnek: Bir karbon-14 çekirdeği, bir nötronu beta negatif bozunarak bir protona dönüştürür ve bir elektron yayarak nitrojen-14 çekirdeğine dönüşür:



Beta pozitif (β^+) bozunması: Bu durumda, bir proton çekirdekten ayrılır ve bir pozitron ve bir nötrino yayılır. Proton, bir nötrona dönüşerek çekirdek numarasının bir azalmasıyla sonuçlanır.

Örnek: Bir flor-18 çekirdeği, bir protonu beta pozitif bozunarak bir nötrona dönüştürür ve bir pozitron yayarak oksijen-18 çekirdeğine dönüşür:



Beta bozunması, radyoaktivite ve nükleer fizikte önemli bir fenomendir. Bu tür bozunmalar, radyoaktif elementlerin dönüşümü ve kararlı hale gelmesi sürecinde rol oynar. Ayrıca, tıbbi görüntüleme ve radyasyon tedavilerinde kullanılan birçok izotopun üretiminde de kullanılır (Welsh, 2007).

Gama bozunması, bir atom çekirdeğinin yüksek enerjili gama ışını (γ) yayarak daha istikrarlı bir hale dönüşmesi sürecidir. Bu bozunma genellikle alfa veya beta bozunması sonucunda ortaya çıkan istikrarsızlık durumlarında gerçekleşir. Gama ışını, elektromanyetik tayfin en yüksek enerjili ve en kısa dalga boylu bölümünde yer alan fotonlardır. Bu yüksek enerjili fotonlar, atom çekirdeğinin yüksek enerjili uyarılma durumlarından düşüş yaparak salınır. Gama ışınları, çekirdeğin içerisinde bulunan fazla enerjiyi atarak daha düşük enerjili bir duruma geçmesine yardımcı olur. Gama bozunması, çekirdeğin atom numarasını ve kütle numarasını değiştirmez, sadece çekirdeğin enerji durumunu değiştirir. Bu nedenle, gama bozunması genellikle bir alfa veya beta bozunması sonrasında gerçekleşir ve genellikle radyoaktif bozunma zincirlerinin bir parçasıdır. Gama ışınları, yüksek enerjileri ve nüfuz yetenekleri nedeniyle tıbbi teşhis ve tedavide kullanılır (Lu vd., 2021). Mesela, radyasyon onkolojisinde kanser tedavisi için kullanılan radyoterapi cihazları gama ışınları üretir. Ayrıca, gama ışınları, endüstriyel uygulamalarda malzeme incelemesi ve kalite kontrolü gibi alanlarda da kullanılır.

Radyoaktif nanomalzemeler ve uygulamaları, radyoaktif elementlerin veya nükleer reaksiyonların kullanıldığı çeşitli alanları kapsar. Bu uygulamalar arasında nükleer enerji üretimi, enerji depolama ve dönüşüm, tıbbi görüntüleme ve tedavi, endüstriyel ölçümler, tarım, arkeoloji ve uzay araştırmaları gibi birçok alan bulunmaktadır. Radyoaktif nanomalzemelerin bu ve benzeri uygulamaları, insanlığın çeşitli alanlardaki teknolojik ve bilimsel ilerlemesine katkıda bulunmuştur. Ancak, radyasyonun kontrolsüz kullanımının sağlık ve çevre üzerinde olumsuz etkileri olabileceği için, bu alanlarda güvenlik standartlarına dikkat edilmesi son derece önemlidir. Bu bölümde ağırlıklı olarak radyoaktif nanomalzemelerin insan sağlığı, tıbbi görüntüleme ve tedavi ve gıda sağlığı alanlarındaki önemi ve uygulamaları üzerinde durulacaktır.

12.2. Uygulama Alanları

12.2.1. Tıbbi Görüntüleme ve Tedavi

Tıbbi görüntüleme ve tedavide radyoaktif nanomalzemelerin rolü oldukça önemlidir. Radyoaktif nanomalzemeler, bilgisayarlı tomografi (BT), pozitron emisyon tomografisi (PET), tek foton emisyon bilgisayarlı tomografi (SPECT) gibi tıbbi görüntüleme tekniklerinde kullanılır. Bu teknikler, hastanın iç organlarını, dokularını ve metabolik süreçlerini 3 boyutlu olarak görüntülemek için radyoaktif izotoplar içeren bileşiklerin enjekte edilmesine dayanır (Ge vd., 2019)

Radyoaktif nanomalzemeler, kanser teşhisi ve tedavisinde de önemli bir rol oynar. Kanser teşhisi için, radyoaktif izotoplar içeren bileşikler, kanser hücrelerinin konumunu belirlemek için tümörlerde birikir ve görüntüleme teknikleriyle tespit edilir. Kanser tedavisinde ise, radyoaktif malzemeler kullanılarak radyoterapi uygulanır (Falk, 2003). Bu tedavi yöntemi, kanser hücrelerini öldürmek için yüksek enerjili radyasyonun kullanılmasını içerir ve tümörün boyutunu azaltabilir veya tamamen yok edebilir. Ayrıca radyoaktif ilaçlar, kanser hücrelerini doğrudan hedef alarak ve sağlıklı dokulara minimum zarar vererek kanser tedavisinde kullanılabilir. Mesela, Ra-223 (Radyum-223) gibi radyoaktif ilaçlar, metastatik kemik kanserinin tedavisinde kullanılabilir (Coleman, 2016).

Radyoaktif iyot, tiroid bezinin fonksiyonunu değerlendirmek ve tiroid kanseri gibi tiroid hastalıklarını tedavi etmek için kullanılır (Dorn vd., 2003). Radyoaktif iyot, tiroid hücrelerine özgü olarak birikir ve bu hücreleri hedefleyerek cerrahi müdahaleye alternatif bir tedavi olarak kullanılabilir. Radyoaktif malzemeler, romatizmal hastalıkların tanısında da kullanılabilir. Özellikle eklemlerdeki iltihaplanmayı belirlemek için kullanılan radyoaktif izotoplar içeren bileşikler, kemik taramaları ve eklem görüntüleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılır (Jamar vd., 2002). Tıbbi görüntüleme ve tedavide radyoaktif malzemelerin kullanımı, hastalıkların erken teşhisi, tedavi planlaması ve tedavi sürecinin izlenmesi gibi önemli avantajlar sağlar. Ancak, bu malzemelerin güvenli kullanımı ve dozajı, uzman tıbbi personel tarafından titizlikle yönetilmelidir.

Radyoaktif izotoplar, belirli organların fonksiyonlarını ve anatomik yapısını değerlendirmek için de kullanılabilir (Bowl, 1981). Mesela, Tc-99m kullanılarak böbrek fonksiyonlarını değerlendirmek veya MIBG (meta-iodo benzilguanidin) gibi radyoaktif ilaçlar kullanılarak adrenal tümörlerin görüntülenmesi için nükleer tıp taramaları yapılabilir (Gibson vd., 2013; Biersack vd., 1992).

Tıbbi görüntüleme ve tedavide ön plana çıkan radyoaktif nanomalzemeleri aşağıdaki şekilde açıklayabiliriz.

12.2.1.1. Nanoparçacıklarla İlişkili Radyonüklidler (NİR)

Tıp, nükleer bilim, çevre izleme ve malzeme bilimi gibi birçok alanda büyük bir uygulama potansiyeline sahip olan NİR'ler nanoparçacıklara bağlanarak hedeflenmiş görüntüleme veya tedavi sağlayabilir. NİR'lerin nanoparçacıklara entegre edilmesi hem teşhis hem de tedavi uygulamalarında, özellikle de kanser tedavisinde hedeflenmiş ve daha etkili çözümler sunar (Pallares ve Abergel,

2020; Gill vd., 2017). NİR'ler nanomalzemelere bağlanarak hastalıklı dokuları hedef alır ve hem görüntüleme hem de tedavi açısından yüksek hassasiyet sağlar. Hedefli Radyoterapi'de radyonüklidlerle işaretlenmiş nanoparçacıklar, kanser hücrelerine doğrudan yönlendirilerek radyoterapi sırasında sağlıklı dokulara zarar vermeden kanser hücrelerini yok edebilir. Bu yöntem, geleneksel radyoterapilere kıyasla yan etkilerin azaltılmasına katkıda bulunur. Mesela, **İyot-131 (I-131)** nanoparçacıklarla birleştirilerek tiroid kanserinde hedeflenmiş tedavi sağlar (Song vd., 2017; Zhang vd., 2022).

Hedefli ilaç taşımada radyonüklidlerle işaretlenmiş nanoparçacıklar, ilaç taşıma sistemleri için kullanılabilir (Cho vd., 2007; Colby vd., 2023). Nanoparçacıklar hem terapötik ajanları hem de radyonüklidleri aynı anda taşıyarak çift etkili bir tedavi sağlayabilir. Akıllı ilaç salımında ise nanoparçacıklar, hedef bölgeye ulaştıklarında kontrollü bir şekilde ilaçları serbest bırakabilir (Liu vd., 2017; Wu vd., 2020). Radyonüklidlerin bu sistemlerle birleştirilmesi, kanser gibi hastalıklarda tümör hücrelerine doğrudan ilaç salımı sağlar. Bu sayede, ilaçlar tümör bölgesine daha etkin bir şekilde ulaşır ve radyasyon terapisiyle kombine edilir.

Moleküler görüntülemeye NİR'lerin PET veya SPECT gibi görüntüleme teknikleriyle kullanılması, hastalıklı dokuların net bir şekilde görüntülenmesini sağlar. Nanoparçacıklar, radyonüklidlerin daha uzun süre kan dolaşımında kalmasına yardımcı olarak daha hassas görüntülemeye imkân tanır. **Teknesyum-99m (Tc-99m)** ile işaretlenmiş nanoparçacıklar bu alanda yaygın olarak kullanılır.

Radyonüklidlerle işaretlenmiş nanoparçacıklar, özellikle radyonüklid terapi (RNT) ve nanohipertermi gibi kanser tedavisinde kullanılmaktadır (Tsiapa vd., 2014). Nanomalzemeler, radyasyonun doğrudan tümöre hedeflenmesine yardımcı olur. **Lutesyum-177 (Lu-177)** gibi radyonüklidlerle birleştirilen nanoparçacıklar, kanserli hücrelere yönelik yüksek hassasiyetli radyoterapi sağlar. Bu sayede, çevredeki sağlıklı dokuların zarar görme ihtimali azalır (Ferro-Flores vd., 2015).

12.2.1.2. Radyoaktif Altın Nanoparçacıklar (RAuNP)

Tıbbi görüntüleme ve tedavide RAuNP'ler hem teşhis hem de tedavi amaçlı kullanımda sağladığı yüksek hassasiyet, biyoyumluluk ve etkinlikten dolayı büyük bir öneme sahiptir. RAuNP'ler, özellikle kanser tedavisi ve görüntülemeye önemli avantajlar sunar (Katti vd., 2006; Hainfeld vd., 2013). Bu malzemeler, Radyoterapi sırasında tümör hücrelerine yönelik radyonüklid taşımak için

kullanılır. RAuNp'ler, tümörlere kolayca hedeflenebildiği için radyonüklidlerin etkinliğini artırır. Altın nanoparçacıklar, biyolojik sistemlerle uyumlu ve güvenlidir. Vücut tarafından toksik olmayan şekilde tolere edilirler, bu da tıbbi uygulamalarda güvenli bir şekilde kullanılmalarını sağlar. Düşük toksisiteye sahip oldukları ve dokulara zarar vermedikleri için radyoterapi ve teşhis uygulamalarında büyük bir avantajdır. Diğer taraftan kontrollü bir parçacık dağılımı sağlanabildiği için kan dolaşımında belirli bir süre kalabilir ve vücuttaki hedef dokulara yönlendirilebilirler. Bu da tedavi ve görüntülemenin doğruluğunu artırır.

