

# Radyasyon Fiziki ve Sağlık Etkileri- 1

**Editörler:**

**Doç. Dr. İsmet Meydan & Doç. Dr. Canan Demir**



**ÖZGÜR**  
YAYINLARI

# Radyasyon Fiziği ve Sağlık Etkileri- 1

**Edit6rler:**

Doç. Dr. İsmet Meydan & Doç. Dr. Canan Demir



Published by

**Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.**

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgurayinlari.com

✉ info@ozgurayinlari.com

---

## Radyasyon Fiziki ve Sağlık Etkileri- I

*Radiation Physics and Health Effects I*

Editörler: Doç. Dr. İsmet Meydan & Doç. Dr. Canan Demir

---

Language: Turkish-English

Publication Date: 2024

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

**ISBN (PDF):** 978-975-447-879-2

**DOI:** <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub432>

---



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>  
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

---

Suggested citation:

Meydan, İ. (ed), Demir, C. (ed) (2024). *Radyasyon Fiziki ve Sağlık Etkileri- I*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub432>. License: CC-BY-NC 4.0

---

*The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgurayinlari.com/>*

---



## Ön Söz

Değerli okurlar;

Radyasyon Fiziği ve Sağlık Etkileri- 1 kitabında birbirinden değerli bilimsel çalışmalar, belirli kriterlere göre yazılmış ve toplamda 5 bölüme yer verilmiştir. Radyasyon Fiziği ve Sağlık Etkileri- 1 kitabımız, alanında yetkin bilim insanlarının araştırmalarını kapsayan çok önemli bilgiler içermektedir. Bu kitabın oluşturulmasındaki amaç bu alanda çalışan bilim insanlarının deneyimleri ve araştırmaları ile ortaya çıkardıkları yeni yaklaşımları bir kitap altında toplamak ve okuyuculara sunmaktır. Bu bağlamda Radyasyon fiziği alanında çalışan bilim insanlarının iş birliği içinde yapmış oldukları bu kitap okuyucu kitlesi için oldukça zengin ve önemli başlıklar içermektedir. Bu kitap evrensel etik ilkeler doğrultusunda, bilimdeki yenilikler göz önüne alınarak oluşturulmuş bir kitaptır. Kitabın radyasyon fiziği alanında bilimsel çalışma yapan tüm bilim okuyuculara önemli bir kaynak olması en büyük arzumuzdur. Kitabın zaman ve imkanlar ölçüsünde dikkatli şekilde hazırlanması amaçlanmıştır. Bu baskıda emeği geçen yayın evine ve bölüm yazarlarına teşekkürü bir borç bilir, çalışmalarında başarılar dileriz.

Editörler

## Preface

Dear readers;

In the Radiation Physics and Health Effects I book, valuable scientific studies were written according to certain criteria and included in 5 chapters in total. Our book Radiation Physics and Health Effects contains very important information covering the research of scientists who are competent in their field. The purpose of creating this book was to collect the experiences and research of scientists working in this field and the new approaches they revealed under one book and present them to the readers. In this context, this book, written in collaboration with scientists working in the field of radiation physics, contains very rich and important topics for the readership. This book was created in line with universal ethical principles, taking into account innovations in science. It is our greatest wish that the book will be an important resource for all scientific readers doing scientific work in the field of radiation physics. It is aimed to prepare the book carefully within the time and possibilities. We would like to thank the publishing house and the chapter authors who contributed to this edition and wish them success in their work.

Editors

# İçindekiler

Ön Söz	iii
Preface	iv

## Bölüm 1

---

Radyolojik ve Nükleer Maruziyetlerde Tıbbi Müdahale	1
<i>Halime Erzen Yıldız</i>	

## Bölüm 2

---

Medikal Görüntü İşleme	19
<i>Merve Kayar</i>	

## Bölüm 3

---

Radyoterapi Tedavi Planlamasında Yapay Zeka	31
<i>Telat Aksu</i>	

## Bölüm 4

---

Tıbbi Uygulamalarda İyonize Radyasyondan Korunmanın Temel Felsefesi ve Prensipleri	41
<i>Taha Erdoğan</i>	

## Bölüm 5

---

Brakiterapi	51
<i>Aykut Oğuz Konuk</i>	
<i>Berna Tırpancı</i>	



# Radyolojik ve Nükleer Maruziyetlerde Tıbbi Müdahale

Halime Erzen Yıldız<sup>1</sup>

## Özet

Radyasyon kazası, iyonize radyasyonla yapılan bir uygulama sırasında meydana gelen ve halkın ya da çevrenin beklenmedik ışınlanması ile karakterize olan olaydır. Radyolojik ve nükleer olaylarda, etkilenen kişi sayısı, olayın niteliğine göre değişkenlik gösterebilir. Vücudun lokal bir bölgesinin ya da tamamının yüksek doz radyasyona maruz kalmasına bağlı olarak deri, hematopoietik sistem, sindirim sistemi ve serebrovasküler sistemin etkilenmesi ile karakterize Akut Radyasyon Sendromu denilen radyasyon hastalığı meydana gelir. Ayrıca yüksek doz radyasyona maruz kalmanın, tiroid bozuklukları ve kanseri, lösemiler ve diğer solid kanserler, infertilite, kardiyovasküler hastalık riskinde artış gibi uzun vadeli sonuçları da vardır. Akut radyasyon maruziyetinde müdahale planlanmasında triyaj önemlidir. Triage, radyasyon maruziyetinden sonra hasta veya yaralıların tıbbi yardım önceliğine göre sınıflandırılması ve ileri tıbbi bakım sağlanacak sağlık merkezlerine nakledilmesidir.

Radyolojik ve nükleer maruziyetler toplum için her zaman büyük bir risk kaynağı olduğundan ilgili sivil toplum kuruluşları ve sağlık sektörü çalışanları her zaman hazırlıklı olmalıdır. Yüksek doz radyasyon maruziyeti ile başa çıkmak, politika kararları, hekimlerin, müdahale ekibinin ve halkın eğitimi, önleme ve tıbbi yaklaşım planları çeşitli stratejiler gerektirir. En önemli strateji önlemedir.

## 1. Giriş

Radyasyon kazası, iyonize radyasyonla yapılan bir uygulama sırasında meydana gelen ve halkın ya da çevrenin beklenmedik ışınlanması ile karakterize olan olaydır. Nükleer santrallerde kontrollü reaksiyonun bozulması ya da radyoaktif atıklardaki ürünlerin kontrol dışına çıkması ile

1 Van Yüzyüncü Yıl Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu  
Orcid No:0000-0002-0603-1815



tesis çalışanlarının ve çevrenin etkilenmesine “nükleer kaza” denir (Ekşi, 2017). Radyoaktif materyalin taşınması, dağıtılması veya nükleer bir silahın patlatılması insanlar için radyolojik ve nükleer tehdit’dir (Ayan ve Dönmez, 2018). Hiroşima ve Nagazaki de olduğu gibi kasıtlı olarak fırlatılan nükleer silah, Çernobil’de olduğu gibi nükleer santral kazası ya da radyoaktif envanter bulunduran uydunun çarpması büyük çaplı bir felakete neden olur (Rump vd., 2018). Yüksek dozda iyonize radyasyona tüm vücudun akut maruziyeti, insanlar üzerinde olumsuz biyolojik hasara sebep olur ve tıbbi olarak acil müdahale gerektirir (Gale vd., 2021). Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP), yüksek doz radyasyona maruz kalınması durumunda, radyasyon maruziyet dozunun azaltılması için radyoaktif malzemelerin salınmasından önce tahliyenin etkili bir yol olduğunu vurgulamıştır (Ohba vd., 2021). Halkın tahliye edilmesinin temel amacı, radyoaktif dumanlar ve yer birikintilerinden kaynaklanan stokastik etkileri azaltmaktır. Yaşam alanlarında radyasyon dozunun 50 mSv/saat üzerinde olması ve salınımın devam etmesinin beklendiği durumlarda, tahliye yapılmalıdır (Ekşi, 2017).

Radyolojik ve nükleer olaylarda, etkilenen kişi sayısı, olayın niteliğine göre değişkenlik gösterebilir. Olaydan etkilenenlerde iki konu çok önemlidir. Birincisi termal yanıklar ve travma ile yaralanmalar, ikincisi ise radyoaktif kaynak ile etkileşimdir. Genelde akut radyasyon maruziyetinde müdahale planlanmasında triyaj önemlidir. Triyaj, radyasyon maruziyetinden sonra hasta veya yaralıların tıbbi yardım önceliğine göre sınıflandırılması ve ileri tıbbi bakım sağlanacak sağlık merkezlerine nakledilmesidir (Karaçaloğlu, 2017).

Yüksek doz radyasyona maruz kalmanın, tiroid bozuklukları ve kanseri, lösemiler ve diğer solid kanserler, infertilite, kardiyovasküler hastalık riskinde artış gibi uzun vadeli sonuçları da vardır (Gale ve Armitage, 2018). Ek olarak Atom bombası, Çernobil ve Fukushima Daiichi nükleer santral kazalarından sonra insanlarda psikolojik problemlerin de ortaya çıktığı kanıtlanmıştır. Nükleer olsun ya da olmasın her türlü felaket, travma sonrası stres bozukluğu, depresyon, anksiyete, aşırı alkol alımı, psikosomatik hastalıklar ve fizyolojik bozukluklara neden olabilir (Ohtsuru vd., 2015).

Radyolojik ve nükleer felaketlerin nadir olarak yaşanması sıkı önlemler alma fırsatlarını sınırlasa bile müdahale gerçekleştirilirken stratejilerin geliştirilmesi, halkı korumak, olumsuz etkileri en aza indirmek ve acil durum çalışanlarını yüksek dozda radyasyona maruz kalmaktan korumak için etkili eylem planlarının geliştirilmesi önemlidir (Ohtsuru vd., 2015).

Bu çalışma, yüksek doz radyasyona maruz kalma durumunda olay yerinde ve sağlık kuruluşlarında kazazedeye yapılması gereken tıbbi müdahale konusunda geniş bir perspektif sunmayı hedeflenmiştir.

## 2. Yüksek Doz Radyasyonda Risk Kaynakları ve Alınabilecek Önlemler

Nükleer santral kazaları, nükleer silahlar dışında radyolojik tanı ve tedavi merkezlerinde bulunan radyasyon kaynaklarının da dahil olmayan personelce kullanılması, taşınması ve imhası halinde toplum hem de çevre radyasyona maruz kalmaktadır. Ek olarak; Araştırma reaktörleri, radyoaktif maddelerin endüstriyel ve tıbbi uygulamaları, radyoaktif maddelerin taşınması ve depolanması, nükleer envanterli uydu, gemi ve denizaltı, nükleer terörizm, radyoaktif madde kaçakçılığı, kayıp radyoaktif maddeler risk kaynakları arasında yer almaktadır (Cansın, 2006). 2016 yılında Sakarya'da kayıp İridyum -192 kaynağını bulan ve evine götüren 16 yaşındaki çocukta radyasyona bağlı cilt hasarı oluşmuş ve en az 10 yakını da radyasyondan etkilenmiştir (Ayan ve Dönmez, 2018). 1987 yılında Brezilya'nın Goiania kentinde terk edilmiş bir klinikten çıkarılan Cs-137 kaynaklı radyoterapi cihazına maruz kalanlardan yirmi kişi hastaneye kaldırılmış ve bunlardan 4'ü bir ay içinde ölmüştür (Rump vd., 2018).

Fukushima Daiichi nükleer santral kazasından sonra, doktorlara nükleer bir kazanın tıbbi ve sosyal etkileriyle mücadele için gerekli bilgi ve becerileri sağlamak amacıyla üç yeni eğitim programı oluşturulmuştur. Birincisi, Fukushima Tıp Üniversitesi'ndeki öğrencilere yönelik radyasyon tıbbi konusunda bir eğitim modülüdür. İkincisi, Fukushima Tıp Üniversitesi'ndeki mevcut tıbbi programı zenginleştirmeye yönelik, hekimleri kamu bilim ve teknolojinin iletişimi ve radyasyon kaygısının sosyal ve psikolojik etkileri gibi becerilerle donatmayı amaçlayan bir modülüdür. Üçüncüsü, Hiroşima Üniversitesi'nde doktora derecesine sahip, tıbbi, çevresel ve sosyal faktörleri ele alarak nükleer felaketler konusunda geleceğin liderlerini yetiştirmeyi amaçlayan Phoenix Lider Programıdır (Ohtsuru vd., 2015).

Ülkemizde nükleer tehlikelerden kaynaklanan radyoaktivitenin zamanında belirlenebilmesi için Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK) tarafından Radyasyon Erken Uyarı Sistem Ağı (RESA) kurulmuştur. 24 saat kesintisiz ölçüm hizmeti veren bu sistem sayesinde radyasyon takibi, değerlendirilmesi, güncellenmesi ve internet üzerinden halkın erişimine sunulması sağlanmıştır. RESA'dan alınan veriler Avrupa Radyolojik Veri Değişim Platformuna (European Radiological Data Exchange Platform-EURDEP) gönderilmekte ve Avrupa ülkeleri tarafından EURDEP'e aktarılan veriler düzenli olarak takip edilmektedir (Ayan ve Dönmez, 2018).

Toplumun radyoaktif ve nükleer olaylardan haberdar etmek amacıyla Uluslararası Nükleer Olay Seviyesi olarak bilinen bir sınıflama kullanılmaktadır. Halk, kitle iletişim araçlarından gelen uyarılara harfiyen

uymak zorundadır. Radyasyondan korunmada eğitim en önemli aşamadır. Ülkemizde sağlık ekiplerine, Sağlık Bakanlığı Refik Saydam Hıfzıssıhha Merkezi Başkanlığı (RSHMB) tarafından “Kitle İmha Silahlarına Karşı Koyma ve Kişisel Korunma (KİS4K)” adlı tatbiki KBRN (Kimyasal, biyolojik, radyolojik, nükleer) eğitimi yılda iki kez verilmektedir. KİS4K; Eğitim, planlama, danışmanlık ve laboratuvar hizmeti sunmaktadır (Cansın, 2006). Türkiye’de Sağlık Bilimleri Üniversitesi bünyesinde 2022 yılında KBRN Eğitim ve Simülasyon merkezi açılmıştır. Merkezde KBRN ajanlarına maruz kalan yaralılarda ilk yardım ve tıbbi tedaviye yönelik uygulamalar için gerçeklik özelliğine sahip bir manken aracılığıyla KBRN maruziyetini simüle etmenin yanısıra tedavi uygulamalarının doğruluğu da test ediliyor (SBÜ, 2022).

### 3. Yüksek Doz İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri

Nükleer patlama gibi yüksek doz radyasyon insan sağlığını beş yolla etkiler:

**1. Güçlü ve parlak ışık etkisi:** Patlama ile birlikte meydana gelen güçlü ve parlak ışık geçici körlüğe neden olabilir.

**2. Darbe etkisi:** Radyasyon maruziyeti dışında gelişen darbeye bağlı ölümler, yıkılan yapıların enkazı altında kalma, yüksek ve ani basınç nedeniyle hemoraji, organ rüptürleri ve toz bulutundan boğulma olabilir.

**3. Isı etkisi:** Patlama sonrasında termal radyasyona bağlı olarak, önce X-ışınları yayılır, sonra birkaç saniye süren uzun dalga enfraruj ya da görülebilen ışınlar oluşur. Termal enerji sonucu oluşan bu ışınlar deri yanıklarına, yangınlara ve körlüğe neden olabilir.

**4. Radyasyon etkisi:** Nükleer patlamadan hemen sonra gama ışınları, nötron, alfa ve beta parçacıkları açığa çıkar. Ani radyasyon etkisi ilk birkaç dakika içinde oluşur. Radyoaktif maddeler hem eksternal maruziyete hem de su ve yiyecekleri kontamine ederek internal maruziyete neden olurlar.

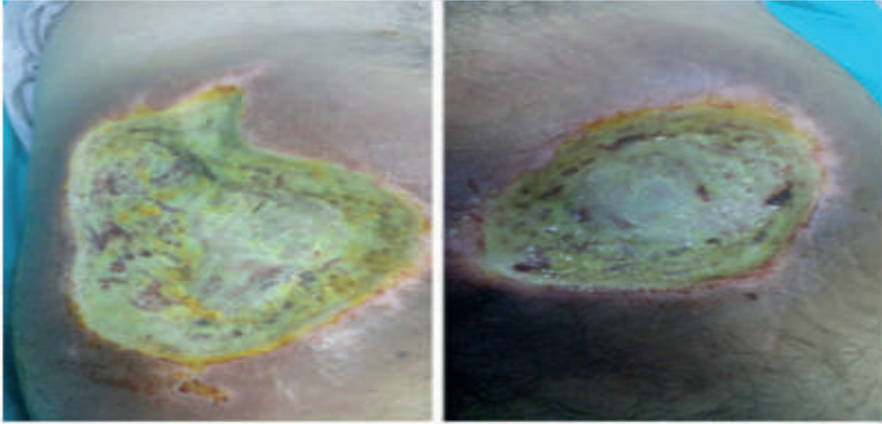
**5. Diğer:** Elektromagnetik dalgalar, radyo ve radar sinyalleri ile iletişimin engellenmesi; Kanserojen ve teratojen etki; Çevre kirliliğine yol açması; Toplum düzeninin sarsılması (Cansın, 2006).

Yüksek doz iyonize radyasyona maruz kalmanın olumsuz biyolojik etkileri vardır. Cilt, akciğer, gastrointestinal sistem ve kemik iliği gibi dokular, yüksek radyosensitif dokulardır. Yaklaşık 200.000 akciğer grafisine eşdeğer olan 2 Gy’den daha az tüm vücut iyonize radyasyona maruz kalan kazazede acil tıbbi müdahaleye gerek kalmadan iyileşebilir. Buna karşın 12-15 Gy’den fazla radyasyona maruz kalanlar tıbbi müdahale yapılsa bile ölüm olabilir. Acil

müdahale gerektiren yaralıların çoğu kemik iliği yetmezliği ve gastrointestinal hasarın olduğu 2-10 Gy'e maruz kalanlardır (Gale ve Armitage, 2018). Radyasyon maruziyetinde bazı mağdurlar, darbe etkisi, mermiler, termal yanıklar ve kimyasallardan kaynaklanan eş zamanlı yaralanmalara maruz kalabilir. Bu tür etkiler iyonize radyasyona karşı duyarlılığı artırabilir ve/veya akut radyasyon sendromunun (ARS) etkili tedavisine rağmen ölümcül olabilir (Gale vd., 2021).

#### 4. Akut Radyasyon Sendromu (ARS)

Vücudun lokal bir bölgesinin ya da tamamının yüksek doz radyasyona maruz kaldıktan sonraki belirti ve semptomların olduğu klinik bir tablodur. ARS, radyasyon hastalığı olarak da bilinir (Şekil 1). Klinik sendromlar en hassas dokular olan deri, hematopoietik sistem, sindirim sistemi ve serebrovasküler sistemi kapsar. ARS'nin ciddiyeti ışınlanan alana, radyasyon tipine (alfa, beta, gamma, nötronlar vs.) ve enerjisine, maruz kalma yolu (iç ve dış) ve bunlara eşlik eden travma ve yanıklara bağlıdır. ARS Prodromal (öncü, ilk safha), Latent (belirti göstermeyen), Manifest (açıkça görülen), Recovery or death (iyileşme ya da ölüm) olarak adlandırılan dört evreden oluşur. ARS'nin alt sendromu olan kutanöz sendromda 0.3-0.5 Gy dozlarda ışınlanmadan sonraki birkaç saat içinde kaşıntının eşlik ettiği geçici eritem olabilir.



