

Sağlık Bilimlerinde Radyolojinin Yeri: Kuramsal Temelden Klinik Uygulamaya Modern Köprü

Davut Ünsal Çapkan¹

Özet

Radyoloji, modern tıbbın temel disiplinlerinden biri olarak sağlık bilimlerinde kuramsal bilgiyi klinik uygulamalarla birleştirir. Bu bölümde radyolojinin sağlık bilimlerindeki konumu, görüntüleme yöntemlerinin bilimsel altyapısı, klinik karar süreçlerine katkıları, girişimsel uygulamaların kapsamı, radyasyon güvenliği ve etik ilkeler ile geleceğe yönelik eğilimler bütüncül biçimde ele alınmaktadır. Radyolojinin kuramsal temelleri fizik, biyomedikal mühendislik ve moleküler biyoloji ilkelerine dayanır; X-ışınları, bilgisayarlı tomografi, manyetik rezonans, ultrasonografi ve nükleer tıp yöntemlerinin çalışma prensipleri bu çerçevede özetlenir. Bu ilkeler, teknolojik gelişmeleri desteklemenin ötesinde, farklı klinik bağlamlarda en uygun görüntüleme yönteminin rasyonel seçimine rehberlik eder. Klinik karar verme sürekliliğinde radyoloji; tanı, tedavi planlaması ve izlem aşamalarında vazgeçilmezdir. İnme, travma, onkoloji ve kardiyoloji gibi kritik alanlarda görüntüleme bulguları, multidisipliner ekiplerin yönetimini doğrudan yönlendirir. Girişimsel radyoloji, tanısal biyopsilerden tümör ablasyonu ve vasküler girişimlere, kas-iskelet sistemine yönelik işlemlere kadar uzanan minimal invaziv yaklaşımlarla morbiditeyi ve hastanede kalış süresini azaltarak hasta güvenliğini artırır. Teknik boyutun ötesinde, ALARA prensibi, pediatrik ve gebelik popülasyonlarında koruyucu stratejiler, bilgilendirilmiş onam ve mahremiyetin korunması, hasta merkezli ve etik bir pratiğin temelini oluşturur. Yapay zekâ, fonksiyonel ve moleküler görüntüleme, radyogenomik ve simülasyon-temelli eğitim modelleri gibi gelişmeler, radyolojiyi kişiselleştirilmiş tıbbın merkezine taşımakta; alanı yalnızca görüntülemenin ötesinde, klinik kararların tüm aşamalarında belirleyici bir konuma yerleştirmektedir.

1 Medical Point Gaziantep Hospital, Radiology Department, Gaziantep, Turkey
ORCID: 0009-0007-6937-8799 Email: drdavutunsal11@gmail.com

GİRİŞ

Radyoloji, modern tıbbın tanı ve tedavi süreçlerinde temel bir rol üstlenen, sağlık bilimlerinin kuramsal ilkeleri ile klinik uygulamalarını bütünleştiren bir disiplindir. Görüntüleme yöntemleri sayesinde insan vücudunun morfolojik ve fonksiyonel özellikleri invaziv olmayan yöntemlerle değerlendirilebilmekte, böylece hastalıkların erken tanısı, evrelemesi ve tedavi yanıtının izlenmesi mümkün olmaktadır (Brink & Miller, 2017).

Radyolojinin sağlık bilimlerindeki yerini anlamak için, 1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen'in X-ışınlarını keşfinden başlamak gerekir. Bu buluş, yalnızca tıp tarihinde değil, bilim tarihinde de bir dönüm noktası olmuştur. X-ışınlarının insan vücuduna zarar vermeden iç organların görüntülenmesine imkân tanınması, tıbbın tanısallık kapasitesini bir anda olağanüstü ölçüde artırmıştır. Röntgen'in keşfinden kısa süre sonra ilk radyografiler çekilmiş, tüberküloz tanısı, kemik kırıkları ve yabancı cisimlerin saptanmasında çığır açılmıştır.

20.yüzyılın ortalarına gelindiğinde bilgisayarlı tomografinin (BT) geliştirilmesi, radyolojinin olanaklarını bir üst seviyeye taşımış; ardından manyetik rezonans görüntüleme (MR), ultrasonografi ve nükleer tıp yöntemleri tıp pratiğine girmiştir. Bu gelişmeler, radyolojiyi yalnızca “tanısal bir alan” olmaktan çıkarıp, tıbbi karar süreçlerinin merkezinde yer alan bir disiplin hâline getirmiştir.

1-Radyolojinin Sağlık Bilimlerindeki Yeri

Sağlık bilimlerinde çalışan klinisyenler için radyoloji yalnızca teknik bir inceleme alanı değil, klinik karar verme süreçlerinin ayrılmaz bir bileşenidir. Cerrahi disiplinlerde preoperatif görüntüleme, cerrahi planlamanın temelini oluştururken; dahili bilimlerde radyolojik bulgular, hastalıkların erken dönemde saptanması ve tedaviye uygunluğun belirlenmesinde kritik öneme sahiptir (Hricak et al., 2021). Böylelikle radyoloji, farklı disiplinlerde tanı ve tedaviye yön veren bir rehber olarak konumlanır.

Radyolojinin kuramsal yönü büyük ölçüde fizik ve biyomedikal mühendislik ilkelerine dayanmaktadır. X-ışınlarının dokularla etkileşimi, manyetik rezonans fenomenleri, ultrasonun akustik özellikleri ya da nükleer tıbbın moleküler düzeyde sunduğu bilgiler, disiplinin bilimsel temelini oluşturur (Sceram, 2019). Bu altyapı yalnızca teknolojik gelişmelere yön vermekle kalmaz, aynı zamanda sağlık bilimleri öğrencilerinin biyofizik, anatomi ve patoloji bilgilerini klinik uygulamalarla ilişkilendirmelerini sağlar.

Disiplinler arası iş birliği de radyolojinin sağlık bilimlerindeki konumunu güçlendirmektedir. Kardiyoloji, pediatri, nöroloji, onkoloji ve ortopedi gibi birçok alanda tanı ve tedavi kararları radyolojik bulgular ışığında şekillenir. Multidisipliner tümör konseylerinde radyoloğun katkısı tedavi stratejilerinin belirlenmesinde kritik olabilirken, travma hastalarında acil görüntüleme çoğu zaman hayat kurtarıcıdır (European Society of Radiology [ESR], 2019).

Bu genel çerçeve, radyolojinin sağlık bilimlerinde yalnızca teknik bir araç değil, teorik bilgi ile klinik uygulama arasında köprü kuran dinamik bir alan olduğunu ortaya koymaktadır. Buradan hareketle, radyolojinin anlaşılabilmesi için temel görüntüleme yöntemlerinin kuramsal temellerine yönelmek gerekir. Bir sonraki bölümde, bu yöntemlerin bilimsel dayanakları ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2. Görüntüleme Yöntemlerinin Kuramsal Temelleri

Tıbbi görüntüleme, modern tıbbın tanı ve tedavi süreçlerinde vazgeçilmez bir konuma sahiptir. Günümüzde kullanılan radyolojik yöntemler, farklı fiziksel prensiplere dayalı olarak geliştirilmiş olup, her bir teknik kendi avantajları, sınırlılıkları ve özel kullanım alanları ile karakterize edilmektedir. Radyolojinin kuramsal temellerinin anlaşılması, yalnızca cihazların çalışma prensiplerini bilmek açısından değil, aynı zamanda hangi klinik durumda hangi yöntemin tercih edilmesi gerektiğine yönelik rasyonel karar verebilmek açısından da kritik öneme sahiptir.

2.1. X-Işınları ve Konvansiyonel Radyografi

Radyolojinin başlangıç noktası, Wilhelm Conrad Röntgen'in 1895 yılında X-ışınlarını keşfi ile olmuştur. X-ışınları, kısa dalga boylu ve yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. İnsan vücuduna gönderildiğinde dokularla farklı şekillerde etkileşime girerler. Yoğunluğu yüksek dokular, özellikle kalsiyum içeren kemikler, X-ışınlarını daha fazla soğurarak beyaz; yoğunluğu düşük dokular ise daha az soğurarak daha koyu tonlarda görüntülenir (Bushberg, Seibert, Leidholdt, & Boone, 2012).

Konvansiyonel radyografinin avantajları arasında düşük maliyet, hızlı çekim süresi ve geniş erişilebilirlik sayılabilir. Bu nedenle göğüs hastalıkları, travma, ortopedi ve diş hekimliği gibi alanlarda halen ilk basamak görüntüleme yöntemi olma özelliğini sürdürmektedir. Bununla birlikte, iki boyutlu görüntü sunması ve yumuşak dokuların kontrast çözünürlüğünün sınırlı olması, başlıca dezavantajlarıdır.