RAuNp'ler Teknesyum-99m (Tc-99m) veya Lutesyum-177 (Lu-177) gibi radyonüklidlerle işaretlenerek PET veya SPECT gibi görüntüleme tekniklerinde kullanılır. Bu teknikler, hastalıklı dokuların 3D görüntülerini sağlayarak tanıda büyük bir rol oynar. RAuNp'ler, yüksek atom numaraları sayesinde X-ışını ve bilgisayarlı tomografi (CT) görüntülemeye kontrast maddesi olarak kullanılır (Kim vd., 2007; Hainfeld vd, 2006). Bu da daha net ve ayrıntılı görüntüler elde edilmesini sağlar. RAuNp'ler radyasyonun kanser hücreleri üzerindeki etkisini artırabilir. Altın, radyasyonun enerjisini artırarak (Radyo-sensitizasyon) kanser hücrelerinin daha etkili bir şekilde yok edilmesine yardımcı olur. Bu, düşük doz radyasyonla bile tedavi başarısını yükseltebilir (Jain vd., 2011; Roa vd., 2009).

RAuNp'ler, termal ablasyon ve hipertermi tedavisinde (ısı tedavisi) de kullanılır (Cherukuri vd., 2010; Kennedy vd., 2011). Bu parçacıklar ısı üretmek için kullanıldığında kanser hücrelerini hedef alarak tümörleri yok edebilir. Fototermal terapide altın nanoparçacıkları, lazer ışığına maruz kaldıklarında ısı üretirler. Bu ısı, tümör dokusunu yok etmek için kullanılabilir (Riley vd., 2017; El-Saved vd., 2006). Radyonüklidlerle birleştirilen altın nanoparçacıkları hem radyoterapi hem de ısıl ablasyon sağlayarak çoklu tedavi seçeneği sunar. Nanohipertermide ise RAuNp'ler, belirli bir frekansta ısı üretmek için elektromanyetik dalgalarla uyarılabilir. Bu ısı, kanser hücrelerini öldürmek için kullanılırken, sağlıklı dokuların korunmasını sağlar (Dimitriou vd., 2019; Liu vd., 2014).

RAuNp'ler antikor ve peptit gibi biyomoleküllerle kaplanarak belirli hücelere veya dokulara yönlendirilerek hedeflenmiş tedavi çalışmalarında kullanılabilirler. Altın nanoparçacıkları, hücre zarını geçerek kanser hücrelerinin içinde birikebilir. Bu sayede radyonüklidler doğrudan hücre içine ulaşarak, hücre düzeyinde etkili tedavi sağlar (Ferro-Flores vd., 2015).

RAuNp'lerin bir diğerk avantajlı yönü ise farklı boyut ve şekillerde tasarlanabilmeleridir. Boyut, yüzey kaplaması ve fonksiyonel gruplar, belirli tedavi veya görüntüleme uygulamalarına göre optimize edilebilir. Altın nanoparçacıkların boyutu, kanser hücrelerine veya dokulara ulaşma yeteneklerini artırabilir. Nanoparçacıkların boyutları ayarlanarak dolaşım süreleri, biyodağılım ve hedefleme kabiliyetleri kontrol edilebilir. RAuNp'lerin yüzeyine çeşitli biyomoleküller veya polimerler bağlanarak yüzey modifikasyonu gerçekleştirilebilir, bu da onları daha spesifik ve etkili hale getirir.

RAuNp'ler hem teşhis hem de tedavi amacıyla aynı anda kullanılabilir. Bu, **teranostik (terapi + tanı)** yaklaşımlar için büyük bir avantajdır. Radyonüklidlerle işaretlenmiş altın nanoparçacıkları, tümörleri tespit etmek için görüntüleme sağlarken, aynı zamanda kanser hücrelerini tedavi edebilir. Bu sayede, tedavi süreci optimize edilir ve tedavinin etkinliği anlık olarak izlenebilir.

Tıbbi görüntüleme ve tedavide radyoaktif altın nanoparçacıkları, biyouyumlulukları, radyonüklidlerle kombine edilebilme özellikleri ve çok yönlü kullanım potansiyelleri sayesinde büyük önem taşır. Kanser tedavisinde hedeflenmiş radyoterapi, hipertermi tedavisi ve görüntülemede yüksek hassasiyet sağlar. Aynı zamanda multimodal tedavi ve görüntüleme çözümleri sunarak hem tanı hem de tedavi süreçlerini optimize eder. Altın nanoparçacıklar, bu nedenle modern tıp uygulamalarında gelecekte daha da yaygın bir şekilde kullanılmaya devam edecektir.

12.2.1.3. Zeolit Nanoparçacıkları (ZNp)

Tıbbi görüntüleme ve tedavide zeolit nanoparçacıklar, özellikle hedeflenmiş ilaç taşıma, radyonüklid taşıyıcı sistemleri ve çevre dostu yapıları sayesinde önemli bir rol oynar (He vd., 2015; Hamoudeh vd., 2008). ZNp'lerin gözenekli yapısı ve iyon değıştirme kapasiteleri, onları tıbbi uygulamalarda kullanıma uygun hale getirir. ZNp'lerin en belirgin özelliklerinden biri, geniş gözenekli yapıları ve yüksek yüzey alanıdır. Bu özellikler, zeolitlerin tıbbi görüntüleme ve tedavi süreçlerinde radyonüklidleri veya ilaçları taşıyıcı olarak kullanılmasını sağlar. İlaç moleküllerini veya terapötik ajanları yüksek miktarda yükleyebilme kapasitesine sahip olmaları ve gözenekli yapıları sayesinde, ilaçlar veya diğerk tedavi edici moleküller kontrollü bir şekilde serbest bırakılabilir. ZNp'ler, radyonüklidleri depolamak, taşımak ve entegre olmak için de mükemmel bir yapı sunar. Radyonüklidler zeolit gözeneklerine sıkıca bağlanabilir ve bu da radyoaktif maddelerin kontrollü bir şekilde serbest bırakılmasına imkân tanır. Diğerk

tarafından ilaçları gözeneklerinde tutarak belirli bir zaman dilimi içinde yavaş ve sürekli bir şekilde salınımını sağlayabilir. Bu da kanser tedavisi ve tanı süreçlerinde kullanılacak güvenilir bir taşıyıcı sistem sağlar. **İyot-131 (I-131)** veya **Lutesyum-177 (Lu-177)** gibi radyonüklidler, zeolit gözeneklerine yerleştirilerek tümörlere yönelik tedavilerde kullanılabilir (Hruby vd., 2011; Hruby vd., 2011). Bu, radyasyonun doğrudan kanser hücrelerine verilmesini sağlar ve sağlıklı dokulara zarar verme riskini azaltır. Ayrıca ZNp'ler radyonüklidlerin stabilize edilmesine yardımcı olur ve bu da uzun süreli görüntüleme için imkân sağlar. ZNp'ler nanohipertermi tedavisi gibi termal tedavilerde de kullanılabilir. Bu tedavide zeolit nanoparçacıkları, belirli frekansta ısı üretmek için kullanılarak kanser hücrelerinin yok edilmesine yardımcı olur (Morales vd., 2020).

ZNp'ler, pH veya sıcaklık değişiklikleri gibi çevresel faktörlere duyarlı hale getirilebilir. Bu durum kanserli dokular gibi belirli bölgelerdeki ortam koşullarına bağlı olarak ilaçların veya radyonüklidlerin serbest bırakılmasını sağlar (Zakeri vd., 2021). ZNp'ler biyolojik sistemlerle uyumlu malzemelerdir ve bu nedenle tıbbi uygulamalarda güvenle kullanılabilirler. Ayrıca, zeolitler vücut tarafından toksik olmayan maddeler olarak kabul edilir ve yan etkileri düşüktür. Zeolitler, doğal olarak bulunan ve geri dönüştürülebilir malzemelerdir. Bu da zeolitlerin tıbbi uygulamalarda çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek olmasını sağlar. Zeolit nanoparçacıkları, diğer nanoparçacık türlerine kıyasla nanotoksik etkileri minimize etme potansiyeline sahiptir. Bu, özellikle tıbbi uygulamalarda nanoparçacıkların güvenli kullanımını artırır. ZNp'ler radyoaktif maddeleri tutma yetenekleri sayesinde radyonüklidlerin güvenli bir şekilde taşınmasını sağlar. Bu, vücutta radyoaktif maddelerin istenmeyen bölgelerde birikmesini engeller. Zeolitler, doğada kolayca parçalanabilen ve çevresel zararı düşük olan malzemelerdir. Bu sebeple hem tıbbi hem de çevresel güvenlik açısından zeolit nanoparçacıkları tercih edilen malzemelerden biridir.

ZNp'ler detoksifikasyon ve temizlik kapasitesine sahip oldukları için radyonüklidlerin bağlanması ve atılması süreçlerinde de kullanılabilir (El-kamash vd., 2006). Bu durum radyoterapi sonrası vücutta kalan radyoaktif materyallerin temizlenmesine yardımcı olabilir. Zeolitler, radyoaktif maddeleri ve ağır metalleri tutma kapasiteleri sayesinde vücutta kalan radyoaktif izotopların uzaklaştırılmasında rol oynayabilir. Bu, tedavi sonrası hastaların maruz kaldığı radyasyon seviyesini azaltır. Ayrıca ZNp'ler çoklu tedavi seçeneklerine imkân

tanır. İlaç salımı, radyonüklid terapisi, görüntüleme ve termal tedavi gibi birden fazla tedavi yöntemini aynı anda uygulamak için kullanılabilir.

12.2.1.4. Demir Oksit Nanoparçacıklar (FeONp)

Demir oksit nanoparçacıklar, tıbbi görüntüleme ve tedavi alanında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nanoparçacıklar, özellikle manyetik özelliklerinden dolayı biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Peng vd., 2008; Dadfar vd., 2019). Radyonüklidleri bağlayarak nükleer atıkların taşınması sırasında çevreye yayılan radyasyon seviyesini kontrol etmek için de yine FeONp'ler kullanılır. Manyetik rezonans görüntülemede (MRG) kontrast maddesi olarak kullanılan FeONp'ler manyetik özelliklerinden dolayı çevresindeki protonların manyetik özelliklerini etkileyerek daha net ve ayrıntılı görüntülerin elde edilmesine imkân tanır (Shen vd., 2017; Lee ve Hyeon, 2012). Süper paramanyetik demir oksit nanoparçacıkları (SPION'lar), özellikle tümörlerin, enfeksiyonların ve inflamasyon bölgelerinin daha kolay görüntülenmesini sağlar. FeONp'ler manyetik alanlar kullanılarak vücuttaki belirli bölgelere hedeflenerek manyetik yönlendirmede kullanılabilir. Bu sayede ilaçların doğrudan tümör veya hastalıklı bölgelere taşınması mümkün olur, bu da tedavi etkinliğini artırır ve yan etkileri azaltır. FeONp'ler, hedeflenen bölgelerde lokalize bir ısınma oluşturarak kanser hücrelerinin ölümüne neden olur. Bu yöntem, diğer kanser tedavilerine kıyasla daha az invazif olabilir ve daha az yan etkiye yol açabilir.

Hipertermi tedavisinde FeONp'ler kanser hücrelerinin lokal olarak ısıtılması için kullanılabilir. Manyetik alan altında bu nanoparçacıklar ısı üretir ve kanser hücrelerinin ısınarak ölmesine neden olabilir. Bu yöntem "manyetik hipertermi" olarak adlandırılır ve çevre dokulara minimum zarar vererek kanserli hücrelerin hedeflenmesini sağlar (Espinosa vd, 2016; Quinto vd., 2015). FeONp'ler rejeneratif tıp uygulamalarında kök hücrelerin veya diğer tedavi edici hücrelerin takibinde de kullanılabilir. Nanoparçacıklarla etiketlenen hücreler MRG ile izlenebilir ve bu, tedavi sürecinin etkinliğini değerlendirmede önemli bir araç olarak karşımıza çıkar.

Moleküler görüntüleme ve sensör çalışmalarında da FeONp'ler hastalık biyobelirteçlerinin tespitinde kullanılır (Oghabian vd., 2011; Zhang vd., 2016). Mesela, bu nanoparçacıklar antikor, protein veya DNA gibi biyomoleküllere bağlanarak belirli hastalıkların teşhis edilmesine yardımcı olabilirler. FeONp'ler biyoyumlu ve biyobozunur oldukları için tıbbi uygulamalarda güvenli bir şekilde kullanılabilirler. Ayrıca yüzeylerinin modifiye edilebilir olması, çeşitli

biyomoleküllerle işlevsel hale getirilmelerini sağlayarak hedeflenmiş tedavilerde kullanımını artırmaktadır.

