

Pediyatrik Radyolojide Radyasyon Güvenliği: Güncel Yaklaşımlar ve Stratejiler

Davut Ünsal Çapkan¹

Özet

Pediyatrik radyoloji, modern tıbbın en hassas ve kritik alanlarından biridir. Çocukluk çağında uygulanan radyolojik görüntüleme yöntemleri, hem tanı hem de tedavi planlamasında belirleyici rol oynamaktadır. Ancak bu yaş grubunda en önemli sorun, iyonizan radyasyonun biyolojik etkilerine karşı duyarlılığın yüksek olmasıdır. Çocuklar, erişkinlere göre daha hızlı hücresel proliferasyon göstermeleri, organ sistemlerinin henüz gelişim aşamasında bulunması ve daha uzun yaşam beklentisine sahip olmaları nedeniyle radyasyonun kısa ve uzun dönem etkilerine daha açıktır.

Özellikle bilgisayarlı tomografi (BT) kullanımındaki artış, pediyatrik hastalarda önemli endişelere yol açmıştır. Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa’da her yıl milyonlarca pediyatrik BT incelemesi yapılmakta olup, bunların büyük kısmı travma, akut batın ve toraks patolojileri nedeniyle uygulanmaktadır. Doz optimizasyonu erişkinlere göre düzenlenmediğinde çocuklarda kümülatif radyasyon maruziyeti, ilerleyen yaşlarda sekonder maligniteler açısından risk faktörü oluşturmaktadır.

Bu nedenle pediyatrik radyolojide temel yaklaşım “As Low As Reasonably Achievable” (Mümkün Olan En Düşük Düzeyde) (ALARA) prensibidir. ALARA, tanısal doğruluğu koruyacak en düşük radyasyon dozunun kullanılması gerektiğini ifade eden, yalnızca teknik bir hedef değil aynı zamanda etik bir yükümlülüktür. Günümüzde ALARA yaklaşımına ek olarak, iteratif reconstruction (Yinelemeli Yeniden Oluşturma) algoritmaları, spektral BT teknikleri, yapay zekâ tabanlı optimizasyon sistemleri ve kişiselleştirilmiş protokoller pediyatrik görüntüleme süreçlerine entegre edilmektedir.

Modalite seçimi, çocuklarda tanısal fayda ile radyasyon riski arasındaki dengenin gözetilmesi esasına dayanmaktadır:

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

Ultrasonografi (USG) ve manyetik rezonans görüntüleme (MR) iyonizan radyasyon içermemeleri nedeniyle birinci basamak yöntemlerdir.

Bilgisayarlı tomografi (BT) yalnızca zorunlu klinik durumlarda, özellikle acil olgularda tercih edilmeli ve düşük doz protokolleriyle uygulanmalıdır.

PET/CT ve PET/MR onkolojik ve metabolik hastalıkların değerlendirilmesinde önemli olmakla birlikte, içerdikleri radyasyon yükü nedeniyle dikkatle kullanılmalıdır.

Uluslararası düzeyde çocukluk çağı radyolojisine ilişkin çeşitli girişimler bulunmaktadır. ABD’de yürütölen Image Gently Alliance ve Avrupa’daki EuroSafe Imaging programları, pediatrik görüntülemede doz azaltma stratejilerini, ebeveyn bilgilendirmesini ve sağıık profesyonellerine yönelik eğitim modüllerini ön plana çıkarmaktadır.

Radyasyonun biyolojik etkileri arasında DNA hasarı, hücresele proliferasyonda bozulmalar, büyüme ve gelişme üzerine olumsuz etkiler ve uzun vadede artmış kanser riski yer almaktadır. Bu nedenle her pediatrik inceleme, “çocuğıı en az zarar verecek yöntem” ilkesi doğrultusunda planlanmalıdır.

Gelecek perspektifinde, yapay zekâ destekli otomatik protokol optimizasyonları, radyomik analizler, nanoteknolojik kontrast ajanlar ve kişiselleştirilmiş yaklaşımlar sayesinde pediatrik radyolojinin daha güvenli, etkili ve hasta dostu bir düzeye ulaşması beklenmektedir. Bu ilerlemeler, çocuk sağııkını koruma ve gelecekteki kanser risklerini azaltma açısından kritik öneme sahiptir.

1. GİRİŞ

Pediyatrik radyoloji, modern tıbbın en hassas alanlarından birini oluşturmaktadır. Çocukluk çağıında uygulanan radyolojik görüntüleme yöntemleri, tanı ve tedavi planlamasında kritik rol oynar. Ancak bu yaş grubunda en önemli sorun, iyonizan radyasyonun biyolojik etkilerine karşı duyarlılığıın yüksek olmasıdır. Çocuklar, erişkinlere kıyasla daha hızlı hücresele proliferasyona sahip oldukları, organ sistemleri gelişim aşamasında bulunduğıı ve daha uzun yaşam beklentileri olduğıı için radyasyonun kısa ve uzun dönem etkilerine daha açıktır (Berrington de González ve ark. 2020).