*Şekil 1. Ir-192 (50 Ci) kaynağını yaklaşık 2 saat boyunca pantolonun her iki arka cebinde taşıyan işçinin 4. ayda her iki gluteal bölgede ağırlı derin ülserasyonlar ve derin doku nekrozu (Ince, 2017)*

Çok yüksek cilt dozlarında vezikül, alopesi, atrofi, fibrozis, salgı bezi hasarı, pigment artışı ya da azalışı, ülserasyon ve nekroz ortaya çıkabilir. Absorbe

edilen 2-3 Gy dozlarda hematolojik sendrom ortaya çıkar. Hematolojik hasar semptom vermeden 1-3 haftalık latent faz sonrası da ortaya çıkabilir. 5-6 Gy doza maruziyetten 5-6 gün sonra Gastrointestinal sendrom, 10 Gy'lik dozda ise Nörovasküler sendrom meydana gelir. Radyasyona bağlı yanıkları ve yaralanmaları olan hastalardaki yaralar daha zor iyileşir. Kan hücrelerinin, özellikle de lenfositlerin, granülositlerin ve trombositlerin konsantrasyonları ile ilişkili enfeksiyon ve kanama riski de mevcuttur. Ayrıca çoklu organ disfonksiyonu sendromu da gelişebilir. Çernobil'de 600 acil durum çalışanından 134'ünde ARS olduğu bildirilmiştir (Ayan ve Dönmez, 2018; Gale ve Armitage, 2021; Ohtsuru vd., 2015). Tüm vücudun maruz kaldığı radyasyon dozu-etki ilişkisi Tablo 1'de gösterilmiştir. ARS'da maruziyet dozuna bağlı oluşabilecek sendromlar Tablo 2'de verilmiştir (Flynn ve Goans, 2006).

*Tablo 1. Tüm vücut radyasyon dozu ve etkisi*

Doz	Etkisi
0.2 Gy	Semptom yok. Lenfositlerdeki kromozom değişiklikleri için eşik değer
0.5 Gy	Minör lenfosit baskılanması için eşik değer
1 Gy	Bulantı-kusma için eşik değer, 48 saatte hafif lenfosit baskılanması, Ölüm yok
2 Gy	Bulantı ve kusma saatler içinde sık görülür; 48 saatte orta derecede lenfosit baskılanması, Kombine yaralanma varsa az sayıda ölüm
3.5 Gy	Birkaç saat içinde bulantı-kusma; 48 saatte belirgin lenfosit baskılanması, Tedavi edilmezse 60 gün içinde %50 oranında ölüm (kombine yaralanmalar mevcutsa ölüm oranı artar).
6 Gy	1 saat içinde %100 bulantı-kusma, 48 saatte şiddetli lenfosit baskılanması, Tedavi edilmezse 60 gün içinde %100 oranında ölüm (kombine yaralanmalar mevcutsa tedaviye rağmen %100 ölüm)

*Tablo 2. ARS'de klinik sendrom*

Maruziyet dozu	Klinik Sendrom
1-8 Gy	Hematopoietik sendrom: lenfositopeni, nötropeni, trombositopeni Klinik etkiler bulantı, kusma, deride eritem, ateş, mukozit ve diyare Yara iyileşmesinde bozulma, anemi, kanama, enfeksiyon komplikasyonlarında artış ve ölüm
8-30 Gy	Gastrointestinal sendrom: Şiddetli bulantı-kusma, diyare, ateş, baş ağrısı ve yorgunluk Maruziyetten 1-2 hafta sonra ölüm
> 30 Gy	Kardiyovasküler ve merkezi sinir sistemi sendromu: Birkaç dakika içinde kusma, yanma hissi, bitkinlik, hipotansiyon, ateş, diyare Nörolojik olarak baş dönmesi, ataksi, konvüzyon 24-48 saat içinde ölüm

## 5. Radyasyon Maruziyetinde Olay Yerinde Müdahale

Acil koşullarda uygulanması zor olsa da yürürlükteki bir radyasyon güvenlik programının temel amacı radyasyonun deterministik ve stokastik etkilerini sınırlamak ve bunun için kazazedeleri ve görevlileri radyasyon maruziyetinden korumaktır. Bu nedenle mesafe, zaman, zırhlama ve radyoaktif kaynağın kontrolünü ihtiva eden ALARA (as low as reasonably achievable) prensibi göz önüne alınır (Karaçalıoğlu, 2017). Yüksek radyasyonlu alanlarda hayat kurtarma önlemleri olay yerinden uzaklaştırma ile başlar. Yaralılar eğitilmiş ve özel kıyafetli personel tarafından olay yerinden hızla uzaklaştırılır. Radyasyon ölçüm cihazı ile kişinin maruz kaldığı doz tespit edilir. Diğer bir deyişle olay yerine müdahalede ilk basamak; radyasyondan korunmanın sağlanabilmesi için olay yerinin tetkiki ve kontrollü alan oluşturulmasıdır. Buna göre olay yeri aşırı yüksek, yüksek, orta, hafif alan olmak üzere dört alandan oluşmalıdır. Radyolojik ve nükleer radyasyon maruziyetlerinde müdahale saha yönetimi alanlar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmelidir (Tablo 3).

*Tablo 3. Radyolojik ve nükleer kazalarda saha yönetimi*

Aşırı Yüksek Dozda Radyasyon Alanı	100mSv/sa	Mağdurları çıkarma 12 saatten kısa
Yüksek Dozda Radyasyon Alanı	1000mR/sa 10mSv/sa	İtfaiye Tıbbi yardım Kurtarma Zaman sınırlı girişimler
Orta Dozda Radyasyon Alanı	100mR/sa 1mSv/sa	Tampon alan Dekontaminasyon Sadece görevli olanlar Kısıtlı süre
Düşük Doz Radyasyon Alanı	0.1mSv	Müdahale edenlerin dekontaminasyonu bu alanın dış sınırında

### 5.1. Tıbbi müdahale alanının oluşturulması

Sıcak alandan çıkarılan kazazedelere ılık alanda bir tıbbi müdahale alanı oluşturulmalıdır. Bu alan belirlenirken rüzgarın yönü ve radyasyon doz oranı dikkate alınmalıdır (rüzgar yönü, soğuk alandan müdahale alanına doğru olmalı) (Şekil 2). Müdahale alanında radyasyon dozu sürekli takip edilmeli, doz seviyesi 10  $\mu$ Sv/saat'in üzerine çıktığında daha düşük bir alana geçilmelidir. Hastaların sağlık kuruluşlarına naklini sağlamak için organizasyon yapılmalıdır. Yangın ve patlama riski varsa müdahale alanı daha uzak bölgelere taşınmalıdır (Ekşi, 2017).



Şekil 2. Olay yerinde sıcak, ılık ve soğuk alan (MEGER, 2011)

### 5.1. Arındırma

Amaç hastaya dıştan radyasyon kontaminasyonunu gidermek ve maruziyeti kesmek ile sağlık personeline bulaşı önlemektir. Sırayla “ıslat-soy-yıka-giydir” prensibine göre tatbik edilir (Şekil 3). Arındırılmamış hiçbir hastaya tıbbi tedavi başlanmamalıdır. Çünkü bulaş devam ettiği için yaralı daha çok radyasyona maruz kalmakta ve sağlık personeli de risk altına girmektedir (Cansın, 2006). Olay yerinde yapılacak dekontaminasyon işlemleri kazazedelerin çevreyi kontamine etmelerini, ilk yardımda bulunan kişilerin kontamine olmasını sınırlar ve internal kontaminasyonu da engeller. Kontaminasyon tespit edilen olguların dekontaminasyon işlemlerinin hastane içindeki dekontaminasyon ünitelerine sevkinden önce, transport öncesinde ılık ve soğuk alan arasına yerleştirilmiş dekontaminasyon ünitelerinde gerçekleştirilmesi tercih edilmelidir.



Şekil 3. Kazazedenin arındırılması (MEGER, 2011)

Saçların silkelmesi, taranması, kıyafetlerin ve ayakkabıların çıkartılmasının bulaşı %90'dan fazla azalttığı belirtilmiştir. Her dekontaminasyon işlemi sonrasında ölçüm tekrarlanır. Bir önceki doza göre ölçüm sonuçlarında %10'dan fazla azalma sağlanana kadar yıkamaya devam edilmelidir. Açık yaralanmalı olgularda yara yerleri steril serum fizyolojik ile yıkanmalıdır. Dekontaminasyon sırasında açık yaradaki radyonüklid ile kontamine şarapnellerin çıkartılmasından kaçınılmalıdır. Kontamine şarapnellerin olduğu açık yaralar tıbbi usüle uygun olarak yıkanır, kapatılır, zırhlanır ve normal dekontaminasyon prosedürü sonrasında hasta sağlık kuruluşuna transfer edilir. Dekontaminasyon işleminde sıcak sudan, sürterek temizlemekten kaçınılmalıdır. Çünkü sürterek yapılan arındırma ve yıkama işlemleri derideki stratum korneum katmanları arasına radyoaktif maddenin girmesine ve maruziyet dozunda artışa neden olabilir. Hafif yüksek doz ölçülen kişilere evlerinde günlük duş almaları ile iç çamaşır ve kıyafetlerini günlük olarak değiştirmeleri önerilebilir (Ayan ve Dönmez, 2018).

### 5.3. Acil sağlık ekiplerinin sorumlulukları

Acil sağlık ekipleri soğuk alanda görev yaparlar. Acil sağlık ekiplerinin sorumlulukları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ayan ve Dönmez, 2018):

- İtfaiye ekipleri tarafından sıcak alandan çıkarılmış olan mağdurlara acil tıbbi müdahalenin başlatılması,
- Olay yerinde bulunan radyasyona ya da diğer nedenlere bağlı gelişmiş olan yaralanmalara müdahale,
- Tıbbi nakil ve transport sağlanacak hastaneler ile koordinasyonu sağlamak,
- Ölümlerin olması durumunda geçici bir morg alanı oluşturmak,
- Radyasyona maruz kalma durumunda koruyucu tıbbi tedaviyi sağlamak,
- Radyasyon yaralanmalarında semptomatik tedaviye başlamak

Olay yerinde müdahale edecek sağlık ekipleri kontaminasyonu önlemek için bazı kişisel koruyucu ekipmanları kullanmalıdır. Bunlar; sert koruyucu kask, tüm yüzü kaplayan pozitif basınçlı filtreli yüz maskeleri, kimyasallara dirençli eldiven ve botlar, tüm vücudu örten kimyasallara ve buhara dirençli elbiseler ve kişisel dozimetri (Karaçalıoğlu, 2017) (Şekil 3).



## 6. Radyolojik ve Nükleer Maruziyetlerde Tıbbi Yaklaşım

### 6.1. Ekipman ve malzemeler

Yaralılara yönelik dekontaminasyon için tedavi alanı belirlenmeli ve mümkünse acil servis faaliyetinin ana akışından uzakta, acil servis girişinin yakınında bir alana kurulmalıdır. Dekontaminasyon odaları gereksiz malzeme veya ekipmandan arındırılmalı ve olası kontaminasyonu en aza indirmek için kullanılmayan sabit ekipmanların üzeri kapatılmalıdır. Bazı hastaneler radyoaktif olarak kontamine olmuş hastaları kabul edecek şekilde düzenlenmiştir ve acil durumlara hızlı bir şekilde odaları veya ameliyathaneleri hazırlanmak için protokoller geliştirmiştir (Rump vd., 2018). Radyasyon tespit cihazları, özellikle Geiger- Müller (GM) sayacı ve film termoluminesans dozimetri veya cep dozimetreleri bulundurulmalıdır. Hasta tedavisiyle ilgilenen personel için ameliyathane kıyafetleri olmalıdır. Zemin bantlanmış kaymaz plastik tabakalarla kaplanmalıdır. Radyolojik numune alma ekipmanı olmalı ve Radyolojik dekontaminasyon malzemeleri bulundurulmalıdır. Su için atık kapları (variller), dekontaminasyon atıkları ve giysiler için yüzlerce büyük plastik torba olmalıdır. Kazazedelerden herhangi bir metal parçasını veya şarapneli çıkarmak için forseps kullanılmalı ve bunlar hasta ve personelden uzakta, korumalı bir kab içine konmalıdır.

### 6.2. Dekontaminasyon Ekibi Elbisesi

Dekontaminasyon ekibi evrensel önlemleri içeren prosedürlere sıkı bir şekilde uymalıdır. Bere, maske, göz koruması, önlük, eldiven ve galoş dahil bariyer kıyafetleri giyilir. Tüm dikişler ve manşetler maskeleme bandıyla sabitlenmelidir. İdeal olarak yaka seviyesinde bir dozimetre takılmalıdır. Eksiksiz bir cerrahi önlük ideal olarak, kontamine olmuş hastaları yıkamada kullanılmak üzere plastik bir önlük ve çapraz kontaminasyonu önlemek için iç eldivenlerin ameliyat giysisine bantlandığı çift eldivenleri içerir, çünkü eldiven değişiklikleri gerekli olabilir (Flynn ve Goans, 2006).

### 6.3. Radyasyon Etkisine Bağlı Triyaj

Radyasyon maruziyetlerinde hem dekontaminasyon hem de olguların tıbbi tedavi alma önceliğinin belirlendiği dinamik bir süreçtir. Olay alanında genellikle fiziksel hasar durumuna göre basit triyaj ve hızlı tedavi, pediatrik hastalar için basit triyaj ve hızlı tedavi ve özellikle askeri alanda uygulanan DIME (delayed, immediate, minimal, expectant) sınıflamaları kullanılabilir. Triyajda amaç en çok sayıda hastaya en iyi yardımı sağlamaktır. Bu nedenle her türlü müdahaleye rağmen kaybedileceği bilinenler bekletilebilir.

REAC/TS (Radiation Emergency Assistance Center/Training Site), radyasyona maruz kalmanın ciddiyetine bağlı olarak hastane bakım grupları olarak listelenen dört temel tedavi kategorisini kullanır. Dört kategori hafif (2 Gy), orta (2-5 Gy), şiddetli (5-10 Gy) ve ölümcül (10 Gy) maruziyettir. Hafif bir radyasyon dozu almış olanlar, acil tedavi olmaksızın hayatta kalmaları beklendiğinden, minimal tedavi kategorisinde değerlendirilebilir. Ölümcül bir radyasyon dozu almış olanlara palyatif bakım sağlanmalıdır. Orta (2-5 Gy) ve şiddetli (5-10 Gy) gruplardaki mağdurların tedavisi için klinik kaynaklara öncelik verilir (Ayan ve Dönmez, 2018).

#### 6.4. Eksternal Dekontaminasyon

GM sayacı harici dekontaminasyonda kullanılır. Giysilerin çıkarılması tek başına harici radyoaktif kirlenmeyi %90 oranında azaltabilir. Sabun ve ılık veya oda sıcaklığında suyla yıkamak etkilidir ve kirliliğin diğer %90'ını giderir. Sabun çoğu kirleticiyi elimine eder ve çözer. Yapılan çalışmalar, sabunun tek başına yetersiz kaldığı durumlarda, sabunun yanı sıra şampuanın da cilt dekontaminasyonunda etkili olabileceğini göstermiştir. Bazı durumlarda povidon-iyot, sağlam cilt üzerinde antiseptik mikrop öldürücü olarak kullanılabilir. Yaralar ve vücut delikleri genellikle ilk önce dekontamine edilir. Yaralar salinle yıkanmalıdır. Yanıklar suyla nazikçe durulanmalı ve kalıntılardan arındırılmalıdır. Bazı hastalarda metal parçalar (şarapnel) gömülü olabilir. Metalik şarapnel çıkarıldığında radyoaktivite açısından değerlendirilmeli ve güvenli bir yere konulmalıdır. Potansiyel olarak radyoaktif parçalar eldivenli ellerle değil, forsepsle tutulmalıdır. Kirlenmiş atık su herhangi bir sınırlama olmaksızın kanalizasyona bırakılabilir. Saçlar herhangi bir ticari şampuanla arındırılabilir. Uygunsa saçın kesilmesi kirletici maddeleri temizleyebilir. El ve ayak tırnakları kontrol edilmeli, gerekiyorsa kesilmelidir (Flynn ve Goans, 2006).

Her cilt ve yara dekontaminasyonundan sonra hasta, dekontaminasyonun etkinliğini belirlemek için bir GM sayacıyla kontaminasyon seviyesi bir kez daha kontrol edilmelidir.

#### 6.5. İnternal Dekontaminasyon ve Dekorporasyon

Radyonüklidler vücuda alındıklarında kimyasal yapılarına bağlı olarak farklı doku ve organlarda birikirler. Vücuttan elimine edilmeleri efektif yarı ömre bağlıdır. Etkin yarılanma ömrü, günler, aylar hatta yıllar sürebilir. Örneğin Plütonyum-239'un yarı ömrü 50 yıldır. Radyonüklidler bu özelliklerinden dolayı iç ışınlamaya neden olurlar. 37kBq (1 $\mu$ Ci) plütonyum-239'un yarayı kontamine ettiği ve tedavi olmaksızın 823mSv'lik bir radyolojik doza yol açtığı varsayılmaktadır. Etkin dozun belirlenmesi, tüm vücut sayımı ve idrar

veya dışkıda radyonüklid atılım ölçümleri yoluyla vücuttaki radyoaktivitenin ölçülmesini ve ardından dahili dozimetri hesaplamalarını gerektirir.

Hasta tıbbi olarak stabilize edildikten ve dışarıdan dekontamine edildikten sonra, iç kontaminasyonun en aza indirilmesine odaklanılmalıdır. Emilim azaltılarak, atılım artırılarak veya her ikisi birden yapılarak iç kontaminasyon en aza indirilir. Uygulanacak işlemler arasında; Oral/nazofarengeal aspirasyon, Mide lavajı, Gastrointestinal geçiş süresini azaltmak için magnezyum sülfat gibi laksatiflerin kullanımı, emilimi azaltmak için antasitlerin (örneğin alüminyum hidroksit) kullanımı, intravenöz hidrasyon ve/veya diüretiklerin verilmesi, kusmayı sağlayan kusturucuların uygulanması, bloke edici veya seyreltici maddelerin (radyoaktif iyodür için potasyum iyodür gibi) verilmesi yer alır. İç maruziyette, tiroid bezi vücudun radyasyondan zarar görmesi muhtemel en hassas organıdır. Tiroidte biriken radyoaktif iyot, tiroit kanseri gibi geç ortaya çıkan sağlık etkilerine neden olabilir. Potasyum iyodür, hedef organ olan tiroid bezinin radyoaktif iyot alımını önleyen, böylece radyoaktif iyotun idrarla atılmasını sağlayan bloke edici bir maddedir. Tedavi özellikle çocuklar ve hamile veya emziren kadınlar için önemlidir. Radyasyon maruziyetinde kriz yönetim merkezi ilgili uzmanlara danışarak iyot kullanım dozunu belirlemelidir. Önerilen günlük potasyum iyodür dozları yetişkinler için (hamile veya emziren kadınlar dahil) 130 mg, 4-17 yaş arası çocuklar için 65 mg, 1-36 ay arası çocuklar için 32 mg ve 1 aydan küçük bebekler için 16 mg'dır (Rump vd., 2018; Flynn ve Goans, 2006).