En yaygın kullanılan FeONp türleri biyomedikal uygulamalarda süper paramanyetik özellik gösteren ve özellikle MRG kontrast maddesi ve hipertermi tedavisinde kullanılan demir ferrit (Fe_3O_4), manganez, çinko ve kobalt ferritleri örnek olarak gösterebiliriz. Bu farklı ferrit türleri, manyetik özellikleri modifiye edilerek belirli uygulamalarda avantaj sağlayabilir. FeONp'ler, antikor, protein ve DNA gibi biyomoleküllerle kaplanarak hedefe yönlendirilmiş tedavi ve görüntüleme için özelleştirilebilir. Fonksiyonel yüzey modifikasyonları, nanoparçacıkların biyolojik ortamda kararlılığını artırarak hedefleme kabiliyetlerini geliştirir. Ayrıca FeONp'ler kimyasal ve fiziksel olarak oldukça stabildir ve biyomedikal uygulamalarda uzun süre kullanılabilir.

12.2.1.5. Gadolinyum Nanoparçacıkları (GdNp)

Gadolinyum nanoparçacıkları, tıbbi görüntüleme ve tedavide özellikle MRG için son derece önemli bir rol oynamaktadır (Lux vd., 2015; Narmani vd., 2018). Gadolinyum (Gd), güçlü manyetik özellikleri nedeniyle tıp dünyasında dikkat çeken bir elementtir. Gd, MRG'de yaygın olarak kontrast ajanı olarak kullanılır. Gd bazlı kontrast maddeler, özellikle T1 ağırlıklı MRG'de kontrastı artırır ve tümörler, damar yapıları ve patolojik lezyonlar gibi anormalliklerin görüntülenmesinde son derece etkilidir (Chen vd., 2014; Delgado vd., 2019). GdNp'ler, güçlü paramanyetik özelliklere sahiptir ve manyetik alanlarda protonların manyetik rezonans sinyalini artırarak daha iyi görüntüleme sağlar. Bu durum, doktorların doku ve organları daha detaylı incelemesine imkân tanır.

GdNp'ler, biyomoleküllerle işlevselleştirilebilir, yani nanoparçacıklar kanser hücreleri veya spesifik reseptörlerle etkileşime girebilir. Bu özellik, hastalıkların daha erken ve spesifik olarak görüntülenmesini sağlar (Yang vd., 2014; Swanson vd., 2008). Mesela, tümör hücrelerine yönlendirilebilen GdNp'ler, yalnızca hastalıklı dokuların net görüntülenmesini sağlar ve bu da tedavi stratejilerinin iyileştirilmesine yardımcı olur. GdNp'ler, hem görüntüleme hem de ilaç taşıma gibi çift işlevli yapılar olarak kullanılabilir. Gd ile modifiye edilmiş nanoparçacıklar, manyetik özellikleri ile hastalıklı bölgelere yönlendirilirken aynı zamanda ilaç taşıyıcısı olarak kullanılabilir. Bu şekilde hastalık hem görüntülenir hem de tedavi edilebilir (Yang vd., 2014; Kim vd., 2013).

GdNp'ler bazı araştırmalarda kanser tedavisi için manyetik hipertermi amacıyla da kullanılmaktadır. Manyetik alan uygulandığında GdNp'ler ısınır ve

tümör hücrelerinin yok edilmesine yardımcı olabilir (Jadhay vd., 2019; Roy vd., 2016). GdNp'ler kanser tedavisinde radyasyon tedavisinin etkinliğini ve radyo-duyarlılığı artırmak için de kullanılır. Gd, tümör bölgelerine spesifik olarak yönlendirildiğinde, radyasyonun etkisini artırarak kanser hücrelerinin daha kolay öldürülmesini sağlar (Du vd., 2020; Detappe vd., 2017). Bunlara ilave olarak GdNp'ler manyetik alan etkisi altında protonların relaksasyon sürelerini kısaltarak MRG'de daha net ve ayrıntılı görüntülerin elde edilmesine imkân tanır. GdNp'ler biyolojik sistemlerle uyumludur ve yüzeylerinin çeşitli biyomoleküllerle kaplanarak spesifik doku veya hücelere yönlendirilmesi mümkündür.

GdNp'lerin önemli avantajlarının yanında bir takım potansiyel yan etkilerinin de olduğu unutulmamalıdır. Gd'nin MRG kontrast maddesi olarak kullanımında, böbrek yetmezliği olan hastalarda nefrojenik sistemik fibrozis (NSF) adı verilen ciddi bir yan etki gelişebilir (Kallen vd., 2008; Canga vd., 2014). Bu nedenle, gadolinyum bazlı kontrast maddelerin güvenli kullanımı önemlidir ve genellikle böbrek fonksiyonları değerlendirilmeden kullanılmaz. Bazı çalışmalar, Gd'nin uzun süreli kullanımı sonucunda beyinde birikim yapabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, güvenlik protokolleri sıkı bir şekilde takip edilmektedir.

12.2.1.6. Karbon Nanotüpler (KNT)

Radyoaktif karbon nanotüpler tıbbi görüntüleme ve tedavi alanında önemli bir yenilik sunmaktadır. KNT'lerin eşsiz fiziksel ve kimyasal özelliklerinin radyoaktif izotoplarla birleştirilmesi hem teşhis hem de tedavi için son derece güçlü bir araç haline gelmelerine imkân tanır (Wang vd., 2019). Radyoaktif KNT'ler, radyoizotopları hedef dokulara taşımak için kullanılabilir. Bu yöntemde, KNT'ler yüzeylerine radyoaktif izotoplar bağlanarak kanser hücrelerine yönlendirilir. Radyoizotoplar, hedeflenen bölgeye ulaştığında lokal olarak radyasyon yayar ve kanser hücrelerini yok eder. Bu yöntem, sağlıklı dokulara zarar vermeden tümör hücrelerinin doğrudan hedeflenmesini sağlar (McDevitt vd., 2007). Radyoaktif izotoplar genellikle beta veya alfa radyasyonu yayar, bu da kanser tedavisinde etkili bir yöntemdir. KNT'ler bu radyoaktif elementlerin hedefe taşınmasını sağlarken aynı zamanda vücuttaki dağılımını kontrol edebilir, böylece istenmeyen yan etkiler azalır.

Radyoaktif KNT'ler PET için radyoaktif izotop taşıyıcıları olarak kullanılabilir. KNT'ler yüzeylerine PET izotopları (mesela, flor-18 veya karbon-11) bağlanarak vücut içindeki biyolojik süreçlerin görüntülenmesini sağlar. Bu yöntem, kanser teşhisi, metabolik aktivitelerin izlenmesi ve diğer hastalıkların erken teşhisi için

kullanılır. KNT'lerin yüzeyine biyomoleküller eklenerek, belirli hücre tiplerine (tümör hücreleri vb.) spesifik olarak bağlanmaları sağlanabilir (McDevitt vd., 2007). Bu sayede PET görüntülemesi daha hassas ve hedefe yönelik hale gelir. Radyoaktif KNT'ler, kanser tedavisinde lokalize radyoterapi uygulamalarında kullanılabilir. Brachyterapi adı verilen bu yöntemde radyoaktif materyaller, kanserli bölgenin içine veya yakınına yerleştirilir ve lokal olarak radyasyon yayar. Radyoaktif KNT'ler, bu tür lokalize radyoterapide etkili bir taşıyıcı olarak kullanılarak tedavinin daha kontrollü ve hedefe yönelik olmasını sağlar (Wang vd., 2019). KNT'lerin radyoaktif maddeleri taşıma kabiliyeti, daha doğru ve kontrollü doz uygulamalarını mümkün kılar. Bu, çevre dokulara verilen zararı en aza indirir ve tedavi etkinliğini artırır.

Radyoaktif KNT'ler ilaç taşıma ve radyoterapiyi birleştirebilir (Biagiotti vd., 2019). Bu çok işlevli yapılar hem radyasyon hem de ilaç taşıma kapasitelerini bir araya getirerek daha etkili ve spesifik tedavi sunabilir. Bu sayede tedavi, kanser hücrelerine daha hassas bir şekilde yönlendirilir ve tedavi etkinliği artırılır. Radyoaktif izotoplarla birleştirilmiş KNT'ler, ilaç salınımı ve radyoterapinin kombine edilmesine imkân tanır. Bu yaklaşım hem radyasyonun hem de ilaçların sinerjik etkileri sayesinde kanser hücrelerinin daha etkili bir şekilde yok edilmesine yardımcı olabilir.

Radyoaktif KNT'ler, hedefe yönlendirilmiş tümör görüntüleme ajanları olarak kullanılabilir. Özellikle, tümör hücrelerine bağlanabilen antikorlar veya peptitlerle kaplandığında, radyoaktif KNT'ler kanserli dokuları hedefleyerek radyonüklid görüntüleme yöntemleriyle yüksek çözünürlükte görüntüleme sağlar (McDevitt vd., 2007). Rehberli tedavi teknolojisinde, görüntüleme ve tedavi amaçlarını birleştirerek “görüntüleme rehberliğinde tedavi (theranostics)” kavramını destekler. Tedavi sırasında tümörler görüntülenir ve radyasyon doğrudan tümörlere yönlendirilir.

Radyoaktif KNT'lerin yüzey modifikasyonu ile radyoaktif izotoplar hastalıklı dokulara spesifik olarak yönlendirilebilir. Bu da radyasyonun hassas hedeflenmesiyle doğrudan hastalıklı bölgeye ulaşmasını sağlar ve sağlıklı dokulara zarar vermesini en aza indirir (Spinato vd., 2016). KNT'lerin geniş yüzey alanı ve tüp yapısı, radyoaktif izotopların etkili bir şekilde taşınmasına imkân tanır. Böylece, daha düşük miktarda radyoaktif madde kullanılarak tedavi etkinliğinin artırılmasını sağlar. Ayrıca KNT'ler biyolojik ortamlarda yüksek stabilite göstererek radyoaktif izotopların kontrollü salınmasını ve güvenli kullanımını destekler.

Radyoaktif KNT'lerin bu üstün özelliklerinin yanında güvenlik açısından dikkat edilmesi gereken bazı noktalar da mevcuttur. Radyoaktif KNT'lerin kullanımı sırasında radyasyon dozunun doğru bir şekilde kontrol edilmesi ve yönetilmesi kritik önem taşır. Bu, özellikle sağlıklı dokulara zarar vermemek için gereklidir. KNT'lerin toksik olma potansiyeline karşı, biyobozunur veya biyolojik olarak uyumlu kaplamalarla modifiye edilmesi gereklidir. Bu da vücutta istenmeyen uzun süreli etkilerin önüne geçilmesine yardımcı olur.

12.2.1.7. Kuantum Noktalar (KN)

Radyoaktif kuantum noktalar tıbbi görüntüleme ve tedavi alanında son yıllarda önemli bir yenilik olarak dikkat çekmektedir (Yong vd., 2015). KN'ler, nanometre boyutunda, yarı iletken özelliklere sahip nanokristaller olup, benzersiz optik ve elektronik özellikleri ile tanınırlar. Bu özelliklerin radyoaktif izotoplarla birleştirilmesi hem tanısal görüntüleme hem de tedavi süreçlerinde çok güçlü ve etkili bir araç sunar. Radyoaktif izotoplarla birleştirildiklerinde floresan özellikleri sayesinde hem optik görüntüleme hem de PET veya SPECT gibi radyonüklid tabanlı görüntüleme teknikleri ile hastalıklı dokuların detaylı görüntülenmesi ve daha erken evrelerde hastalıkların teşhis edilmesi mümkün olur (Guo vd., 2014). Bu çift modlu görüntüleme yeteneği, hastalığın tanısında daha kesin ve net sonuçlar elde edilmesini sağlar. Radyoaktif KN'ler, kanserli dokular, enfeksiyonlar veya inflamasyon gibi hastalıklı bölgelerin yüksek hassasiyetle görüntülenmesini sağlar. Optik sinyaller ve radyoaktif sinyaller bir araya getirildiğinde, daha yüksek çözünürlüklü ve detaylı görüntüleme sağlar.