2.2. Bilgisayarlı Tomografi (BT)

Bilgisayarlı tomografi, 1970'li yıllarda klinik kullanıma girmiş ve radyolojide devrim yaratmıştır. BT, X-ışınlarının farklı açılardan gönderilmesiyle elde edilen verilerin bilgisayar algoritmaları aracılığıyla üç boyutlu olarak yeniden yapılandırılması prensibine dayanır. Bu yöntem, özellikle akciğer, beyin ve abdominal organların incelenmesinde yüksek uzaysal çözünürlük sunar (Brenner & Hall, 2007).

BT'nin avantajları arasında hızlı çekim süresi, geniş anatomik alanların kısa sürede taranabilmesi ve acil durumlarda hayat kurtarıcı olması yer alır. Ancak en önemli dezavantajı iyonizan radyasyon maruziyetidir. Bu nedenle son yıllarda düşük doz protokolleri, iterative reconstruction algoritmaları ve pediatrik popülasyon için özel yazılımlar geliştirilmiştir (Kalra, Maher, Rizzo, Kanarek, & Shepard, 2004).

Klinik uygulamada BT, özellikle travma hastalarında total vücut taramalarında, inme olgularında beyin perfüzyon çalışmalarında, kardiyolojide koroner BT anjiyografi ile damar değerlendirmesinde vazgeçilmez hale gelmiştir.

2.3. Manyetik Rezonans Görüntüleme (MR)

Manyetik rezonans görüntüleme, iyonizan radyasyon kullanmayan bir yöntemdir. Temelinde, güçlü manyetik alan ve radyo dalgaları ile hidrojen protonlarının enerjilerindeki değişimlerin ölçülmesi yatar. İnsan vücudunda en bol bulunan element olan hidrojenin manyetik özelliklerinden yararlanılarak elde edilen sinyaller, farklı sekanslarla çeşitlendirilir ve yüksek kontrast çözünürlükte görüntüler üretilir (Brown & Semelka, 2019).

MR'ın en önemli avantajı yumuşak doku kontrastındaki üstünlüğüdür. Beyin, omurilik, kas-iskelet sistemi, karaciğer ve pelvis gibi alanlarda olağanüstü ayrıntılı görüntüler elde edilebilir. Ayrıca difüzyon ağırlıklı görüntüleme, perfüzyon çalışmaları ve fonksiyonel MR gibi ileri teknikler, yalnızca morfolojik değil, aynı zamanda fizyolojik bilgi de sağlar. Dezavantajları ise uzun çekim süreleri, yüksek maliyet ve hareket artefaktlarına duyarlılıktır.

2.4. Ultrasonografi (USG)

Ultrasonografi, yüksek frekanslı ses dalgalarının doku arayüzlerinden yansımaya dayanan bir tekniktir. İyonizan radyasyon içermemesi, taşınabilirliği, düşük maliyeti ve gerçek zamanlı inceleme olanağı, ultrasonu pediatri, obstetri ve acil servislerde ilk tercih edilen yöntemlerden biri yapmaktadır (Nelson & Pretorius, 2020).

USG'nin avantajları arasında damar yapılarının Doppler incelemeleriyle değerlendirilmesi, gebelikte fetüsün güvenli takibi ve girişimsel işlemlerde iğne kılavuzluğunda rehberlik etmesi bulunmaktadır. Operatör bağımlılığı ve derin dokularda görüntüleme sınırlılıkları ise dezavantajlarıdır.

2.5. Nükleer Tıp ve Hibrid Görüntüleme

Nükleer tıp, radyoaktif izotopların organ düzeyinde dağılımını görüntülemeye dayanır. Tek foton emisyon tomografisi (SPECT) ve pozitron emisyon tomografisi (PET), özellikle onkoloji ve kardiyoloji alanlarında metabolik ve fonksiyonel bilgi sağlamaktadır. Son yıllarda PET/BT ve PET/MR gibi hibrid sistemler geliştirilmiş olup, bu yöntemler morfolojik ve metabolik bilgiyi aynı anda sunarak tanısal doğruluğu artırmıştır (Townsend, 2020).

PET görüntülemede en yaygın kullanılan radyoizotop florodeoksiglukoz (FDG)'dur. FDG-PET özellikle malignitelerin saptanmasında, evrelemesinde ve tedaviye yanıtın değerlendirilmesinde yüksek duyarlılık ve özgüllük göstermektedir.

2.6. Görüntüleme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Her bir görüntüleme yönteminin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları vardır. Örneğin, travma hastasında BT hayat kurtarıcı olabilirken, çocuk hastada ultrason öncelikli tercih edilmelidir. Beyin tümörlerinde MR yüksek doku kontrastı sağlarken, metabolik aktivite için PET görüntüleme tamamlayıcıdır. Bu nedenle günümüzde radyoloji, tek bir yöntemin değil, yöntemlerin rasyonel kombinasyonlarının kullanıldığı bütüncül bir disiplin olarak tanımlanmaktadır.

3. Klinik Karar Sürecinde Radyolojinin Rolü

Radyoloji, modern tıbbın yalnızca tanısal doğruluk sağlamaktan ibaret olmayan, klinik karar verme sürecinin tüm aşamalarına nüfuz eden bir bileşenidir. Tanı, evreleme, tedavi planlama, tedaviye yanıtın değerlendirilmesi ve uzun dönem takip süreçlerinde radyolojik veriler, klinisyenlerin stratejik kararlarını yönlendiren en önemli unsurlardan biri hâline gelmiştir. Günümüzde multidisipliner yaklaşımın vazgeçilmez bir parçası olan radyoloji, birçok klinik senaryoda karar mekanizmasının belirleyici noktasıdır (Sardanelli et al., 2017).

Örneğin, onkoloji pratiğinde radyolojik incelemeler olmaksızın doğru evreleme yapmak neredeyse imkânsızdır. Akciğer kanseri olgularında PET/BT ile lenf nodu metastazlarının veya uzak organ tutulumlarının gösterilmesi,

hastanın cerrahiye mi yoksa sistemik tedaviye mi yönlendirileceğini belirler. Benzer şekilde meme kanserinde MR, tümörün multifokalitesini ve göğüs duvarıyla ilişkisini ortaya koyarak cerrahın mastektomi ya da meme koruyucu cerrahi kararına doğrudan etki eder. Bu veriler, yalnızca tanısal doğruluk sağlamaz, aynı zamanda tedavi algoritmalarının tümünü şekillendirir.

Kardiyovasküler hastalıkların yönetiminde de benzer bir durum söz konusudur. Koroner BT anjiyografi, invaziv koroner anjiyografi ihtiyacını azaltmakta, noninvaziv biçimde aterosklerotik plak yükü hakkında bilgi vererek hangi hastaların medikal tedaviye, hangilerinin girişimsel yaklaşıma uygun olduğunu belirlemektedir. Özellikle asemptomatik bireylerde koroner kalsiyum skorlaması, gelecekteki kardiyak olay riskinin öngörülmesini sağlayarak klinik kararları doğrudan etkilemektedir.

Nörolojide de radyolojinin klinik karar sürecindeki merkezi rolü açıktır. Akut inmede ilk dakikalarda yapılan BT, hemorajiyi dışlayarak trombolitik tedavi kararını belirlerken, difüzyon MR ise infarkt alanını göstererek tedavi penceresini tanımlar. Bu görüntüleme olmadan yapılan klinik kararlar, yüksek oranda mortalite ve morbidite riskini beraberinde getirebilir. Radyoloji bu anlamda sadece tanıyı doğrulayan değil, aynı zamanda klinik müdahalenin yönünü belirleyen bir kılavuzdur.

Travma hastalarında total vücut BT'nin kullanımı, multidisipliner ekibin hızlı karar almasını mümkün kılar. Örneğin batın içi organ yaralanmalarının varlığı, aktif kanama olup olmadığı ve eşlik eden toraks yaralanmaları tek bir inceleme ile ortaya konabilir. Bu bilgiler, cerrahın acil laparotomiye mi, yoksa konservatif yaklaşıma mı karar vereceğini doğrudan belirler. Acil servislerde alınan bu hızlı kararlar, hastanın yaşam şansını artırmakta ve kaynak kullanımını optimize etmektedir.

Multidisipliner tümör konseylerinde de radyoloji, tartışmaların merkezindedir. Radyoloğun sunduğu ayrıntılı rapor ve görüntüler, onkolog, cerrah ve radyasyon onkoloğu için tedavi planının temelini oluşturur. Tümörün boyutu, sınırları, lenf nodu tutulumları ve uzak metastaz bulguları, hangi hastada neoadjuvan tedavi uygulanacağına, hangi hastanın doğrudan cerrahiye alınacağına karar vermede belirleyici parametrelerdir. Bu nedenle günümüzde “görüntüleme temelli karar verme” klinik pratiğin standardı hâline gelmiştir (Sardanelli et al., 2017).