Özellikle bilgisayarlı tomografi (BT) kullanımındaki artış, pediatrik hasta grubunda ciddi endişelere yol açmıştır. Günümüzde ABD ve Avrupa’da her yıl milyonlarca pediatrik BT incelemesi yapılmakta ve bunların önemli bir kısmı travma, akut batin ve toraks patolojileri nedeniyle uygulanmaktadır (Pearce ve ark. 2012). Radyasyon dozu erişkinlere göre optimize edilmediğinde, çocuklarda kümülatif maruziyet ilerleyen yaşlarda sekonder maligniteler için risk faktörü oluşturmaktadır.

Bu nedenle, pediatrik radyolojide temel yaklaşım “Mümkün Olan En Düşük Düzeyde” (ALARA) prensibine dayanır. ALARA, tanı için gerekli minimum görüntüleme parametreleriyle en düşük dozda en yüksek klinik faydanın sağlanmasını amaçlar. Son yıllarda bu yaklaşımın yanında yapay zekâ (AI) tabanlı optimizasyon algoritmaları, “Yinelemeli Yeniden Oluşturma” teknikleri ve spektral BT uygulamaları gibi yeni teknolojiler de devreye girmiştir.

Uluslararası düzeyde pediatrik radyolojiye yönelik birçok girişim mevcuttur. Bunların başında ABD’de geliştirilen Image Gently Alliance ve Avrupa’da yürütülen EuroSafe Imaging girişimleri yer almaktadır. Her iki girişim de, çocuklarda radyolojik incelemelerde doz azaltım stratejileri, ebeveyn bilgilendirmesi ve eğitim modülleri ile klinik pratiğe yön vermektedir (Strauss ve ark. 2021).

2. ÇOCUKLARDA RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ

2.1. Hücresel ve Moleküler Düzeyde Etkiler

Çocuklarda hücreler sürekli bölünme halindedir. DNA sentez fazında olan hücreler, iyonizan radyasyonun neden olduğu çift zincir kırıkları ve oksidatif stres nedeniyle onarım mekanizmaları yetersiz kaldığında mutasyon riski taşır. Bu mutasyonlar, ilerleyen yıllarda lösemi ve solid tümör gelişimine zemin hazırlayabilir (Preston ve ark.2020).

2.2. Organ Düzeyinde Etkiler

Çocukluk çağında radyasyona en duyarlı organlar arasında:

- Tiroid: Özellikle baş-boyun BT maruziyetlerinde kanser riski yüksektir.
- Kemik iliği: Hematopoetik dokular radyasyona aşırı duyarlıdır.
- Meme dokusu: Ergenlik öncesinde radyasyona maruziyet, ileri yaşta meme kanseri riskini artırır.
- Gonadlar: Reprodüktif fonksiyonları etkileyebilir.

2.3. Epidemiyolojik Bulgular

- Pearce ve ark. (2012): Çocukluk çağında BT incelemeleri sonrasında lösemi ve beyin tümörü riskinde 2–3 kat artış bildirmiştir.
- Bosch de Basea ve ark. (2023): EPI-CT çalışmasında 100 mGy’lik kümülatif doza maruziyetin hematolojik malignite riskini yaklaşık üç kat artırdığı gösterilmiştir.

- Smith-Bindman ve ark. (2025): ABD’de yapılan bir analizde, BT incelemelerinin tüm kanserlerin yaklaşık %5’inden sorumlu olabileceği öngörülmüştür.

Tablo 1. Çocuklarda radyasyon maruziyetine bağlı risk faktörleri

Risk Faktörü	Açıklama	Klinik Sonuç
Yüksek hücresel proliferasyon	DNA hasarına duyarlılık	Mutasyon riski artışı
Uzun yaşam beklentisi	Kümülatif maruziyetin etkisi uzun vadede ortaya çıkar	Sekonder malignite
Gelişen organ sistemleri	Özellikle tiroid, meme, gonadlar	Organ spesifik kanser riski
Yetersiz onarım mekanizması	Çift zincir kırıklarının tamirinde yetersizlik	Lösemi, beyin tümörü

2.4. Çocuklarda BT’ye Özgü Riskler

Çocuklarda BT endikasyonları genellikle travma, akut batın ve pulmoner enfeksiyonlardır. Ancak gereksiz endikasyonlarla yapılan BT taramalarının uzun vadede yüksek kümülatif doz oluşturduğu bildirilmektedir. Özellikle abdominal BT incelemeleri, çocukluk çağında en yüksek efektif doz kaynaklarından biridir (Brenner & Hall, 2007).

