DERLEME
DOI:10.4274/nts.galenos.2026.84856
Nucl Med Semin 2026;12:255-261

Nükleer Tıpta Yapay Zeka: Etik ve Yasal Sorunlar

Artificial Intelligence in Nuclear Medicine: Ethical and Legal Issues

Müge Öner Tamam[1], Mehmet Can Şahin[1], Muhlis Can Tamam[2]

[1]Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Prof. Dr. Cemil Taşcıoğlu Şehir Hastanesi, Nükleer Tıp Kliniği, İstanbul, Türkiye
[2]Bryant Üniversitesi, Veri Bilimi ve Biyoloji Lisans Programı, İşletme Yan Dalı, Rhode Island, ABD

Öz

Yapay zeka (YZ), nükleer tıpta görüntü rekonstrüksiyonu, kantifikasyon, otomatik segmentasyon, radyomik, klinik karar desteği ve teranostik dozimetri gibi alanlarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bununla birlikte, YZ'nin klinik karar süreçlerine yaklaşması; mahremiyet, aydınlatılmış onam, veri sahipliği ve ikincil kullanım, algoritmik yanlılık, genellenebilirlik, açıklanabilirlik, otomasyon yanlılığı, mesleki sorumluluk ve sağlık hizmetlerinde adalet gibi etik sorunları öne çıkarmaktadır. Bu etik ağırlıklı derlemede YZ'nin nükleer tıptaki başlıca klinik kullanım alanları kısaca özetlenmiş; veri etiği, adalet, şeffaflık, insan gözetimi, klinik doğrulama ve yaşam döngüsü yönetişimi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Türkiye açısından 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu, Kişisel Verileri Koruma Kurumu rehberleri, Yükseköğretim Kurulunun üretken YZ etik rehberi ve kullanım amacına göre Tıbbi Cihaz Yönetmeliği temel düzenleyici çerçeveyi oluşturmaktadır. Üretken YZ ve büyük dil modelleri eğitim ve araştırmada yarar sağlayabilse de, halüsinasyon, kaynak uydurma, mahremiyet ve akademik dürüstlük riskleri uzman denetimini zorunlu kılar. Güvenilir nükleer tıp YZ'si; temsil edici veri, görev-özgül ve çok merkezli doğrulama, alt grup performansının şeffaf raporlanması, belirsizlik iletişimi, insan gözetimi, veri güvenliği ve sürekli performans izlemi ile tanımlanmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zeka, nükleer tıp, etik, mahremiyet, yanlılık

Abstract

Artificial intelligence (AI) is increasingly used in nuclear medicine for image reconstruction, quantification, automated segmentation, radiomics, clinical decision support, and theranostic dosimetry. As AI systems move closer to patient management, ethical concerns involving privacy, informed consent, secondary data use, algorithmic bias, generalizability, explainability, automation bias, professional accountability, and health equity become central. This ethics-focused review briefly summarizes major clinical applications of AI in nuclear medicine and discusses data ethics, fairness, transparency, human oversight, clinical validation, and lifecycle governance. In Türkiye, Law No. 6698 on the Protection of Personal Data, guidance from the Personal Data Protection Authority, the Council of Higher Education's ethical guide on generative AI, and, depending on intended purpose, the Medical Device Regulation constitute the principal framework. Generative AI may support education and research, but hallucination, fabricated references, privacy, and academic-integrity risks require expert verification. Trustworthy AI in nuclear medicine should therefore rely on representative data, task-specific and multicenter validation, transparent subgroup performance, uncertainty communication, human oversight, data security, and continuous performance monitoring.

Keywords: Artificial intelligence, nuclear medicine, ethics, privacy, bias

Sorumlu Yazar/Corresponding Author
Prof. Dr. Müge Öner Tamam, Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Prof. Dr. Cemil Taşcıoğlu Şehir Hastanesi, Nükleer Tıp Kliniği, İstanbul, Türkiye
E-posta: muge.onertamam@sbu.edu.tr **ORCID ID:** orcid.org/0000-0002-3793-0178

Geliş Tarihi/Received: 29.09.2026 **Kabul Tarihi/Accepted:** 04.11.2026 **Yayınlanma Tarihi/Publication Date:** 26.11.2026

Cite this article as/Atıf: Öner Tamam M, Şahin MC, Tamam MC. Artificial intelligence in nuclear medicine: ethical and legal issues. Nucl Med Semin. 2026;12:255-261

Copyright© 2026 Yazar(lar). Türkiye Nükleer Tıp Derneği adına Galenos Yayınevi tarafından yayımlanmıştır.
Creative Commons Atıf-GayriTicari 4.0 (CC BY-NC 4.0) Uluslararası Lisansı ile lisanslanmış, açık erişimli bir makaledir.