Kısacası, radyoloji klinik karar süreçlerinde yalnızca tanısal doğruluk sağlayan bir araç değil, aynı zamanda tanıdan tedaviye giden yolda her aşamada aktif rol alan bir rehberdir. Modern sağlık hizmetlerinde klinik stratejilerin çoğu, radyolojik veriler olmadan eksik kalmakta ve hasta

güvenliği açısından riskli hâle gelmektedir. Bu nedenle radyoloji, çağdaş tıp pratiğinde yalnızca tamamlayıcı bir unsur değil, klinik kararların ayrılmaz bir bileşeni olarak görülmektedir

3.1. Tanısal Katkıları ve Erken Tanı

Klinik karar verme sürecinin ilk basamağı tanıdır. Radyolojik yöntemler, pek çok durumda erken tanıya ulaşmayı mümkün kılar ve bu da tedavi başarısını doğrudan etkiler. Akut iskemik inme örneğinin, acil koşullarda yapılan bilgisayarlı tomografi (BT) incelemesi intrakraniyal kanamanın varlığını dakikalar içinde dışlayarak trombolitik tedavinin güvenli bir şekilde uygulanıp uygulanamayacağını belirler. Difüzyon ağırlıklı manyetik rezonans görüntüleme (DW-MRI) ise serebral dokuda iskemik değişiklikleri dakikalar içinde göstererek “inme penceresi”nin hassasiyetle belirlenmesini sağlar ve bu nedenle altın standart olarak kabul edilmektedir (Powers et al., 2019). Bu erken tanı, yalnızca mortaliteyi azaltmakla kalmaz, aynı zamanda sakatlık oranlarını da ciddi biçimde düşürür.

Onkoloji alanında da radyolojinin erken tanıdaki rolü vazgeçilmezdir. Mamografinin sağladığı tarama avantajı, meme kanserinin henüz klinik belirti vermediği dönemlerde mikrokalsifikasyonların saptanmasını mümkün kılar. Buna ek olarak, kontrastlı manyetik rezonans görüntüleme, mamografinin şüpheli bulgularını destekler veya meme yoğunluğu yüksek bireylerde ilave bilgi sağlayarak erken evre lezyonların ortaya çıkarılmasına yardımcı olur. Bu sayede tümör çapı küçülmeden, lenf nodu tutulumu başlamadan ve metastatik süreç hız kazanmadan hastalık saptanabilir. Erken evrede saptanan meme kanseri olgularında sağkalım oranlarının belirgin biçimde artması, radyolojik taramaların doğrudan yaşam kurtarıcı rolünü göstermektedir.

Akciğer kanseri, dünya genelinde en sık görülen ve en fazla ölüme yol açan kanser türlerinden biridir. Klinik belirtiler genellikle ileri evrede ortaya çıktığı için tarama yöntemlerinin önemi büyüktür. Düşük doz BT kullanımıyla yapılan akciğer kanseri taramaları, erken evrede küçük nodüllerin yakalanmasını sağlar ve bu taramaların mortaliteyi anlamlı şekilde azalttığı randomize kontrollü çalışmalarla gösterilmiştir (National Lung Screening Trial Research Team, 2011). Örneğin, yüksek risk grubundaki uzun süreli sigara içicilerde düşük doz BT ile tanınan küçük hücreli dışı akciğer kanserlerinde cerrahi rezeksiyon şansı doğmakta, ileri evredeki olgularda görülen düşük sağkalım oranlarının önüne geçilebilmektedir.

Radyolojik yöntemlerin erken tanıya katkısı sadece kanser veya inme gibi ölümcül hastalıklarla sınırlı değildir. Örneğin, akut apandisit olgularında ultrasonografi ile yapılan hızlı inceleme, gereksiz laparotomileri

önleyebilirken, şüpheli durumlarda BT ile inflamasyonun evresi ve komplikasyonların varlığı netleştirilerek hem yanlış negatif hem de yanlış pozitif oranlar azaltılmaktadır. Çocuklarda ultrasonun non-invaziv yapısı, radyasyon riski olmaması ve gerçek zamanlı inceleme imkânı, erken tanıyı güvenli biçimde mümkün kılmaktadır.

Ayrıca pediatrik popülasyonda konjenital anomalilerin tanısında da radyoloji ön plandadır. Yenidoğanlarda ultrasonografi ile saptanan böbrek anomalileri, erken müdahaleyle ileride oluşabilecek böbrek yetmezliğinin önüne geçilmesini sağlar. Benzer şekilde prenatal dönemde yapılan ultrason ve fetal MR incelemeleri, santral sinir sistemi malformasyonlarını veya kardiyak anomalileri doğum öncesinde tanıyabilmekte, böylece hem aileye danışmanlık verilmekte hem de doğum sonrası tedavi planlaması yapılabilmektedir.

Tüm bu örnekler, radyolojinin klinik karar süreçlerinin en başında yer alan tanı aşamasındaki hayati rolünü gözler önüne sermektedir. Erken dönemde yapılan doğru tanı yalnızca hastanın yaşam süresini uzatmakla kalmaz, aynı zamanda yaşam kalitesini artırır ve sağlık sistemine olan maliyetleri azaltır. Bu nedenle radyolojik yöntemler, modern tıbbın “erken tanı – erken tedavi” yaklaşımının vazgeçilmez taşıyıcı sütunlarından biri olarak kabul edilmektedir (Powers et al., 2019; National Lung Screening Trial Research Team, 2011).

3.2. Hastalıkların Evrenmesi ve Risk Sınıflaması

Tanının ötesinde radyoloji, hastalıkların evrenmesinde ve risk sınıflamasında belirleyici bir rol üstlenmektedir. Özellikle onkolojide doğru evreleme yapılması, yalnızca hastalığın mevcut yaygınlığını ortaya koymakla kalmaz, aynı zamanda tedavi stratejilerinin seçiminde de belirleyici olur. TNM sınıflamasının güvenilir biçimde yapılabilmesi, radyolojik veriler olmaksızın mümkün değildir. Lezyonun boyutu, lenf nodu tutulumu ve uzak metastaz varlığı gibi parametreler, bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MR) ve pozitron emisyon tomografisi/bilgisayarlı tomografi (PET/BT) incelemeleri ile ayrıntılı biçimde değerlendirilmektedir (Choi et al., 2018).

Örneğin, akciğer kanserinde BT ile primer tümör boyutu ve lokal invazyon; PET/BT ile lenf nodu metastazları ve uzak organ tutulumları net olarak belirlenebilir. Bu sayede bir hasta, cerrahi rezeksiyona uygun “erken evre” kategorisinden sistemik tedaviye ihtiyaç duyacak “ileri evre” kategorisine farklılaştırılabilir. Benzer şekilde kolorektal kanserlerde karaciğer metastazlarının çok fazla BT ve MR ile doğru biçimde tanımlanması, hangi

hastaların cerrahi şansı olduğunu, hangilerinin yalnızca sistemik tedaviye yönlendirileceğini belirler.

Meme kanserinde de evreleme sürecinde radyolojinin yeri tartışmasıdır. Meme MR ile multifokalite veya kontrallateral meme tutulumu değerlendirilebilir; aksiller lenf nodlarının ultrason ve BT ile incelenmesi, biyopsi ile doğrulama yapılması, cerrahın sentinel lenf nodu biyopsisi mi yoksa aksiller diseksiyon mu uygulayacağına karar vermesine yol açar. Bu kararların doğruluğu, hastanın hem sağkalımı hem de yaşam kalitesi açısından kritik öneme sahiptir.

Onkolojinin dışında kardiyolojide de radyolojik yöntemler risk sınıflamasında önemli bir yer tutmaktadır. Koroner BT anjiyografi, koroner arterlerdeki aterosklerotik plak yükünü ortaya koymakta ve bu plakların morfolojisini ayrıntılı biçimde göstermektedir. Özellikle kalsiyum skorlaması, asemptomatik bireylerde gelecekteki kardiyovasküler olaylara yönelik riskleri öngörmek için kullanılan güvenilir bir yöntemdir. Skorun yüksek çıkması, miyokard enfarktüsü veya ani kardiyak ölüm olasılığının artışı ile ilişkilidir (Budoff et al., 2018). Bu nedenle kalsiyum skoru, sadece bir görüntüleme bulgusu olmanın ötesinde, hasta yönetiminde terapötik kararları doğrudan etkileyen bir biyobelirteç gibi değerlendirilmektedir.

Benzer şekilde kardiyak MR, miyokard dokusunun canlılığını ve fibroz alanlarını ortaya koyarak kalp yetmezliği olan hastaların prognozunu öngörmeye kullanılmaktadır. Bu bilgi, kardiyologların hangi hastaya implantabl defibrilatör, hangi hastaya yalnızca medikal tedavi uygulanacağına karar vermesini kolaylaştırır. Radyolojinin sağladığı bu tür prognostik bilgiler, yalnızca mevcut hastalığın varlığını göstermekle kalmayıp, uzun dönem sonuçları doğrudan öngörmeye yardımcı olur.