Nükleer ve radyolojik olaylarda antidot olarak potasyum iyodür dışında Granülosit koloni uyarıcı faktör (G-CSF), dietilentriaminpentaasetik asit ((Ca)DTPA ve (Zn)DTPA) ile Prusya mavisini (ferrik heksaziyanoferat) mevcuttur. Kanda ya da hücre dışında (Ca)DTPA, daha az sıkı bağlı olan kalsiyum iyonunu, aralarında plütonyum-239 ve amerikyum-241'in de bulunduğu birçok metal radyonüklid ile değiştirir ve böbreklerden atılımını hızlandırır. (Ca)DTPA genellikle intravenöz olarak enjekte edilir ve aynı zamanda inhalasyon yoluyla da uygulanabilir. Ağız yoluyla uygulanan Prusya mavisini, safra yoluyla salgılanan sezyum-137'yi bağırsağa bağlayarak kana yeniden emilmesini önler ve dışkı yoluyla atılımını artırır. Bazı ülkelerde, DMPS (2, 3-Dimerkapto-1-propansülfonik asit) veya DMSA (dimerkaptosüksinik asit) gibi sülfhidril grupları da gerekli olduğunda kullanımı düşünülmektedir. Bunlar etkinliği şüpheli olmasına rağmen polonyum-210 kontaminasyonunu tedavi etmek için kullanılır. Ancak tedaviye ne zaman başlanacağı konusunda fikir birliği yoktur. "İhtiyatlı yaklaşıma" göre, dahili dozimetri sonuçları beklenmeli ve dekontaminasyon tedavisi ancak ilgili etkin dozun doğrulanması durumunda başlatılmalıdır (> 20 mSv veya > 200 mSv) (Rump vd., 2018).

## 6.6. ARS Tedavisi

Yüksek doz radyasyon maruziyetinde ilk 72 saat boyunca tedavinin başlangıç aşaması, travma ve yanıkların tedavisine, dış dekontaminasyona ve uygun olduğunda potasyum iyodürün başlatılmasına yöneliktir. Kazazedeye müdahalede bulunan bölümler sadece radyasyonla uğraşan klinikler değil, hastanın ihtiyacına göre genel cerrahi, hematoloji, intaniye, ortopedi, plastik cerrahi ve yoğun bakım üniteleri olmalıdır. Hastaların önce tıbbi anlamda stabil hale gelmeleri sağlanmalı, klinik bulgular, maruz kalınan doz miktarı, radyonüklid cinsi ve internal kirlenmenin olup olmadığı dikkate alınmak suretiyle radyasyon yaralanmaları değerlendirilmelidir. Radyasyona maruz kalmış hastanın tedavisi; maruz kalınan radyasyon cinsine (gama, nötron), radyonüklid tipine (sezyum, plütonyum, vs), maruziyet dozu ve düzeyine (tam veya kısmi vücut), maruz kalma şekline (iç ya da dış), eş zamanlı travma veya yanıkların olup olmamasına göre değişebilir (Gale ve Armitage, 2021; Ayan ve Dönmez, 2018). Ciddi kombine yaralanmalarda prognoz, radyasyon olmadan aynı derecede konvansiyonel yaralanmaya göre çok daha kötü seyredir. Travma hastaları için “altın saat” travmadan sonraki ilk 1-2 saattir. Kaza nedeniyle şok geçiren veya şoka girmeye çok yakın olan hastalar eğer bu altın saat içinde tedavi edilmezlerse ölebilirler. ARS’de alınan doza bağlı olarak tedavi deri, hematopoietik sistem, sindirim sistemi ve serebrovasküler sisteme yöneliktir (Flynn ve Goans, 2006).

### 6.6.1. Hematopoetik hasar tedavisi

Kazazedelerin ilk değerlendirilmesinde, öncelikli olarak tam kan sayımı yaptırılmalı ve aynı gün içerisinde tam kan sayımı 4-6 saat aralıklarla tekrarlanmalıdır. Hem travma sonrası erken dönemde hem de daha sonra hematopoietik radyasyon hasarının ortaya çıkması sırasında, endikasyon varsa kan ürünleri agresif bir şekilde kullanılmalıdır. Olay anından sonraki 24 saat içinde miyeloid sitokinlerin (granülosit koloni stimülan faktör) uygulanması önem taşır. Radyasyona maruz kaldıktan sonraki 2-4 haftalık dönemde, radyasyonun gecikmiş miyelosupresif etkileri görülürse daha fazla transfüzyon gerekebilir. İmmün sistemi baskılanmış hastada transfüzyonla ilişkili graft-versus-host hastalığı riskini azaltmak için mümkünse kan ürünleri yaklaşık 25 Gy’lik bir doz verilerek ışınlanmalıdır, değilse ışınlanmamış olarak da kullanılabilir (Ortatatlı vd., 2015; Flynn ve Goans, 2006).

Olaydan 24 saat sonra lenfosit sayısı normalin %10’u ise, tedaviye rağmen ölümcüldür. Lenfosit sayımı %90’ın üzerindeyse tedavi olmasa da bu vakalarda ölüm beklenmez (Ayan ve Dönmez, 2018). Nötropenik vakalarda destek tedavisi olarak hematopoietik büyüme faktörleri, kan ürünleri ve antibiyotikler verilir.

### 6.6.2. Gastrointestinal hasar tedavisi

Gastrointestinal sendrom 5-6 Gy doza maruziyetten 5-6 gün sonra gelişebilir ve agresif tedaviye gereksinim duyar. Bulantı-kusma ve ishal genellikle semptomatik olarak ve sıvı replasmanı ile tedavi edilir. Alınan doz miktarı ile kusma sıklığı lineer bir uyum gösterir. Maruziyetten sonra 1-2 saat içinde kusma varsa tüm vücut etkin radyasyon dozu en az 3 Gy'dir. Eğer 1 saatten önce kusma mevcutsa 4 Gy'in üzerinde doz maruziyeti söz konusudur. Kusma için proklorperazin, granisetron ve ondansetron gibi ilaçlar uygulanır. Kusma genellikle 48 saat içinde kaybolur ve uzun süreli antiemetik tedavi ihtiyacı ortadan kalkar. Diyare için loperamid ve difenoksilat hidroklorür ile atropin sülfat gibi ilaçlar verilir (Gale ve Baranov, 2011; Flynn ve Goans, 2006).

### 6.6.3. Kardiyovasküler ve Merkezi Sinir Sistemi Hasar Tedavisi

Çok yüksek dozda akut radyasyona maruz kalmanın ciddi sonuçlarına yönelik etkili bir tıbbi müdahale yoktur. Sedasyon ve kardiyovasküler destek verilmesine rağmen çoğu mağdur maruziyetten hemen sonra ölür. Nörovasküler sendrom 10 Gy'lik dozlarda ortaya çıkar ve genel olarak ölümcüldür. Vakaların konforu için palyatif ve semptomatik tedavi uygulanmalıdır (Gale ve Baranov, 2011).

### 6.6.4. Kemik İliği Tedavisi

Kemik iliği 1-2 Gy'i aşan dozlarda radyasyona maruz kalırsa kemik iliği baskılanması meydana gelir. Yaklaşık 5 Gy'lik tüm vücut dozuna maruz kalan vakaların yarısı tıbbi müdahale olmadan ölür. Böyle bir maruziyette kan hücrelerinin yenilenmesi ve enfeksiyonların kontrolü önemlidir. Bazen çok az sayıda kemik iliği hücresi radyasyona maruz kaldığında müdahale olmadan iyileşmenin gerçekleşmesi için gereken süre çok uzun olabilir. Fakat kemik iliği 8-10 Gy'in üzerinde ışınlanırsa kemik iliği transplantasyonu gerekebilir (Gale ve Baranov, 2011).

### 6.6.5. Enfeksiyon ve Cilt Tedavisi

Nötropenik hastalarda enfeksiyonun kontrol edilmesi önemli bir faktördür. Enfeksiyonlar, radyasyona bağlı kemik iliği aplazisi ve lenfosit azlığına bağlı immünoşüpresif etkiler nedeniyle radyasyon maruziyetinde önemli bir ölüm nedenidir. (Flynn ve Goans, 2006).

Yaralar ve vücut delikleri önce dekontamine edilir. Yaralar salinle yıkandıktan sonra topikal antibiyotikler ve gerekirse sistemik antibiyotikler

kullanılır. Yara, yapışmayan pansumanlarla kapatılmalı ve ağrı kontrolü de sağlanmalıdır (Gale ve Baranov, 2011).

### 6.7. Kazazedeye Psikolojik Destek

Atom bombası, Çernobil ve Fukushima Daiichi nükleer santral kazaları vakalarında, insanlar uzun vadeli psikolojik yüklerle maruz kaldılar. Bu psikolojik yükler, yüksek radyasyon maruzitetinden sonra toplumdaki hekimlerden ne beklenebileceği sorusunu gündeme getirmektedir. Çernobil kazasında ruh sağlığı, engelliliğe, fiziksel hastalıklara ve ölümlere neden olan en büyük halk sağlığı sorunuuydu.

Radyolojik ve Nükleer maruziyetlerde travma sonrası stres bozukluğu, depresyon, anksiyete, psikosomatik hastalıklar, hipokondri meydana gelebilmektedir. Radyasyon maruziyeti sonrası bozulan ruh sağlığı, fiziksel işlevlerin aksamasına, çeşitli hastalıklara ve akabinde sağlığın bozulmasına sebep olabilir. Bu nedenle ruh sağlığı sorunlarına dikkat etmek önemlidir (Ohtsuru vd., 2015).

Fukushima'daki Nükleer Santral kazasından sonra tahliye edilenlere yönelik aktif sosyal yardım hizmeti ve ruh sağlığı müdahale programları başlatılmıştır (Ohba vd., 2021). Radyasyon maruziyetinden sonraki iyileşme döneminde, hekimlerin olaydan etkilenen pek çok bölge sakinine genel fiziksel ve zihinsel sağlık bakımı sağlaması gerekmektedir. Ayrıca radyolojik ve nükleer olaylarda müdahale ekibi arasındaki iletişim, halkın doğru bilgilendirilmesi ve yapılacaklar hakkında hızlı uyarıda bulunulması gibi davranışlar hem ölüm oranını hem de psikolojik hasarı azaltabilir.

## 7. Sonuç

Radyolojik ve nükleer maruziyetler toplum için her zaman büyük bir risk kaynağıdır. Bu nedenle ilgili sivil toplum kuruluşları ve sağlık sektörü çalışanları her zaman hazırlıklı olmalıdır. Afet planının bir parçası olarak telefon numaralarını içeren bir öncelik listesi önceden oluşturulmalı ve ulaşılabilir olmalıdır.

Radyasyon maruziyeti yaşanmadan önce potansiyel tehlikelerin olabileceğinin öngörülmesi ve buna karşı tedbir alınması gerekir. Farklı senaryolar oluşturulup, bu senaryolardaki görev dağılımının önceden belirlenmesi, ihtiyaç duyulan malzemelerin kolay ulaşılabilir bir yerde depolanması, personelin ve halkın eğitilmesi temel tedbirler arasında yer alır. Aksi takdirde yanlış veya eksik organizasyona bağlı kazazede sayısında artış ve daha fazla çevresel hasar meydana gelir.

Olay yeri müdahale ekibinin koordineli bir şekilde zamana karşı mücadele etmesi gerekir. Bu da, önceden hazırlık çalışmaları gerçekleştiren olay yeri yönetim sistemleri ile mümkündür. Bu nedenle her ülke mevcut olay yeri yönetim sistemlerini gözden geçirmeli ve hazırlık çalışmaları tekrarlanmalıdır.

Hekimlerin nükleer ve radyolojik afete müdahale konusunda eğitim alması gerekir. Tıp fakültelerindeki hekim adaylarına Nükleer Tıp ve Radyasyon Onkolojisi uzmanları tarafından nükleer afetler ve radyasyon hastalıkları konusunda teorik bilgiler daha fazla verilmelidir. Gelecekteki nükleer ve radyolojik felakete hazırlanmak ve hasarı en aza indirmek için öğrenme süreci gereklidir.

Yüksek doz radyasyon maruziyeti ile başa çıkmak, politika kararları, hekimlerin, müdahale ekibinin ve halkın eğitimi, önleme ve tıbbi yaklaşım planları çeşitli stratejiler gerektirir. Önleme en etkili stratejidir.

## Kaynakça

- Ayan, A., Dönmez, S. (2018). Radyolojik Nükleer Kaza ve Terör Olaylarında Tıbbi Yönetim. *Ankara Eğt. Arş. Hast. Dergisi*, 51(2), 154-162.
- Cansın, A. (2006). Nükleer silahlar ve radyasyon. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 63(1), 139-144.
- Ekşi, A. (2017). Nükleer Kazalarda Olay Yeri Yönetimi. *Hastane Öncesi Dergisi*, 2(1), 51-62.
- Flynn, D. F., Goans, R. E. (2006). Nuclear terrorism: triage and medical management of radiation and combined-injury casualties. *Surgical Clinics*, 86(3), 601-636.
- Gale, R. P., Armitage, J. O. (2021). Use of molecularly-cloned haematopoietic growth factors in persons exposed to acute high-dose, high-dose rate whole-body ionizing radiations. *Blood Reviews*, 45, 100690.
- Gale, R. P., Armitage, J. O. (2018). Are we prepared for nuclear terrorism? *New England Journal of Medicine*, 378(13), 1246-1254.
- Gale, R. P., Armitage, J. O., Hashmi, S. K. (2021). Emergency response to radiological and nuclear accidents and incidents. *British journal of haematology*, 192(6), 968-972.
- Gale, R. P., Baranov, A. (2011). If the unlikely becomes likely: medical response to nuclear accidents. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 67(2), 10-18.
- Ince, S. (2017). Acute Local Radiation Injury and Treatment Methods/Akut Lokal Radyasyon Hasari ve Tedavisi. In *Nuclear Medicine Seminars* (Vol. 3, No. 3, pp. 201-207). Galenos Yayınevi Tic. Ltd.
- Karaçalıoğlu, A. Ö. (2017). Nükleer-Radyolojik Acillerde Tıbbi Triyaj. *Nükleer Tıp Seminerleri Dergisi*, 196-201.
- MEGEP, 2011. KİMYASAL BİYOLOJİK RADYASYON VE NÜKLEER (KBRN) TEHLİKELERDE ACİL YARDIM 725TTT154https://megep.meb.gov.tr/mte\_program\_modul/moduller\_pdf/Kimyasal,%20Biyolojik,%20Radyasyon%20Ve%20N%C3%BCkleer%20(kbrn)%20Tehlikelerde%20Acil%20Yard%C4%B1m.pdf
- Ohba, T., Tanigawa, K., Liutsko, L. (2021). Evacuation after a nuclear accident: Critical reviews of past nuclear accidents and proposal for future planning. *Environment international*, 148, 106379.
- Ohtsuru, A., Tanigawa, K., Kumagai, A., Niwa, O., Takamura, N., Midorikawa, S., ... & Clarke, M. (2015). Nuclear disasters and health: lessons learned, challenges, and proposals. *The Lancet*, 386(9992), 489-497.
- Ortatatlı, M., Sezigen, S., Ayan, H. A., Balandız, H., Kenar, L. (2015). Terörizm kapsamında kimyasal, biyolojik, nükleer ve radyasyona bağlı yaralanmaların değerlendirilmesi. *Türkiye Klinikleri J Foren Med Special Topics*, 1(2), 44-52.



Rump, A., Becker, B., Eder, S., Lamkowski, A., Abend, M., Port, M. (2018). Medical management of victims contaminated with radionuclides after a “dirty bomb” attack. *Military medical research*, 5(1), 1-10.

SBÜ, 2022. Sağlık Bilimleri Üniversitesi. KBRN Eğitim ve Simülasyon Merkezi <https://www.sbu.edu.tr/tr/haber/eG69iV-sbu-kbrn-egitim-ve-simulasyon-merkezi-acildi>

## Medikal Görüntü İşleme

Merve Kayar<sup>1</sup>

### Özet

Bilgisayar tabanlı sistemlerin yaygınlaşmasıyla daha çok kullanılmaya başlanılan görüntü işleme teknolojisi, çağımızdaki teknolojik gelişmelerin en önemli alanlarından biridir. Sağlık enformatiği de, bilgisayarların yaygın kullanılmasıyla ortaya çıkan bilim dallarından biridir. Bu bilim dalı, tıbbi görüntülemenin ortaya çıkmasını ve gelişmesini sağlamıştır. Yine insanlık tarihinin en büyük gelişmelerinden biri olan X-ışınlarının keşfi de tıbbi görüntülemeyi mümkün kılmıştır. Bu iki teknolojinin gelişmesi hastalıkların tanı ve tedavisinde büyük ilerlemeler kaydedilmesine sağlamış ve tıbbi görüntüleme, sağlık sektöründe en çok başvurulan yöntem olmuştur. Bu alanın gelişmesi ile birlikte tıbbi görüntüler için depolama alanlarına ihtiyaç duyulmuştur. Birçok alandan kullanılan bulut sistemli depolama teknolojisi sağlık sektöründe de yerini almıştır. Bulut tabanlı büyük veri depolama sistemlerinde saklanan bu görüntüler kullanılarak bilgisayar destekli tanı için çeşitli yazılımlar üretilmekte ve hekimlerin karar verme süreçlerine destek sağlanmaktadır. Görüntü işleme teknolojisi sayesinde, görüntülerin elde edilmesi, saklanması, iyileştirilmesi ve nihayet analizine kadar uzun bir süreç bilgisayar destekli sistemler yardımıyla kısalmış ve kolaylaşmıştır. Bilgisayarlı tomografi, manyetik rezonans görüntüleme ve nükleer tıp gibi yöntemlerle elde edilen görüntüler, görüntü işleme teknikleri ile, görüntülerin kalitesini artırmak ve anlamını çıkarmak gibi bir dizi işlemde oluşmaktadır. Bu adımlar genellikle düşük, orta ve yüksek seviyeli işlemler olarak gruplandırılabilir. Düşük seviyeli işlemleri, görüntü alımı ve temel işlemleri yapmak olarak tanımlanırken; orta ve yüksek seviyeli işlemleri ise daha karmaşık analizler ve özellik çıkarımıyla tanımlanır. Günümüzde bilgisayarlı görüş sistemlerinde de sıklıkla kullanılan bir teknoloji olan görüntü işleme, özellikle yapay zeka ve derin öğrenme gibi alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Kullanılan tüm teknikler, derin öğrenme alanlarında yapılan çalışmalarda, görüntülerden anlamlı bilgiler çıkarmak ve bu bilgileri kullanarak karar vermeyi sağlamak için oldukça önemlidir.