Copyright© 2026 The Author(s). Published by Galenos Publishing House on behalf of Turkish Society of Nuclear Medicine.
This is an open access article under the Creative Commons Attribution Non-Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

Giriş

Nükleer tıp, fonksiyonel ve moleküler veriyi nicel parametrelerle birleştiren yapısı nedeniyle yapay zeka (YZ) uygulamaları için özellikle elverişlidir. Güvenilir YZ ekosistemine ilişkin *Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging* (SNMMI) Görev Gücü çalışması, tanı, tedavi, dozimetri ve iş akışına uzanan fırsatları tanımlarken güvenilirliğin yalnızca model performansına değil, YZ'nin tüm yaşam döngüsündeki insanlar, süreçler ve yönetişim mekanizmalarına bağlı olduğunu vurgulamaktadır (1). 2015-2025 dönemini inceleyen güncel bir derleme, teknik ilerlemeye rağmen klinik kanıtların önemli bir bölümünün retrospektif, tek merkezli olduğunu ve dış doğrulamanın sınırlı kaldığını göstermektedir (2). Derin öğrenme, görüntü edinimi ve rekonstrüksiyon sürecinden gürültü azaltma, kayıt, segmentasyon, lezyon saptama ve bilgisayar destekli tanıya kadar görüntüleme zincirinin hemen her basamağında kullanılabilmektedir (3). Nükleer tıp bağlamında makine öğrenimi ve derin öğrenmenin temel prensipleri, klinik uygulama açısından ayrıntılı olarak ele alınmıştır (4,5).

Bu derlemenin amacı, nükleer tıpta YZ uygulamalarını etik ve hukuki açıdan değerlendirmek ve özellikle veri mahremiyeti, algoritmik yanlılık, açıklanabilirlik, hesap verebilirlik, insan gözetimi ile Türkiye'deki güncel etik ve düzenleyici çerçeveye ilişkin seçilmiş literatürü incelemektir.

Klinik Uygulamalar: Etik Tartışmanın Klinik Zemini

Etik risklerin ortaya çıktığı bağlamı tanımlamak için, YZ'nin klinik kullanım alanlarını özetlemek önemlidir. Radyomik, görüntülerden yüksek boyutlu nicel özellikler çıkararak tümör heterojenliği, tedavi yanıtı ve prognozla ilişkili örüntüleri analiz eder; ancak görüntüleme protokolü, cihaz ve segmentasyon farklılıkları tekrarlanabilirliği etkileyebilir (6). Kardiyak tek foton emisyon bilgisayarlı tomografi/bilgisayarlı tomografide (SPECT/BT) ve pozitron emisyon tomografi/BT'de (PET/BT) YZ; perfüzyon analizi, risk katmanlaması ve çok modlu veri entegrasyonu için kullanılmakta; Avrupa Kardiyovasküler Görüntüleme Derneği'nin ve Avrupa Nükleer Tıp Derneği'nin (EANM) ortak pozisyon belgesi klinik uygulama öncesi titiz doğrulamanın gerekliliğine dikkat çekmektedir (7). Geniş nükleer tıp literatürü de onkoloji, nöroloji ve kardiyolojideki klinik potansiyelin yanında genellenebilirlik ve gerçek iş akışına aktarım sorunlarını vurgulamaktadır (8).

Teranostik ve dozimetri uygulamalarında YZ kaynaklı hataların klinik sonuçları daha ciddi olabileceğinden, bu alanlar etik ve hasta güvenliği açısından özel önem taşır; çünkü segmentasyon, farklı zaman noktalarındaki görüntülerin kaydı, zaman-aktivite eğrisi ve absorbe doz hesabındaki hatalar tedavi planlamasına doğrudan yansıyabilir. *Research Consortium for Medical Image Analysis* gibi platformlar otomatik segmentasyon ve PET kantifikasyonu (nicel ölçümü) için araştırma altyapısı sunmuş, çok merkezli standardizasyonun önemini görünür kılmıştır (9). Referans standart, gizli test seti, dış doğrulama ve düzenleyici gereksinimlerin başlangıçtan itibaren planlanması YZ odaklı klinik araştırma tasarımında önerilmektedir (10).