KN'lerin yüzeylerine bağlanan flor-18, teknesyum-99m gibi radyoaktif izotoplar bu teknikler için uygun radyoaktif sinyaller sağlar. Bu sayede, kanser, nörolojik hastalıklar ve kardiyovasküler hastalıklar gibi birçok farklı patolojik durumun detaylı görüntülenmesi mümkündür (Hu vd., 2015). KN'lerin doğal floresan özellikleri, vücutta optik görüntüleme için kullanılabilirken, radyoaktif izotopların eklenmesiyle birlikte radyonüklid görüntüleme sağlar. Bu kombinasyon, aynı anda iki farklı görüntüleme tekniğinin avantajlarını birleştirir ve hastalıklı dokuların hem optik hem de radyoaktif sinyallerle izlenmesine imkân tanır.

Radyoaktif KN'ler, kanser tedavisinde radyoterapi ve fotodinamik terapiyi birleştirebilir. Kuantum noktaların yüzeyine radyoaktif izotoplar eklenerek, tümör bölgesine spesifik olarak radyasyon verilmesi sağlanır (Juzenas vd., 2008). Ayrıca, KN'ler fotodinamik terapi için ışığa duyarlı hale getirilebilir ve bu,

hedeflenen bölgelerde reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretilmesini sağlar, bu da tümör hücrelerinin yok edilmesine yol açar (Chan vd., 2016). Hedefe yönlendirilmiş tedavi çalışmalarında yüzeylerine antikolar veya biyomoleküller eklenerek spesifik kanser hücrelerine yönlendirilebilir. Böylece hem radyasyonun doğrudan tümör hücrelerine verilmesini sağlar hem de sağlıklı dokuların korunmasına yardımcı olur. Radyoaktif KN'ler, lokal radyoterapi uygulamalarında da kullanılabilir. Tümör dokusuna yerleştirilen radyoaktif KN'ler, lokalize bir radyasyon kaynağı oluşturarak sadece tümör hücrelerine zarar verir. Bu yöntem, sağlıklı dokulara zarar vermeden kanser tedavisini mümkün kılar. Ayrıca radyoaktif maddelerin kontrollü salımını sağlayabilir. Bu da radyasyonun zaman içinde istenilen bölgede salınmasını ve uzun süreli tedavi sağlamayı mümkün kılar (Juzenas vd., 2008).

KN'ler biyosensörlerde kullanılabilir ve radyoaktif izotoplarla birleştirildiklerinde hastalık biyobelirteçlerinin yüksek hassasiyetle tespit edilmesini sağlar (Liv d., 2010). Özellikle kanser, kardiyovasküler hastalıklar ve enfeksiyonlar gibi durumların erken teşhisi için radyoaktif kuantum nokta tabanlı sensörler kullanılabilir. Organik boyalara kıyasla daha uzun süreli ve stabil floresan sinyalleri verdikleri için uzun süreli görüntüleme ve izleme uygulamaları için idealdir. Geniş yüzey alanları sayesinde daha fazla radyoaktif izotop veya biyomolekül taşıyabilmeleri onların hedefleme ve görüntüleme süreçlerinin etkinliğini artırır. Güvenlik, yüksek biyoyumluluk ve düşük toksisite için polimerler veya diğer biyomalzemelerle kaplanabilir.

12.2.2. Gıda Sağlığı

Gıda sağlığı alanında radyoaktif nanomalzemelerin kullanımı, özellikle gıda güvenliği ve kalite kontrolünde bazı önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, bu tür malzemelerin gıdalarda doğrudan kullanımı ile ilgili sağlık ve güvenlik endişeleri de bulunmaktadır. Radyoaktif nanomalzemeler, gıdalarda kirlenme veya kontaminasyonu izlemek için hassas sensörlerde kullanılabilir (Lim vd., 2016). Nanomalzemeler, radyoaktif izotoplarla işaretlenerek gıdalarda mikrobiyal kontaminasyon, kimyasal kalıntılar veya bozulmanın erken tespit edilmesine imkân sağlar. Radyoizotoplu sensörler gıdaların tazeliğini, raf ömrünü veya mikrobiyal kontaminasyonu tespit edebilir. Radyoaktif nanomalzemelerle çalışan bu cihazlar, gıdalardaki bozulma ürünlerini veya toksinleri daha hızlı ve hassas bir şekilde tespit eder.

Radyoaktif materyaller, gıdaların sterilizasyonunda uzun zamandır kullanılmaktadır. Bu işlem, gıdalardaki zararlı bakterileri, parazitleri ve mikroorganizmaları yok etmek için yapılır. Radyoaktif nanomalzemeler, daha etkili ve kontrollü bir sterilizasyon sağlayabilir. Radyoaktif nanomalzemeler, daha düşük dozlarda, daha hedeflenmiş bir sterilizasyon sağlayabilir. Nanomalzemelerin yüzey özellikleri, radyasyonun etkisini artırabilir ve daha iyi koruma sunabilir. Nanomalzemeler, radyoaktif izotoplarla fonksiyonelleştirilerek gıdaların izlenebilirliği konusunda yenilikçi çözümler sunabilir. Özellikle gıda ambalajında kullanılan nanomalzemeler, ürünün depolanması, taşınması ve raf ömrü boyunca güvenliğini sağlamak için önemli olabilir. Akıllı ambalajlar gıdanın bozulma durumunu ya da dış etmenlerden kaynaklanan riskleri algılayabilir.

Radyoaktif nanomalzemeler, gıdalarda radyolojik, kimyasal veya biyolojik kontaminasyonun tespitinde kullanılabilir (Lv vd., 2018). Gıdalarda radyoaktif kontaminasyonu tespit etmek için geliştirilen nanomalzemeler, çok düşük seviyelerde bile kontaminasyonu algılayabilir. Bu da tüketici güvenliği açısından önemlidir. Özellikle gıda tedarik zincirinde radyolojik kontaminasyonun izlenmesi, halk sağlığı açısından önemlidir. Gıda Biyosensörlerinde kullanılan radyoaktif nanoparçacıklar, sensörlerin hassasiyetini artırarak çok düşük konsantrasyonlardaki patojenleri bile algılamayı mümkün kılar. Bu tür sensörler, gıdalarda E. coli veya Salmonella gibi mikroorganizmaların tespitinde kullanılabilir. Gıda sahteciliği ile mücadele etmek ve tedarik zincirinin izlenebilirliğini artırmak, gıda tedarik zincirinde ürünleri izlemek ve kökenlerini doğrulamak için radyoaktif izotoplarla işaretlenmiş nanomalzemeler kullanılabilir.

Her ne kadar radyoaktif nanomalzemeler, gıda güvenliği ve kalitesi için yararlı olsa da insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri konusunda dikkatli olunmalıdır. Özellikle gıda ile doğrudan temas eden radyoaktif materyallerin kullanımı, sıkı regülasyonlara ve güvenlik standartlarına tabidir. Gıda tüketimi sırasında bu malzemelerin insan vücuduna geçişi, uzun vadeli sağlık riskleri oluşturabileceğinden, uygulamalarda çok dikkatli olunmalıdır. Bu sebeple doğrudan gıdalarda radyoaktif materyallerin kullanımı sağlık açısından dikkat gerektirdiğinden, bu teknolojiler genellikle dolaylı yöntemlerle uygulanır.

Gıda sağlığıyla ilgili kullanılan bazı radyoaktif nanomalzeme türleri ve uygulamalarını aşağıdaki şekilde açıklayabiliriz:

12.2.2.1. Altın nanoparçacıklar

AuNp'ler gıda sağlığı ve güvenliği alanında önemli bir rol oynamaktadır. Gıda kalite kontrolü, güvenlik ve biyosensör teknolojileri gibi alanlarda benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde geniş kullanım alanı bulurlar (Hua vd., 2021). AuNp'ler yüksek yüzey alanları ve biyomoleküllerle etkileşim yetenekleri sayesinde biyosensörlerde yaygın olarak kullanılır. Bakteriler, virüsler ve toksinler gibi gıda patojenlerini hızlı ve hassas bir şekilde tespit etmek için kullanılabilirler. Mesela, E. coli, Salmonella gibi patojenler AuNp temelli sensörlerle tespit edilebilir (Du vd., 2020). AuNp'ler, yüzeylerine bağlanan biyomoleküller (antikorlar, enzimler, DNA) aracılığıyla spesifik patojenlerin tanınmasına ve böylece gıda güvenliğinin daha etkili, hızlı ve hassas bir şekilde sağlanmasına katkı sağlar. AuNp'ler, pestisitler, ağır metaller ve antibiyotik kalıntıları gibi kimyasal kontaminantların gıdalardaki varlığını tespit etmek için de kullanılabilir (Liu vd., 2018). AuNP temelli sensörler, bu kontaminantların hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır.

Bazı gıda katkı maddeleri ve koruyucuların, fazla tüketildiğinde sağlık sorunlarına yol açabileceği bilinmektedir. AuNp'ler bu katkı maddelerinin tespit edilmesi ve izlenmesi için kullanılarak gıda güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Gıda maddelerinin tazelik ve bozulma süreçlerini izlemek için AuNp'ler kullanılabilir. Mesela, bozulmuş gıdalarda açığa çıkan uçucu organik bileşikler (VOC'ler) AuNp temelli sensörlerle tespit edilebilir (Calabrese vd., 2023). Bu da gıdaların raf ömrünü izlemek ve tazeliklerini kontrol etmek için önemlidir. Sıcaklık, nem veya oksijen seviyeleri gibi depolama faktörlerinin izlenmesi, gıdaların uygun koşullarda saklanıp saklanmadığını denetleyerek gıda kalitesini korur. AuNp'ler boyutlarına ve yüzey özelliklerine bağlı olarak optik özellikler sergiler. Özellikle görünür ışık altında renk değiştirme özellikleri, gıda patojenlerinin veya kontaminantların tespitinde görsel bir gösterge olarak kullanılabilir. Bu özellik, düşük maliyetli ve hızlı sonuç veren test kitlerinin geliştirilmesini mümkün kılar. AuNp temelli test kitleri, gıda örneklerinde kontaminantları veya patojenleri görsel olarak hızlı bir şekilde tespit etmek için tasarlanabilir. Bu kitler, özellikle gıda üretim tesislerinde ve perakende sektöründe kullanıcı dostu ve pratik çözümler sunar.

AuNp'ler gıda ambalajlarında antimikrobiyal kaplama malzemesi olarak kullanılabilir (Thirumurugan vd., 2013). Bu kaplamalar, gıdaların yüzeyinde bakteri veya diğer mikroorganizmaların üremesini önler ve gıdaların raf ömrünü uzatır. Altın nanoparçacıkların antimikrobiyal özellikleri, özellikle taze ürünlerin

korunmasında ve mikrobiyal kontaminasyonun önlenmesinde büyük önem taşır. AuNp temelli akıllı ambalajlar, gıdaların tazeliğini izleyebilir ve bozulma sürecini tespit edebilir. Mesela, gıdaların bozulmasıyla açığa çıkan kimyasal bileşiklerle etkileşime girerek renk değiştiren ambalajlar geliştirilebilir. Bu ambalajlar, tüketicilere gıdaların taze olup olmadığını gösterebilir.

AuNp'ler, gıda üretim süreçlerinde biyokatalizör olarak kullanılabilir (Mishra vd., 2014). Bu nanoparçacıklar, enzimlerin etkinliğini artırarak fermantasyon, şekerleme ve diğer gıda işlemlerinde kullanılabilir. Mesela, bazı enzimlerin aktivitesini artırarak daha verimli üretim süreçlerine katkı sağlar. AuNp'ler gıda bileşenlerinin kimyasal yapısını değiştirerek yeni gıda ürünlerinin geliştirilmesine imkân tanır. Bu durum, gıda teknolojisinde yenilikçi ürünlerin ve süreçlerin ortaya çıkmasına katkıda bulunur.