Nörolojide de evreleme ve risk sınıflaması kavramı giderek önem kazanmaktadır. Multiple skleroz (MS) hastalarında MR ile saptanan yeni veya aktif lezyonların sayısı ve dağılımı, tedavinin agresif mi yoksa daha konservatif mi seçileceğini belirler. İnme hastalarında difüzyon-perfüzyon MR eşleşmesi, hangi hastaların endovasküler tedaviye uygun olduğunun belirlenmesinde anahtar rol oynamaktadır.

Tüm bu örnekler, radyolojinin yalnızca hastalık varlığını göstermekle kalmadığını, aynı zamanda prognozu doğrudan etkileyen ve tedavi seçiminde belirleyici olan veriler sunduğunu göstermektedir. Klinik pratiğin her alanında hastalığın evresini doğru biçimde tanımlamak ve hastayı uygun risk grubuna yerleştirmek, ancak yüksek doğrulukla yapılmış radyolojik incelemeler sayesinde mümkündür (Choi et al., 2018; Budoff et al., 2018).

3.3. Tedavi Planlama

Tedavi planlama sürecinde radyolojinin rolü, modern tıbbın en kritik bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Cerrahi girişimlerde anatomik varyasyonların önceden bilinmesi, olası komplikasyonları azaltır. Örneğin hepatobiliyer cerrahilerde manyetik rezonans kolanjiyopankreatografi (MRCP), aksesuar safra kanallarını, segmental drenaj paternlerini ve darlık seviyelerini ayrıntılı biçimde ortaya koyar; buna eşlik eden bilgisayarlı tomografi (BT) anjiyografi ise hepatik arter, portal ven ve hepatik venlerin seyri ile varyasyonlarını üç boyutlu olarak haritalandırır (Bhosale et al., 2020). Canlı donör karaciğer naklinde bu veriler, greft hacmi ile alıcıda kalacak karaciğer hacminin fizyolojik yeterliliğini aynı plan üzerinde göstererek donör güvenliği ile greft başarısı arasındaki dengeyi kurmayı sağlar; örneğin sağ lob greft planlanırken sağ posterior kanalın ayrı drenajı önceden bilinir ve biliyer anastomoz stratejisi buna göre belirlenir (Bhosale et al., 2020).

Pankreas başı tümörlerinde BT anjiyografinin arteriyel ve portal faz değerlendirmeleri, superior mezenterik arter/ven ve çölyak trunkus ile tümörün temas derecesini ve sarmalanma açısını göstermesi sayesinde “rezektabl, sınırdaki rezektabl ya da rezektabl olmayan” ayrımını objektifleştirir. Örneğin $>180^\circ$ arteriyel sarmalanma saptanan olgularda primer cerrahi yerine neoadjuvan tedavi kararı öne çıkar; venöz kısmi invazyonla sınırlı olgularda ise, damarsal rekonstrüksiyon eşliğinde rezeksiyon seçenekleri gündeme gelebilir (Bhosale et al., 2020). Benzer biçimde perihiler kolanjiyokarsinom şüphesinde MRCP ile biliyer dallanma ve stenoz uzunluğu, BT ile lobar atrofi ve portal ven tutulumunun birlikte değerlendirilmesi rezeksiyon sınırını, gerektiğinde portal ven embolizasyonu ya da iki aşamalı cerrahi planını öngörülebilir kılar (Bhosale et al., 2020).

Karaciğer metastazlı hastalarda çok fazlı BT ve karaciğer odaklı MR incelemeleri, lezyon sayısı, segmental dağılım ve vasküler komşuluğu ayrıntılandırarak cerrahi stratejiyi belirler; “kalan karaciğer hacmi” hesapları yetersizse portal ven embolizasyonu veya iki aşamalı hepatektomi gibi yaklaşımlar planlanabilir. Görüntüleme aynı zamanda ablasyonla kombine sınırlı rezeksiyon seçeneğinin etkinliğini değerlendirmek için de kullanılır; örneğin derin parankimde damar komşuluğundaki küçük odaklar için termal ablasyon, yüzeysel yerleşimli odaklar için wedge rezeksiyon tek seferde planlanabilir (Bhosale et al., 2020). Safra yolu darlıklarında inflamatuvar striktür ile malign darlığın ayırıcı tanısı için MRCP bulgularının zamanlaması da kritiktir; akut kolanjit sonrası çekilen görüntülerde duvar kalınlaşması ve ödem yalancı pozitif sonuçlara yol açabileceğinden, stabil fazda tekrarlanan

inceleme cerrahi endikasyonu gereksiz genişlikte belirlemekten korur (Bhosale et al., 2020).

Kolorektal cerrahi öncesinde rektal MR, mezorektal fasya ile tümör ilişkisini ve CRM (circumferential resection margin) riskini milimetrik düzeyde göstererek neoadjuvan kemoradyoterapi gereksinimini belirler; sfinkter tutulumu veya levator ani invazyonu bilgisi, sfinkter koruyucu cerrahinin olanaklı olup olmadığını doğrudan etkiler. Benzer şekilde böbrek tümörlerinde arteriyel ve parankimal faz BT ile renal pedikül anatomisi ve toplayıcı sistemle ilişkinin tanımlanması, parsiyel nefrektomi sırasında iskemi süresi ve klemp stratejisini planlamada belirleyicidir. Tiroid kanserlerinde boyun USG ile şüpheli lenf düğümlerinin morfolojik değerlendirilmesi ve USG eşliğinde ince iğne aspirasyon biyopsisi, boyun diseksiyonunun düzeylerini gereksiz genişlikten korur (Bhosale et al., 2020).

Radyoterapi planlamasında görüntüleme, tümör hacminin ve kritik organların hatasız tanımlanmasının temel dayanağıdır. Planlama BT'si üzerine MR'ın eşleştirilmesi, özellikle beyin, baş-boyun ve pelvik tümörlerde yumuşak doku kontrastını artırarak GTV/CTV/PTV tanımlarının doğruluğunu yükseltir. Akciğer tümörlerinde 4D-BT ile solunum hareketine bağlı hedef kaymaları nicel olarak ölçülür; elde edilen veriye göre solunum eşlemeli (gating) ya da nefes tutma teknikleri seçilerek hedef marjları optimize edilir. Günlük tedavi doğrulamasında konik ışın BT gibi IGRT uygulamaları, hedef ve kritik organ konumlarını her fraksiyonda yeniden kontrol ederek geometrik belirsizliği azaltır; adaptif radyoterapi iş akışlarıyla tümör hacminde küçülme veya ödem gibi değişiklikler saptandığında plan yeniden hesaplanır (Gregoire et al., 2018).

Fonksiyonel ve moleküler görüntüleme, anatomik hedeflemenin ötesine geçerek biyolojik hedeflemeyi mümkün kılar. FDG-PET ile yüksek metabolik aktiviteye sahip alt hacimlerin haritalandırılması, “boost” alanlarının belirlenmesini sağlar; bu “doz boyaması” (dose painting) yaklaşımı baş-boyun kanserlerinde hipoksik/nüks eğilimli bölgelerin daha etkin dozla kontrolüne hizmet eder. Rektum ve serviks kanserlerinde difüzyon MR ile ADC değerlerindeki erken değişimlerin tedavi yanıtını öngördüğüne ilişkin bulgular, tedavi ortasında hedef ve marjların yeniden tanımlanmasına kapı açar; yanıt veren hastada kritik organ dozlarını azaltmak, yanıt vermeyende ise alanları biyolojik olarak yoğunlaştırmak mümkün olur (Gregoire et al., 2018). Bu yaklaşım, toksisiteyi arttırmadan lokal kontrol olasılığını yükseltmeyi amaçlayan kişiselleştirilmiş planların bilimsel zeminini oluşturur.

Görüntü kalitesi ve teknik uygunluk, planlama doğruluğunun önkoşuludur. Kontrast madde zamanlamasındaki hatalar arteriyel

faz patolojilerinin gözden kaçmasına, geç fazda parankimal lezyon kontrastlanmasının maskelenmesine yol açabilir; metalik implant varlığında BT’de ışın sertleşmesi ve MR’da manyetik duyarlılık artefaktları görülebilir, bu durumda metal artefakt azaltma algoritmaları, uygun rekonstrüksiyon çekirdekleri ve sekans modifikasyonları devreye sokulmalıdır. Kurum içi konturlama kılavuzları ve çok disiplinli ortak değerlendirme oturumları, gözlemciler arası değişkenliği azaltır; DICOM-RT uyumlu veri akışı ve raporlama, tedavinin izlenebilirliğini ve yeniden üretilebilirliğini güçlendirir (Gregoire et al., 2018).