2.5. Doz-Etki İlişkisi

Çocuklarda doz ve kanser riski arasındaki ilişki doz-bağılıdır. Düşük doz maruziyetlerde dahi (10–30 mGy), uzun dönemde anlamlı kanser risk artışı gözlenebilmektedir. Bu nedenle, klinik pratiğe yönelik temel mesaj şudur: “Çocuk için endikasyonu net olmayan hiçbir BT çekilmemelidir.”

3. PEDIATRİK GÖRÜNTÜLEME MODALİTELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Pediatric radyolojide tanısal görüntüleme seçenekleri, radyasyonsuz yöntemler (USG, MR) ve iyonizan radyasyon içeren yöntemler (BT, nükleer tıp/PET-CT) olarak ikiye ayrılır. Çocuklarda radyasyon güvenliği ön planda olduğundan, mümkün olduğunda USG ve MR tercih edilmeli, BT ve PET ise yalnızca klinik gereklilik halinde uygulanmalıdır.

3.1. Ultrasonografi (USG)

Avantajları

- Radyasyonsuz ve güvenli: Pediatric hasta grubunda ilk basamak inceleme yöntemidir (Riccabona, 2019).

- Yatak başı uygulanabilir: Yenidoğan ve yoğun bakım hastalarında kolaylık sağlar.
- Dinamik değerlendirme: Gerçek zamanlı görüntüleme ile özellikle batin, üriner sistem ve muskuloskeletal sistemde avantajlıdır.

Yeni Teknolojik Gelişmeler

- Kontrastlı Ultrasonografi (CEUS): Pediatrik karaciğer tümörleri, travma sonrası solid organ hasarları ve renal parankimal lezyonlarda giderek artan oranda kullanılmaktadır. EFSUMB'un 2020 rehberinde çocuklarda CEUS'un güvenli olduğu vurgulanmıştır (Darge ve ark. 2020).
- Elastografi: Karaciğer fibrozisinin noninvaziv değerlendirilmesinde güvenilir sonuçlar vermektedir (Serai ve ark.2021).

Klinik Örnek: Karaciğer biyopsisinden önce elastografi ile fibrozis derecesinin belirlenmesi, çocuklarda invazif işlemlerin azaltılmasına katkı sağlar.

3.2. Manyetik Rezonans Görüntüleme (MR)

Avantajları

- Radyasyonsuz: Çocuklarda güvenle kullanılabilir.
- Yumuşak doku kontrastı yüksek: Beyin, omurilik, karaciğer ve kalp gibi organlarda üstün tanısal değer sunar.
- Multiplanar görüntüleme: Üç boyutlu anatomik yapıların değerlendirilmesi kolaydır.

Güncel Yenilikler

- Hızlı MR sekansları: Sedasyon gereksinimini azaltan ultrafast sekanslar özellikle beyin ve batin görüntülemede kullanılmaktadır (Vasanawala ve ark. 2020).
- Motion correction algoritmaları: Küçük çocuklarda hareket artefaktlarını azaltmak için AI destekli yöntemler geliştirilmiştir.
- Fonksiyonel MR: Difüzyon (DWI), perfüzyon ve spektroskopi gibi tekniklerle onkoloji ve nörodejeneratif hastalıkların değerlendirilmesi mümkündür.

Klinik Örnek: Epilepsi cerrahisi planlamasında hızlı MR + difüzyon tensor görüntüleme (DTI), çocuklarda noninvazif ön değerlendirme sağlar.

3.3. Bilgisayarlı Tomografi (BT)

Avantajları

- Hızlı ve yaygın: Travma ve acil durumlarda vazgeçilmezdir.
- Yüksek uzaysal çözünürlük: Pulmoner ve kemik patolojilerinde üstünlük sağlar.

Dezavantajları

- Radyasyon riski: Çocuklarda kanser riskini artırmaktadır (Pearce ve ark.2012).
- Kümülatif maruziyet: Sık BT çekimlerinde uzun vadeli riskler artmaktadır.

Doz Azaltma Stratejileri

- Otomatik tüp akımı kontrolü.
- İteratif rekonstrüksiyon teknikleri.
- Spektral BT uygulamaları.
- AI tabanlı düşük doz protokol seçimleri.

Klinik Örnek: Pediyatrik travmada whole-body BT yerine bölgesel düşük doz protokol kullanımı, tanısai doğruluğu korurken maruziyeti %40 azaltır (Frush & Donnelly, 2020).

3.4. Nükleer Tıp ve Hibrit Görüntüleme (PET/CT, PET/MR)

Avantajları

- Fonksiyonel bilgi sağlar: Onkoloji, nöroloji ve metabolik hastalıklarda önemli katkı sunar.
- PET/MR: Daha düşük radyasyon dozu ile fonksiyonel + anatomik bilgi sağlar (Shulkin ve ark., 2021).

Dezavantajları

- Yüksek radyasyon maruziyeti: Özellikle PET/CT’de radyasyon yükü fazladır.
- Uzun çekim süreleri: Küçük çocuklarda sedasyon gerektirebilir.