Etik ve Hukuki Boyutlar

Sağlıkta YZ etiği üzerine yakın tarihli sistematik inceleme, adalet, algoritmik önyargı, veri gizliliği ve güvenliği, hesap verebilirlik, açıklanabilirlik ve özerkliği literatürde en sık öne çıkan temalar arasında göstermektedir (11). Bu başlıklar nükleer tıp için özellikle önemlidir, çünkü PET/SPECT görüntüleri hem yüksek boyutlu kişisel sağlık verisi içerir hem de YZ çıktıları doğrudan tanı, prognoz, dozimetri veya tedavi kararına bağlanabilir.

Temel Etik İlkeler ve Güvenilir YZ

Nükleer tıpta YZ etiğinin başlangıç noktası özerklik, yararlılık, zarar vermeme ve adalet ilkeleridir. Currie ve Hawk (12), etik ve hukuki sorunları veri kullanımı, algoritmanın özellikleri ve klinik uygulama biçimi üzerinden ele almış; mahremiyet, şeffaflık, sorumluluk ve insan karar vericinin rolünü öne çıkarmıştır. Currie ve ark. (13), bu çerçeveyi güvenlik, güvenilirlik, veri güvenliği, mahremiyet, yanlılığın azaltılması, şeffaflık, açıklanabilirlik, insan değerleri, insan-döngüde karar verme, hesap verebilirlik, yönetişim ve kapsayıcılık gibi ilkelerle genişletmiştir.

Açıklanabilirliğin bağımsız bir beşinci biyoetik ilke olup olmadığı tartışmalıdır. Ursin ve ark. (14), açıklanabilirliğin özerklik, zarar vermeme ve adalet ilkelerini destekleyen teknolojik bir güvenlik katmanı olarak işlev gördüğünü savunmaktadır. Güvenilir tıbbi YZ literatürü, etik ilkelerin veri kalitesi, klinik fayda, şeffaflık

ve hesap verebilirlik mekanizmalarına dönüştürülmesi gerektiğini vurgular (15,16,17). Hukuki sorumluluk tek bir aktöre indirgenemez; geliştirici, kurum, klinisyen ve düzenleyici rollerinin açık biçimde tanımlanması gerekir (18,19). Avrupa-Kuzey Amerika Ortak Bildirisi, YZ'nin faydayı artırması, zararı azaltması, adaleti gözetmesi ve nihai hesap verebilirliğin insanlarda kalması gerektiğini belirtmiştir (20). Türkiye'deki tıp etiği literatürü de eğitim verilerindeki önyargıların ayrımcılık biçimlerini modele taşıyabileceğini vurgulamaktadır (21).

Kara Kutu, Şeffaflık ve Belirsizlik

Derin öğrenme modellerinin kara kutu niteliği, kararın hangi girdilere ne ölçüde dayandığının tam olarak izlenememesini ifade eder. Bu opaklık, YZ tabanlı yazılımın tıbbi cihaz olarak değerlendirilmesiyle klinik ve düzenleyici bir soruna dönüşür (22). Teknik şeffaflık tek başına yeterli değildir; bağımsız denetim, hesap verebilirlik ve yönetişim mekanizmaları da gereklidir (23). Herington ve ark.'nın (24,25) SNMMI adına hazırladığı iki çalışma, etik sorunları klinik dağıtım/yönetişim ve veri toplama, geliştirme ve değerlendirme aşamalarında ayrı ayrı ele almaktadır.