AuNp'ler gıdalarda bulunan toksik maddelerin izlenmesi için kullanılabilir (Liu vd., 2018). Ağır metaller, kimyasal kalıntılar veya doğal toksinler, gıda güvenliğini tehdit eden önemli faktörlerdir. AuNp'ler bu tür toksik maddeleri hassas bir şekilde tespit ederek, gıda tüketimi açısından risk oluşturan maddelerin kontrol altında tutulmasını sağlar. Ayrıca AuNp'ler gıdalarda kullanılan katkı maddelerinin ve kimyasal bileşenlerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştırmak için de kullanılabilir. Bu nanoparçacıklar, hücre kültürü ve biyomoleküler deneylerde biyobelirteçlerle etkileşime girerek gıda bileşenlerinin toksikolojik profillerinin çıkarılmasına yardımcı olur.

AuNP'ler, geniş yüzey alanları sayesinde birçok biyomolekül ve kimyasal bileşenle işlevselleştirilebilir. Bu, patojenler ve toksinler gibi hedef moleküllerin tespitinde yüksek hassasiyet sağlar. Diğer taraftan biyoyumlu oldukları için gıda uygulamalarında güvenli bir şekilde kullanılabilirler. İnsan vücuduna zarar vermeden patojenleri ve toksik maddeleri tespit edebilmeleri, onları gıda güvenliği açısından ideal bir araç haline getirir.

12.2.2.2. Silika Nanoparçacıklar

Silika nanoparçacıklar gıda sağlığı ve güvenliği alanında önemli bir role sahiptir. Bu nanoparçacıklar, biyoyumlulukları, kimyasal stabiliteleri ve kolayca yüzey modifikasyonu yapılabilmeleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Tarn vd., 2013). Gıda güvenliğinde, kalite kontrolünde, sensör teknolojilerinde ve ambalajlama gibi birçok alanda silika nanoparçacıkları önemli avantajlar sunar. Gıda patojenlerini tespit etmek için biosensörlerde kullanılır. E. coli, Salmonella gibi patojenler gıdada bulunduğu anda, bu nanoparçacıklarla

işlevselleştirilmiş sensörler, patojenlerin varlığını hızlı ve hassas bir şekilde tespit edebilir. Silika nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı ve kolayca fonksiyonelleştirilebilmesi, antikor ve enzim gibi biyomoleküllerin nanoparçacık yüzeyine bağlanmasını sağlar ve patojenlerin tespitini daha etkili hale getirir (Wu vd., 2009).

Gıdalardaki pestisitler, antibiyotikler ve ağır metaller gibi kimyasal kontaminantların izlenmesinde de silika nanoparçacıkları kullanılabilir (Bpat vd., 2016). Gıdalarda bulunan bu zararlı maddelerin varlığını hızlı ve düşük maliyetli testlerle tespit etmek mümkündür. Gıdaların tazelik durumunu izlemek ve bozulma süreçlerini belirlemek için silika nanoparçacıkları kullanılabilir. Özellikle silika nanoparçacıkları, bozulma sırasında oluşan kimyasal bileşiklerle etkileşime girerek gıdanın bozulduğunu gösteren sinyaller üretebilir. Bu sinyaller, tazelik izleme sensörleri olarak kullanılabilir. Silika nanoparçacıkları, gıda ürünlerinin bileşenlerinin hızlı bir şekilde analiz edilmesi için kullanılabilir. Gıda bileşenlerinin (proteinler, yağlar, karbonhidratlar) analizi, kalite kontrol ve güvenlik açısından önemli olup, silika nanoparçacıklarla yapılan analizler bu süreci hızlandırabilir.

Silika nanoparçacıkları, gıda ambalajlarında antimikrobiyal kaplamalar olarak kullanılabilir. Bu kaplamalar, gıdaların yüzeyinde bakteri ve mantar üremesini engelleyerek gıdanın raf ömrünü uzatır. Antimikrobiyal özellikler, gıdaların daha uzun süre taze kalmasına yardımcı olur ve mikrobiyal kontaminasyonu azaltır. Bu malzemeler akıllı ambalajlama sistemlerinde de kullanılabilir. Mesela ambalaj içerisindeki oksijen veya nem seviyelerini izleyerek gıdanın bozulup bozulmadığını gösterebilir ve ambalajların rengi değişerek gıdanın taze olup olmadığını gösterebilir, bu da tüketicilere büyük kolaylık sağlar.

Gıda takviyeleri ve vitaminlerin kontrollü salımı için silika nanoparçacıkları, kullanılabilir (Singh vd., 2016). Bu nanoparçacıklar, belirli vitaminleri, mineralleri veya biyoaktif bileşenleri taşıyarak vücutta doğru zamanda salınmalarını sağlar. Bu sayede besinlerin biyoyararlanımı artırılır ve etkileri optimize edilir. Silika nanoparçacıkları, gıda takviyelerinin veya biyoaktif bileşenlerin stabilitesini artırarak bozulmalarını önleyerek besin maddelerinin daha uzun süre etkili kalmalarını ve gıdalarda kullanılabilirliğini artırabilirler. Ayrıca silika nanoparçacıkları, gıdaların bozulması sırasında açığa çıkan gazların tespit edilmesi için kullanılabilir. Özellikle silika bazlı sensörler, gıdalarda oluşan uçucu organik bileşikler (VOC'ler) izleyerek bozulma sinyalleri verebilir (Ziyaina vd.,

2019). Böylece hem üreticilerin hem de tüketicilerin gıda güvenliği açısından önemli bilgilere ulaşmasını sağlar.

Silika nanoparçacıkları, ambalaj içerisindeki pH veya oksijen seviyelerini izleyen sensörlerde kullanılabilir. Gıdaların bozulması genellikle pH değişikliklerine veya oksijenin varlığına bağlıdır. Silika nanoparçacıkları, bu değişiklikleri izleyerek gıda kalitesinin korunmasına yardımcı olur (Tsou vd., 2013). Diğer taraftan gıdalarda kullanılan koruyucu maddelerin varlığını ve miktarını tespit etmek için kullanılabilir. Özellikle aşırı tüketimi sağlık sorunlarına yol açabilen koruyucu maddeler, nanoparçacık bazlı sensörlerle izlenebilir. Bu da gıda katkı maddelerinin denetimini kolaylaştırır. Gıdalarda kullanılan yapay tatlandırıcılar ve renk maddeleri, sağlık açısından zararlı olabilir. Silika nanoparçacıkları, bu maddelerin tespit edilmesinde kullanılabilir, bu da tüketici sağlığı için önemlidir.

Silika nanoparçacıkları, vitaminler, antioksidanlar veya diğer biyoaktif bileşenlerin korunması için nanokapsülasyon teknolojisinde kullanılabilir (Mai vd., 2017). Bu teknoloji, biyoaktif maddelerin stabilitesini artırır ve istenmeyen çevresel koşullardan (ışık, sıcaklık, oksijen) korunmalarını sağlar. Silika nanoparçacıkları, gıdalarda kullanılan biyoaktif bileşenlerin kontrollü bir şekilde salınmasını sağlar. Bu da besin takviyelerinin veya fonksiyonel gıda bileşenlerinin daha etkili bir şekilde kullanılmasını mümkün kılar.

Biyolojik olarak uyumlu ve toksik olmamaları, yüzeylerine biyomoleküllerin kolayca bağlanabilmesi sayesinde sensörlerde ve analiz cihazlarında geniş bir kullanım imkânı sunması, kimyasal olarak stabil olmaları, geniş bir pH aralığında etkinliklerini korumaları silika nanoparçacıklarını gıda sağlığı konusunda önemli hale getiren diğer özellikleridir.

12.2.2.3. Karbon Nanotüpler

KNT'ler gıda sağlığı açısından hem fırsatlar hem de potansiyel riskler taşıyan ileri nanoteknoloji malzemeleridir. En önemli kullanım alanlarından biri, gıda ambalajlarının geliştirilmesidir. KNT'ler, ambalaj malzemelerine katılarak mekanik dayanıklılık, ısıya dayanıklılık ve gaz bariyeri özelliklerini artırabilir (Sun vd., 2021). Bu da gıdaların daha uzun süre taze kalmasını sağlayarak bozulmayı ve gıda israfını önler. Üstün elektriksel iletkenlik özellikleri, gıdalardaki zararlı maddeleri veya bozulmayı tespit eden sensörlerde kullanılmasını mümkün kılar. KNT tabanlı sensörler, gıdadaki bakteriyel enfeksiyonları, toksinleri veya

kimyasal kirleticileri tespit edebilir. Bu da gıda güvenliği için daha hassas ve hızlı analiz imkânı sunar (Inbaraj ve Chen, 2015).

KNT'ler özellikle su arıtma sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılır. Su arıtma teknolojilerinde, karbon nanotüplerin yüzey alanı genişliği ve kimyasal reaktivitesi, zararlı kirleticileri sudan etkin şekilde uzaklaştırmada avantaj sağlar (Upadhyayula vd., 2009). Bu durum tarımda ve gıda üretiminde kullanılan suyun daha temiz olmasına katkı sunarak gıda güvenliğine olumlu etki yapar. KNT'lerin gıda takviyeleri ya da besin maddelerinin kontrollü salınımında kullanılması mümkündür (Luo vd., 2011). Mesela vitaminler veya mineraller gibi besin bileşenleri mikro seviyede taşınabilir ve vücut içinde hedeflenen noktalara salınabilir. Bu teknoloji, fonksiyonel gıdaların geliştirilmesinde yenilikçi bir yöntem sunar. KNT'lerin antibakteriyel ve antiviral özellikleri de gıda kaynaklı hastalıkların önlenmesinde kullanılabilir. Gıda işleme yüzeylerine veya ambalajlara uygulanarak zararlı mikroorganizmaların büyümesini engelleyebilirler.

Bütün bu avantajlı yönleriyle beraber KNT'lerin gıda sistemlerinde kullanılmasına yönelik bazı riskler de vardır. Özellikle nanopartiküllerin insan vücudunda nasıl birikim göstereceği ve uzun vadeli sağlık etkileri hala tam olarak anlaşılammıştır. Bazı araştırmalar, KNT'lerin toksik olabileceğini ve hücreler üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceğini göstermektedir (Magrez vd., 2006).

12.2.2.4. Titan Dioksit (TiO₂) Nanoparçacıkları

TiO₂ nanoparçacıkları, gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir katkı maddesidir ve gıda sağlığı açısından hem avantajlar hem de potansiyel riskler taşır (Chen vd., 2020). Özellikle renklendirici olarak kullanılmasıyla bilinen bu nanoparçacıklar, bazı işlevsel özellikleri nedeniyle gıda üretiminde önemli bir yer tutar. Beyaz renk vermek amacıyla birçok gıda ürünüde kullanılır. Çikolatalar, şekerlemeler, sakızlar ve soslar gibi ürünlerde, beyazlatıcı ve opaklaştırıcı bir madde olarak görev yapar. Geleneksel boyar maddelere kıyasla, TiO₂ nanoparçacıklarının daha etkili ve homojen renk dağılımı sağlayabilmesi, üretim sürecinde tercih edilmesinin temel nedenlerinden biridir.

Bu nanoparçacıklar UV ışınlarını engelleme yetenekleri ile bilinir. Bu özellik, gıdaların korunmasında kullanılabilir. Gıda ambalajlarına katıldığında UV ışınlarını engelleyerek gıdaların ışığa karşı korunmasına ve bozulma süreçlerinin yavaşlatılmasına yardımcı olabilir (Oleyaei vd., 2016). Bu sayede gıdaların raf ömrü uzatılabilir. Nanoparçacık formundaki titan dioksit, antibakteriyel ve

antimikrobiyal özelliklere sahip olabilir. Gıda işleme yüzeylerinde, ambalajlarda veya doğrudan gıdalarda mikroorganizmaların üremesini engellemek amacıyla kullanılabilir. Bu, gıda kaynaklı hastalıkların önlenmesi açısından bir avantaj sunar.