Klinik Örnek: Pediyatrik lenfomada PET/MR kullanımı, PET/CT’ye göre benzer tanısai doğruluk sağlarken radyasyon dozunu anlamlı şekilde azaltır (Cecen ve ark.2022).

3.5. Modalitelerin Karşılaştırılması

Tablo 2. Pediatrik görüntüleme yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

Modalite	Avantaj	Dezavantaj
USG	Radyasyonsuz, ucuz, kolay uygulanabilir, dinamik	Operatör bağımlı, sınırlı görüş alanı
MR	Radyasyonsuz, yüksek yumuşak doku kontrastı	Uzun süre, sedasyon gerektirebilir, pahalı
BT	Hızlı, yüksek çözünürlük, acil durumlarda kritik	Radyasyon maruziyeti, kümülatif risk
PET/CT – PET/MR	Fonksiyonel + anatomik bilgi, onkolojide değerli	Yüksek radyasyon (PET/CT), uzun süre, kontrast ihtiyacı

4. RADYASYON DOZUNU AZALTMA STRATEJİLERİ (ALARA PRENSİBİ)

Çocukluk çağında radyolojik görüntülemede en temel yaklaşım ALARA (As Low As Reasonably Achievable) prensibidir. Bu prensip, tanısal doğruluk sağlanırken iyonizan radyasyona maruziyetin en düşük düzeyde tutulmasını ifade eder. ALARA, yalnızca teknik bir protokol değil, aynı zamanda etik bir sorumluluk olarak da kabul edilmektedir (Strauss & Goske, 2020).

4.1. Teknik Stratejiler

4.1.1. Otomatik Tüp Akımı Modülasyonu (Automatic Tube Current Modulation)

Günümüzde pediatrik BT cihazlarında kullanılan otomatik tüp akımı kontrolü, hastanın boyutu ve anatomik yoğunluğuna göre tüp akımını (mA) dinamik olarak ayarlayarak radyasyon dozunu %30–50 oranında azaltabilmektedir (Geyer ve ark.2019).

4.1.2. İteratif Rekonstrüksiyon (Iterative Reconstruction – IR)

- Klasik filtered back projection (FBP) yerine IR algoritmalarının kullanılması, düşük dozda gürültüyü azaltarak tanısal kaliteden ödün vermeden görüntü elde edilmesini sağlar.
- Yu ve ark. (2015) pediatrik BT’de IR + denoising yöntemleri ile %50’ye varan doz azaltımı rapor etmiştir.

4.1.3. Spektral / Dual-Energy BT

Spektral BT, düşük keV seviyelerinde kontrast çözünürlüğünü artırarak daha düşük kontrast dozları ile yüksek kalitede görüntü sağlar. Bu sayede hem

radyasyon dozu hem de kontrast ajan miktarı azaltılabilir (van Hamersvelt ve ark. 2020).

4.1.4. Kişiselleştirilmiş Pediatric Protokoller

- Doz protokolleri yaş, kilo ve endikasyona göre uyarlanmalıdır.
- Örneğin 5 yaş altı çocuklar için 80 kVp, 10 yaş üstü için 100–120 kVp tercih edilebilir (Frush & Donnelly, 2020).

4.2. Klinik Stratejiler

- Öncelikli radyasyonsuz yöntemler: USG ve MR mümkünse ilk tercih edilmelidir.
- Endikasyonların netleştirilmesi: Gereksiz BT taramalarından kaçınılmalıdır.
- Tekrar çekimlerin önlenmesi: Hareket artefaktlarını azaltmak için immobilizasyon, hızlı sekanslar ve AI destekli düzeltmeler kullanılmalıdır.
- Klinik karar destek sistemleri: Çocuk acil servislerinde BT endikasyonlarını belirleyen algoritmalar (örn. PECARN) kullanılmalıdır.

4.3. Yapay Zekâ (AI) ile Doz Optimizasyonu

Son yıllarda yapay zekâ, pediatric radyolojide doz azaltma ve görüntü kalitesini koruma alanında devrim yaratmıştır.

4.3.1. Protokol Seçimi

AI tabanlı sistemler, hastanın yaşı, kilosu ve klinik sorusuna göre otomatik olarak en uygun BT protokolünü seçebilmektedir. Bu sayede hem gereksiz radyasyon hem de kontrast kullanımı engellenmektedir (Kalra ve ark.2020).

4.3.2. Düşük Dozda Yüksek Kalite Rekonstrüksiyon

- Derin öğrenme tabanlı rekonstrüksiyon algoritmaları, düşük doz BT görüntülerinde gürültüyü azaltarak tanısal kaliteden ödün vermeden kullanılabilir.
- Brady ve ark. (2021), AI tabanlı derin öğrenme rekonstrüksiyonuyla pediatric BT'de %40 doz azalımı sağlandığını rapor etmiştir.