Multidisipliner tümör konseylerinde radyoloğun sunduğu ayrıntılı haritalandırma, tedavi sıralamasını değiştirebilecek ağırlıktadır. Pankreas başı neoplazmlarında arteriyel sarmalanma derecesi yüksekse neoadjuvan tedaviye yönelme; yalnız venöz temas varsa rekonstrüksiyonla kombine rezeksiyon; biyopsiyle histolojik doğrulama gereksinimi gibi kararlar doğrudan görüntüleme temellidir (Bhosale et al., 2020). Rektal kanserde CRM tehdidi belirginse neoadjuvan tedavi ile rezeksiyon sınırlarının güvenli hâle getirilmesi; karaciğer metastazlarında segmental yerleşim ve kalan karaciğer hacmine göre portal ven embolizasyonu veya iki aşamalı yaklaşım seçilmesi, hepsi radyolojik verinin planlama masasına koyduğu somut haritalara dayanır (Bhosale et al., 2020).

Tüm bu örnekler, radyolojinin tedavi planlamasında anatomik kesinlik, fonksiyonel doğrulama ve biyolojik hedeflemeyi bir araya getirerek komplikasyonları azalttığını, etkinliği artırdığını ve hasta güvenliğini öncelediğini gösterir. Cerrahi haritalandırmadan radyoterapide hedef hacim tanımına, neoadjuvan/adyuvant strateji seçiminden minimal invaziv yaklaşımların sınırlarının çizilmesine kadar her adımda, doğru çekilmiş ve doğru yorumlanmış görüntüleme verisi klinik sonuca doğrudan yansır (Bhosale et al., 2020; Gregoire et al., 2018).

3.4. Tedaviye Yanıtın Değerlendirilmesi ve Takip

Tedavi sonrası dönemde radyoloji, yanıtın değerlendirilmesinde standart kriterlerin uygulanmasına imkân verir. Solid tümörlerde en sık kullanılan yöntemlerden biri olan RECIST (Response Evaluation Criteria in Solid Tumors) kriterleri, tümör boyutlarının radyolojik ölçümlere dayalı olarak izlenmesine olanak tanır. BT ve MR görüntülemelerle yapılan uzun çap ölçümleri, lezyonun küçülme oranını belirler ve hastalığın “tam yanıt”, “kısmi yanıt”, “stabil hastalık” ya da “progresif hastalık” kategorilerinden hangisine girdiğini ortaya koyar (Eisenhauer et al., 2009). Bu standartlaştırma, farklı merkezlerde yapılan klinik araştırmalarda karşılaştırılabilir veriler elde edilmesini sağladığı için de bilimsel açıdan büyük önem taşır.

Örneğin akciğer kanserinde kemoterapi alan bir hastanın kontrol BT incelemelerinde primer tümörün boyutunun %30'dan fazla küçülmesi, kısmi yanıt olarak tanımlanırken; aynı tümörün en kısa çapının %20'den fazla büyümesi progresyon olarak kabul edilmektedir. Bu sayede klinisyen, aynı görüntüleme kriterlerine dayalı olarak evrensel tanımlarla tedavi etkinliğini değerlendirme şansı bulur.

Ancak son yıllarda yalnızca morfolojik ölçümlere dayalı bu yaklaşımın yetersiz kaldığı durumlar görülmeye başlanmıştır. Özellikle hedefe yönelik tedaviler ve immünoterapilerle birlikte tümör boyutu küçülmesibile metabolik aktivitede belirgin düşüş olabilmektedir. Bu noktada PET/BT incelemeleri devreye girer. FDG-PET/BT ile tümörün glukoz metabolizmasındaki değişimler saptanarak, tedaviye daha erken dönemde yanıt alınıp alınmadığı belirlenebilir. Örneğin lenfoma hastalarında kemoterapinin ikinci küründen sonra yapılan PET/BT incelemelerinde metabolik aktivitenin kaybolması, tedavinin başarılı olduğuna dair güçlü bir öngörü sağlar.

Ayrıca immünoterapi alan hastalarda görülen “pseudoprogression” fenomeni, klasik RECIST ölçümlerinin sınırlılığını göstermektedir. Bazı olgularda immün hücre infiltrasyonu nedeniyle tümör boyutunda geçici bir artış izlenirken, gerçekte tümör yükü azalmaktadır. Bu nedenle immünoterapiye özel olarak geliştirilmiş iRECIST kriterleri kullanılmakta ve radyolojik yanıt değerlendirmesi fonksiyonel ve biyolojik bilgilerle desteklenmektedir.

Takip sürecinde radyolojinin katkısı yalnızca yanıt değerlendirmekle sınırlı değildir. Nükslerin erken dönemde saptanması, hastanın yeniden tedaviye yönlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Meme kanseri cerrahisi sonrası yıllık mamografi kontrolleri, kolorektal kanserlerde düzenli BT incelemeleri ya da beyin tümörlerinde kontrastlı MR ile yapılan yakın takip, hastalığın tekrarlamasını erken aşamada ortaya koyar ve sekonder tedavi şansını artırır.

Bununla birlikte, radyoloji yalnızca tümöral hastalıkların değil, inflamatuvar ve vasküler patolojilerin tedavi yanıtını değerlendirmede de önemli rol üstlenmektedir. Örneğin vaskülit tedavisinde MR anjiyografi ile damar duvarı kalınlığındaki azalma veya anevrizma gelişiminin önlenmesi, tedavinin etkinliğini gösterebilir. Romatizmal hastalıklarda eklem MR incelemeleri ile sinovit aktivitesindeki gerileme, biyolojik ajanların etkinliği konusunda objektif kanıtlar sağlar.

Sonuç olarak, radyolojik takip ve yanıt değerlendirmesi modern tıpta yalnızca boyut ölçümleriyle sınırlı kalmayan, metabolik ve fonksiyonel

parametreleri de içine alan bütüncül bir yaklaşım hâline gelmiştir. Bu durum, hem bireysel hasta yönetiminde hem de klinik araştırmalarda standardizasyonun sağlanmasında radyolojinin vazgeçilmez rolünü bir kez daha ortaya koymaktadır (Eisenhauer et al., 2009).

3.5. Multidisipliner Karar Süreçleri

Modern tıpta hasta yönetimi multidisipliner yaklaşıma dayanmaktadır. Radyoloji, bu ekiplerin en kritik üyelerinden biridir. Tümör konseylerinde radyoloğun sunduğu bulgular, cerrahın uygulayacağı teknikten onkologun seçeceği tedavi protokolüne kadar birçok kararı etkileyebilmektedir (ESR, 2019).

Travma yönetiminde de radyolojinin multidisipliner rolü dikkat çekicidir. Hızlı total vücut BT protokolleri, travma cerrahı ve yoğun bakım ekibiyle eş zamanlı karar alınmasına imkân verir. Benzer şekilde, pediatrik hasta yönetiminde radyoloji uzmanının yorumları, çocuk cerrahı, neonatolog ve pediatristin tedavi planlarını doğrudan etkiler.

3.6. Klinik Karar Sürecinde Yeni Paradigmalar

Son yıllarda klinik karar süreçlerinde yapay zekâ (YZ) ve radyomik analizler öne çıkmaktadır. Klasik radyolojik değerlendirme, görsel gözleme dayalı niteliksel yorumlarla sınırlıyken, günümüzde bilgisayar destekli sistemler ve algoritmalar sayesinde çok daha kapsamlı, hızlı ve objektif değerlendirmeler yapılabilmektedir. YZ destekli görüntü analizleri, radyologların karar verme sürecine hız ve doğruluk kazandırmakta; küçük lezyonların gözden kaçmasını önlemekte ve raporlama sürelerini azaltmaktadır. Özellikle mamografide kitle saptama, toraks BT'de akciğer nodüllerinin karakterizasyonu ve beyin MR'ında multipl skleroz plaklarının otomatik belirlenmesi gibi alanlarda YZ'nin etkinliği kanıtlanmıştır. Bu sistemler, deneyimli bir radyoloğun performansına yakın sonuçlar verebilmekte, hatta bazı durumlarda tanısal duyarlılığı artırabilmektedir.

Radyomik yaklaşımlar ise görüntülerin içerisindeki kantitatif özelliklerin çıkarılması ile hastalık prognozunun öngörülmesine imkân tanımaktadır (Lambin et al., 2017). Geleneksel radyolojik raporlarda tümörün boyutu ve şekli gibi makroskopik özellikler değerlendirilirken, radyomikler görüntülerin piksel düzeyindeki yoğunluk dağılımları, doku heterojenliği, kenar özellikleri ve fraktal analizler gibi yüzlerce parametreyi matematiksel olarak tanımlar. Bu veriler, tümörün biyolojik davranışıyla korele edilerek tedaviye yanıtın tahmini veya hastalığın nüks riski konusunda öngörüler geliştirilmesine olanak tanır. Örneğin akciğer kanseri hastalarında radyomik

imzalar kullanılarak EGFR mutasyonu gibi moleküler değişiklikler önceden tahmin edilebilmekte, böylece genetik test yapılmadan biyolojik bilgiye ulaşılabilmektedir.