TiO₂ gıda katkı maddesi olarak uzun süre güvenli kabul edilmiştir ve birçok ülkede E171 koduyla kullanımı onaylanmıştır (Berardinelli ve Parisi, 2021). Ancak, nanoparçacık formundaki TiO₂'nin bağırsak bariyerini aşabileceği ve vücutta birikebileceği endişeleri nedeniyle, bu kullanım daha dikkatle incelenmeye başlanmıştır (Guo vd., 2017). TiO₂ nanoparçacıkları ile ilgili gıda sağlığı konusunda en büyük tartışma, bu maddelerin nanoparçacık boyutlarında insan sağlığı üzerindeki etkileridir. Nanoparçacıkların biyoyararlanımı ve vücutta nasıl biriktiği konusunda yapılan bazı araştırmalar, uzun vadeli sağlık riskleri olabileceğini ortaya koymuştur. TiO₂'nin hücre zarından geçip vücutta birikebileceği ve bazı durumlarda toksik etkiler yaratabileceği öne sürülmüştür (Meena vd., 2014). Özellikle bağırsak hücrelerinde inflamasyona neden olabileceği ve DNA hasarı yapabileceği düşünülmektedir. Bazı hayvan çalışmalarında, uzun süreli TiO₂ maruziyetinin kanser riskini artırabileceği gösterilmiştir. Ancak bu veriler insanlar için henüz kesin olarak kanıtlanmamıştır. TiO₂'nin nanoparçacık formunda bağışıklık sistemi üzerinde olumsuz etkileri olabileceği ve inflamatuvar yanıtları tetikleyebileceği yönünde araştırmalar bulunmaktadır.

12.2.2.5. Gümüş Nanoparçacıklar (AgNp)

Gümüş nanoparçacıklar gıda sağlığı açısından önemli bir role sahiptir, çünkü güçlü antimikrobiyal özelliklere sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde gıda endüstrisinde çeşitli amaçlar için kullanılırlar. Mesela gıdaların raf ömrünü uzatmak ve gıda güvenliğini sağlamak amacıyla gıda ambalajlarında antimikrobiyal katkı maddesi olarak tercih edilirler. Geniş spektrumlu antimikrobiyal etkilere sahip oldukları için bakteri, mantar ve bazı virüslere karşı etkili oldukları bilinmektedir (Franci vd., 2015). Gıdalarda bakteri üremesini engelleyerek, özellikle gıda kaynaklı hastalıklara neden olan mikroorganizmaların büyümesini durdurur ve böylece gıdaların güvenliğini sağlar.

AgNp'ler düşük dozlarda biyoyumlu olarak kabul edilir ve vücut üzerinde zararlı etkilere sebep olmazlar. Ancak, yüksek dozda AgNp'ler toksisite riskleri olabileceğinden, gıda uygulamalarında kullanılan miktarın dikkatli bir şekilde

kontrol edilmesi gereklidir (Kim vd., 2010). Regülasyonlar ve standartlar, gümüş nanoparçacıkların kullanımını sınırlar ve güvenli miktarların aşılmasını önler.

Mikroorganizmaların gıdalarda neden olduğu bozulmayı engelledikleri için, AgNp'ler gıdaların daha uzun süre taze kalmasına katkıda bulunur. Bu, özellikle taze meyve ve sebzeler gibi kısa ömürlü ürünler için faydalıdır. Gıdalardaki mikrobiyal büyümeyi sınırlayarak gıda israfını azaltmaya yardımcı olabilir. Böylece hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilirlik açısından faydalıdır.

12.2.2.6. Nanomalzemelerle Birleştirilmiş Radyoaktif İzotoplar

Bazı radyoaktif izotoplar, doğrudan nanomalzemelere bağlanarak gıda güvenliği uygulamalarında kullanılabilir. Bu izotoplar, sensörlerde veya izleme sistemlerinde etkin rol oynar. Teknesyum-99m (Tc-99m) izotopu, gıda ambalajlarında ve güvenlik sistemlerinde nanomalzemelerle birleştirilerek kontaminasyonu izlemek ve tespit etmek amacıyla kullanılabilir (Qi vd, 2022). Radyoaktif iyot izotopları (I-125), nanoparçacıklarla birleştirilerek gıdalardaki kirleticilerin tespiti için kullanılabilir.

Kaynaklar

- Bapat, G., Labade, C., Chaudhari, A., & Zinjarde, S. (2016). Silica nanoparticle based techniques for extraction, detection, and degradation of pesticides.. *Advances in colloid and interface science*, 237, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.06.001>.
- Berardinelli, A., & Parisi, F. (2021). TiO₂ in the food industry and cosmetics., 353-371. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819960-2.00008-0>.
- Biagiotti, G., Pisaneschi, F., Gammon, S., Machetti, F., Ligi, M., Giambastiani, G., Tuci, G., Powell, E., Piwnica-Worms, H., Pranzini, E., Paoli, P., Cicchi, S., & Piwnica-Worms, D. (2019). Multiwalled Carbon Nanotubes for Combination Therapy: a Biodistribution and Efficacy Pilot Study.. *Journal of materials chemistry. B*, 7 16, 2678-2687. <https://doi.org/10.1039/C8TB03299H>.
- Biersack, H., Briele, B., Hotze, A., Oehr, P., Qian, L., Mekki, M., & Shih, W. (1992). The role of nuclear medicine in oncology. *Annals of Nuclear Medicine*, 6, 131-136. <https://doi.org/10.1007/BF03178304>.
- Bowl, C. (1981). The use of radioisotopes in medical diagnosis. *Contemporary Physics*, 22, 97-115. <https://doi.org/10.1080/00107518108231516>.
- Calabrese, A., Battistoni, P., Ceylan, S., Zeni, L., Capo, A., Varriale, A., d'Auria, S., & Staiano, M. (2023). An Impedimetric Biosensor for Detection of Volatile Organic Compounds in Food. *Biosensors*, 13. <https://doi.org/10.3390/bios13030341>.
- Canga, A., Kislikova, M., Martínez-Gálvez, M., Arias, M., Fraga-Rivas, P., Poyatos, C., & Francisco, Á. (2014). Renal function, nephrogenic systemic fibrosis and other adverse reactions associated with gadolinium-based contrast media. *Nefrología: publicación oficial de la Sociedad Española Nefrología*, 34 4, 428-38. <https://doi.org/10.3265/Nefrologia.pre2014.Apr.12375>.
- Chan, M., Chen, C., Lee, I., Chan, Y., Tu, D., Hsiao, M., Chen, C., Chen, X., & Liu, R. (2016). Near-Infrared Light-Mediated Photodynamic Therapy Nanoplatform by the Electrostatic Assembly of Upconversion Nanoparticles with Graphitic Carbon Nitride Quantum Dots.. *Inorganic chemistry*, 55 20, 10267-10277. <https://doi.org/10.1021/ACS.INORGCHEM.6B01522>.
- Chen, B., & Shih, T. (2014). DCE-MRI in hepatocellular carcinoma-clinical and therapeutic image biomarker.. *World journal of gastroenterology*, 20 12, 3125-34 . <https://doi.org/10.3748/wjg.v20.i12.3125>.

- Chen, Z., Han, S., Zhou, S., Feng, H., Liu, Y., & Jia, G. (2020). Review of health safety aspects of titanium dioxide nanoparticles in food application. *NanoImpact*, 18, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100224>.
- Cherukuri, P., Glazer, E., & Curley, S. (2010). Targeted hyperthermia using metal nanoparticles.. *Advanced drug delivery reviews*, 62 3, 339-45. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2009.11.006>.
- Cho, Y., Park, S., Han, T., Son, D., Park, J., Oh, S., Moon, D., Cho, K., Ahn, C., Byun, Y., Kim, I., Kwon, I., & Kim, S. (2007). In vivo tumor targeting and radionuclide imaging with self-assembled nanoparticles: mechanisms, key factors, and their implications. *Biomaterials*, 28 6, 1236-47. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2006.10.002>.
- Colby, A., Kirsch, J., Patwa, A., Liu, R., Hollister, B., McCulloch, W., Burdette, J., Pearce, C., Oberliels, N., Colson, Y., Liu, K., & Grinstaff, M. (2023). Radiolabeled Biodistribution of Expansile Nanoparticles: Intraperitoneal Administration Results in Tumor Specific Accumulation. *ACS nano*. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c08451>.
- Coleman, R. (2016). Treatment of Metastatic Bone Disease and the Emerging Role of Radium-223. *Seminars in nuclear medicine*, 46 2, 99-104. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2015.10.012>.
- Dadfar, S., Roemhild, K., Drude, N., Stillfried, S., Knüchel, R., Kiessling, F., & Lammers, T. (2019). Iron oxide nanoparticles: Diagnostic, therapeutic and theranostic applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 138, 302–325. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2019.01.005>.
- Delgado, A., Westen, D., Nilsson, M., Knutsson, L., Sundgren, P., Larsson, E., & Delgado, A. (2019). Diagnostic value of alternative techniques to gadolinium-based contrast agents in MR neuroimaging—a comprehensive overview. *Insights into Imaging*, 10. <https://doi.org/10.1186/s13244-019-0771-1>.
- Detappe, A., Thomas, E., Tibbitt, M., Kunjachan, S., Zavidij, O., Parnandi, N., Reznichenko, E., Lux, F., Tillement, O., & Berbeco, R. (2017). Ultrasmall Silica-Based Bismuth Gadolinium Nanoparticles for Dual Magnetic Resonance-Computed Tomography Image Guided Radiation Therapy.. *Nano letters*, 17 3, 1733-1740. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b05055>.

- Dimitriou, N., Pavlopoulou, A., Tremi, I., Kouloulis, V., Tsigaridas, G., & Georgakilas, A. (2019). Prediction of Gold Nanoparticle and Microwave-Induced Hyperthermia Effects on Tumor Control via a Simulation Approach. *Nanomaterials*, 9. <https://doi.org/10.3390/nano9020167>.
- Dorn, R., Kopp, J., Vogt, H., Heidenreich, P., Carroll, R., & Gulec, S. (2003). Dosimetry-guided radioactive iodine treatment in patients with metastatic differentiated thyroid cancer: largest safe dose using a risk-adapted approach. *Journal of nuclear medicine: official publication, Society of Nuclear Medicine*, 44 3, 451-6.
- Du, J., Wu, S., Niu, L., Li, J., Zhao, D., & Bai, Y. (2020). A gold nanoparticles-assisted multiplex PCR assay for simultaneous detection of *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7. *Analytical Methods*, 12, 212-217. <https://doi.org/10.1039/c9ay02282a>.
- Du, Y., Sun, H., Lux, F., Xie, Y., Du, L., Xu, C., Zhang, H., He, N., Wang, J., Liu, Y., Leduc, G., Doussineau, T., Ji, K., Wang, Q., Lin, Z., Wang, Y., Liu, Q., & Tillement, O. (2020). Radiosensitization Effect of AGuIX, a Gadolinium-Based Nanoparticle, in Nonsmall Cell Lung Cancer.. *ACS applied materials & interfaces*. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c16548>.
- El-kamash, A., El-Naggar, M., & El-Dessouky, M. (2006). Immobilization of cesium and strontium radionuclides in zeolite-cement blends. *Journal of hazardous materials*, 136 2, 310-6. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2005.12.020>.
- El-Sayed, I., Huang, X., & El-Sayed, M. (2006). Selective laser photo-thermal therapy of epithelial carcinoma using anti-EGFR antibody conjugated gold nanoparticles. *Cancer letters*, 239 1, 129-35. <https://doi.org/10.1016/J.CANLET.2005.07.035>.
- Espinosa, A., Corato, R., Kolosnjaj-Tabi, J., Flaud, P., Pellegrino, T., & Wilhelm, C. (2016). Duality of Iron Oxide Nanoparticles in Cancer Therapy: Amplification of Heating Efficiency by Magnetic Hyperthermia and Photothermal Bimodal Treatment.. *ACS nano*, 10 2, 2436-46 . <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b07249>.
- Falk, S. (2003). Principles of cancer treatment by radiotherapy. *Surgery (oxford)*. <https://doi.org/10.1383/SURG.2006.24.2.62>.