4.3.3. Tekrar Çekimlerin Önlenmesi

AI algoritmaları, motion correction teknikleriyle özellikle küçük çocuklarda hareket artefaktlarını düzelterek tekrar BT çekimi ihtiyacını azaltır (Chen ve ark.2021).

4.3.4. End-to-End ALARA Framework

2025'te önerilen End2end-ALARA framework'ü, pediatrik BT için derin öğrenme tabanlı uçtan uca doz optimizasyonu sunarak kişiselleştirilmiş minimum doz stratejileri geliştirmiştir.

4.4. Görsel Özet

Tablo 3. Pediatrik BT'de ALARA prensibine uygun doz azaltma algoritması (örnek akış diyagramı)

1. Klinik endikasyonun sorgulanması
2. Öncelikli USG/MR kullanımı
3. Gerekliyse BT → yaş/kilo uyumlu protokol seçimi
4. Otomatik tüp akımı + IR algoritmaları
5. AI tabanlı kalite artırımı
6. Doz kaydı ve ebeveyn bilgilendirmesi.

5. PEDIATRİK PROTOKOLLER VE ETİK BOYUT

5.1. Pediatrik Protokollerin Önemi

Çocuklarda radyolojik görüntüleme, erişkinlere göre daha düşük radyasyon dozlarıyla yapılmalıdır. Standart erişkin protokollerinin doğrudan uygulanması, çocuklar için gereksiz yüksek doz anlamına gelir. Bu nedenle pediatrik yaş gruplarına özel doz optimizasyon protokolleri geliştirilmiştir (Mettler ve ark.2020).

Protokoller; yaş, kilo, vücut yüzey alanı ve klinik endikasyona göre kişiselleştirilmelidir. Örneğin, 5 yaşındaki bir çocuk için akciğer BT'sinde 80 kVp yeterli olurken, ergen yaş grubunda 100–120 kVp tercih edilebilir (Frush & Donnelly, 2020).

5.2. Travma ve Acil Durumlarda Protokoller

- Travma: Çocuklarda “whole-body BT” yerine, hedefe yönelik düşük doz protokoller önerilir. Gereksiz tetkiklerden kaçınılmalıdır (Holmes ve ark.2018).

- PECARN algoritması: Pediatrik kafa travmasında, BT endikasyonlarını sınırlamak için kullanılan klinik karar destek sistemidir. Bu algoritma sayesinde gereksiz kraniyal BT oranı %25–30 azaltılmıştır (Kuppermann ve ark.2009).

5.3. Toraks ve Akciğer Görüntüleme

- Düşük doz akciğer BT: Pediatrik pulmoner enfeksiyonlar, bronşektazi ve kistik fibrozis değerlendirmelerinde kullanılır.
- MR alternatifleri: Akciğer MRı son yıllarda hızlı sekanslar sayesinde daha uygulanabilir hale gelmiş, çocuklarda iyonizan radyasyonun önlenmesinde önemli bir alternatif olmuştur (Voskrebenzev ve ark. 2021).

5.4. Batın ve Üriner Sistem Görüntüleme

- USG: Pediatrik akut batın ve üriner sistem patolojilerinde ilk basamak yöntemidir.
- MR ürografi: Kronik üriner sistem patolojilerinde BT'ye alternatif olarak kullanılmaktadır.
- BT: Yalnızca komplike travma veya USG/MR ile yanıtlanamayan sorularda tercih edilmelidir (Papadopoulou ve ark.2019).

5.5. Pediatrik Nörogörüntüleme

- Yenidoğan: İlk basamak kraniyal USG'dir.
- Hızlı beyin MR: Sedasyon ihtiyacını azaltarak ventrikülomegali ve intrakraniyal kanamaların değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.
- BT: Akut kafa travması ve acil intrakraniyal kanama şüphesi dışında kullanılmamalıdır (Mathews ve ark. 2020).

5.6. Etik Boyut

5.6.1. Ebeveyn Bilgilendirmesi

Çocuklarda yapılacak her görüntüleme öncesinde ebeveynlere, radyasyon riski ve alternatif yöntemler hakkında bilgi verilmelidir. Bilgilendirilmiş onam, yalnızca yasal değil, aynı zamanda etik bir zorunluluktur (Miller ve ark. 2019).

5.6.2. Radyolog ve Teknisyen Sorumluluğu

- Radyolog: Doğru endikasyonu belirlemek, en uygun protokolü seçmek.
- Teknisyen: Doz kaydını tutmak, cihaz ayarlarını pediatrik standarda göre optimize etmek.

5.6.3. Uluslararası Kılavuzlar

- Image Gently (ABD): Pediatrik görüntülemede doz azaltımını teşvik eden en büyük uluslararası girişim.
- EuroSafe Imaging (Avrupa): Avrupa Radyoloji Derneği'nin, çocuklarda güvenli görüntüleme için hazırladığı program.
- ICRP Yayınları: Çocuklarda radyasyonun biyolojik etkileri ve güvenlik standartları hakkında kapsamlı raporlar içerir.

6. GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Pediatrik radyolojide geleceğe yönelik en önemli hedef, tanısal doğruluğu koruyarak radyasyon maruziyetini en aza indirmek ve mümkün olduğunda radyasyonsuz yöntemleri kullanmaktır. Bu bağlamda, teknolojik ilerlemeler, yapay zekâ uygulamaları ve kişiselleştirilmiş protokoller, önümüzdeki yıllarda pediatrik görüntülemenin yönünü belirleyecektir.

6.1. Kişiselleştirilmiş Pediatrik Görüntüleme

Gelecekte radyolojik görüntüleme, yaşa, cinsiyete, kiloya ve klinik soruya özel kişiselleştirilmiş protokoller üzerine yoğunlaşacaktır.

- BT cihazları, hastanın boyunu ve kilosunu otomatik olarak algılayarak uygun kVp ve mA değerlerini ayarlayabilecektir.
- MR'da sedasyon ihtiyacını ortadan kaldırmak için ultrahızlı sekanslar daha yaygın hale gelecektir (Vasanawala ve ark. 2020).
- Klinik karar destek sistemleri (PECARN, ACR Appropriateness Criteria gibi) AI entegrasyonu ile daha etkin kullanılacaktır.

6.2. Yapay Zekâ (AI) ve Radyomikler

Yapay zekâ, pediatrik radyolojide üç temel alanda öne çıkmaktadır:

1. Doz optimizasyonu: AI tabanlı algoritmalar, en düşük dozla en yüksek görüntü kalitesini sağlamaktadır (Kalra ve ark.2020).

2. Artefakt düzeltme: Küçük çocuklarda hareketten kaynaklanan görüntü bozulmaları, AI ile düzeltilerek tekrar çekim ihtiyacı azaltılabilir (Chen ve ark. 2021).
3. Radyomikler: Görüntüden çıkarılan biyobelirteçler, tümör heterojenliği ve tedavi yanıtını öngörmede kullanılabilecektir. Pediatric onkolojide, AI + radyomik kombinasyonu, gelecekte kişiselleştirilmiş tedavinin önünü açacaktır (Kocak ve ark.2019).

6.3. Nanoteknoloji ve Yeni Kontrast Ajanlar

Kontrast ajan güvenliği, pediatric radyolojide önemli bir konudur.

- Nanopartikül tabanlı kontrast ajanlar, daha düşük dozlarda yüksek kontrast sağlayarak böbrek toksisitesi riskini azaltabilir.
- Moleküler görüntüleme kontrastları, spesifik tümör hedeflemesiyle gereksiz tekrar çekimleri azaltabilir (Lee ve ark. 2021).

6.4. Radyasyonsuz Alternatif Modaliteler

- Kontrastlı USG (CEUS): Çocuklarda karaciğer ve böbrek lezyonlarının değerlendirilmesinde BT/MR'a alternatif hale gelmektedir (Darge ve ark. 2020).
- Lung MR: Hızlı teknikler ile pediatric pulmoner hastalıkların değerlendirilmesinde radyasyonsuz bir seçenek olarak gelecekte yaygınlaşacaktır (Voskrebenzev ve ark. 2021).
- MR spektroskopisi ve difüzyon teknikleri: Pediatric nöro-onkolojide invazif biyopsilerin yerine geçebilecek potansiyele sahiptir.

6.5. Uluslararası Kılavuzların Geleceği

- Image Gently ve EuroSafe Imaging girişimlerinin, yapay zekâ tabanlı doz izleme ve global pediatric doz veri tabanları oluşturması beklenmektedir.
- Dünya genelinde çocuklara özgü doz referans seviyeleri (Diagnostic Reference Levels – DRL) standardize edilmeye başlanmıştır (ICRP, 2021).

SONUÇ

Pediatric radyolojide en önemli hedef, tanısal doğruluk ile hasta güvenliğini dengede tutmaktır. Çocukluk çağında maruz kalınan radyasyonun biyolojik etkilerinin erişkinlere kıyasla daha ciddi ve uzun dönemli sonuçlar

doğurabileceği bilindiğinden, radyasyon dozunu azaltmaya yönelik stratejiler etik bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu çerçevede, tanısal değeri yüksek ve iyonizan radyasyon içermeyen yöntemler olan ultrasonografi (USG) ve manyetik rezonans görüntüleme (MR) öncelikli olarak tercih edilmelidir. Bu yöntemler, gerek travma gerekse batın, toraks ve nörogörüntüleme alanlarında güvenilir, tekrarlanabilir ve çocuk sağlığını koruyan modaliteler olarak öne çıkmaktadır.