“Decision support systems” olarak adlandırılan bilgisayar destekli karar sistemleri, klinik verilerle radyolojik bulguları entegre ederek hasta bazlı daha kişiselleştirilmiş stratejiler geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu sistemler, yalnızca radyolojik görüntüleri değil; laboratuvar verileri, genomik profiller ve klinik öykü gibi çok boyutlu verileri bir araya getirerek tedavi seçeneklerini optimize eder. Örneğin beyin tümörlü bir hastada MR’dan elde edilen radyomik veriler, PET görüntülemeye ölçülen metabolik aktivite ve patolojiden gelen moleküler belirteçlerle entegre edilerek kişiselleştirilmiş tedavi protokolü önerilebilir.

Bununla birlikte, yeni paradigmaların klinik uygulamaya girmesi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. YZ algoritmalarının eğitildiği veri setlerinin çeşitliliği sınırlı olduğunda, farklı popülasyonlarda genelleme hataları ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca klinik sorumluluğun kime ait olduğu, yani YZ’nin önerdiği yanlış bir kararın sonuçlarından kimin sorumlu olacağı hâlâ etik ve hukuki tartışma konusudur. Veri güvenliği de başka bir boyuttur; radyomik analizler için kullanılan büyük hasta veri tabanlarının güvenliği, hasta mahremiyeti açısından hassasiyet gerektirmektedir.

Tüm bu sınırlamalara rağmen yapay zekâ, radyomik ve karar destek sistemleri radyolojinin yalnızca bugünkü rolünü güçlendirmekle kalmamış, aynı zamanda disiplini geleceğin kişiselleştirilmiş tıbbının merkezine taşımıştır. Artık klinik karar süreçlerinde yalnızca “görüntüyü yorumlamak” değil, aynı zamanda biyolojik, moleküler ve klinik verileri bütünleştiren çok katmanlı bir yaklaşım gündemdedir. Bu sayede hastaların tedavi planları daha öngörülebilir, daha hedefe yönelik ve daha bireyselleştirilmiş hâle gelmektedir (Lambin et al., 2017).

4. Radyolojik Rehberlik ve Girişimsel Uygulamalar

Radyolojinin klinik karar süreçlerindeki rolü, yalnızca tanısal boyutla sınırlı değildir. Günümüzde radyoloji, pek çok durumda doğrudan terapötik girişimlere rehberlik eden bir alan hâline gelmiştir. Bu gelişim, özellikle girişimsel radyoloji adı altında şekillenen yeni bir disiplin ile somutlaşmıştır. Görüntüleme rehberliğinde gerçekleştirilen tanısal ve tedavi edici işlemler, minimal invaziv özellikleri sayesinde morbiditeyi azaltmakta, hastanede kalış süresini kısaltmakta ve maliyet-etkin çözümler sunmaktadır (Baerlocher, Asch, Myers, & Liu, 2018).

4.1. Tanısal Girişimler

Görüntüleme eşliğinde biyopsi, girişimsel radyolojinin en sık uygulanan yöntemlerinden biridir. Ultrason veya BT kılavuzluğunda yapılan biyopsiler, malignite tanısının doğrulanmasında ve histopatolojik alt tiplerin belirlenmesinde yüksek doğruluk sağlamaktadır. Benzer şekilde, drenaj işlemleri de görüntüleme rehberliğinde güvenli bir şekilde yapılabilmektedir (Gupta, Wallace, Cardella, & Kundu, 2011).

4.2. Tedavi Edici Girişimler

Embolizasyon, ablasyon ve stentleme gibi tedavi edici girişimler, birçok hastalığın yönetiminde cerrahiye alternatif veya tamamlayıcı yöntemler olarak kullanılmaktadır. Örneğin hepatoselüler karsinomda transarteriyel kemoembolizasyon (TACE), radyolojik rehberlikle en sık uygulanan tedavilerden biridir (Llovet et al., 2016). Termal ablasyon teknikleri (radyo-frekans, mikrodalga) ise özellikle karaciğer, böbrek ve akciğer tümörlerinde minimal invaziv tedavi seçenekleri sunmaktadır. Vasküler girişimler kapsamında ise periferik arter hastalıklarında anjiyoplasti ve stentleme işlemleri, görüntüleme rehberliğinde rutin olarak uygulanmaktadır.

4.3. Non-vasküler ve Kas-İskelet Girişimleri

Girişimsel radyoloji yalnızca onkoloji ve vasküler hastalıklarla sınırlı değildir. Kas-iskelet sisteminde, ultrason rehberliğinde eklem enjeksiyonları, sinir blokları ve tendon kılıfı girişimleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalar, özellikle ağrı yönetiminde ve fizik tedavi süreçlerinde giderek daha fazla önem kazanmıştır (Finlayson, O'Connor, & Stone, 2019).

4.4. Multidisipliner Yaklaşımla Entegrasyon

Girişimsel radyoloji, multidisipliner hasta yönetiminin ayrılmaz bir parçasıdır. Onkoloji konseylerinde ablasyon ve embolizasyon seçeneklerinin tartışılması, travma cerrahisinde acil embolizasyon kararlarının verilmesi ya da pediatrikte minimal invaziv tedavi protokollerinin planlanması bu entegrasyona örnektir. Bu yönüyle radyolojik rehberlik, yalnızca tanısal değil, terapötik karar süreçlerinde de belirleyici bir unsur hâline gelmiştir (Habibollahi, Hwang, & Thrall, 2020).

5. Radyasyon Güvenliği ve Etik İlkeler

Radyoloji pratiğinin önemli bir kısmı iyonizan radyasyon kullanımı üzerine kuruludur. Bu nedenle hasta, sağlık çalışanı ve toplum açısından **radyasyon güvenliği** temel bir önceliktir. Aynı zamanda, görüntüleme ve

girişimsel işlemler sırasında hastaların hakları, bilgilendirilmiş onam ve etik ilkeler de dikkate alınmalıdır.

5.1. ALARA Prensibi

Radyasyon güvenliğinin merkezinde, “**As Low As Reasonably Achievable (ALARA)**” ilkesi yer almaktadır. Bu prensip, tanınal doğruluktan ödün vermeden, hastanın maruz kaldığı radyasyon dozunun mümkün olan en düşük düzeyde tutulmasını öngörür (Mettler, Huda, Yoshizumi, & Mahesh, 2008). Günümüzde düşük doz BT protokolleri, pediatrik radyolojiye özel algoritmalar ve doz takip yazılımları, bu yaklaşımın klinik uygulamalara yansımalarıdır.

5.2. Çocuklar ve Gebelerde Radyasyon

Çocuklar ve gebeler, iyonizan radyasyonun biyolojik etkilerine karşı daha hassastır. Pediatrik popülasyonda BT kullanımının artışı, uzun dönem kanser riskine ilişkin önemli tartışmaları gündeme getirmiştir (Pearce et al., 2012). Gebelikte ise özellikle ilk trimesterde radyasyondan kaçınılmalı, ultrason ve MR gibi non-iyonizan yöntemler öncelikle tercih edilmelidir.

5.3. Sağlık Çalışanlarının Korunması

Radyologlar, teknisyenler ve girişimsel işlemlerde görev alan sağlık çalışanları da radyasyon güvenliği kapsamında korunmalıdır. Kurşun önlük, tiroid koruyucu, dozimetre kullanımı ve işlem odası tasarımıındaki koruyucu bariyerler, mesleki maruziyeti en aza indirmektedir (Rehani et al., 2014).

5.4. Etik İlkeler ve Bilgilendirilmiş Onam

Radyolojide etik ilkeler, yalnızca hasta güvenliğini değil aynı zamanda bilgi gizliliğini, görüntülerin saklanması ve doğru raporlamayı da kapsamaktadır. Özellikle girişimsel radyoloji uygulamalarında bilgilendirilmiş onam, hastanın işlem hakkında yeterli bilgi sahibi olmasını ve olası riskleri kabul ederek gönüllü katılımını sağlar (Mauro, Murphy, Thomson, & Venbrux, 2014). Ayrıca görüntüleme sırasında elde edilen verilerin eğitim veya araştırma amacıyla kullanılması durumunda etik kurallar ve hasta mahremiyeti korunmalıdır.

5.5. Yasal Düzenlemeler ve Küresel Standartlar

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen radyasyon güvenliği standartları, ulusal protokollere de yön vermektedir. Bu düzenlemeler, yalnızca hasta ve çalışan

güvenliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda uluslararası düzeyde etik ve hukuki uyumu da güvence altına alır (Frija, Damilakis, & Paulo, 2021).

6. Radyolojide Gelecek Perspektifleri

Radyoloji, modern tıbbın en hızlı gelişim gösteren alanlarından biridir. Son 30 yılda konvansiyonel radyografiden bilgisayarlı tomografiye, manyetik rezonans görüntülemeye kadar yaşanan teknolojik dönüşümler, tanı ve tedavi süreçlerinde devrim yaratmıştır. Günümüzde ise yapay zekâ destekli görüntü analizi, fonksiyonel ve moleküler görüntüleme, radyogenomik, kişiselleştirilmiş tıp, eğitimde dijitalleşme ve tele-radyoloji gibi yenilikler, radyolojiyi geleceğin sağlık hizmetlerinde daha da merkezi bir konuma taşımaktadır (Thrall, 2018).