- Ferro-Flores, G., Ocampo-García, B., Santos-Cuevas, C., Ramírez, F., Azorín-Vega, E., & Meléndez-Alafort, L. (2015). Theranostic Radiopharmaceuticals Based on Gold Nanoparticles Labeled with (177) Lu and Conjugated to Peptides. *Current radiopharmaceuticals*, 8 (2), 150-9 . <https://doi.org/10.2174/1874471008666150313115423>.
- Franci, G., Falanga, A., Galdiero, S., Palomba, L., Rai, M., Morelli, G., & Galdiero, M. (2015). Silver Nanoparticles as Potential Antibacterial Agents. *Molecules*, 20, 8856-8874. <https://doi.org/10.3390/molecules20058856>.
- Ge, J., Zhang, Q., Zeng, J., Gu, Z., & Gao, M. (2019). Radiolabeling nanomaterials for multimodality imaging: New insights into nuclear medicine and cancer diagnosis. *Biomaterials*, 228, 119553. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2019.119553>.
- Gibson, P., Shamma, A., Cada, M., Licht, C., & Gupta, A. (2013). The Role of Tc-99m-DTPA Nuclear Medicine GFR Studies in Pediatric Solid Tumor Patients. *Journal of Pediatric Hematology/Oncology*, 35, 108–111. <https://doi.org/10.1097/MPH.0b013e31825804b2>.
- Gill, M., Falzone, N., Du, Y., & Vallis, K. (2017). Targeted radionuclide therapy in combined-modality regimens. *The Lancet. Oncology*, 18 (7), e414-e423. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(17\)30379-0](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(17)30379-0).
- Guo, W., Sun, X., Jacobson, O., Yan, X., Min, K., Srivatsan, A., Niu, G., Kiesewetter, D., Chang, J., & Chen, X. (2014). Intrinsically Radioactive [64Cu]CuInS/ZnS Quantum Dots for PET and Optical Imaging: Improved Radiochemical Stability and Controllable Cerenkov Luminescence. *ACS Nano*, 9, 488- 495. <https://doi.org/10.1021/nn505660r>.
- Guo, Z., Martucci, N., Moreno-Olivas, F., Tako, E., & Mahler, G. (2017). Titanium Dioxide Nanoparticle Ingestion Alters Nutrient Absorption in an In Vitro Model of the Small Intestine. *NanoImpact*, 5, 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.01.002>.
- Hainfeld, J., Slatkin, D., Focella, T., & Smilowitz, H. (2006). Gold nanoparticles: a new X-ray contrast agent. *The British journal of radiology*, 79 (939), 248-53. <https://doi.org/10.1259/BJR/13169882>.
- Hainfeld, J., Smilowitz, H., O'Connor, M., Dilmajian, F., & Slatkin, D. (2013). Gold nanoparticle imaging and radiotherapy of brain tumors in mice.. *Nanomedicine*, 8 (10), 1601-9 . <https://doi.org/10.2217/nnm.12.165>.

- Hamoudeh, M., Kamleh, M., Diab, R., & Fessi, H. (2008). Radionuclides delivery systems for nuclear imaging and radiotherapy of cancer.. *Advanced drug delivery reviews*, 60(12), 1329-46. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.04.013>.
- He, M., Zhou, J., Chen, J., Zheng, F., Wang, D., Shi, R., Guo, Z., Wang, H., & Chen, Q. (2015). Fe₃O₄@carbon@zeolitic imidazolate framework-8 nanoparticles as multifunctional pH-responsive drug delivery vehicles for tumor therapy in vivo. *Journal of materials chemistry. B*, 3(46), 9033-9042. <https://doi.org/10.1039/C5TB01830G>.
- Hruby, M., Pouckova, P., Zadinova, M., Kucka, J., & Lebeda, O. (2011). Thermoresponsive polymeric radionuclide delivery system—an injectable brachytherapy. *European journal of pharmaceutical sciences*, 42(5), 484-488.
- Hrubý, M., Škodová, M., Macková, H., Skopal, J., Tomeš, M., Kropáček, M., ... & Walterová, Z. (2011). Synthesis and studying properties of macroporous metal chelating polymer beads as potential therapeutics intended for radioembolization of liver malignancies and for the therapy of Wilson's disease. *Polymeric nanoparticles with biodegradable core and polymer chelates for medical purposes*, 71, 4205.
- Hu, K., Wang, H., Tang, G., Huang, T., Tang, X., Liang, X., Yao, S., & Nie, D. (2015). In Vivo Cancer Dual-Targeting and Dual-Modality Imaging with Functionalized Quantum Dots. *The Journal of Nuclear Medicine*, 56, 1278- 1284. <https://doi.org/10.2967/jnumed.115.158873>.
- Hua, Z., Yu, T., Liu, D., & Xianyu, Y. (2021). Recent advances in gold nanoparticles-based biosensors for food safety detection.. *Biosensors & bioelectronics*, 179, 113076. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113076>.
- Inbaraj, B., & Chen, B. (2015). Nanomaterial-based sensors for detection of foodborne bacterial pathogens and toxins as well as pork adulteration in meat products. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24, 15- 28. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.05.001>.
- Jadhav, S., Shewale, P., Shewale, P., Shin, B., Patil, M., Kim, G., Rokade, A., Park, S., Bohara, R., & Yu, Y. (2019). Study of structural and magnetic properties and heat induction of gadolinium-substituted manganese zinc ferrite nanoparticles for in vitro magnetic fluid hyperthermia.. *Journal of colloid and interface science*, 541, 192-203. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.063>.

- Jain, S., Coulter, J., Hounsell, A., Butterworth, K., McMahon, S., Hyland, W., Muir, M., Dickson, G., Prise, K., Currell, F., O'Sullivan, J., & Hirst, D. (2011). Cell-specific radiosensitization by gold nanoparticles at megavoltage radiation energies. *International journal of radiation oncology, biology, physics*, 79 2, 531-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.08.044>.
- Jamar, F., Houssiau, F., Devogelaer, J., Chapman, P., Haskard, D., Beaujean, V., Beckers, C., Manicourt, D., & Peters, A. (2002). Scintigraphy using a technetium 99m-labelled anti-E-selectin Fab fragment in rheumatoid arthritis. *Rheumatology*, 41 1, 53-61. <https://doi.org/10.1093/RHEUMATOLOGY/41.1.53>.
- Jurisson, S., Miller, W., & Robertson, J. (2006). Radionuclide Production and Radioactive Decay. <https://doi.org/10.1002/0471732877.EMD219>.
- Juzenas, P., Chen, W., Sun, Y., Coelho, M., Generalov, R., Generalova, N., & Christensen, I. (2008). Quantum dots and nanoparticles for photodynamic and radiation therapies of cancer. *Advanced drug delivery reviews*, 60 15, 1600-14. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.08.004>.
- Kallen, A., Jhung, M., Cheng, S., Hess, T., Turabelidze, G., Abramova, L., Arduino, M., Guarner, J., Pollack, B., Saab, G., & Patel, P. (2008). Gadolinium-containing magnetic resonance imaging contrast and nephrogenic systemic fibrosis: a case-control study. *American journal of kidney diseases: the official journal of the National Kidney Foundation*, 51 6, 966-75. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2007.12.036>.
- Katti, K., Kannan, R., Katti, K., Kattumori, V., Pandrapraganda, R., Rahing, V., Cutler, C., Boote, E., Casteel, S., Smith, C., Robertson, J., & Jurrison, S. (2006). Hybrid gold nanoparticles in molecular imaging and radiotherapy. *Czechoslovak Journal of Physics*, 56, D23-D34. <https://doi.org/10.1007/S10582-006-0484-9>.
- Kennedy, L., Bickford, L., Lewinski, N., Coughlin, A., Hu, Y., Day, E., West, J., & Drezek, R. (2011). A new era for cancer treatment: gold-nanoparticle-mediated thermal therapies. *Small*, 7 2, 169-83. <https://doi.org/10.1002/smll.201000134>.
- Kim, D., Park, S., Lee, J., Jeong, Y., & Jon, S. (2007). Antibiofouling polymer-coated gold nanoparticles as a contrast agent for in vivo X-ray computed tomography imaging. *Journal of the American Chemical Society*, 129 24, 7661-5. <https://doi.org/10.1021/ja071471p>.

- Kim, T., Chae, K., Chang, Y., & Lee, G. (2013). Gadolinium oxide nanoparticles as potential multimodal imaging and therapeutic agents.. *Current topics in medicinal chemistry*, 13 4, 422-33. <https://doi.org/10.2174/1568026611313040003>.
- Kim, Y., Song, M., Park, J., Song, K., Ryu, H., Chung, Y., Chang, H., Lee, J., Oh, K., Kelman, B., Hwang, I., & Yu, I. (2010). Subchronic oral toxicity of silver nanoparticles. *Particle and Fibre Toxicology*, 7, 20- 20. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-7-20>.
- Lee, N., & Hyeon, T. (2012). Designed synthesis of uniformly sized iron oxide nanoparticles for efficient magnetic resonance imaging contrast agents.. *Chemical Society reviews*, 41 7, 2575-89. <https://doi.org/10.1039/c1cs15248c>.
- Li, Z., Wang, Y., Wang, J., Tang, Z., Pounds, J., & Lin, Y. (2010). Rapid and sensitive detection of protein biomarker using a portable fluorescence biosensor based on quantum dots and a lateral flow test strip. *Analytical chemistry*, 82 16, 7008-14 . <https://doi.org/10.1021/ac101405a>.
- Lim, M., & Kim, Y. (2016). Analytical Applications of Nanomaterials in Monitoring Biological and Chemical Contaminants in Food.. *Journal of microbiology and biotechnology*, 26 9, 1505-16. <https://doi.org/10.4014/jmb.1605.05071>.
- Liu, G., Lu, M., Huang, X., Li, T., & Xu, D. (2018). Application of Gold-Nanoparticle Colorimetric Sensing to Rapid Food Safety Screening. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18. <https://doi.org/10.3390/s18124166>.
- Liu, G., Lu, M., Huang, X., Li, T., & Xu, D. (2018). Application of Gold-Nanoparticle Colorimetric Sensing to Rapid Food Safety Screening. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18. <https://doi.org/10.3390/s18124166>.
- Liu, J., Yang, G., Zhu, W., Dong, Z., Yang, Y., Chao, Y., & Liu, Z. (2017). Light-controlled drug release from singlet-oxygen sensitive nanoscale coordination polymers enabling cancer combination therapy.. *Biomaterials*, 146, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2017.09.007>.
- Liu, X., Chen, H., Chen, X., Alfadhl, Y., Yu, J., & Wen, D. (2014). Electromagnetic heating effect of aggregated gold nanoparticle colloids. *Journal of Applied Physics*, 115, 094903. <https://doi.org/10.1063/1.4867615>.
- Lu, L., Sun, M., Lu, Q., Wu, T., & Huang, B. (2021). High energy X-ray radiation sensitive scintillating materials for medical imaging, cancer diagnosis and therapy. *Nano Energy*, 79, 105437. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2020.105437>.