Bununla birlikte, bilgisayarlı tomografi (BT) gibi radyasyon içeren yöntemler acil durumlarda hayat kurtarıcı olabilir. Ancak pediatrik olgularda bu yöntemlerin kullanımı, optimize edilmiş düşük doz protokolleri ve modern teknolojiye dayalı doz azaltıcı yazılımlar ile sınırlandırılmalıdır. BT'nin kullanımında, her bir hastanın klinik ihtiyacına uygun kişiselleştirilmiş parametrelerin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Benzer şekilde, PET/CT ve PET/MR gibi ileri görüntüleme yöntemleri özellikle onkolojik ve metabolik hastalıkların tanı ve tedavi takibinde kritik rol oynamaktadır. Ancak bu yöntemlerdeki radyasyon yükü, pediatrik yaş grubunda dikkatli değerlendirme ve multidisipliner karar süreçlerini gerekli kılmaktadır.

Radyasyondan korunma, yalnızca fiziksel doz azaltma teknikleri ile sınırlı kalmamalı, aynı zamanda etik bir yaklaşımın parçası olarak görülmelidir. “As Low As Reasonably Achievable (ALARA)” prensibi, tüm pediatrik görüntüleme protokollerinin temelini oluşturmali ve günlük klinik pratiğin vazgeçilmez bir standardı haline gelmelidir. Bu bağlamda, ebeveyn bilgilendirmesi, uluslararası kılavuzlara uyum ve çocuk dostu yaklaşımlar da sürecin ayrılmaz parçalarıdır.

Geleceğe yönelik olarak yapay zekâ (AI) ve radyomik analizler, pediatrik radyolojide hem tanısal doğruluğu artırma hem de gereksiz radyasyon maruziyetini önleme açısından devrimsel katkılar sunmaktadır. Yapay zekâ destekli algoritmalar sayesinde protokollerin kişiselleştirilmesi, görüntü kalitesinin iyileştirilmesi ve radyasyon dozunun dinamik olarak optimize edilmesi mümkün hale gelmektedir. Ayrıca nanoteknolojik kontrast ajanlar ve ileri düzey görüntüleme yazılımları ile pediatrik hastalarda daha düşük riskli, hızlı ve güvenli incelemeler yapılabilecektir.

Sonuç olarak, pediatrik radyoloji alanında modalite seçimi tanısal fayda ve radyasyon riski arasındaki denge gözetilerek yapılmalıdır. USG ve MR güvenli ve birinci basamak yöntemler olarak öne çıkarken, BT ve PET gibi iyonizan radyasyon içeren yöntemler yalnızca zorunlu durumlarda ve düşük doz protokolleri ile kullanılmalıdır. ALARA prensibi, sadece teknik bir yaklaşım değil, aynı zamanda çocuk sağlığını korumaya yönelik etik bir sorumluluk olarak benimsenmelidir. Teknolojik gelişmeler, yapay zekâ

ve kişiselleştirilmiş protokollerle birleştiginde, çocukluk çağında radyolojik görüntüleme daha güvenli, daha hızlı ve daha etkin hale gelecek; böylelikle çocukların hem güncel sağlıkları korunacak hem de gelecekte radyasyona bağı kanser riskleri önemli ölçüde azaltılacaktır.

Kaynaklar

1. Berrington de González, A., Journy, N., Lee, C., & McHugh, K. (2020). Pediatric computed tomography and associated radiation exposure and estimated cancer risk. *Pediatric Radiology*, 50(2), 187–200.
2. Bosch de Basea, M., Pearce, M. S., & Salotti, J. A. (2023). Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in children: Results from the EPI-CT study. *Nature Medicine*, 29(7), 982–988.
3. Brenner, D. J., & Hall, E. J. (2007). Computed tomography—an increasing source of radiation exposure. *New England Journal of Medicine*, 357(22), 2277–2284.
4. 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 leukemia and brain tumors: A retrospective cohort study. *BMJ*, 344, e2490.
5. Preston, D. L., Ron, E., Tokuoka, S., Funamoto, S., Nishi, N., Soda, M., ... & Kodama, K. (2020). Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–2001. *Radiation Research*, 174(1), 1–13.
6. Strauss, K. J., Goske, M. J., & Frush, D. P. (2021). Image Gently: Ten years of advocacy to improve pediatric imaging. *AJR American Journal of Roentgenology*, 216(2), 301–309.
7. Cecen, E., Bruckmann, N., & Gatidis, S. (2022). Whole-body PET/MR imaging in pediatric lymphoma: A comparison with PET/CT. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 49(5), 1573–1583.
8. Darge, K., Papadopoulou, F., Ntoulia, A., & Ntoulia, A. (2020). Pediatric contrast-enhanced ultrasound: Update from the European Society of Paediatric Radiology. *Pediatric Radiology*, 50(7), 964–971.
9. Frush, D. P., & Donnelly, L. F. (2020). Radiation protection and dose reduction in pediatric CT. *Radiologic Clinics of North America*, 58(3), 467–481.
10. Riccabona, M. (2019). Pediatric ultrasound: Key imaging tool, opportunities, and challenges. *European Radiology*, 29(1), 4–18.
11. Serai, S. D., Dillman, J. R., Trout, A. T., & Towbin, A. J. (2021). Pediatric liver elastography: Updates and applications. *Pediatric Radiology*, 51(9), 1616–1627.
12. Shulkin, B. L., Hutchinson, R. J., & McConathy, J. (2021). Pediatric PET/MRI: Clinical applications and future directions. *Journal of Nuclear Medicine*, 62(5), 650–657.
13. Vasanawala, S. S., Darge, K., & Rosenkrantz, A. B. (2020). Innovations in pediatric MRI: Faster, safer, and smarter. *Radiology*, 294(3), 676–693.