6.1. Yapay Zekâ ve Derin Öğrenme Uygulamaları

Yapay zekâ (YZ), özellikle **derin öğrenme algoritmaları** sayesinde, görüntü analizi ve klinik karar destek sistemlerinde hızla yaygınlaşmaktadır. Meme kanseri taramalarında otomatik kitle saptama, akciğer nodüllerinin erken teşhisi, beyin MR görüntülerinde otomatik segmentasyon gibi alanlarda YZ'nin klinik performansının, deneyimli radyologlarla karşılaştırılabilir düzeye ulaştığı bildirilmektedir (McKinney et al., 2020).

YZ'nin temel katkısı, radyologun iş yükünü azaltmak, gözden kaçabilecek küçük lezyonların saptanmasını kolaylaştırmak ve görüntü yorumlama süresini kısaltmaktır. Bununla birlikte, YZ'nin tek başına tanı koyan bir araç değil, **radyoloğa yardımcı bir karar destek mekanizması** olduğu vurgulanmalıdır (Kelly et al., 2019).

6.2. Radyomik ve Radyogenomik Yaklaşımlar

Radyolojinin geleceğini şekillendiren bir diğer alan, **radyomik** ve **radyogenomik** yaklaşımlardır. Radyomik, görüntülerin piksel düzeyinde analiz edilerek matematiksel özelliklerinin çıkarılmasını ve bu özelliklerin klinik sonuçlarla ilişkilendirilmesini amaçlar. Radyogenomik ise bu verilerin genetik ve moleküler biyoloji bulguları ile bütünleştirilmesidir (Lambin et al., 2017).

Bu sayede, örneğin akciğer kanseri görüntülerinden tümörün genetik mutasyon profili öngörüleabilmekte, tedaviye yanıtın önceden tahmin edilmesi mümkün olmaktadır. Böylece radyoloji, yalnızca görüntülerin yorumlandığı bir alan olmaktan çıkarak, **kışıselleştirilmiş tıbbın en önemli bileşenlerinden biri** hâline gelmektedir.

6.3. Fonksiyonel ve Moleküler Görüntüleme

Morfolojik görüntüleme yöntemlerinin yanı sıra, fonksiyonel ve moleküler görüntüleme de hızla gelişmektedir. Fonksiyonel MR (fMR), beyin aktivitelerinin haritalanmasında nöroloji ve psikiyatri alanında devrim yaratmıştır. Difüzyon tensör görüntüleme (DTI), beyindeki ak madde yollarının görüntülenmesini sağlamış ve nöroşirürjide cerrahi planlamanın önemli bir parçası hâline gelmiştir (Mukherjee et al., 2008).

Moleküler görüntüleme ise PET ve SPECT gibi yöntemlerle hücresel düzeyde metabolik süreçlerin incelenmesine olanak tanır. FDG-PET, onkolojide tümör evreleme ve tedavi yanıt değerlendirmede standart yöntem hâline gelmiştir. Gelecekte yeni radyoizotoplar ve hedefe yönelik moleküllerin geliştirilmesiyle, tümör biyolojisi daha ayrıntılı olarak ortaya konabilecek ve **biyobelirteç temelli görüntüleme** klinik pratiğe entegre edilecektir (Mankoff, 2017).

6.4. Tele-Radyoloji ve Dijitalleşme

Görüntüleme cihazlarının yaygınlaşması ve dijital altyapıların gelişmesi, **tele-radyoloji** kavramını ön plana çıkarmıştır. Tele-radyoloji, görüntülerin internet üzerinden uzaktaki merkezlere aktarılması ve uzman radyologlar tarafından raporlanmasını mümkün kılar. Bu yöntem özellikle kırsal bölgelerde sağlık hizmetlerine erişimi artırmakta, 7/24 kesintisiz radyoloji desteği sağlamaktadır (Krupinski & Weinstein, 2014).

Ayrıca, **yapay zekâ ile entegre tele-radyoloji** sistemlerinin, acil durumlarda hızlı ön raporlar oluşturmaya, sağlık hizmetinin verimliliğini daha da artıracaktır. Bu yönüyle dijitalleşme, gelecekte radyolojiyi sınırların ötesinde bir hizmet hâline getirecektir.

6.5. Eğitim ve Simülasyon Teknolojileri

Radyoloji eğitimi de teknolojiyle dönüşmektedir. **Sanal gerçeklik (VR)** ve **artırılmış gerçeklik (AR)** tabanlı simülasyonlar, öğrencilere ve asistanlara üç boyutlu anatomik yapıları interaktif şekilde öğretmektedir. Ayrıca simülasyon tabanlı eğitim, girişimsel radyoloji işlemlerinin risksiz bir ortamda öğrenilmesine olanak tanımaktadır (Brady et al., 2020).

Dijital platformlar sayesinde öğrenciler, farklı hasta senaryoları üzerinde pratik yapabilmekte ve klinik karar süreçlerini deneyimleyebilmektedir. Bu gelişmeler, radyoloji eğitiminde klasik modelden **teknoloji tabanlı modern modele** geçişin habercisidir.

6.6. Etik ve Hukuki Boyutlar

Teknolojinin hızla gelişmesi beraberinde yeni etik ve hukuki sorunları da gündeme getirmektedir. Yapay zekâ algoritmalarının karar verme sürecindeki rolü, hatalı tanımlardan doğabilecek hukuki sorumlulukları tartışmalı hâle getirmiştir. Ayrıca büyük veri tabanlarında hasta görüntülerinin depolanması, mahremiyet ve veri güvenliği açısından yeni düzenlemeler gerektirmektedir (European Society of Radiology, 2019).

Geleceğin radyolojisinde etik ilkeler, hasta güvenliği ve veri gizliliğini korumakla birlikte, yapay zekâ ile insan faktörünün nasıl dengeleneceğini de tanımlamak zorunda kalacaktır.

Sonuç

Radyoloji, sağlık bilimlerinin kuramsal temelleri ile uygulamalı klinik bilgilerini bütünleştiren, modern tıbbın en dinamik alanlarından biridir. Tarihsel olarak X-ışınlarının keşfi ile başlayan bu disiplin, günümüzde bilgisayarlı tomografi, manyetik rezonans görüntüleme, ultrasonografi ve nükleer tıp uygulamalarıyla geniş bir spektrumda tanısal ve terapötik katkılar sunmaktadır.

Kuramsal düzeyde radyoloji, fizik, biyomedikal mühendislik ve moleküler biyoloji gibi disiplinlerin ilkeleri üzerine inşa edilmiştir. Bu bilimsel zemin, sağlık bilimleri öğrencilerinin anatomi, patoloji ve biyofizik bilgisini daha fonksiyonel hâle getirirken, klinik uygulamalarda doğru yöntem seçimine rehberlik etmektedir. Klinik süreçlerde ise radyoloji, tanıdan evrelemeye, tedavi planlamasından tedaviye yanıtın izlenmesine kadar her basamakta belirleyici bir rol oynamaktadır.

Radyolojik rehberlik ve girişimsel uygulamalar, disiplini yalnızca görüntüleme sınırlarından çıkarak doğrudan tedaviye katkı sunan bir alan hâline taşımıştır. Minimal invaziv tekniklerin yaygınlaşması, cerrahiye alternatif veya tamamlayıcı yöntemler sunarak hasta güvenliğini artırmıştır. Bununla birlikte, radyasyon güvenliği ve etik ilkeler, radyolojinin sorumluluk alanlarını şekillendiren vazgeçilmez unsurlardır. ALARA prensibi, pediatrik ve gebelik popülasyonunda koruyucu yaklaşımlar, bilgilendirilmiş onam ve hasta mahremiyeti, bu disiplinin etik omurgasını oluşturmaktadır.

Geleceğe bakıldığında, yapay zekâ destekli görüntüleme analizleri, fonksiyonel ve moleküler görüntüleme teknikleri, radyogenomik uygulamaları ve simülasyon tabanlı eğitim modelleri, radyolojiyi kişiselleştirilmiş tıbbın merkezine taşımaktadır. Bu gelişmeler, yalnızca tanısal doğruluğu artırmakla

kalmayacak, aynı zamanda multidisipliner klinik karar süreçlerinde radyolojinin vazgeçilmez rolünü daha da güçlendirecektir.

Sonuç olarak, radyoloji hem kuramsal bilgi ile klinik uygulamaları bütünleştiren, hem de geleceğe yön veren yenilikçi yaklaşımlarıyla sağlık bilimlerinin merkezinde yer almaktadır. Bu nedenle, sağlık bilimleri alanında eğitim gören her öğrenci ve klinik pratiğe yönelen her hekim için radyolojik bilgi, yalnızca yardımcı değil, temel bir bileşen olarak kabul edilmelidir.