Sonuç olarak görüntü işleme, özellikle sağlık sektöründe, hastalıkların teşhis ve tedavisinin daha etkili bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

1 Orcid No:0000-0002-6066-9414

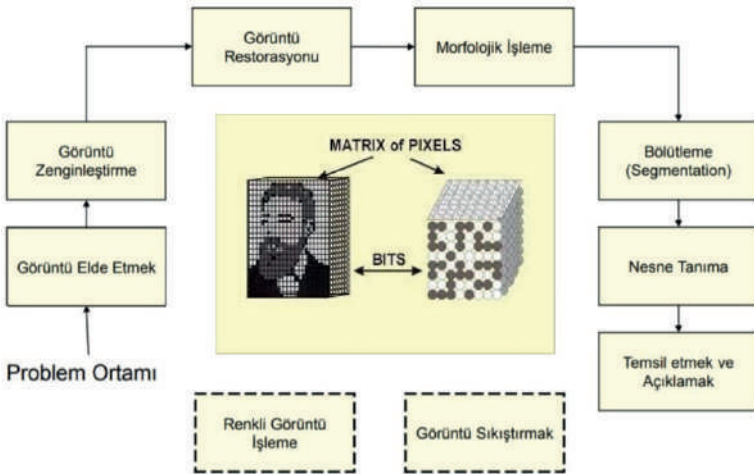
## 1. GİRİŞ

Görüntü işleme teknolojilerindeki ilerlemeler sağlık hizmetlerinin birçok yönünü etkilenmektedir. Örneğin yapay zeka destekli algoritmalar, hastalıkların erken teşhis ve tedavisinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknolojiler, büyük miktarda veriyi hızlı bir şekilde analiz etmekte ve bu sayede doktorlara daha doğru teşhisler koyma ve tedavi önerilerinde bulunma imkanı sağlamaktadır. Bununla beraber bu ilerlemelerin, tıbbi verilerin güvenliği ve gizliliği gibi konularda getirdiği bazı zorluklar da vardır. Tıbbi görüntülerin elektronik ortamdaki güvenliği ve yetkisiz erişimlere karşı önlemler oldukça önemlidir (Kumar vd, 2014; Zikos vd, 1997).

Görüntü işleme teknolojilerindeki gelişmeler, ileride doktorların daha hızlı tanı koymasını ve hastaların daha iyi hizmet almasını sağlayarak sağlık sektörünün gelişmesine imkan tanıyacaktır. Bu alandaki araştırmalar ve gelişmeler için teşvik etmek önemlidir.

## 2. GÖRÜNTÜ İŞLEME

Görüntü işleme, görüntünün elde edilışinden başlayarak anlamlı bilgiye ulaşılmasına kadar bir dizi aşamayı içerir. Bu süreçler, farklı işlemleri ayrı ayrı veya birlikte kullanarak gerçekleştirilir. Bilgisayarlar aracılığıyla gerçekleştirilen işlemler, sinyal işlemeyi, matematik ve istatistik yöntemlerini içerir; bu da sayısal görüntü işlemenin önemini ortaya çıkarır.



Şekil 1. Görüntü İşleme Aşamaları

Görüntü işleme genel olarak düşük, orta ve yüksek seviye olarak gruplandırılabilir. Genellikle, görüntü alımından sonra başlayan düşük seviyeli işlemler çeşitli adımlar içerir ve görüntünün kalitesini artırmayı amaçlar. Görüntünün keskinleştirilmesi, gürültünün azaltılması, kontrastın artırılması gibi işlemler düşük seviyeli işlemlere örnek olarak verilebilir.

Orta seviyede yer alan işlemler, görüntüde bulunan özelliklerin veya bölgelerin çıkarılmasıdır. Bu noktada, dokular, kemikler ve tümörler gibi belirli yapıların tanımlanması gibi daha karmaşık işlemler yer alır.

Yüksek seviyeli işlemler, daha yüksek oranda bilgi elde edilmesini içermektedir. Genellikle makine öğrenimi ve derin öğrenme gibi yapay zeka teknikleri olan algoritmalar kullanılarak gerçekleştirir. Literatür göz önüne alındığında (Zhang, 2017; C. Russ ve Russ, 2008; Dougherty, 2009) görüntü işleme aşağıda yazılı başlıklardan oluşmaktadır:

- Görüntü elde etme
- Görüntü filtreleme
- Görüntü restorasyonu
- Görüntü dönüşümleri
- Morfolojik İşlemler

### 2.1. Segmantasyon (Bölütleme) Görüntü Elde Etme

Kaya (2020) ve Tuncel (2014) tarafından belirtildiği gibi, tıbbi görüntü elde etmek için en sık kullanılan teknikler arasında elektromanyetik dalgalar (örneğin görünür ışık dalga boyu, x-ışınları, gamma) vardır. Elde edilen görüntüler, tipik olarak DICOM (tıpta dijital görüntüleme ve iletişim) formatında depolama cihazlarına kaydedilmektedir.

### 2.2. Görüntü Filtreleme

Tıbbi tanı ve tedavide görüntünün kalitesi hayati bir rol oynamaktadır. Ancak, alınan görüntünün kalitesi, cihaz ve hastanın özellikleri gibi bir dizi faktöre bağlı olduğu için değişiklik gösterebilir. Görüntüleme cihazının enerji seviyesi ve yoğunluğu da görüntünün kalitesini belirleyen önemli faktörler arasında yer alır. Doku gibi incelenen bir anatomik yapıdan elde edilen görüntünün kalitesi; çözünürlük, kontrast, kenar keskinliği, artefaktlar ve gürültü bileşenleri ile değerlendirilir. Görüntünün kalitesinin düşük olması, bu değerlendirme sürecinde, doğru tanı konulmasını ve istenen özelliklerin belirlenmesini zorlaştırabilir. Tam bu noktada, görüntü kalitesini geliştirmek için kullanılan görüntü ve sinyal işleme teknikleri önemli bir role sahiptir.

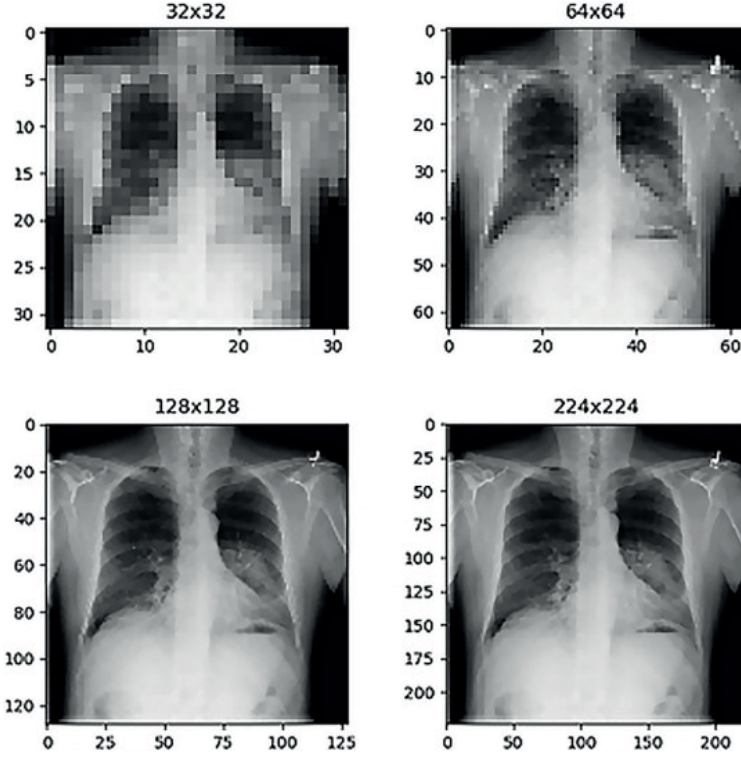
Bu yöntemler, görüntüyü bozan etkenleri düzeltir, kaliteyi optimize eder ve tanısal doğruluğu artırmayı sağlar (Bulakbaşı, 2020; Ulzheimer ve Raupach, 2014).

Görüntü iyileştirme teknikleri, kullanılan görüntüleme teknolojisi için değişebilir. Örneğin bir iyileştirme tekniği ultrason veya BT elde edilen görüntü üzerinde işe yararken, MR görüntülerinde aynı doğruluk oranını vermeyebilir. Bu sebeple, hangi tekniklerin hangi görüntüleme teknolojileri için verimli olduğunu tespit etmek önemlidir. Çözünürlük artırma, kontrast düzeltme ve filtre kullanımı, tıbbi görüntüleme alanında sıkça kullanılan teknikler arasında yer almaktadır. Örneğin, bir beyindeki bir doku görüntüsünün detaylarını daha net bir şekilde görebilmek için çözünürlük artırılabilir, bu sayede tanısal doğruluk da artabilir. Yine beyindeki farklı dokular arasındaki kontrastı artırarak, belirli yapıların daha kolay ayırt edilmesini sağlanabilir; dokudaki görüntü kalitesini artırmak için filtre kullanılabilir ve bu şekilde görüntüdeki gürültü azaltılabilir (Bulakbaşı, 2020; Ulzheimer ve Raupach, 2014).

Görüntüleme teknolojisi ve görüntü iyileştirme teknikleri, tıbbi görüntülemenin temel unsurlarıdır. Bu alanda konulan doğru tanı ile tedavi süreçlerindeki başarı büyük ölçüde artabilir. Bu tekniklerin geliştirilmesi ve uygulanması, günümüz tıbbi için önemli bir araştırma ve geliştirme alanı olarak devam etmektedir.

### **2.2.1. Çözünürlük (Resolution) Arttırma**

Görüntünün çözünürlüğü, görüntü detaylarının keskinliği ve netliği üzerinde önemlidir. Çözünürlük kavramı, bir görüntünün içerdiği nokta sayısını ve en küçük yapıları ayırt edebilme yeteneğini ifade eder. Dijital cihazlar başta olmak üzere çözünürlük, kullanılan cihazın teknik yetenekleriyle direkt olarak ilişkilidir. Ürünlerinin çözünürlük değerleri, üretici firmalar tarafından belirtilir ve bu değerler, cihazın kalitesi, işlevi ve performansı hakkında önemli bir öneme sahiptir. Günümüzde görüntü çözünürlüğünü artırmak için çeşitli teknikler ve yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler ile daha keskin görüntüler elde edilir ve çözünürlüğün artması sağlanır. Örneğin süper çözünürlük, görüntü kalitesini artırmak için kullanılan özel algoritmalarından biridir. Görüntü kalitesi, eksik piksellerin hesaplanması için mevcut piksel bilgileri kullanılarak artırılabilir (Jiang vd. 2018; Liu vd. 2019; Luong, 2009).



*Şekil 2. Farklı görüntü çözünürlüklerindeki göğüs radyograflerinin karşılaştırılması. Kütle bulgusu tüm görüntülerde görülebilmektedir ancak daha yüksek çözünürlüklü örneklerde (alt sıra) görsel olarak gözlemlenebilir geliştirilmiş bir netliğe sahiptir (göğüs kitlesi olan 60 yaşında erkek hasta). (Sabotke ve Spieler, 2020)*

Yaygın bir şekilde kullanılan başka bir yöntem ise dalgacık dönüşümleridir. Görüntüyü farklı frekans bileşenlerine ayırarak daha net bir sonuç elde edilmesini sağlar. Yine görüntünün çözünürlüğünü artırmak için kullanılan sofistike algoritmalar sayesinde, sözlük tabanlı yöntemler görüntü analizi yapar ve daha yüksek çözünürlük elde edilir. (Jiang vd. 2018; Liu vd. 2019; Luong, 2009).

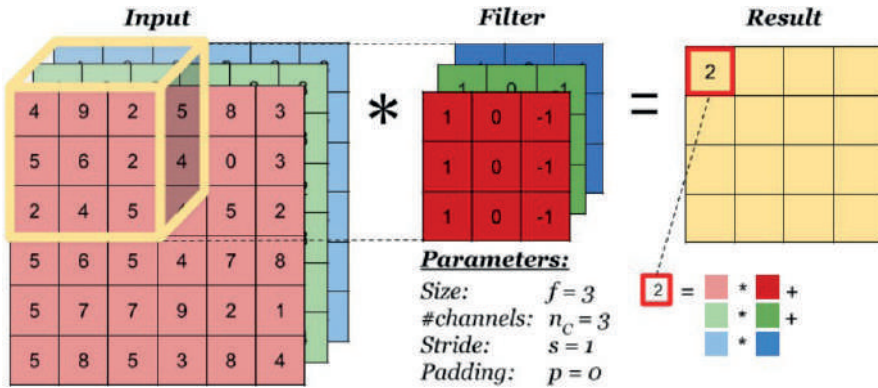
Tüm bu teknikler ile görüntü çözünürlüğünü artırmak, keskin ve detaylı görüntüler elde etmek amaçlanmıştır. Sağlık sektöründe, daha üstün kalitede görüntüler elde edilir ve böylelikle tanı ve tedavi süreci daha hızlı ve kolay bir hal alabilir.

### 2.2.2. Kontrast Düzeltme

Kontrast, tıbbi görüntülerdeki yapılar ile arka plan veya zemin arasındaki gri ton farkı olarak tanımlanır. Farklı dokuların farklı parlaklık düzeylerine sahip olması, tanı sürecinde hayati öneme sahiptir. Doku görüntüsündeki farklılığın net bir şekilde anlaşılması hastalıkların teşhis ve tedavisini daha doğru bir hale getirir. Bu sebeple görüntünün elde edildiği cihaz da oldukça önemlidir. Bu noktada uzman hekimler, genellikle hastanın ihtiyaç ve durumuna bağlı olarak en uygun görüntüleme yöntemini seçerler. Örneğin kemik dokusu detaylı bir şekilde incelenmek için geleneksel bilgisayarlı tomografi (BT) kullanılırken; daha yüksek çözünürlük gerektiren durumlar için radyografi tercih edilebilir. Her iki durumda da kullanılabilen kontrastın yeterli olmaması durumunda ise kontrast iyileştirme yapılabilir. Görüntülerin netliğini artırmak, dokular arasındaki farkı daha anlaşılır kılmak ve tanısal doğruluğu artırmak için önemlidir (Zhang, 2017; Tuncel, 2014).

### 2.2.3. Filtreleme

Görüntü işleme sürecinde, resimdeki yüksek frekansları azaltmak veya düşük frekansları vurgulamak için genellikle filtreler kullanılır. Filtreler sayesinde düzleştirme veya kenar belirginleştirme işlemleri gerçekleştirilir. Örneğin Santhosh vd. (2021) tarafından yayınlanan makalede belirtildiği gibi, bu yöntem sıkça kullanılan bir tekniktir; görüntünün kalitesini artırmak ve belirli özelliklerini daha belirgin hale getirmeyi sağlar.



Şekil 3. Görüntü Filtreleme İşlemi

#### 2.2.4. Morfolojik İşlemler

Morfoloji, görüntülerin şekilsel özelliklerini analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir ve temeli kümeler teorisine dayanmaktadır. Özellikle medikal görüntüleme, yüzey tanıma ve endüstriyel kalite kontrol gibi alanlarda sıkça kullanılır. Morfolojik operasyonlar, genellikle aşındırma ve genişletme yöntemlerini içerir. Belirli bir yapısal elemana bağlı olarak nesnelerin boyutunu küçülten işlem aşındırma olarak adlandırılırken; nesnenin alanını artırma işlemi genişletmedir. Bu işlemler görüntüdeki detayları iyileştirmek, nesnelere tanımlamak ve arka planı temizlemek gibi birçok uygulama için önemlidir. Yine bu teknikler güçlü araçlar sunarak görüntülerin şekil ve yapısal özelliklerini belirlemede temel bir rol oynar ve bu nedenle bilgisayarlı görü analizinde önemli bir rolü vardır (Dougherty, 2009).

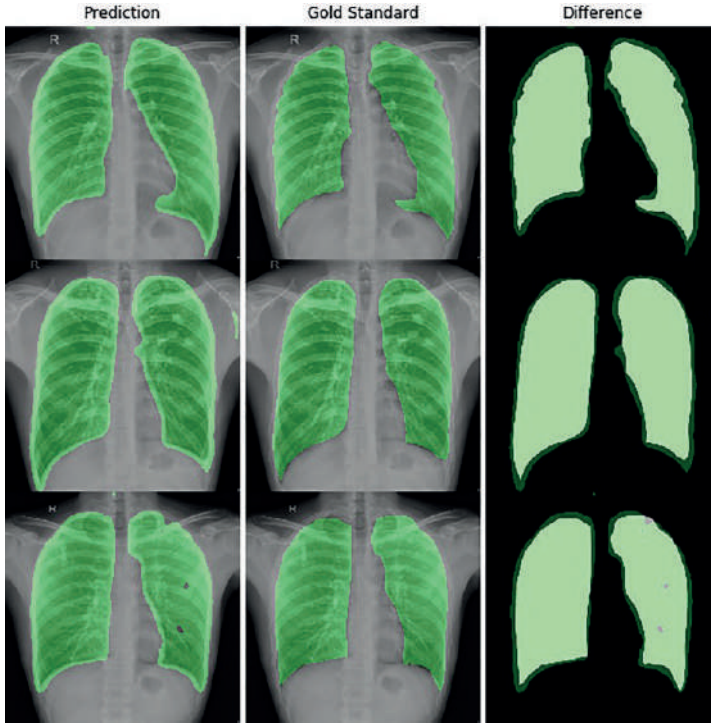
#### 2.2.5. Segmentasyon (Görüntü Bölütleme)

Görüntü segmentasyonu, görüntü analizi alanında karmaşık bir süreç olmasıyla beraber, görüntülerdeki yapıları tanımlamak için önemli bir işlemdir. Segmentasyon genel hatlarıyla, görüntüyü anlamlı ve tutarlı bölgelere ayırma işlemidir ve görüntülerdeki anatomik yapıları veya diğer özellikleri daha iyi analiz etmek için kullanılır. Medikal görüntüdeki dokuların veya lezyonların doğru bir şekilde tanımlanması ve sınıflandırılması gereklidir, bu nedenle segmentasyon tıbbi teşhis ve tedavi sürecinde büyük öneme sahiptir (Ronneberger vd., 2015; Dougherty, 2009)

Segmentasyon işlemi ile benzer parlaklık ve dokusal özelliklere sahip pikseller bir araya getirilerek benzer yapıları temsil eden bölgeler oluşturulur. Bu sayede, görüntüdeki değişik bölgelerin daha iyi analiz edilmesi ve anlaşılması sağlanır. Görüntüleme teknikleriyle elde edilen her bir görüntü farklı özelliklere ve gereksinimlere sahiptir ve bu nedenle segmentasyon için tek bir evrensel yaklaşım bulunmamaktadır, farklı bölütleme teknikleri ve algoritmaları kullanılır (Ronneberger vd., 2015; Dougherty, 2009).