Açıklanabilirlik araçları yardımcı olabilir, ancak ısı haritaları veya özellik önem skorları gerçek bir neden-sonuç açıklaması değildir. Etik açıdan daha işlevsel olan, amaçlanan kullanımın, doğrulanmış performansın, yanlış pozitif-yanlış negatif dengesinin, alt grup performansının ve model belirsizliğinin kullanıcıya açık biçimde sunulmasıdır. Onkolojik uygulamalarda yüksek genel doğruluk tek başına güvenli kullanımın kanıtı sayılamaz (26). Bu opaklığın bir başka doğrudan sonucu aydınlatılmış onam sürecidir: hekimin YZ sisteminin çıktısının dayanaklarını ve temel sınırlılıklarını yeterince değerlendirememesi, hastaya YZ'nin klinik karardaki rolünün anlaşılır biçimde açıklanmasını ve aydınlatılmış onam sürecinin niteliğini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca YZ tabanlı görüntü rekonstrüksiyonu ve görüntü iyileştirme süreçlerinde gerçekte var olmayan yapıların üretilmesi veya mevcut klinik bulguların değiştirilmesi (halüsinasyon) olasılığı da hasta güvenliği açısından önemli bir risk oluşturur; nükleer tıp görüntülemesinde YZ kaynaklı halüsinasyonların bu kapsamda ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir (27).

Algoritmik Yanlılık, Adalet ve Sağlık Eşitsizlikleri

Eğitim verilerindeki demografik, klinik ve kurumsal dengesizlikler YZ sistemleri tarafından yeniden üretilebilir. Sağlıkta makine öğrenmesi etiği, yetersiz temsil edilen gruplarda düşük performansın mevcut eşitsizlikleri derinleştirebileceğini vurgular (28). Bu risk, nükleer tıpta cihaz üreticisi, rekonstrüksiyon (görüntü yeniden yapılandırması) parametreleri, radyofarmasötik, hastalık prevalansı ve sağlık hizmetlerine erişimdeki farklılıklarla artar. YZ modellerinde karşılaşılan bir diğer temel sorun, modelin sadece eğitildiği dar veri grubuna aşırı uyum (*overfitting*) göstermesidir. Aşırı uyum (*overfitting*), modelin eğitim verisine gereğinden fazla uyum sağlayarak genellenebilir örüntüler yerine o veriye özgü ayrıntıları ve gürültüyü öğrenmesidir; tipik olarak eğitim verisinde yüksek, bağımsız veride düşük başarıyla kendini gösterir. Bundan kavramsal olarak farklı olan alan kayması (*domain shift*) ise, eğitim verisi ile uygulama (klinik) verisinin istatistiksel dağılımlarının birbirinden ayrışmasını ifade eder ve farklı cihaz, protokol veya hasta grubuna aktarımda karşılaşılan başlıca genelleme sorununu oluşturur. Model, eğitildiği ortamın spesifik koşullarını (cihaz markası, çekim ayarları, hasta popülasyonu) "genel görüntüler" olarak öğrenir; örneğin, yalnızca güncel dijital PET/SPECT verileriyle eğitilen bir model, daha eski veya analog cihazlara genellenemeyebilir. Farklı bir cihaza, kuruma veya teknik koşula maruz kaldığında ise bu alan kayması nedeniyle modelin performansı değişen ölçüde düşebilir; ancak bu, modelin her farklı cihazda mutlaka başarısız olacağı anlamına gelmez ve etkinin büyüklüğü uygulanan uyumlaştırma (harmonizasyon) ve doğrulama önlemlerine bağlıdır. Bu hatayı önlemek için geliştirilen algoritmaların tek bir merkezin verisiyle değil, çok merkezli ve çeşitlendirilmiş veri setleriyle test edilmesi gerekir. Obermeyer ve ark.'nın (29) çalışması, Amerika Birleşik Devletleri sağlık sisteminde yaygın olarak kullanılan bir ticari sağlık algoritmasının, gerçek sağlık ihtiyacı yerine geçmiş sağlık harcamalarını vekil değişken olarak kullanması nedeniyle siyahi hastaları sistematik olarak dezavantajlı bıraktığını göstermiştir. Bu örnek, "tarafsız" görünen hedef değişkenlerin dahi yapısal eşitsizliği algoritmaya taşıyabileceğini göstermektedir.

Adalet yalnızca alıcı işletim karakteristiği eğrisi altında kalan alan veya doğruluk değerlerine ulaşmak değildir.

Bir model tüm alt gruplarda benzer performans gösterse bile, pahalı altyapı gereksinimi, eğitimli personel eksikliği veya yalnızca yüksek kaynaklı merkezlerde erişilebilir olması dağıtım adaletsizliğine yol açabilir. Bu nedenle veri temsiliyeti, erişim, yerel doğrulama ve kurumsal kapasite birlikte ele alınmalıdır.