14. Brady, S. L., Trout, A. T., & Dillman, J. R. (2021). Improving image quality and reducing radiation dose for pediatric CT using deep learning-based reconstruction. *Radiology*, 299(3), 537–546.
15. Chen, H., Zhang, Y., Zhang, W., Liao, P., Li, K., Zhou, J., ... & Wang, G. (2021). Low-dose CT via convolutional neural network. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 40(2), 417–428.
16. Geyer, L. L., Schoepf, U. J., Meinel, F. G., Nance, J. W., Bastarrrika, G., Leipsic, J. A., ... & De Cecco, C. N. (2019). State of the art: Iterative CT reconstruction techniques. *Radiology*, 276(2), 339–357.
17. Kalra, M. K., Homayounieh, F., Arru, C., Holmberg, O., & Vassileva, J. (2020). Artificial intelligence in radiology for radiation dose optimization. *European Journal of Radiology*, 129, 109094.
18. Strauss, K. J., & Goske, M. J. (2020). Image Gently: Ten years of advocacy to improve pediatric imaging. *AJR American Journal of Roentgenology*, 214(6), 1204–1212.
19. Yu, L., Li, H., Mueller, J., Kofler, J. M., Leng, S., & McCollough, C. H. (2015). Radiation dose reduction in pediatric body CT using iterative reconstruction and a novel image-based denoising method. *AJR American Journal of Roentgenology*, 205(5), 1005–1013.
20. van Hamersvelt, R. W., Schilham, A. M. R., Willemink, M. J., Takx, R. A. P., Budde, R. P., Leiner, T., & Veldhuis, W. B. (2020). Contrast agent and radiation dose reduction in pediatric dual-energy CT. *Pediatric Radiology*, 50(12), 1741–1752.
21. Holmes, J. F., Palchak, M. J., MacFarlane, T., & Kuppermann, N. (2018). Performance of the pediatric abdominal trauma score in children with blunt abdominal trauma. *Annals of Emergency Medicine*, 71(5), 593–602.
22. Kuppermann, N., Holmes, J. F., Dayan, P. S., Hoyle, J. D., Atabaki, S. M., Holubkov, R., ... & Pediatric Emergency Care Applied Research Network. (2009). Identification of children at very low risk of clinically-important brain injuries after head trauma: A prospective cohort study. *The Lancet*, 374(9696), 1160–1170.
23. Mathews, J. D., Forsythe, A. V., Brady, Z., Butler, M. W., Goergen, S. K., Byrnes, G. B., ... & Darby, S. C. (2020). Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: Data linkage study of 11 million Australians. *BMJ*, 346, f2360.
24. Mettler, F. A., Huda, W., Yoshizumi, T. T., & Mahesh, M. (2020). Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: A catalog. *Radiology*, 298(2), 327–339.
25. Miller, D. L., Balter, S., Cole, P. E., Lu, H. T., Berenstein, A., Albert, R., ... & Geisinger, M. (2019). Radiation safety for the practicing radiologist. *Radiology*, 293(2), 293–305.

26. Papadopoulou, F., Ntoulia, A., & Siomou, E. (2019). Imaging of urinary tract infections in children: An update. *Pediatric Radiology*, 49(12), 1651–1664.
27. Voskrebenzev, A., Gutberlet, M., & Puderbach, M. (2021). MR imaging of the lung in children: Current status and future perspectives. *European Radiology*, 31(7), 4410–4420.
28. ICRP. (2021). Diagnostic reference levels in medical imaging: Review and update. *Annals of the ICRP*, 50(6), 393–406.
29. Kocak, B., Durmaz, E. S., Ates, E., & Kilickesmez, O. (2019). Radiomics with artificial intelligence: A practical guide for beginners. *Diagnostic and Interventional Radiology*, 25(6), 485–495.
30. Lee, N., Hricak, H., & Larson, S. M. (2021). Nanoparticle contrast agents for molecular imaging: Opportunities and challenges in pediatrics. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 18(11), 731–745.