Son yıllarda özellikle de evrimsel sinir ağları (CNN) gibi derin öğrenme yöntemleri sayesinde görüntü segmentasyonu alanında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Tıbbi görüntülerde yapısal analiz ve segmentasyon için yaygın bir şekilde kullanılan U-Net gibi evrimsel sinir ağları bunlardan biridir. Tanısal doğruluk ve tedavi planlaması gibi kritik süreçlerde, tıbbi görüntüleme alanındaki bu gelişmeler büyük bir etkiye sahiptir. Yine makine öğrenimi algoritmaları sayesinde bilgisayar destekli teşhis (CAD) sistemleri geliştirilmiş ve doktorların daha doğru ve hızlı teşhis yapmalarına imkan sağlanmıştır. Bu yüzden, segmentasyon teknikleri ve algoritmalarının sürekli olarak geliştirilmesi ve iyileştirilmesi tıbbi görüntüleme alanında önemini korumaya devam etmektedir (Ronneberger vd., 2015; Dougherty, 2009).





Şekil 4. U-Net modeli kullanarak yapılan akciğer bölgesi tahminleri (Patel and Vidyarthi, 2021)

Şekil 4’de, model tahmini akciğer bölgesi tanımlama görevinde yapılmıştır ve standart maske ile öngörülen maske arasındaki fark gösterilmektedir. Açık yeşil renk, standart maske ile model tahmini maskesi arasındaki örtüşme alanını; koyu yeşil renk ise sadece model tarafından tahmin edilen bölgeyi gösterir. Gri renk, yalnızca standart maske yedekli siyah arka plan pikselleri tarafından işaretlenen bölgeyi görüntüler (Patel and Vidyarthi, 2021).

### 3. SONUÇ

Son 50 yılda, BT, MRG, ultrason ve nükleer tıp gibi görüntüleme yöntemleri ve cihazları hastalıkların teşhis ve tedavisinde önemli bir rol oynadı ve tıbbi görüntüleme teknolojilerinde büyük ilerlemeler kaydedildi. Bu ilerlemeler, tıbbi görüntüleme teknolojilerinde sadece donanım ve cihazlar ile sınırlı kalmayarak; görüntülerin işlenmesinde, kullanılan yazılımlarda da önemli gelişmeler sağlamıştır. Elde edilen görüntülerin analiz, işleme ve yorumlama süreçlerindeki bu yazılımların gelişmesi sayesinde teşhisler daha hızlı ve doğru bir şekilde konulabilir; tedavi süreçleri de daha etkin bir şekilde yönetilebilir.

Görüntülerin kalitesini artırmak, gürültüyü azaltmak, kontrastını iyileştirmek ve görüntülerin daha anlamlı hale gelmesi için tasarlanmış görüntü işleme teknikleri ve son yıllarda artan veri ve işlem gücü ile beraber daha karmaşık ve yenilikçi yöntemler geliştirilmektedir. Yapay zeka ve derin öğrenme tekniklerinin tıbbi görüntüleme alanındaki kullanımı da, hastalıkların daha erken teşhis ve tedavi edilmesine olanak tanımaktadır ve tıbbi görüntüleme alanındaki gelişmeler için önemi oldukça büyüktür.

Görüntü işleme, günümüzde hızla gelişmekte olan ve dünya standartlarını belirleyen sistemlerin ilerlemesinde önemli alanlardan biridir. Tıbbi görüntüleme alanındaki teknolojik ilerlemeler, özellikle sağlık sektöründe son derece hızlı bir büyüme yaşamaktadır ve bu nedenle sağlık hizmetlerinin kalitesini artırmaya yönelik büyük bir potansiyele sahiptir.

## KAYNAKÇA

- Bulakbaşı, N. 2020. Radyografik Kalite. Retrieved from <https://www.turkrad.org.tr/assets/kisokulusunumlar/3-radyografik-kalite.pdf>
- C. Russ, J., Russ, C. 2008. E-book: Introduction to Image Processing and Analysis, CRC Press.
- Dougherty G., 2009. Digital Image Processing for Medical Applications. California State University, Channel Islands. Cambridge University Press, 2009.
- Jiang, C., Zhang, Q., Fan, R., & Hu, Z. 2018. Super-resolution CT Image Reconstruction Based on Dictionary Learning and Sparse Representation. *Scientific Reports*, 8(1), 1–10.
- Kumar GA, Nistala V, Murthy ES. 2014. Analysis of Medical Image Processing and Its Applications in Healthcare Industry. *Int J Comput Technol Appl*; 5: 851-60.
- Liu, H., Guo, Q., Wang, G., Gupta, B. B., & Zhang, C. 2019. Medical image resolution enhancement for healthcare using nonlocal self-similarity and low-rank prior. *Multimedia Tools and Applications*, 78(7), 9033–9050.
- Luong, Q. H. 2009. Advanced Image and Video Resolution Enhancement Techniques (Doctoral dissertation). Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/a559/0e325ef1aca832072c1df2f666b21cff7741.pdf>
- Patel A., Vidyarthi, A. 2021. PTXNet: An extended UNet model based segmentation of pneumothorax from chest radiography images. Department of CSE & IT, Jaypee Institute of Information Technology, Noida, Uttar Pradesh, India.
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. 2015. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Çinde Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (C. 9351, ss. 234–241).
- Sabottke, Carl E & Spieler, Bradley M. 2020. The Effect of Image Resolution on Deep Learning in Radiography. From the Department of Radiology, LSU Health Sciences Center New Orleans, 433 Bolivar St, New Orleans, LA 70112.
- Santhosh B, Rishikesan J, Sundar K, Kalaiyarasi M, 2021. Filters in Medical Image Processing, M4 1,2,3II Year, Biomedical Engineering, 4Assistant Professor, Bannari Amman Institute of Technology, Sathyamangalam, Erode, Tamil Nadu – 638 401
- Tuncel, E. 2014. Radyoloji Ders Notları. Retrieved from [http://www.anadoluisagligi.com/img/file\\_1579.pdf](http://www.anadoluisagligi.com/img/file_1579.pdf)
- Ulzheimer, S., & Raupach, R. 2014. Bilgisayarlı tomografide görüntü kalitesi. *Siemens İnavasyon*, 4–7.

- Zhang, Yu Jin 2017. E-book: Image Processing. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084.
- Zikos M, Kaldoudi E, Orphanoudakis S. 1997. Medical Image Processing. *Stud Health Technol Inf*; 43: 465-9.



## Radyoterapi Tedavi Planlamasında Yapay Zeka

Talat Aksu<sup>1</sup>

### Özet

Tedavi planlaması, radyoterapi iş akışında oldukça önemli bir adımdır. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte normal dokular daha iyi korunarak karmaşık ve zor radyoterapi planları yapılabilir hale geldi. Fakat bu durumda zor tedavi planlamalarını optimize etmek için deneme yanılma yöntemiyle planlayıcının saatlerce hatta günlerce süreye ihtiyacı gerekti. Son zamanlarda tıp biliminin çeşitli yönlerini otomatikleştirmek ve geliştirmek için yapay zekadan faydalanılıyor. Yapay zeka ayrıca tüm terapi sürecinin kişiye özel hazırlanarak daha iyi tedavi sonuçlarına ulaşmamızı sağlayabilir ve böylelikle, zamandan tasarruf da göz önünde bulundurulunca, insanlara yardımcı olabilir. Yapay zeka tekrarlayıp duran ve yinelenen görevleri hızlandırabileceğinden, günlük klinik rutinlere de fayda sağlayacaktır. Bu, klinik personelin üzerindeki yükü hafifletebilir ve verimliliği artırarak maliyetlerin düşürülmesine yardımcı olabilir. Radyoterapi tedavi planlamasında planlamacıları daha iyi desteklemek amacıyla birçok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, planlama sürecini otomatikleştirmeye ve tedavi planlama verimliliğinin ve plan kalitesi tutarlılığının iyileştirilmesinde halihazırda büyük etki yarattılar. Bu çalışmanın amacı derin öğrenmeye dayalı algoritmalar ve ortaya çıkan araştırma yönleri gibi yeni yapay zeka tabanlı tedavi planlama uygulamaları gözden geçirilip yapay zeka tabanlı tedavi planlamasının zorlukları ve gelecekteki çalışmalar hakkında bilgi vermektir.

### 1. Giriş

Yapay zeka son zamanlarda hem endüstride hem de akademide en popüler kelimelerden biri haline gelmiştir. Modern bir teknoloji terimi olarak bilinen yapay zeka, “rasyonelliği kaybetmeden insanca düşünebilen ve hareket edebilen” güçlü bir varlık olarak algılanıyordu. Bilgisayar bilimi alanlarında yapay zeka, çevreden gelen bilgiyi algılayan ve belirli hedeflere

1 Dr, 19 Mayıs Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkolojisi A.D,  
talataksu@gmail.com, 0000-0003-4588-0489

ulaşma şansını en üst düzeye çıkarmak için harekete geçen algoritmaların ve cihazların incelenmesi olarak tanımlanır. Hesaplama gücünün yanı sıra veri toplama ve paylaşma yeteneklerindeki hızlı artış nedeniyle, son birkaç yılda çok sayıda yapay zeka tekniği, özellikle derin öğrenme teorileri ve algoritmaları yayınlandı. Bu teknik patlamasının ardından yapay zeka hayatımızın neredeyse her alanına nüfuz etti ve yaşam tarzımızda hızla devrim meydana getirmektedir. Radyasyon onkolojisi alanında yapay zeka devrimi aynı zamanda radyoterapi klinik iş akışının çeşitli bölümlerinin otomatik olarak desteklenmesine de olanak sağlamaktadır. Bunlar; tümör ve riskli organların konturlanması, tedavi planlaması, radyoterapi uygulanması ve tedaviye yanıt değerlendirmesidir (Wang, 2019).

Bu bölümde, radyoterapi tedavi planlamasındaki yapay zeka destekli otomatik tedavi planlama uygulamasının özelliklerinden bahsedilecektir ve muhtemelen yakın bir gelecekte mevcut manuel tedavi planlama işlemlerinin nasıl yerini alacağı incelenecektir. Bunun için yapay zekadaki derin öğrenmeye dayalı araştırmalar incelenecektir. Otomatik konturlama, görüntü klavuzluğu veya QA gibi radyoterapinin diğer işlemlerinde de yapay zeka uygulamaları incelenecektir.

Radyoterapi tedavi planlaması, özellikle de zor bir plan ise, tamamlanması saatler hatta günler süren zahmetli bir süreçtir. Tedavi planlamasında tümör ve riskli organların (OAR) konturlanması da dahil olmak üzere birçok dozimetrik parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Her bir durumun özel gereksinimlerine bağlı olarak, planlayıcıların ışın enerjisi, alan sayısı, alan açıları vb. dahil olmak üzere temel planlama parametreleri hakkında karar vermesi gerekir. Asgari düzeyde kabul edilebilir bir plan oluşturmak hızlı olsa da, bir planın iyileştirilmesi genellikle tedavi planlama sistemine (TPS) bağlı olduğu için birçok yineleme gerektirir. Ayrıca, yapılan ilk plan radyasyon onkologlarına gösterilip fikir alışverişinde bulunulur. Bazı planların onaylanması oldukça çaba gerekebilir ve zaman alabilir.

Otomatik doğası nedeniyle yapay zeka, plan yapma süresini başarılı bir şekilde azalttı. Böylece planlayıcılara planlama sonrası yapılması gerekli olan dozimetri için daha fazla zaman ayırma imkânı sağladı. Ayrıca artan verimlilik, yeni tedavi planlama stratejileri, tedavi süreci izleme yöntemleri ve tedavi uygulama iş akışları dâhil olmak üzere klinik işlemlere olanak sağladı (Hussein, 2016).

Yapay zeka, verimliliğin yanı sıra plan kalitesi tutarlılığını ve hata oranını da önlemektedir. Geleneksel tedavi planlamasında en ideal plan için bir sürü deneme-yanılma yapmak gerekir ve plan kalitesi planlayıcının bilgisi ve tecrübesine bağlı olarak değişir. Ayrıca, planlamaya ayrılan süre

de plan kalitesini etkiler. Çeşitli hastalık bölgelerinde yapılan birçok yapay zeka çalışması, manuel planlara kıyasla daha tutarlı bir tedavi planı kalitesi bildirmiştir. Bu nedenle yapay zeka, gelişmiş tedavi planlama uzmanlığını geniş çapta kullanılabilir hale getirerek sağlık hizmetleri eşitsizliklerini azaltabilir.

Verimlilik ve tutarlılık konusunda gelişmelere rağmen, plan kalitesi mevcut yapay zeka teknikleriyle iyileştirilmemiştir. Çalışmalar makine tarafından oluşturulan planların klinik olarak kabul edilebilir olduğunu bildirirken, diğerleri yapay zekanın kabul edilebilir kalite ve güvenliği sağlamak için temel insan ayarlaması veya manipülasyonu gerektirdiğini belirtti. Plan güvenliği ve kalitesi için insanların tedavi planlamasının merkezinde kalması gerekirken, yapay zeka tabanlı tedavi planlama algoritmalarının önemli bir hedefi de tedavi planı kalitesini artırmaktır. Bu alanda şu anda birçok yeni yaklaşım araştırılmaktadır. Bu çalışmanın amacı yapay zekanın radyoterapideki uygulamalarının mevcut araştırma yönündeki geçmiş çabalarının yanı sıra gelecekteki araştırma konularını ve zorluklarını da incelemektir.

## 2. Tedavi Planlamasında Mevcut Yapay Zeka Teknikleri

Radyoterapide tedavi planlama aşaması oldukça önemli bir yere sahiptir. Çünkü radyoterapinin amacı tümöre en uygun dozu verirken ışınlama bölgesinde bulunan riskli organların en az dozu almasını sağlamaktır. Bu bölümde radyoterapi tedavi planlamasında son on yılda mevcut yapay zeka tekniklerini ile ilgili teknik gelişmeler, klinik araştırmalar ilgili önemli çalışmalar, klinik uygulama deneyimler incelenecektir.

### 2.1. Klinik Pratikteki Bilgilerin Modellenmesi

İnsan pratiğinde, manuel tedavi planlamasının verimliliğini ve kalitesini artırmanın doğal bir yolu, önceki benzer “iyi” vakaları gözden geçirmektir. Daha önce yapılan planlamalardaki gantry açıları ve DVH priortileri gibi planlama parametreleri doğrudan planlama sürecine dâhil edilebilir veya mevcut bir durum için karar referansları olarak kullanılabilir. Bu fikrin ardından araştırmacılar, daha önce yapılan iyi planlamalardaki özellikleri çıkarmak için istatistiksel modeller geliştirdiler. Önceki planlardan alınan bu özellikleri yeni yapılacak plan için giriş olarak kullanmayı denediler. Bilgiye dayalı planlama (KBP) olarak da bilinen bu yaklaşım popülerlik kazanmıştır. KBP’den elde edilen bilgiler, ilk karar verme sırasında planlayıcılara yardımcı olabilir. Genel olarak KBP’nin kullanımı, optimizasyona başlayana kadarki işlemleri kısaltarak iyi bir planlama yapılmasına yardım edebilir (Vanderstraeten, 2018).



DVH tabanlı optimizasyonda, DVH konstrainleri kaliteli planlar açısından önemlidir; en uygun konstrainler hızlı bir şekilde en uygun doz dağılımının elde edilmesinde yardımcı olabilirler. Bu nedenle DVH tabanlı bilgi modellemeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Spesifik olarak, belirli bir anatomik bölgenin önceki kabul edilebilir planlar kullanılır. Gerekli vaka sayısı farklı klinik uygulamalarda tedavi bölgelerine, uygulama tekniklerine ve klinik değerlendirme standartlarına bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik gösterir. Modelleme sürecinde DVH sonuçları ile riskli organlar (OAR) ve geometrik Planlanan Tümör Volümü (PTV) arasında bir ilişki kurulur. Geometrik olarak aynı yerdeki yeni bir hasta için, riskli organlar ve PTV için DVH ler bu model ile tahmin edilebilir. Tahmin edilen DVH eğrileri manuel planlama sırasında veya otomatik planlama iş akışında kullanılabilir.

DVH tabanlı bilgi modelleme yöntemi Yuan tarafından yayımlandı (Yuan , 2015). Çalışmalarında prostat ve baş boyun YART tedavileri için modeller oluşturuldu. Bir OAR'ın planlama hedef hacmine (PTV) göre geometrisi, hedefe olan uzaklık histogramı (DTH) ile gösterildi. Sonuçlar her iki modellenen bölgede de OAR dozu tahmininde güzel sonuçlar verildiğini gösterdi. Bu DVH tabanlı bilgi modellemesi, Eclipse Tedavi Planlama Sistemin (TPS)'de opsiyonel bir paket olarak Varian (Varian Medikal Sistemi) tarafından RapidPlan ismiyle ticari olarak geliştirilmiştir. RapidPlan'ın yanı sıra, prostat, beyin, baş-boyun, akciğer, karaciğer ve pelvis dahil olmak üzere çeşitli tedavi bölgeleri için DVH tabanlı bilgi modelleme yöntemlerine ilişkin bir dizi araştırma çalışması rapor edilmiştir.

DVH tabanlı yaklaşımın temel sınırlaması uzaysal bilginin eksikliğidir ve planlayıcıların nadir yerleşimli OAR/hedef geometrisi olan bir durumla başa çıkmak için ekstra çalışmaya ihtiyacı olmasıdır.

Böylece, DVH tabanlı yaklaşıma ek olarak, her bir vokseldeki doz değerlerinin tahmin edildiği bilgi tabanlı modelleme rapor edilmiştir. Akciğer IMRT tedavisi için uygun açıyı bulmada yardımcı olan ışın açısı düzenlemesi bilgiye dayalı modelleme de rapor edilmiştir (Lian, 2013).

## 2.2. Çok Kriterli Optimizasyon

Radyoterapi tedavi planlamasındaki optimizasyondan farklı olan Çok Kriterli Optimizasyon (MCO), RayStation (RaySearch Medical Laboratories AB, Stockholm, Sweden) tarafından tasarlanmıştır. Radyoterapi tedavi planlama zamanını kısaltan MCO, OAR ile hedef hacimler arasında uygun doz ayarlaması yaparak daha uygun bir plan yapılmasına olanak sağlar. MCO aynı zamanda bir parametreyi bozmadan diğerinin daha iyi olmasını sağlayan \*Pareto- optimal\* prensibini gerçekleştirmektedir (Breedveld, 2012).

“a priori-MCO” ismiyle Elekta tarafından piyasaya sürülmekte olan otomatik planlama sistemi olan bir KBP modülü örneğidir. RayStation “Pareto-optimal planlarını otomatik oluşturup herbir hasta için gerekli bilgileri veri tabanında saklamaktadır. Herbir OAR daki elde edilmesi gereken doz değeri için sistemin yaklaşık olarak 3 veya 4 plan yapması gereklidir. Elde edilen farklı çözümler bulunarak en iyi PTV’yi sağlayıp OAR’ ı en iyi koruyan çözümü seçer (Hussein, 2016).