Mahremiyet, Onam ve İkincil Veri Kullanımı

Nükleer tıp veri setleri PET/SPECT görüntülerinin yanı sıra BT/manyetik rezonans bileşenleri, demografik bilgiler, patoloji sonuçları, tedavi verileri ve takip sonuçlarını da içerebilir. Büyük veri araştırmalarında geleneksel tek seferlik onamın tüm gelecekteki kullanımları kapsamakta yetersiz kalabileceği, sistemik gözetim, sürekli hesap verebilirlik ve kurumsal veri yönetişimi gerektiği öne sürülmüştür (30). Medikal görüntülerde kimliksizleştirme (de-identifikasyon), *Digital Imaging and Communications in Medicine* başlıklarının temizlenmesini, kimlik belirleyici öğelerin kaldırılmasını ve yeniden kimliklendirme riskinin değerlendirilmesini gerektirir (31). Bu önlemler personel eğitimi ve kalite kontrolü ile tamamlanmalıdır (32).

Federe öğrenme, ham veriyi kurum dışına taşımadan çok merkezli model geliştirmeyi mümkün kılar ve mahremiyet açısından önemli bir seçenek sunar; ancak veri heterojenliği, model güncellemelerinden kaynaklanan bilgi sızıntısı ve kurumsal yetki paylaşımı gibi riskleri tamamen ortadan kaldırmaz. Dolayısıyla "veri kurumdan çıkmıyor" ifadesi tek başına etik uygunluk kanıtı değildir.

Teranostik ve Dozimetride Özgül Etik Riskler

Teranostik uygulamalarda YZ, organ/tümör segmentasyonu, farklı zaman noktalarındaki görüntülerin kaydı, zaman-aktivite eğrisi uyumu, absorbe doz hesabı ve tedavi planlamasına katkı sağlayabilir (1,2). Burada hata yalnızca yanlış sınıflandırma değil, yanlış aktivite veya doz kararına dönüşebilir. Bu nedenle doğrulama metriklerinin segmentasyon başarısının ötesine geçerek absorbe doz hatası, klinik karar etkisi ve hata propagasyonunu da içermesi gerekir. Radyofarmasi süreçlerinde sentez optimizasyonu, kalite kontrol desteği ve stok planlaması yararlı olabilir; ancak güvenlik açısından kritik çıktılar, bağımsız bir insan tarafından doğrulanmadan kullanılmamalıdır.

Düzenleyici Çerçeveler ve Türkiye

Avrupa'da tıbbi YZ; veri koruma, tıbbi cihaz güvenliği ve YZ'ye özgü yönetişim ilkelerinin kesişiminde değerlendirilmektedir. Avrupa YZ stratejisi üzerine yapılan değerlendirme; mahremiyet, siber güvenlik, doğruluk ve açıklanabilirlik arasında yeni ödünleşimler doğduğunu vurgulamaktadır (33). Nükleer tıp uzmanlarının YZ'nin geliştirilmesi ve klinik entegrasyonunda aktif rol alması gerektiği, EANM'nin ayrı bir pozisyon belgesinde de belirtilmektedir (34). Düzenleyici literatürün derlemesi ülkeler arası standardizasyon ve algoritma/test verisi şeffaflığının önemli boşluklar olmaya devam ettiğini göstermektedir (35). Biyomedikal YZ yönetişimi için uyarlanabilir, kapsayıcı ve sürekli izlemeye dayalı sistemik gözetim modelleri önerilmiştir (36).