- Luo, X., Matranga, C., Tan, S., Alba, N., & Cui, X. (2011). Carbon nanotube nanoreservoir for controlled release of anti-inflammatory dexamethasone. *Biomaterials*, 32(26), 6316-23. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.05.020>.
- Lux, F., Sancey, L., Bianchi, A., Crémillieux, Y., Roux, S., & Tillement, O. (2015). Gadolinium-based nanoparticles for theranostic MRI-radiosensitization. *Nanomedicine*, 10(11), 1801-15. <https://doi.org/10.2217/nnm.15.30>.
- Lv, M., Liu, Y., Geng, J., Kou, X., Xin, Z., & Yang, D. (2018). Engineering nanomaterials-based biosensors for food safety detection. *Biosensors & bioelectronics*, 106, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.01.049>.
- Magrez, A., Kasas, S., Salicio, V., Pasquier, N., Seo, J., Celio, M., Catsicas, S., Schwaller, B., & Forró, L. (2006). Cellular toxicity of carbon-based nanomaterials. *Nano letters*, 6(6), 1121-5. <https://doi.org/10.1021/NL060162E>.
- Mai, Z., Chen, J., Hu, Y., Liu, F., Fu, B., Zhang, H., Dong, X., Huang, W., & Zhou, W. (2017). Novel functional mesoporous silica nanoparticles loaded with Vitamin E acetate as smart platforms for pH responsive delivery with high bioactivity. *Journal of colloid and interface science*, 508, 184-195. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.027>.
- McDevitt, M., Chattopadhyay, D., Kappel, B., Jaggi, J., Schiffman, S., Antczak, C., Njardarson, J., Brentjens, R., & Scheinberg, D. (2007). Tumor Targeting with Antibody-Functionalized, Radiolabeled Carbon Nanotubes. *Journal of Nuclear Medicine*, 48, 1180-1189. <https://doi.org/10.2967/jnumed.106.039131>.
- Meena, R., Kajal, K., & R., P. (2014). Cytotoxic and Genotoxic Effects of Titanium Dioxide Nanoparticles in Testicular Cells of Male Wistar Rat. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 175, 825-840. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1299-y>.
- Mishra, A., Kumari, M., Pandey, S., Chaudhry, V., Gupta, K., & Nautiyal, C. (2014). Biocatalytic and antimicrobial activities of gold nanoparticles synthesized by *Trichoderma* sp. *Bioresource technology*, 166, 235-42. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.085>.
- Morales, I., Muñoz, M., Costa, C., Alonso, J., Silva, M., Multigner, M., Quijorna, M., Ribeiro, r., & Presa, P. (2020). Induction Heating in Nanoparticle Impregnated Zeolite. *Materials*, 13. <https://doi.org/10.3390/ma13184013>.

- Narmani, A., Farhood, B., Haghi-Aminjan, H., Mortezaazadeh, T., Aliasgharzadeh, A., Mohseni, M., Najafi, M., & Abbasi, H. (2018). Gadolinium nanoparticles as diagnostic and therapeutic agents: Their delivery systems in magnetic resonance imaging and neutron capture therapy. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 44, 457-466. <https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2018.01.011>.
- Oghabian, M., Jeddi-Tehrani, M., Zolfaghari, A., Shamsipour, F., Khoei, S., & Amanpour, S. (2011). Detectability of Her2 positive tumors using monoclonal antibody conjugated iron oxide nanoparticles in MRI. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 11 6, 5340-4. <https://doi.org/10.1166/JNN.2011.3775>.
- Oleyaei, S., Zahedi, Y., Ghanbarzadeh, B., & Moayedi, A. (2016). Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO₂ nanoparticles.. *International journal of biological macromolecules*, 89, 256-64. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.078>.
- Pallares, R., & Abergel, R. (2020). Nanoparticles for targeted cancer radiotherapy. *Nano Research*, 13, 2887- 2897. <https://doi.org/10.1007/s12274-020-2957-8>.
- Peng, X., Qian, X., Mao, H., Wang, A., Chen, Z., Nie, S., & Shin, D. (2008). Targeted magnetic iron oxide nanoparticles for tumor imaging and therapy. *International Journal of Nanomedicine*. <https://doi.org/10.2147/IJN.S2824>.
- Qi, J., Zhang, C., Chen, X., Yi, S., Niu, C., Liu, J., Zhang, L., Liang, R., & Qiu, J. (2022). 3D Ionic Olefin-Linked Conjugated Microporous Polymers for Selective Detection and Removal of TcO₄⁻/ReO₄⁻ from Wastewater.. *Analytical chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c01932>.
- Quinto, C., Mohindra, P., Tong, S., & Bao, G. (2015). Multifunctional superparamagnetic iron oxide nanoparticles for combined chemotherapy and hyperthermia cancer treatment. *Nanoscale*, 7 29, 12728-36. <https://doi.org/10.1039/c5nr02718g>.
- Riley, R., & Day, E. (2017). Gold nanoparticle-mediated photothermal therapy: applications and opportunities for multimodal cancer treatment. *Wiley interdisciplinary reviews. Nanomedicine and nanobiotechnology*, 9 4. <https://doi.org/10.1002/wnan.1449>.

- Roa, W., Zhang, X., Guo, L., Shaw, A., Hu, X., Xiong, Y., Gulavita, S., Patel, S., Sun, X., Chen, J., Moore, R., & Xing, J. (2009). Gold nanoparticle sensitize radiotherapy of prostate cancer cells by regulation of the cell cycle. *Nanotechnology*, 20, 375101. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/37/375101>.
- Roy, E., Patra, S., Madhuri, R., & Sharma, P. (2016). Stimuli-responsive poly(N-isopropyl acrylamide)-co-tyrosine@gadolinium: Iron oxide nanoparticle-based nanotheranostic for cancer diagnosis and treatment.. *Colloids and surfaces. B, Biointerfaces*, 142, 248-258 . <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.02.053>.
- Shen, Z., Wu, A., & Chen, X. (2017). Iron Oxide Nanoparticle Based Contrast Agents for Magnetic Resonance Imaging.. *Molecular pharmaceutics*, 14 5, 1352-1364. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.6b00839>.
- Singh, S., Rathi, N., Angal, A., Parida, P., & Rautaray, D. (2016). Biofortification of Food with Minerals and Vitamins Encapsulated in Silica., 157-206. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39306-3_5.
- Song, X., Liang, C., Feng, L., Yang, K., & Liu, Z. (2017). Iodine-131-labeled, transferrin-capped polypyrrole nanoparticles for tumor-targeted synergistic photothermal-radioisotope therapy. *Biomaterials science*, 5 9, 1828-1835. <https://doi.org/10.1039/c7bm00409e>.
- Spinato, C., Garibay, A., Kierkowicz, M., Pach, E., Martinčić, M., Klippstein, R., Bourgognon, M., Wang, J., Ménard-Moyon, C., Al-Jamal, K., Ballesteros, B., Tobias, G., & Bianco, A. (2016). Design of antibody-functionalized carbon nanotubes filled with radioactivable metals towards a targeted anticancer therapy.. *Nanoscale*, 8 25, 12626-38. <https://doi.org/10.1039/c5nr07923c>.
- Sun, Y., Wen, Y., Liu, Q., Chen, J., Guzman, M., Li, X., & Tsou, C. (2021). Mechanical and Barrier Properties of Polyvinyl Alcohol Films Modified with Carbon Nanotubes and Zinc Oxide. *Key Engineering Materials*, 877, 27- 33. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.877.27>.
- Swanson, S., Kukowska-Latallo, J., Patri, A., Chen, C., Ge, S., Cao, Z., Kotlyar, A., East, A., & Baker, J. (2008). Targeted gadolinium-loaded dendrimer nanoparticles for tumor-specific magnetic resonance contrast enhancement. *International Journal of Nanomedicine*, 3, 201- 210. <https://doi.org/10.2147/IJN.S2696>.
- Tarn, D., Ashley, C., Xue, M., Carnes, E., Zink, J., & Brinker, C. (2013). Mesoporous silica nanoparticle nanocarriers: biofunctionality and biocompatibility.. *Accounts of chemical research*, 46 3, 792-801. <https://doi.org/10.1021/ar3000986>.

- Thirumurugan, A., Ramachandran, S., & Gowri, A. (2013). Combined effect of bacteriocin with gold nanoparticles against food spoiling bacteria- an approach for food packaging material preparation. *international food research journal*, 20, 1909-1912.
- Tsiapa, I., Efthimiadou, E., Fragogeorgi, E., Loudos, G., Varvarigou, A., Bouziotis, P., Kordas, G., Mihailidis, D., Nikiforidis, G., Xanthopoulos, S., Psimadas, D., Paravatou-Petsotas, M., Palamaris, L., Hazle, J., & Kagadis, G. (2014). (99m)Tc-labeled aminosilane-coated iron oxide nanoparticles for molecular imaging of $\alpha\beta 3$ -mediated tumor expression and feasibility for hyperthermia treatment. *Journal of colloid and interface science*, 433, 163-175. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.07.032>.
- Tsou, C., Chu, C., Hung, Y., & Mou, C. (2013). A broad range fluorescent pH sensor based on hollow mesoporous silica nanoparticles, utilising the surface curvature effect. *Journal of materials chemistry. B*, 1 41, 5557-5563. <https://doi.org/10.1039/C3TB21009J>.
- Upadhyayula, V., Deng, S., Mitchell, M., & Smith, G. (2009). Application of carbon nanotube technology for removal of contaminants in drinking water: a review. *The Science of the total environment*, 408 1, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.027>.
- Wang, J., Klippstein, R., Martinčić, M., Pach, E., Feldman, R., Šefl, M., Michel, Y., Asker, D., Sosabowski, J., Kalbáč, M., Ros, T., Ménard-Moyon, C., Bianco, A., Kyriakou, I., Emfietzoglou, D., Saccavini, J., Ballesteros, B., Al-Jamal, K., & Tobias, G. (2019). Neutron Activated ^{153}Sm Sealed in Carbon Nanocapsules for In Vivo Imaging and Tumor Radiotherapy. *ACS nano*. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b04898>.
- Wang, J., Klippstein, R., Martinčić, M., Pach, E., Feldman, R., Šefl, M., Michel, Y., Asker, D., Sosabowski, J., Kalbáč, M., Ros, T., Ménard-Moyon, C., Bianco, A., Kyriakou, I., Emfietzoglou, D., Saccavini, J., Ballesteros, B., Al-Jamal, K., & Tobias, G. (2019). Neutron Activated ^{153}Sm Sealed in Carbon Nanocapsules for In Vivo Imaging and Tumor Radiotherapy. *ACS nano*. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b04898>.
- Welsh, J. (2007). Beta Decay in Science and Medicine. *American Journal of Clinical Oncology*, 30, 437-439. <https://doi.org/10.1097/01.coc.0000258753.09234.0c>.

- Wu, F., Qiu, F., Wai-Keong, S., & Diao, Y. (2020). The Smart Dual-Stimuli Responsive Nanoparticles for Controlled AntiTumor Drug Release and Cancer Therapy. *Anti-cancer agents in medicinal chemistry*. <https://doi.org/10.2174/1871520620666200924110418>.
- Wu, Y., Chen, C., & Liu, S. (2009). Enzyme-functionalized silica nanoparticles as sensitive labels in biosensing. *Analytical chemistry*, 81 4, 1600-7. <https://doi.org/10.1021/ac802345z>.
- Yang, H., Huang, C., Lin, C., Liu, H., Huang, C., Liao, S., Chen, P., Lu, Y., Wei, K., & Ma, C. (2014). Gadolinium-functionalized nanographene oxide for combined drug and microRNA delivery and magnetic resonance imaging.. *Biomaterials*, 35 24, 6534-42. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.04.057>.
- Yong, Y., Cheng, X., Bao, T., Zu, M., Yan, L., Yin, W., Ge, C., Wang, D., Gu, Z., & Zhao, Y. (2015). Tungsten Sulfide Quantum Dots as Multifunctional Nanotheranostics for In Vivo Dual-Modal Image-Guided Photothermal/Radiotherapy Synergistic Therapy. *ACS nano*, 9 12, 12451-63. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b05825>.
- Zakeri, N., Rezaie, H., Javadpour, J., & Kharaziha, M. (2021). Effect of pH on cisplatin encapsulated zeolite nanoparticles: Release mechanism and cytotoxicity. *Materials Chemistry and Physics*, 273, 124964. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.124964>.
- Zhang, L., Tong, S., Zhou, J., & Bao, G. (2016). Accurate Quantification of Disease Markers in Human Serum Using Iron Oxide Nanoparticle-linked Immunosorbent Assay. *Theranostics*, 6, 1353- 1361. <https://doi.org/10.7150/thno.16093>.
- Zhang, X., Yan, Z., Meng, Z., Li, N., Jia, Q., Shen, Y., & Ji, Y. (2022). Radionuclide 131I-labeled albumin-indocyanine green nanoparticles for synergistic combined radio-photothermal therapy of anaplastic thyroid cancer. *Frontiers in Oncology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.889284>.
- Ziyaina, M., Rasco, B., Coffey, T., Ünlü, G., & Sablani, S. (2019). Colorimetric detection of volatile organic compounds for shelf-life monitoring of milk. *Food Control*. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2019.01.018>.