Hedef ile OAR’ ı sağlamada öncelik sıralaması vardır. Bunun sonucunda elde edilen tedavi planı kliniğe en uygun sonucu içermektedir. KBP’de tedavisi bitmiş hastaların plan kalitesini arttırmak odaklanırken, bu optimizasyondaki amaç kliniğe en uygun sonucu elde etmektir. Tedaviye girecek olan hastaların tutarlı bir şekilde sonuç vermesi amaçlanmış ve bu ilk defa i-Cycle yazılımlarıyla Erasmus MC Kanser Merkezi Enstitüsü’nde denenerek geliştirilerek uygulanmıştır (Wu, 2016). Bunun sonucunda, her bir hasta için özel plan oluşturulmuş ve Erasmus i-Cycle algoritması Monaco TPS (Elekta AB, Stockholm, Sweden) planları için dönüştürülmesi ihtiyacı gerekmiştir.

### 2.3. Yeni Yapay Zeka Uygulamaları

Güçlü bir yapay zeka ajanının kullanıldığı gelecekteki tedavi planlama süreci, minimum insan müdahalesiyle etkili ve verimli olabilir. Yapay zekanın, hasta anatomisini ayrıntılı bir şekilde kapsamlı analizine dayalı olarak insanların yaptığı işlemlerin hepsini yapabileceğini öngörüyoruz. Tedavi dozu ve uygulama tekniği gibi parametreler doktorlardan gelen bilgiler de yapay zekanın karar verme sürecine dahil edilebilir. Gelecekteki iş akışı, planlamacılar ve doktorların minimum insan çabasını gerektirir; kurtarılan insan çabaları diğer insan merkezli klinik bakım görevleri için kullanılabilir. Tedavi planlamasında devam eden aktif araştırmalar mevcut olsa da, yeni yapay zeka algoritmalarına, öncelikle derin mimariye ve kompozisyona sahip derin öğrenmeye dayalı yaklaşımlara odaklanmaktadır.

### 2.4. Yapay Zekadaki Son Gelişmeler

Bilgiye dayalı modelleme yaklaşımı ATP’ deki en eski buluşlardan biriydi. Boutilier ve arkadaşları, prostat IMRT için optimizasyondaki değerleri tahmin ederek klinik uygulamalarda kullanılabileceğini gösterdi (Boutilier, 2015). Daha önceki planlamalardaki en uygun optimizasyondaki değerleri kullanarak, yeni algoritmalar geliştirildi. Bunlar multinominal lojistik regresyon ve K-en yakın komşu algoritmalarıdır. Sonuçlar, bu yeni algoritmaların da klinik planlar için iyi tahminler üretebildiğini gösterdi, ancak lojistik regresyon kullanan modelle karşılaştırıldığında hiçbir önemli performans artışı bulunamadı.

Ma ve arkadaşları, destek vektör regresyonunu (SVR) kullanarak bilgiye dayalı modelleme önerdi. Çalışmalarında, anatomik/geometrik özelliklere ek olarak model girişi olarak OAR değerlerini kullanmadan sadece PTV optimizasyonu kullanılmış ve DVH tahmini, sağlam bir denetimli öğrenme tekniği olarak SVR tarafından uygulanmıştır. Bir karşılaştırma çalışmasında bu modelin mesane ve rektum DVH tahmininde RapidPlan modelinden daha doğru olduğu görülmüştür. TPS'deki bir diğer önemli araştırma alanı, uzaysal doz dağılımının tahminidir. DVH tabanlı tahmin yaygın olmakla birlikte, doz gradienti ve konformitesi gibi belirli dozimetrik değerleri ortaya çıkarmayabilir. Doğru uzaysal doz dağılımını tahmini manuel tedavi planlama sürecinde planlayıcılara yardım edebilir. Ayrıca tahmin edilen doz dağılımı, DVH tabanlı IMRT optimizasyonuna gerek kalmadan tam otomatik bir TPS iş akışı için kullanılabilir. Campbell ve Miften, pankreas stereotaktik vücut radyasyon terapisinin (SBRT) uzaysal doz dağılımı tahmini için yapay sinir ağı doz modelleri geliştirdi. Bu ağ, voksel bazlı geometrik parametreler ile klinikteki planlar ile geliştirildi (Campbell ve Miften, 2017).

Sonuçlar 3 boyutlu doz dağılımının umut verici olduğunu gösterdi. Nguyen ve arkadaşları, prostat IMRT doz dağılımı tahmini için U-net mimarisinde bir modifikasyon kullandı. Tamamen konvolusyon ağlarına dayanan, orijinal görüntü boyutunu korumak amacıyla konturlama için U-net önerildi. U-net, doğrudan görüntü girişine izin verir. Bu, klasik modelleme süreci (örneğin, bilgiye dayalı modelleme süreci) sırasında veri yorumlama gereksinimini azaltabilir. 2D bazlı tahminde mutlak doz farkının ortalama değerleri PTV'de %2 civarında, OAR'larda ise tanımlanan dozun %5'inin altında bulundu (Nguyen, 2017).

## **2.5. Tedavi Planlama Sistemlerinde Yapay Zekanın Gelecekteki Durumu**

CNN tabanlı algoritmalar görüntüyü işlemede yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Görselleri girdi olarak kullanan derin öğrenme algoritmasıdır. Değişik işlemler yaparak görsellerdeki özellikleri yakalayarak onları sınıflandıran bu algoritma farklı katmanlardan oluşmuştur. Bu algoritma ile doz tahmininin doğruluğu ve verimliliği daha da gelişmektedir. Bu, plan oluşturmada bir paradigma değişikliğine yol açabilir: DVH tabanlı optimizasyon yerine, tahmin edilen doz dağılımını referans veri olarak kullanarak bir plan oluşturulabilir (Shin, 2016).

Plan parametrelerini doğru bir şekilde tahmin etmek başka bir potansiyel araştırma alanı haline gelebilir. Belirli plan parametrelerinin 2D/3D görüntüler olarak dönüştürülebilmesi durumunda, plan tahmini için

CNN tabanlı algoritmalar kullanılabilir ve bu da otomatik plan oluşturma yapılabilmesine olanak sağlar. Bu tahminler muhtemelen, statik IMRT ışınlarının 2 boyutlu yoğunluk haritaları, step and shoot tekniği ile 2 boyutlu segmentler ve VMAT'ın dinamik çok yapraklı kolimatör dizilimi olabilir. Radyasyon onkolojisindeki en son yapay zeka çalışmaları tahminlere odaklanırken, çok azı tedavi planlamasındaki süreci simüle etti. Manuel tedavi planlama sürecinde, doz dağılımının nasıl olacağını belirlemede, planlamacılar arasında oldukça farklılık olabilir; Daha fazla deneyime sahip biri, daha az deneyime sahip başka bir planlamacıya göre yapılması gereken işlemleri daha verimli bir şekilde gerçekleştirebilir. Böylece daha kısa sürede iyi planlar yapabilir. Bunun nedeni doğru karar verme stratejisidir. TPS'nin insan müdahalesi olmadan tam otomatik olarak iş akışına uygulanması planlayıcılar arasındaki bu farklılıkları ortadan kaldırması amaçlanmaktadır (Sharpe, 2014).

TPS'de karar verme sürecini uygulamaya yönelik bir başka olası yaklaşım, çekişmeli üretken ağların (ÇÜA'lar) kullanılmasıdır. ÇÜA'lar Ian Goodfellow tarafından ilk defa 2014 yılında önerilmiştir. (Ian, 2014). Çekişmeli üretken ağlar rekabetçi iki ağdan meydana gelmektedir. Bu iki ağ gerçek verilerden ayırt edilmeyen sentetik verileri en iyi şekilde oluşturmayı amaçlayan makine öğrenimi tekniğidir. ÇÜA'lar Üretici ve Ayrıştırıcı olmak üzere iki ağa sahiptir. Üretici ağ, herhangi bir gürültü, sinyal veya görüntüyü giriş olarak alıp gerçeğine benzeyen sahte görüntüler üretmeyi öğrenir. Ayrıştırıcı ağın amacı ise üretici ağdan çıkan sonucun gerçeğe ne kadar benzediğini bulmaktır. Bu 2 rakip ağ, yani üretici ve ayırıcı aynı anda eğitilir: Jeneratör numune oluşturma konusunda eğitilirken, ayırıcı da numunelerin "iyi" olup olmadığını değerlendirmek üzere eğitilir. ÇÜA 'lar doğal dil işleme ve bilgisayarlı görme alanlarında araştırılmıştır. Son zamanlarda ÇÜA 'lar tıbbi görüntü konturlanması ve hastalık teşhisinde kullanılmaktadır. ÇÜA 'lar ayrıca radyoterapi için doz dağıtımı için de kullanıldığı belirtilmektedir. Tedavi planlamasına yönelik karar vermeyi simüle etmek için, ÇÜA 'lar, çevre hakkında bilgi edinmek için model tabanlı takviyeli öğrenmede kullanılabilir; böylece takviyeli öğrenme aracı, yalnızca çevreyle etkileşime güvenmek yerine daha önce öğrenilen ortamdan (model) yararlanabilir. ortam (deneme yanılma deneyimi). Eğitilmiş 2 ağın ÇÜA 'larda rekabetçi bir ilişkisi olmalıdır; böyle bir ilişki, tahmini plan dağılımını kullanan bir plan üreticisi ve eğitimi için üretilmiş tedavi planlarını gerektiren bir doz dağılımı tahmincisi tarafından simüle edilebilir (Çelik, 2020).

### 3. Sonuç

Mevcut yapay zeka çözümleri teknik özelliklerine ve klinik iş akışı etkilerine göre incelenmiştir. Bildirilen klinik araştırmalarda sunulan çözümler, planlamaların daha iyi olduğunu ve kalitesini arttığını göstermiştir. TPS' deki yapay zeka yeni ortaya çıkan bir alandır ve hızla gelişmektedir. TPS' de yapay zekaya ilişkin son araştırma çalışmaları, özellikle derin öğrenmeye dayalı araştırmalar özetlenmiştir. Ek olarak, TPS' deki yapay zekaya ilişkin gelecekteki araştırma yönleri önerildi. Son olarak, TPS'de yapay zeka araştırmasının zorlukları ve potansiyel klinik öncesi ve klinik araştırmaların pratik konuları tartışıldı. Yapay zeka teknolojilerinin eninde sonunda radyoterapi tedavi planlama pratiği paradigmasını değiştireceğine inanıyoruz. Gelecek vaat eden geleceği benimseyen mevcut araştırmacılar, önümüzdeki yirmi yılda sağlık hizmetleri ihtiyaçlarını karşılamak için yapay zekanın mevcut uygulamalarının ve olası araştırma fırsatlarının sınırlamalarının farkında olmalıdır.

## Kaynakça

- Boutilier, J. J., Lee, T., Craig, T., Sharpe, M. B., & Chan, T. C. (2015). Models for predicting objective function weights in prostate cancer IMRT. *Medical physics*, 42(4), 1586-1595.
- Breedveld, S., Storchi, P. R., Voet, P. W., & Heijmen, B. J. (2012). iCycle: Integrated, multicriterial beam angle, and profile optimization for generation of coplanar and noncoplanar IMRT plans. *Medical physics*, 39(2), 951-963.
- Campbell, W. G., Miften, M., Olsen, L., Stumpf, P., Schefter, T., Goodman, K. A., & Jones, B. L. (2017). Neural network dose models for knowledge-based planning in pancreatic SBRT. *Medical physics*, 44(12), 6148-6158.
- Çelik, G., & Talu, M. F. (2020). Çekişmeli üretken ağ modellerinin görüntü üretme performanslarının incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 181-192.
- Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... & Bengio, Y. (2014). Generative adversarial nets. *Advances in neural information processing systems*, 27.
- Hussein, M., South, C. P., Barry, M. A., Adams, E. J., Jordan, T. J., Stewart, A. J., & Nisbet, A. (2016). Clinical validation and benchmarking of knowledge-based IMRT and VMAT treatment planning in pelvic anatomy. *Radiotherapy and Oncology*, 120(3), 473-479.
- Kınay, Ş., Akçay, D., Cenk, U. M. A. Y., Aydın, B., Gülşan, D., Akgüngör, K., & Demiral, A. N. (2023). Prostat kanserinin hacimsel modülasyonlu ark tedavisi ile radyoterapisinde bilgi tabanlı planlama yöntemlerinin kullanıldığı klinik çalışmaların değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 37(1), 67-77.
- Lian, J., Yuan, L., Ge, Y., Chera, B. S., Yoo, D. P., Chang, S., & Wu, Q. J. (2013). Modeling the dosimetry of organ-at-risk in head and neck IMRT planning: an intertechnique and interinstitutional study. *Medical physics*, 40(12), 121704.
- Nguyen, D., Long, T., Jia, X., Lu, W., Gu, X., Iqbal, Z., & Jiang, S. (2017). Dose prediction with U-net: a feasibility study for predicting dose distributions from contours using deep learning on prostate IMRT patients. *arXiv preprint arXiv:1709.09233*, 17.
- Sharpe, M. B., & Moore, K. L. (2014). POINT/COUNTERPOINT. *Medical physics*, 41, 120601.
- Shin, H. C., Roth, H. R., Gao, M., Lu, L., Xu, Z., Nogues, I., & Summers, R. M. (2016). Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning. *IEEE transactions on medical imaging*, 35(5), 1285-1298.

- Vanderstraeten, B., Goddeeris, B., Vandecasteele, K., Van Eijkeren, M., De Wagter, C., & Lievens, Y. (2018). Automated instead of manual treatment planning? A plan comparison based on dose-volume statistics and clinical preference. *International Journal of Radiation Oncology\* Biology\* Physics*, 102(2), 443-450.
- Yuan, L., Wu, Q. J., Yin, F., Li, Y., Sheng, Y., Kelsey, C. R., & Ge, Y. (2015). Standardized beam bouquets for lung IMRT planning. *Physics in Medicine & Biology*, 60(5), 1831.
- Wang, C., Zhu, X., Hong, J. C., & Zheng, D. (2019). Artificial intelligence in radiotherapy treatment planning: present and future. *Technology in cancer research & treatment*, 18, 1533033819873922.
- Wu, H., Jiang, F., Yue, H., Zhang, H., Wang, K., & Zhang, Y. (2016). Applying a RapidPlan model trained on a technique and orientation to another: a feasibility and dosimetric evaluation. *Radiation Oncology*, 11, 1-7.

## Tıbbi Uygulamalarda İyonize Radyasyondan Korunmanın Temel Felsefesi ve Prensipleri

Taha Erdoğan<sup>1</sup>

### Özet

Bir enerji olan radyasyondan korunmada temel felsefe onu iyi ve doğru anlamaktır. Bu enerjiyi doğru anlayarak radyasyonu hem faydalı ve etkin bir şekilde kullanabiliriz hem de zararlarından korunmayı gerçekleştirebiliriz. İyonize radyasyonun tıbbi görüntüleme ve tedavilerde teknolojik gelişmelerle birlikte kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bununla beraber radyasyonun bu kadar sık kullanılması hem radyasyonla çalışan personel ve hastaların hem de toplumun radyasyon maruziyetinin de artmasına neden olmuştur. Bu nedenle radyasyondan korunma prensiplerinin doğru uygulanması çevre ve toplum sağlığı açısından önem arz etmektedir.

Bu bölümde iyonize radyasyonun hem etkin ve doğru kullanılması hem de zararlarından korunma amacıyla temel korunma felsefesine ve prensiplerine yer verilecek, tıbbi uygulamalara dikkat edilmesi gereken ulusal ve uluslararası radyasyondan korunma kuralları sunulacaktır.

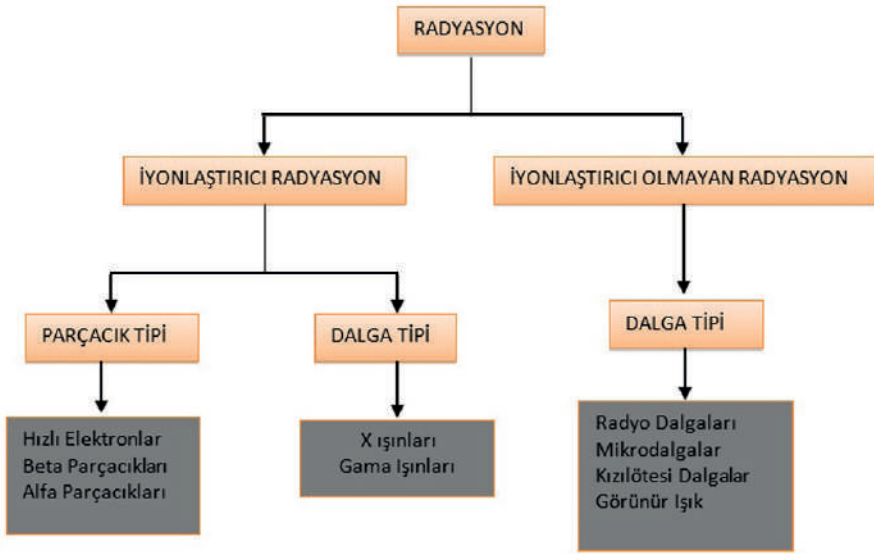
### 1. Radyasyon Tanımı ve Türleri

Radyasyon, partiküler veya elektromanyetik dalga yoluyla enerjinin transferi olarak tanımlanmaktadır. Radyasyonun sınıflandırılmasında kullanılan temel parametreler; radyasyonun enerjisi, türü ve kaynağıdır. Radyasyona ait enerji paketi, etkileştiği ortamdaki atomun elektronu koparabilecek seviyede değilse iyonize olmayan radyasyon, bu enerji paketi atomun elektronunu koparabilecek seviyede ise iyonize radyasyon olarak sınıflandırılmaktadır. İyonize olmayan radyasyon türleri, radyo dalgaları ile düşük enerjili morötesi ışık frekans bölgesini kapsamaktadır. İyonize radyasyon ise dalga karakterli olan yüksek enerjili mor ötesi ışınlar, x-ışınları,

1 Dr. Öğr. Üyesi, Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi Radyasyon Onkolojisi A.D., taha.erdogan@afsu.edu.tr, 0000-0002-3559-8933



gama ışınları, kozmik ışınlar ve parçacık karakterli alfa, beta ve nötron parçacığını kapsamaktadır. (Şekil 1).



Şekil 1. Radyasyon Türleri

### 1.1. Radyasyon Birimlerinin Tanımları

Hangi tür olursa olsun, radyasyon etkileştiği ortama enerji aktararak çeşitli etkileşimlere yol açmaktadır (1). Radyasyonun etkileştiği ortama aktardığı enerji radyasyon dozu olarak tanımlanmaktadır. Radyasyon dozu iki önemli kavrama bağlıdır; (a) etkileşilen soğurucu ortam (özellikle dokuda) gram başına depolanan enerji yani **soğurulan doz**, (b) radyasyon hasar etkisini tanımlamakta kullanılan **etkin doz eşdeğeridir**. Tüm bunlara ek olarak soğurucu ortam hava ise havada oluşan iyonizasyon miktarının ölçüsü x ve gama ışınları için özel bir tanımlama olan, **radyasyon pozu (ışınlama)** olarak tanımlanmaktadır.

#### Soğurulan Radyasyon Dozu (D)

Birim kütlede depolanan enerji miktarı soğurulan doz olarak tanımlanmaktadır. Soğurulan dozun konvansiyonel birimi rad'dır (radiation absorbed dose). Dokunun 1 gramında 100 erg enerjinin soğurulmasıdır (2).