Kaynakça

- Brink, J. A., & Miller, D. L. (2017). U.S. medical imaging: Understanding its rapid rise and the corresponding role of radiology. *Radiology*, 285(3), 690–692. <https://doi.org/10.1148/radiol.2017171286>
- European Society of Radiology (ESR). (2019). The role of radiology in multi-disciplinary cancer management: Results from the ESR survey. *Insights into Imaging*, 10(1), 109. <https://doi.org/10.1186/s13244-019-0789-2>
- Hricak, H., Abdel-Wahab, M., Atun, R., Lette, M. M., Paez, D., & Brink, J. A. (2021). Medical imaging and nuclear medicine: A Lancet Oncology Commission. *The Lancet Oncology*, 22(4), e136–e172. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(20\)30751-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(20)30751-8)
- Secram, E. (2019). *Computed tomography: Physical principles, clinical applications, and quality control* (4th ed.). St. Louis, MO: Elsevier.
- Brenner, D. J., & Hall, E. J. (2007). Computed tomography—An increasing source of radiation exposure. *New England Journal of Medicine*, 357(22), 2277–2284. <https://doi.org/10.1056/NEJMra072149>
- Brown, M. A., & Semelka, R. C. (2019). *MRI: Basic principles and applications* (5th ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., & Boone, J. M. (2012). *The essential physics of medical imaging* (3rd ed.). Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins.
- Kalra, M. K., Maher, M. M., Rizzo, S., Kanarek, D., & Shepard, J. A. (2004). Radiation exposure from chest CT: Issues and strategies. *Journal of Korean Medical Science*, 19(2), 159–166. <https://doi.org/10.3346/jkms.2004.19.2.159>
- Nelson, T. R., & Pretorius, D. H. (2020). Three-dimensional ultrasound imaging. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 46(1), 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2019.09.005>
- Townsend, D. W. (2020). Combined PET/CT: The historical perspective. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, 41(6), 471–478. <https://doi.org/10.1053/j.sult.2020.07.007>
- Bhosale, P. R., Javitt, M. C., Atri, M., & Reinhold, C. (2020). Magnetic resonance imaging for surgical planning in hepatobiliary and pancreatic diseases. *Radiology*, 295(1), 32–47. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020192438>
- Budoff, M. J., Young, R., Burke, G., Shaw, L. J., Liu, K., Kronmal, R., ... Lima, J. A. C. (2018). Ten-year association of coronary artery calcium with atherosclerotic cardiovascular disease events. *Journal of the American College of Cardiology*, 72(10), 957–966. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.05.027>

- Choi, H., Varghese, B. A., & Cen, S. Y. (2018). Role of imaging in staging and response assessment of cancer. *Seminars in Nuclear Medicine*, 48(1), 16–30. <https://doi.org/10.1053/j.semnucmed.2017.09.003>
- Eisenhauer, E. A., Therasse, P., Bogaerts, J., Schwartz, L. H., Sargent, D., Ford, R., ... Verweij, J. (2009). New response evaluation criteria in solid tumours: Revised RECIST guideline (version 1.1). *European Journal of Cancer*, 45(2), 228–247. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2008.10.026>
- Gregoire, V., Guckenberger, M., Haustermans, K., Lagendijk, J. J. W., Ménard, C., & Pötter, R. (2018). Image-guided radiotherapy: New standards for individualized treatment. *The Lancet Oncology*, 19(4), e240–e251. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(18\)30048-3](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(18)30048-3)
- Lambin, P., Leijenaar, R. T. H., Deist, T. M., Peerlings, J., de Jong, E. E. C., van Timmeren, J., ... Aerts, H. J. W. L. (2017). Radiomics: The bridge between medical imaging and personalized medicine. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 14(12), 749–762. <https://doi.org/10.1038/nrclinonc.2017.141>
- National Lung Screening Trial Research Team. (2011). Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening. *New England Journal of Medicine*, 365(5), 395–409. <https://doi.org/10.1056/NEJMoal102873>
- Powers, W. J., Rabinstein, A. A., Ackerson, T., Adeoye, O. M., Bambakidis, N. C., Becker, K., ... Yonas, H. (2019). 2018 Guidelines for the early management of acute ischemic stroke. *Stroke*, 50(12), e344–e418. <https://doi.org/10.1161/STR.0000000000000211>
- Sardanelli, F., Hunink, M. G. M., Gilbert, F. J., Di Leo, G., Krestin, G. P., & European Society of Radiology (ESR). (2017). Evidence-based radiology: Why and how? *European Radiology*, 27(1), 193–201. <https://doi.org/10.1007/s00330-016-4396-0>
- Baerlocher, M. O., Asch, M. R., Myers, A., & Liu, D. M. (2018). Interventional radiology: From diagnosis to treatment. *CMAJ*, 190(9), E258–E263. <https://doi.org/10.1503/cmaj.170744>
- Finlayson, R. J., O'Connor, P. J., & Stone, J. H. (2019). Musculoskeletal ultrasound-guided interventions: A review of applications in pain medicine. *Pain Physician*, 22(5), 451–460.
- Gupta, S., Wallace, M. J., Cardella, J. F., & Kundu, S. (2011). Quality improvement guidelines for percutaneous needle biopsy. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 22(4), 531–535. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2010.12.011>
- Habibollahi, P., Hwang, G. L., & Thrall, J. H. (2020). Interventional radiology in the era of value-based care: Challenges and opportunities. *Academic Radiology*, 27(9), 1262–1268. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.10.021>

- Llovet, J. M., Real, M. I., Montaña, X., Planas, R., Coll, S., Aponte, J., ... Bruix, J. (2016). Arterial embolisation or chemoembolisation versus symptomatic treatment in patients with unresectable hepatocellular carcinoma: A randomised controlled trial. *The Lancet*, 359(9319), 1734–1739. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)08649-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)08649-X)
- Frija, G., Damilakis, J., & Paulo, G. (2021). Patient radiation protection in diagnostic radiology: European and global perspectives. *European Radiology*, 31(2), 1036–1043. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07157-y>
- Mauro, M. A., Murphy, K. P., Thomson, K. R., & Venbrux, A. C. (2014). *Image-guided interventions* (2nd ed.). Philadelphia, PA: Saunders.
- Mettler, F. A., Huda, W., Yoshizumi, T. T., & Mahesh, M. (2008). Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: A catalog. *Radiology*, 248(1), 254–263. <https://doi.org/10.1148/radiol.2481071451>
- Pearce, M. S., Salotti, J. A., Little, M. P., McHugh, K., Lee, C., Kim, K. P., ... Berrington de González, A. (2012). Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: A retrospective cohort study. *The Lancet*, 380(9840), 499–505. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60815-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60815-0)
- Rehani, M. M., Vano, E., Ciraj-Bjelac, O., & Kleiman, N. J. (2014). Radiation and cataract. *Radiology*, 273(2), 360–370. <https://doi.org/10.1148/radiol.14132501>
- Brady, A. P., Bello, J. A., Derchi, L. E., & Mortelet, K. J. (2020). Radiology education: The evolving role of technology. *European Radiology*, 30(9), 4871–4877. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-06876-6>
- European Society of Radiology (ESR). (2019). ESR statement on the ethics of artificial intelligence in radiology. *European Radiology*, 29(8), 3891–3897. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06219-9>
- Kelly, C. J., Karthikesalingam, A., Suleyman, M., Corrado, G., & King, D. (2019). Key challenges for delivering clinical impact with artificial intelligence. *BMC Medicine*, 17(1), 195. <https://doi.org/10.1186/s12916-019-1426-2>
- Krupinski, E. A., & Weinstein, R. S. (2014). Telemedicine in an academic center—The Arizona telemedicine program: A 20-year review. *Telemedicine and e-Health*, 20(10), 835–839. <https://doi.org/10.1089/tmj.2014.0012>
- Mankoff, D. A. (2017). Molecular imaging in cancer management. *Seminars in Nuclear Medicine*, 47(6), 505–514. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2017.06.002>
- McKinney, S. M., Sieniek, M., Godbole, V., Godwin, J., Antropova, N., Ashrafian, H., ... Shetty, S. (2020). International evaluation of an AI system for breast cancer screening. *Nature*, 577(7788), 89–94. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1799-6>

- Mukherjee, P., Berman, J. I., Chung, S. W., Hess, C. P., & Henry, R. G. (2008). Diffusion tensor MR imaging and fiber tractography: Theoretic underpinnings, applications, and limitations. *Radiology*, 246(2), 578–597. <https://doi.org/10.1148/radiol.2462070718>
- Thrall, J. H. (2018). Artificial intelligence and machine learning in radiology: Opportunities, challenges, pitfalls, and criteria for success. *Journal of the American College of Radiology*, 15(3), 504–508. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2017.12.026>
- Kauvar, D. S., & Wade, C. E. (2005). The epidemiology and modern management of traumatic hemorrhage: US and international perspectives. *Critical Care*, 9(5), S1–S9. <https://doi.org/10.1186/cc3779>