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

Soğurulan dozun SI sistemindeki birimi gray (Gy) olarak tanımlanmaktadır. Ortamın 1 kilogramında 1 joule enerjinin soğurulmasıdır.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

### **Etkin Doz Eşdeğeri (H)**

Ortamın soğurduğu enerji miktarı aynı olsa da farklı tip radyasyonlar farklı biyolojik hasarlara neden olmaktadır (1). Biyolojik etkiler radyasyonun yolu boyunca dağılımına bağlı olarak değişmektedir (1). Bu sebepten radyasyon tipi etkisi etkin doz eşdeğeri (H) tanımı ile tanımlanmaktadır. Etkin doz eşdeğeri geleneksel birimi rem, SI birimi Sievert (Sv)'dir. Etkin doz eşdeğeri (H), soğurulan doz (D) ile radyasyon tipine bağlı hasarı tanımlayan kalite faktörünün (Q) çarpımı ile belirlenmektedir (2). Radyasyon tipine bağlı olarak değişen kalite faktörü; x-ışınları, gama ve elektronlar için  $Q= 1$ , farklı enerjideki nötronlar için  $Q= 2-20$  arasında değişmektedir, alfa partikülleri ya da fisyon ürünleri için  $Q= 20$ 'dir.

$$H \text{ (Etkin Doz Eşdeğeri)} = D \text{ (Soğurulan Doz)} \times Q \text{ (Kalite Faktörü)}$$

$$\text{Sievert (Sv)} = \text{Gray (Gy)} \times Q$$

### **Radyasyon Pozu (Işınlama)**

X ve gama ışınlarının havadaki iyonizasyon miktarı radyasyon pozu (ışınlama) olarak tanımlanır (1). Radyasyon pozu geleneksel birimi roentgen (R)'dir. Roentgen (R), 0,001293 g havada (atmosfer basıncı ve 0° C'deki havanın 1 cm<sup>3</sup>'ü) 1 elektrostatik yük birimi ( $1 \text{esu} = 3,336 \times 10^{-10} \text{C}$ ) yük üreten x ve gama radyasyonu miktarıdır (1). Havanın birim kütlesi başına üretilen yük roentgen cinsinden;

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

SI sisteminde roentgen yer almamakla birlikte; ışınlamanın SI birim, 1 kg'lık kuru havada 1 C yük üretebilen radyasyon enerjisi olarak tanımlanır ve X ile ifade edilir.

$$X = 1C/kg$$

Özetle depolanan enerji miktarı yani radyasyon dozu hesapları yapılırken (1);

- i. Soğurucu ortama giren radyasyonun birim alan başına miktarı bilinmelidir.
- ii. Radyasyonun soğurulduğu ortamın kütlesi bilinmelidir.
- iii. Farklı etkileşim olasılıkları hesaplanmalıdır.

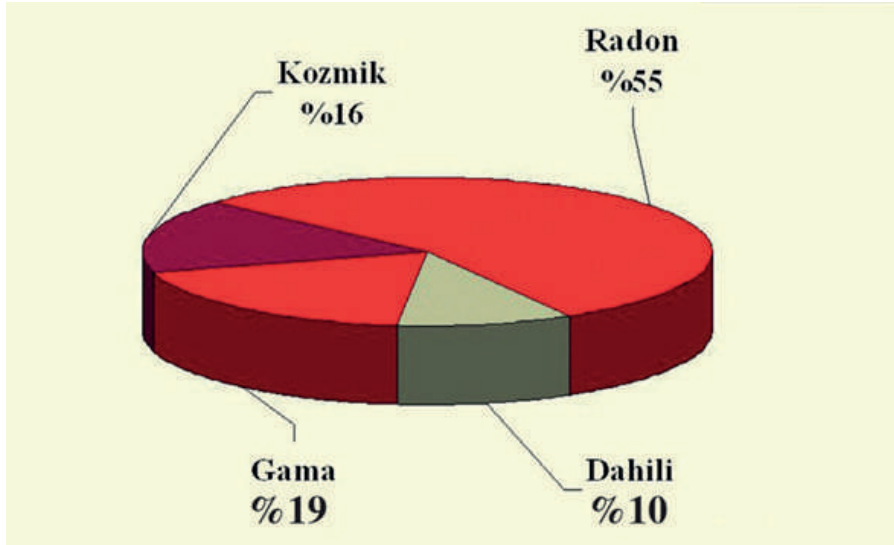
## 2. Radyasyona Maruz Kalma Şekilleri ve Radyasyon Alanları

Radyasyon kaynakları doğal (%88) ve yapay (%12) kaynaklar olarak temel iki sınıfa ayırabiliriz (Şekil 2) (3).

### 2.1. Doğal Radyasyon Kaynakları:

Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi'ne (UNSCEAR) göre doğal radyasyon kaynakları 4 farklı sınıfta guruplandırılmaktadır (4):

- Yüksek enerjili kozmik radyasyon.
- Karasal- Yerküre radyasyon (terrestrial).
- Solunan radyasyon (inhalasyon).
- Gıdalar ile alınan radyasyon (ingestion).



*Şekil 2. Doğal radyasyon kaynaklarının oluşturduğu dozun dağılımı*

**Yüksek enerjili kozmik radyasyon;** uzay kaynaklıdır; primer olarak proton ve alfa parçacıklarından oluşurlar. Dünya atmosferinin üst katmanlarındaki etkileşimler ikincil bileşenleri yaratır; doz değerlendirmesi açısından daha önemli ikincil parçacıklar müonlar, nötronlar, elektronlar, pozitronlar ve fotonlardır. Kozmik ışınlar maruz kalma yüksekliğe güçlü bir şekilde, enleme ise zayıf bir şekilde bağlıdır. Doz değerlendirmeleri hem ölçümlere hem de irtifaya bağlı olarak radyasyon taşınımı hesaplamalarına

dayanmaktadır. UNSCEAR, yer seviyesine ulaşan kozmik radyasyon kaynaklı yıllık etkin dozu ortalama 0,4 mSv olarak bildirmiştir (3). Yıllık kozmik radyasyon sebebiyle yer kürede aldığımız doz ortalaması 0,39 mSv/yıldır (3).

**Karasal-Yerküre radyasyon (terrestrial);** doğal olarak oluşan karasal kökenli primordial radyo nüklitler çevremizde bulunan tüm ortamlarda farklı seviyelerde bulunur. Sadece yarı ömürleri dünyanın yaşı ile kıyaslanabilir olan radyonüklitler ve bunların bozunma ürünleri bu materyallerde önemli miktarlarda bulunur. İnsan vücudunun dış kaynaklardan ışınlanması esas olarak U-238 ve Th-232 serilerindeki radyonüklitlerden ve K-40'dan gelen gama radyasyonu ile olur. Bu radyonüklitler vücutta da bulunur ve çeşitli organları alfa ve beta parçacıklarının yanı sıra gama ışınlarıyla da ışınlayabilmektedir. U-235 serisi, Rb-87, La-138, Sm-147 ve Lu-176 gibi diğer bazı karasal radyonüklitler doğada bulunur, ancak o kadar düşük seviyelerde bulunurlar ki, insanlardaki doza katkıları küçüktür.

Yerkürenin kabuğunda radyum elementinin (Ra-226) bozunması sonucunda salınan “radon gazı” doğal radyasyon seviyesi en çok artıran kaynak türüdür. Dünya atmosferinin bir parçası ve soygaz olan radon, topraktan havaya salınır, salınma sonucunda seyrelirse ve birikmez ise sorun teşkil etmez. Bir insanın yıllık maruz kalacağı bütün radyoaktif kaynak dozlarının toplamının (doğal + yapay) %8'i radon bozunum ürünleri kaynaklıdır (4). Dünya genelinde maruz kalınan yıllık etkin dozun ortalama 1,2 mSv seviyesinde olduğu rapor edilmiştir (3).

**Solunan radyasyon (inhalasyon):** Radyoaktif materyaller toprakta, suda ve besinlerde de bulunmaktadır. Bu maddelerden bazıları yiyecek ve su ile vücuda alınırken radon gibi diğer radyoaktif maddeler yukarıda anlatıldığı gibi solunma yoluyla vücuda girerler. İç maruziyetler, karasal radyonüklitlerin solunması ve yutulması yoluyla alınmasından kaynaklanır. Solunum yoluyla alınan dozlar  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  bozunma zincirlerinin radyonüklitlerini içeren toz parçacıklarının havadaki varlığından kaynaklanır (3). Solunum yoluyla maruziyetin baskın bileşeni, kısa ömürlü bozunma ürünleri olan radondur.

**Gıdalar ile alınan radyasyon (ingestion):** Sindirim yoluyla maruz kalınan dozlar esas olarak K-40, C-14 doğal radyoaktif elementi, gıdalarda ve içme suyunda bulunan U-238 ve Th-232 serisi radyonüklitler kaynaklıdır. Yetişkinler için vücuttaki potasyum içeriği yaklaşık % 0,18, çocuklar için ise yaklaşık % 0,2'dir. K-40'ın vücuttaki dokularda yıllık eşdeğer dozları yetişkinler ve çocuklar için sırasıyla 165 ve 185  $\mu\text{Sv}$ 'dir (3). Karasal radyonüklitlerin solunması ve sindiriminden kaynaklanan toplam doz

310  $\mu\text{Sv}$ 'dir; bunun 170  $\mu\text{Sv}$ 'i K-40'dan, 140 $\mu\text{Sv}$ 'i ise U-238 ve Th-232 serisindeki uzun ömürlü radyonüklidlerden kaynaklanmaktadır (3).

## 2.2. Yapay Radyasyon Kaynakları:

Geçmişte radyasyona maruziyette sebebi doğal radyasyon kaynaklarıydı. Günümüzde doğal kaynaklara ek olarak yapay radyasyon kaynakları ek bir doz yükü getirmiştir. Çünkü yapay radyasyon kaynakları ile radyasyon hem daha sık hem de daha etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun başlıca nedenlerinden en önemlisi tıbbi tanı ve tedavi yöntemlerine aittir. Örneğin; bir çok hastalığın tanısında bilgisayarlı tomografi (BT) uygulamalarına oldukça sık başvurulmaktadır. Uygulama alanlarının artması bu alanda çalışan personel, hasta ve toplum radyasyon maruziyeti arttırmış radyasyondan korunmaya ait düzenlemelerin daha ciddi ve daha rijit denetimlere tabii olması ihtiyacını da doğurmuştur. Tıbbi uygulamalar kaynaklı x- ışınları kullanımı yıllık etkin doz değeri 0.4 mSv yapay radyasyon kaynağıdır (3).

## 3. Radyasyon Alanlarının Sınıflandırılması

Radyasyon alanı, her hangi bir radyasyon tesisinde maruziyet dozunun yıllık 1 mSv değerini geçme olasılığı bulunan alan olarak tanımlanmaktadır. Radyasyon alanları radyasyon düzeylerine göre gözetimli ve denetimli alan olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır (3,4,5,6,7,8,9,10).

**a. Gözetimli Alan:** Radyasyon çalışanları için doz sınırlarının yıllık 1/20'sinin aşılma olasılığı ve 3/10'unun aşılması beklenmeyen, kişisel doz ölçümünü gerektirmeyen ve çevresel radyasyonun izlenmesini gerektiren alanlardır (3,4,5,6,7,8,9,10).

**b. Denetimli Alan:** Radyasyon görevlilerinin giriş ve çıkışlarının özel denetime, çalışmalarının radyasyon korunması bakımından özel kurallara bağlı olduğu, çalışanların ardışık beş yılın ortalaması yıllık doz sınırlarının 3/10'undan fazla radyasyon dozuna maruz kalabilecekleri alanlardır. Bu alanlarda kişisel dozimetre kullanılması ve alanın radyasyon seviyesinin alan monitörleri ile kontrol edilmesi zorunlu olup, alan girişlerinde, gözetimli alanlarda olduğu gibi radyasyon alanı olduğunu gösteren radyasyon simgesi ile dozimetre kullanımının zorunlu olduğunu ve alanın denetimli alan olduğunu gösteren uyarı yazısının bulunması gerekir (3,4,5,6,7,8,9,10).

## 4. Radyasyondan Korunma Felsefesi

Bir önceki bölümde bahsedilen tıbbi tanı ve tedavi uygulamalarında çalışan personel, hasta ve toplum radyasyon maruziyetinde radyasyondan korunmanın temel ilkeleri; gerekçelendirme (justification) tanı ve tedavi

amaçlı ışınlamalarda uygulamaların gerekliliği, optimizasyon (ALARA-As Low As Reasonably Achievable) mümkün olabilecek en düşük dozun uygulanması ve doz seviyeleri dikkate alınmalıdır (11). 1956 yılında Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP), “Bir kişi tarafından izin verilen maksimum maruziyet dozu, bu kişide somatik etkiler meydana getirmeyecek ve meydana gelecek genetik hasarlarda en alt seviyede olan dozdur.” şeklinde ifade etmiştir. ICRP doz tavsiyelerini yıllara göre güncelleyerek en son 2007 yılında yayınladığı ICRP103 numaralı raporunda, “ardışık 5 yılın ortalaması 20 mSv/yıl çalışanlar, 1mSv/yıl toplum” şeklinde sınırlamıştır. Ülkemizde 1967 yılında 6821 sayılı kanun ile Radyasyon Sağlığı Tüzüğü oluşturulmuştur. Tüzük ile radyasyon içeren faaliyetlerde ruhsatlandırma, yasal takip ve iptal yetkisi Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) komisyonuna verilmiştir.

Son yıllarda nükleer enerji alanında yeni atılımlar neticesinde; TAEK bünyesinde yürütülmekte olan düzenleyici ve denetleyici faaliyetler, uluslararası gereklilikler de dikkate alınarak 02.07.2018 tarihli ve 702 sayılı Nükleer Düzenleme Kurumunun Teşkilat ve Görevleri ile Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun Hükmünde Kararname kapsamında kurulan Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) bünyesinde yeniden düzenlenmiştir (12).

## 5. Radyasyondan Korunmanın Temel Prensipleri

### 5.1. Genel Radyasyon Güvenliği Kuralları

Radyasyon doğası gereği görülemez, duyulamaz, tadılamaz, koklanamaz ve hissedilemez, özetle duyu organlarımızla varlığını tespit edemeyiz. Bu sebeple dış ışınlama maruziyetini en aza indirebilmek için üç temel kurala dikkat edilmesi gerekmektedir.

**Zaman Kuralı:** Radyasyondan alınan doz miktarı ile o noktada geçirilen zaman doğru orantılıdır. Radyasyon ile yapılan işlemlerde radyasyon kaynağı ile geçirilen süre azaldıkça maruz kalınan doz da azalır. Yapılacak her işlem önceden tasarlanmalı ve planlanmalıdır, böylelikle radyasyon alanında geçirilecek süre hesaplanmalı ve azaltılması için gerekli düzenlemelere gidilmesi gerekmektedir.

**Uzaklık Kuralı:** Radyasyon kaynağından uzaklaştıkça mesafenin karesi ile ters orantılı olarak radyasyonun şiddeti azalmaktadır (ters kare kanunu). Bu sebepten; radyasyon çalışanı personel radyasyon kaynağından mümkün mertebe uzak mesafede çalışması alacağı dozu azaltacak önemli bir parametredir.

**Zırhlama Kuralı:** Zaman ve uzaklık kurallarına ek olarak alınan radyasyon dozunu azaltmak için kaynak ve uygulayıcı arasına konulan engele zırhlama denir. Kullanılan radyasyon türüne göre uygun zırhlama materyali kullanılması bu noktada oldukça önemlidir. Çünkü radyasyon türü ve enerjisine göre zırhlama materyalinin etkileşme olasılığı da değişmektedir.

## 6. Radyasyondan Korunmanın Temel İlkeleri

ICRP (International Commission of Radiation Protection) ve IAEA (International Atomic Energy Agency) tarafından iyonlaştırıcı radyasyonların zararlı etkilerinden korumak için bazı ilkeler önermiştir (11,12).

### Radyasyon Uygulamalarının Gerekliliği (Justification)

Bu ilkeye göre, radyasyon kullanılarak yapılacak uygulamaların zararları göz önünde bulundurulmalı ve net fayda sağlamayan hiçbir radyasyon uygulamasına izin verilememelidir. Tanı ve tedavi amacıyla iyonlaştırıcı radyasyon kullanılmasını gerektiren herhangi bir tıbbi girişim veya işlemin yapılması ile elde edilecek yararın, bunların kullanılmasından sonra oluşabilecek risklere göre daha fazla olduğu ispatlanması gerekmektedir (13).

### Optimizasyon (ALARA) İlkesi

ALARA (As Low As Reasonably Achievable) mümkün olabilen en düşük dozun alınması sağlanmalıdır. Bu ilkeye göre yasal doz sınırları sağlanmalı, çalışan personel, hastanın ve toplumun yani hasta yakınlarının maruz kalacağı radyasyon dozları bu sınırlardan altında ve mümkün olan en düşük seviyede tutulmalıdır (10).

### Doz Limiti İlkesi

Bir kişinin alabileceği etkin eş değer doz bir limit dâhilinde sınırlandırılmalıdır. Kümülatif kanser yükü ve kalıtsal aktarımda radyasyonun stokastik etkilerini kontrol altında tutabilmek amacıyla bu sınırlandırmaya ihtiyaç duyulmuştur. Doğal radyasyon ve tıbbi işlemlerde alınan doz değerleri, doz sınırlarının uygulanmasında dikkate alınmamaktadır (13).

### Radyasyon Görevlileri, Toplum Üyesi Kişiler ve Stajyerler İçin Doz Sınırları

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) şu an ki Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) tarafından uluslararası standartlara uygun olarak uyulması zorunlu yıllık doz sınırları sağlığa zarar vermeyecek şekilde Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği ile halk, radyasyonlu alanda çalışan personel, hamile personel ve stajyerler için belirlenmiştir (Tablo 1, Tablo2, Tablo3). Yıllık toplam doz hesaplanırken dış ve iç işlemlerden alınan dozlar

toplandır. Kişilerin denetimli alanda çalıştıkları radyasyon kaynaklarından dolayı belirlenen sınırların üzerinde doz almalarına müsaade edilmez, tıbbi ışınlamalar ve doğal radyasyon nedeniyle alınan dozlar toplam doza eklenemez (13).

*Tablo 1. Halk için doz limitleri*

Halk İçin Doz Limitleri	
Yıllık Etkin Doz	1 mSv/yıl
Lens	15 mSv/yıl
Cilt	50 mSv/yıl

*Tablo 2. Radyasyonlu alanda çalışan personel için yıllık doz limitleri*

Radyasyonlu Alanda Çalışan Personel İçin Yıllık Doz Limitleri		
	Ardışık 5 Yıllık Ortalaması	Tek Yıl
Yıllık Etkin Doz	20 mSv/yıl	50 mSv
Lens	20 mSv/yıl	50 mSv
Cilt	500 mSv/yıl	-
Hamile Personel	5 mSv/yıl	5 mSv

*Tablo 3. Stajyerler için doz limitleri*

Stajyerler İçin Doz Limitleri			
Yaş Grubu	16 yaş	16-18 yaş	18 yaş(14)
Yıllık Etkin Doz	Halk için doz limitleri geçerlidir	6 mSv/yıl	Radyasyonlu alanda çalışan personel için yıllık doz limitleri geçerlidir
Lens		15 mSv/yıl	
Cilt		150 mSv/yıl	

Sonuç olarak herhangi bir radyasyon uygulamasında, iyonlaştırıcı radyasyonun bilinçli ve kontrollü olarak kullanılması gerekli olup, yasal düzenlemeler dikkate alınmalıdır. Bu düzenlemeler; mesleki, tıbbi ve bilimsel çalışmalara ait ışınlamalarda radyasyondan korunmanın ve radyoaktif kaynakların güvenliğinin sağlanmasına ilişkin kuralları standart protokoller ile sınırlandırılarak, yasal sınırlarını belirler. Radyasyon çalışması olarak isimlendirilen personel eğitilmiş, bilinçli ve deneyimli olmalıdır. Ayrıca hem kendilerinin hem de çevre ve toplumun radyasyondan korunmada sorumlu kişilerdir.



## Kaynaklar

1. James E.Martin. Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği, Çeviri editörleri; Tanır AG, Bölükdemir MH,Koç K. Palme Yayınevi. 2013;7:305-8.
2. ICRP (1977). Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1.
3. UNSCEAR (2008). (United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations, New York.
4. UNSCEAR (2000). (United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation). Sources, effects and risk of ionizing radiation. United Nations, New York.
5. Değer M, Demir M, İnce M, vd. Kalite Kontrol, Enstrümantasyon ve Radyasyon Güvenliği Komitesi Yönergesi. Bölüm III. Radyasyon Güvenliği. Türk J Nucl Med 2004;13:151-169.
6. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği. Resmi Gazete Tarihi: 24.3.2000 Resmi Gazete Sayısı: 23999, Revizyon tarihi: Değişik: RG-3/6/2010-27600.
7. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. Nükleer Tesislerde Radyasyondan Korunma Yönetmeliği. Resmi Gazete 29.05.2018/30435.
8. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA General Safety Requirements 2014;3:10-1.
9. Applying Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine, Safety Reports Series No. 40, IAEA, Vienna, 2005.
10. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. Radyasyon Alanlarının Sınıflandırılmasına İlişkin Kılavuz (RSGD-KLV-005).
11. International Atomic Energy Agency (IAEA). Safety Series No:115. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Standards,2014.
12. <https://www.ndk.org.tr/ndk-hakkında>
13. Dirican B, Becerir HB, Olacak N, vd. Radyoterapi Fiziği. Radyasyondan Korunma Felsefesi ve Prensipleri. Nobel Yayınevi. 2020;59:937,57.
14. Report of Amendments during 1956 to Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) Radiation Research, Vol. 8, No. 6, June 1958.

## Brakiterapi

Aykut Oğuz Konuk<sup>1</sup>

Berna Tırpancı<sup>2</sup>

### Özet

Brakiterapi (BRT), dış ışın radyasyon tedavisi (EBRT) ile birlikte önemli ve etkili bir radyasyon tedavi sürecidir. BRT’de EBRT’den farklı olarak radyasyon kaynağı radyoizotoplardır. BRT, tümörleri ortadan kaldırmak ve küçültmek amacıyla radyoaktif cihazların tümörlerin yakınına yerleştirilmesiyle yüksek dozda radyasyonun güvenli bir şekilde iletilmesini sağlayan bir radyoterapi tekniğidir.

BRT uygulaması tümörün lokasyonuna, tümörün sağlıklı dokulara olan mesafesine, kanser türüne göre 6 ayrı tekniğe ayrılır. Bunlar; İntrakaviter Brakiterapi Uygulaması, İnterstisyel Brakiterapi Uygulaması, İntraluminal Brakiterapi Uygulaması, Yüzeysel Brakiterapi Uygulaması, İntraoperatif Brakiterapi Uygulaması, İntravasküler Brakiterapi Uygulaması şeklindedir.

### 1.Brakiterapi Tarihçesi

Brakiterapi (BRT) “Yakından Tedavi” anlamına gelmektedir. Yunanca da “kısa” anlamına gelen “brachios” ve terapi anlamına gelen “theraphia” kelimelerinden türetilmiştir (1,2). Kanser tedavisinde kullanılan BRT, radyoaktif kaynağın tümör yakınına, içine ya da yüzeyine yerleştirildiği radyoterapi tedavi yöntemidir. BRT’in çalışma prensibi, mesafenin karesinin tersiyle orantılı olarak nokta kaynağın dozunun azalması şeklindedir (3). Bu nedenle BRT, çevreleyen normal dokulara verilen radyasyon dozunu azaltırken, tümöre yüksek doz radyasyon verilebilmesini sağlar (4).

BRT, 1898 yılında Curie’nin bir radyoaktif kaynak olan radyumu (Ra) keşfinden hemen sonra kanser tedavisinde kullanımı etkili hale gelmiştir

1 Sağlık Fizikçisi, Kocaeli Üniversitesi Hastanesi Radyasyon Onkolojisi, aykut.oguz.konuk@hotmail.com, Orcid : 0000-0003-2418-1478

2 Dr.Sağlık Fizikçisi, Kocaeli Üniversitesi Hastanesi Radyasyon Onkolojisi, bernaerdurmus@gmail.com, Orcid: 0000-0001-8151-0552

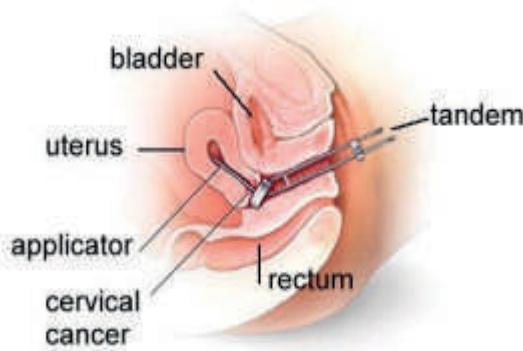
(5,6). İlk kez 1901'de Paris'te Dr.Donlos ve Dr.Block, bir miktar radyum radyoaktif kaynağını yüzeysel aplikatörlerle lupus tedavisinde kullanmışlardır. Jinekolojik kanserlerin tedavisinde ilk kez Doderlein ve Cleaves'in, 1903'de inoperabl uterus kanseri tedavisinde radyoaktif kaynak olarak radyumu kullandığı görülür. BRT'de kullanılmak üzere radyum, iğne ve tüpleri 1920'li yıllarda geliştirmiş, 1930'lu yıllarda jinekolojik brakiterapinin ilk dozimetri sistemi olan Manchester sistemi (Paterson- Parker sistemi) geliştirmiş ve tedavi planlamasında sıkça kullanılmıştır. 1948 yılında Kobalt-60, 1952 yılında Talyum-182 iğnelerinin ve altın tohumlarının, 1954 yılında ise Iridyum-192 kaynaklarının BRT'de kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler sonrasında sonradan yükleme tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik ile serviks kanseri tedavisinde 1967'de uygulanmaya başlanmıştır. Microselectron brakiterapi cihazı Ir-192 uygulamaları 1986 yılında radyoterapide kullanılmaya başlanmıştır (7,8).

## 2.Brakiterapi Uygulama Şekilleri

BRT uygulaması tümörün lokasyonuna, tümörün sağlıklı dokulara olan mesafesine, kanser türüne göre 6 ayrı tekniğe ayrılır;

### 2.1.İntrakaviter Brakiterapi Uygulaması;

Radyoaktif kaynakların vücut boşluklarında tümör yakınına yerleştirildiği, sıklıkla jinekolojik tümörlerde kullanılan bir BRT tekniğidir (Şekil 1.)(3)

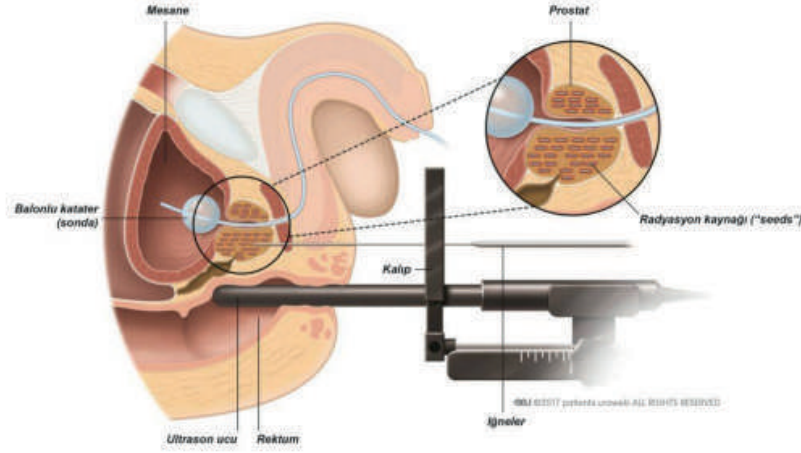


Şekil 1.İntrakaviter Brt uygulaması

Bu tip uygulamalarda Ir-192 ve Cs-137 radyoaktif kaynakları sıkça kullanılmaktadır (9).

## 2.2.İnterstisyel Brakiterapi Uygulaması;

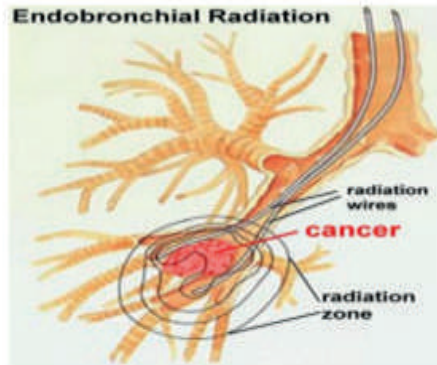
Direk olarak tümörlü dokuya radyoaktif implantların yerleştirilmesiyle uygulanan Brt tekniğidir. İmplantlar kalıcı ya da geçicidir (10). Baş boyun, meme, dil altı tümörleri ve prostat kanserlerinde (Şekil 2) uygulanmaktadır (9,11,12).



Şekil 2. İnterstisyel Brt uygulaması ile prostat tedavisi

## 2.3.İntraluminal Brakiterapi Uygulaması;

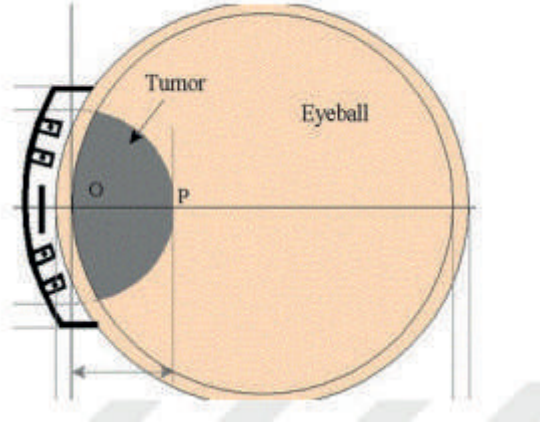
Bronş ve özefagus gibi vücut bölgelerine (Şekil 3.) (3) uygun aplikatörlerle implantların yerleştirilmesiyle uygulanan Brt tekniğidir ve “Transluminal Brt” olarak da adlandırılır (12).



Şekil 3. İntraluminal Brakiterapi Uygulaması

## 2.4.Yüzeyel Brakiterapi Uygulaması;

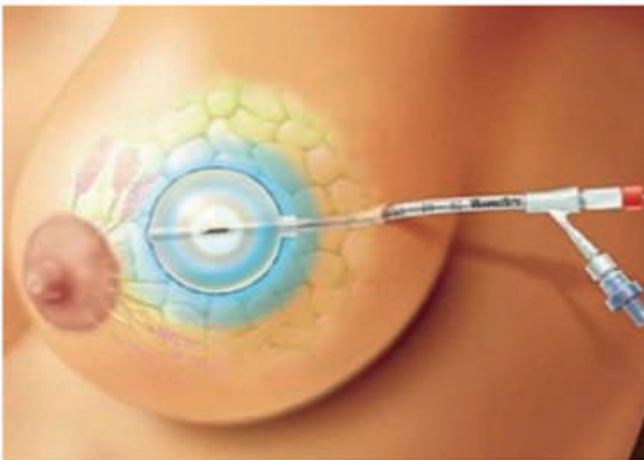
Göz ve deri gibi yüzeyel bölgelerdeki tümörlere radyoaktif plakların yerleştirilmesiyle uygulanan Brt tekniğidir (Şekil 4.) (3) .



Şekil 4. Yüzeyel Brakiterapi Uygulaması

## 2.5.İntraoperatif Brakiterapi Uygulaması;

İntraoperatif Brt yönteminde, cerrahi operasyon sırasında radyoizotop kaynaklar özel aplikatörler yardımı ile tümör içerisine yerleştirilir(13).Bu yöntem genellikle yumuşak doku sarkomu ve meme (Şekil 5.) kanserlerinde uygulanır (9).



Şekil 5. İntraoperatif Brakiterapi Uygulaması

## 2.6.İntravasküler Brakiterapi Uygulaması;

İntravasküler Brt, tek bir kaynağın aplikatör yardımıyla arterlerin içine yerleştirilmesiyle anjioplasti sonrası gelişebilen restenozu önlemek amacıyla uygulanır (14). Gama ışını yayan ya da beta bozunumu yapan kaynaklar kullanılmaktadır (15).

## 3.Brakiterapide Kullanılan Kaynaklar

Brakiterapide kullanılan radyoaktif kaynakların seçiminde bazı özellikler göz önüne alınmalıdır. Bunlar; kaynağın yarılanma ömrü, aktivitesi, parçalanma şekli ve ortalama foton enerjisidir (16). Tablo 1. de brakiretapide kullanılan radyoaktif kaynakların fiziksel özellikleri görülmektedir (2).

Radyonüklid	Yarı Ömür	Işın Tipi	Foton Enerjisi
Ra-226	1622 yıl	$\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$	0,8 MeV
Rn-222	91,8 saat	$\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$	0,78 MeV
Cs-137	30 yıl	$\beta$ , $\gamma$	0,662 MeV
Co-60	5,27 yıl	$\beta$ , $\gamma$	1,25 MeV
Sr-90	28,7 yıl	$\beta$	0,546 MeV
Ta-182	115 gün	$\beta$ , $\gamma$	0,70 MeV
Au-198	64,7 saat	$\beta$ , $\gamma$	0,42 MeV
Ir-192	73,8 gün	$\beta$ , $\gamma$	0,37 MeV
Cf-252	2,64 yıl	$\alpha$ , $\gamma$ , n	0,1 MeV
Y-90	64 saat	$\beta$	2,27 MeV

*Tablo 1. Brakiterapide kullanılan belirli radyoaktif kaynakların fiziksel özellikleri*

Günümüzde en sık kullanılan Ir-192 kaynağıdır. Ir-191 elementinin bir reaktörde nötronla tepkimeye sokulmasıyla elde edilmektedir. Ir-192 kaynağının ortalama gama enerjisi 0,38 MeV'dir (0,136 MeV-1,06 MeV). Yarı ömrü 73,8 gündür. Yaklaşık olarak günde %1 kadarlık kesimi radyoaktif bozunuma uğramaktadır. Ir-192 radyoaktif kaynağının iyonlaştırıcı radyasyon şiddetini yarıya düşürmek için 2,5 mm'lik kurşun yeterlidir. Günümüzde Ulrich Henschke tarafından 1958 yılında, uzaktan kumandalı sonradan yüklemeli yüksek doz hızlı brakiterapi tedavi cihazlarında radyoaktif kaynak olarak kullanılan Ir-192 ilk defa iğne kaynak olarak kullanılmıştır. 1960'larda Ir-192 tel şeklinde yüksek doz hızlı brakiterapi cihazlarında kullanılmaya başlanmıştır (2).

## REFERANSLAR

- Cüneyt E., “Ring ve Tandem Aplikatörleri ile Yüksek Doz Hızlı İntrakaviter Brakiterapi Uygulanmış Yerel İleri Serviks Karsinomlu Olguların, Brakiterapi Uygulamaları Arasında Aplikatör Pozisyon Değişkenliğinin İncelenmesi”, Tıpta Uzmanlık Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Tıp Fakültesi, İzmir, 2006.
- Berna E. T., “Brakiterapide Planlama Optimizasyonlarının Karşılaştırılması”, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2021.
- Nazlı B., “İnopere Serviks Kanserli Hastalarda 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Brakiterapi Tedavi Planlamalarının Dozimetrik Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015.
- Timur Mitin. Radiation therapy techniques in cancer treatment [Internet]. UpToDate. 2022.
- “AAPM, Code of practice for brachytherapy physics: Report of the AAPM radiation therapy committee task group no:56”. Med. Phys.24(10), 1557-1598, 1997.
- Pierquin P, Wilson JF, Chassagne D. “Modern brachytherapy”. USA,1987.
- Çelebioğlu B, Akfırat C. Brakiterapi. Ankara Üniversitesi Dikimevi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Yıllığı 2001;2:1.
- The GEC ESTRO Handbook of Brachytherapy. Gerbaulet A, Pötter R, Mazeron JJ, Meetens H, Limbergen EV. Leuven,2002; p. 3-20.
- Dönmez B, Ünsal M. Brakiterapi. Okmeydanı Tıp Dergisi 2013;29:35-40.
- Nurgül K.,”Brakiterapi Alan Jinekolojik Kanserli Hastaların Cinsel Fonksiyon Durumlarının Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2019.
- Merve K.G.,“Pla Malzemenen Yapılmış Göz Fantomunda Radyokromik Film Dozimetri Tekniği Kullanarak <sup>142</sup>Pr Beta Doz Dağılımının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2020.
- Canadian Cancer Society, Brachytherapy. Canada. Available From: <http://www.cancer.ca/en/cancer-information/diagnosis-and-treatment/radiationtherapy/brachytherapy/region=on>.
- Kerem D., “Yüksek Doz Hızlı Praseodim-142 Brakiterapi Kaynağın Reaktörde Üretilmesi Ve Seçilen Hedef Organlara Özgü Fantomlarda Uygulanabilirliğinin Dozimetri Teknikleri İle İncelenmesi”, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2021.
- Kollaard, R. P., Dries, W. J. F., Kleffens, H. J. V., Aalbers, A. H. L., Marel, J. V. D., Marijnissen, J. P. A., Piessens, M., Schaart, D. R. and Vroome, H. D. Report 14 of the Netherlands Commission on Radiation Dosimetry,

quality control of sealed beta sources in brachytherapy, recommendations on detectors, measurement procedures and quality control of beta sources, NCS14, 96 p., Netherlands. 2004.

Podgorsak E.B., A Handbook for Teachers and Students, IAEA, Radiation Oncology, Physics, 2005.

Yavaş G, Yavaş Ç. Serviks kanserinde intrakaviter brakiterapideki güncel gelişmeler. Selçuk Üniversitesi Selçuklu Tıp Fakültesi, Konya Eğitim Araştırma Hastanesi.





# Radyasyon Fiziği ve Sağlık Etkileri- 1

Editörler:

Doç. Dr. İsmet Meydan

Doç. Dr. Canan Demir

 ÖZGÜR  
YAYINLARI

ISBN 978-975-447-879-2



9 789754 447879 2