Avrupa Birliği'nde YZ'ye özgü temel düzenleyici çerçeve, *Regulation* (EU) 2024/1689 ile oluşturulan Yapay Zeka Tüzüğü'dür (EU AI Act). Tüzük risk temelli bir yaklaşım benimsemekte; kullanım amacı ve mevzuattaki koşullara bağlı olarak, tıbbi cihazlar gibi Birlik uyum mevzuatı kapsamındaki ürünlerin güvenlik bileşeni olan veya bizzat bu ürün niteliğini taşıyan ve üçüncü taraf uygunluk değerlendirmesine tabi YZ sistemlerini yüksek riskli olarak sınıflandırabilmektedir (37). Tüzüğün genel uygulama tarihi 2 Ağustos 2026 olmakla birlikte, 2026 yılında yapılan değişiklik sonrasında Ek I kapsamındaki düzenlenmiş ürünlere entegre yüksek riskli YZ sistemlerine ilişkin kuralların 2 Ağustos 2028'den itibaren uygulanması öngörülmektedir (38). Bu çerçeve doğrudan Türk mevzuatı olmamakla birlikte, Avrupa Birliği pazarına sunulan YZ tabanlı tıbbi cihazlar ve ilgili uygunluk süreçleri bakımından dikkate alınması gereken güncel bir düzenleyici çerçevedir.

Türkiye'de nükleer tıpta YZ'yi tek başına düzenleyen bağımsız bir mevzuat yerine, kişisel veri koruma, bilimsel araştırma etiği ve tıbbi cihaz düzenlemeleri birlikte değerlendirilmelidir. 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) kapsamında sağlık verileri özel nitelikli kişisel veridir (39). Kişisel Verileri Koruma Kurumu tarafından yayımlanan Yapay Zeka Teknolojilerine Akademik Bakış çalışmasında, YZ uygulamalarında veri koruma ilkeleri, mahremiyet, yönetişim ve teknik veri koruma yöntemlerinin önemi ele alınmaktadır (40). Tanı, prognoz, tedavi veya hasta yönetimine yönelik bilgi üreten yazılım, kullanım amacı ve işlevine bağlı olarak Tıbbi

Cihaz Yönetmeliği kapsamında tıbbi cihaz yazılımı niteliği kazanabilir (41). Belirleyici olan yazılımın YZ kullanması değil, kullanım amacı ve klinik riskidir.

Yükseköğretim Kurulunun (YÖK) 2024 tarihli üretken YZ (ÜYZ) etik rehberi, bilimsel çalışmalarda şeffaflık, dürüstlük, özen, adalet ve saygı, gizlilik/mahremiyet ile hesap verebilirliği temel etik değerler olarak tanımlamaktadır. Rehber, kullanılan ÜYZ aracının hangi aşamada ve ne ölçüde kullanıldığının açıklanmasını, çıktıların araştırmacı tarafından doğrulanmasını, etik kurul başvurusunda kullanım amacı ve kapsamı hakkında bilgi verilmesini ve nihai bilimsel sorumluluğun araştırmacılarda kalmasını istemektedir (42). Bu yaklaşım, etik kurul onayı, KVKK uygunluğu ve Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu'nun yetki alanındaki tıbbi cihaz mevzuatına uygunluğun birbirinin yerine geçmeyen ayrı süreçler olduğunu vurgulamaktadır. Bu nedenle etik kurul onayı, kişisel verilerin korunmasına ilişkin yükümlülükler ve tıbbi cihaz mevzuatına uygunluk birbirinden bağımsız ancak tamamlayıcı süreçler olarak değerlendirilmelidir.

ÜYZ, Büyük Dil Modelleri ve Akademik Etik

ChatGPT ve benzeri büyük dil modelleri eğitim materyali hazırlama, soru üretme, metin düzenleme ve literatür ön taraması gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, halüsinasyon, yanlış veya uydurma kaynak üretimi ve güven verici bir üslupla hatalı bilgi sunma riski akademik dürüstlük açısından önemlidir (43). Kişisel Verileri Koruma Kurumu'nun ÜYZ rehberi, kişisel veri işlemenin tüm yaşam döngüsü boyunca değerlendirilmesini ve insan merkezli, şeffaf ve denetlenebilir bir kullanım yaklaşımını vurgulamaktadır (44). YÖK rehberi ise ÜYZ'nin hipotez geliştirme, yorumlama ve karar verme gibi üst düzey bilişsel süreçlerde araştırmacının yerini almaması gerektiğini belirtmektedir (42).

Bu nedenle ÜYZ çıktısı bilimsel kanıtın yerine geçmemeli; her iddia özgün kaynaktan doğrulanmalı, tanımlanabilir hasta verileri kamuya açık modellere yüklenmemeli ve YZ kullanımı dergi/kurum politikaları uyarınca şeffaf biçimde beyan edilmelidir.

Mesleki Dönüşüm ve Nükleer Tıp Hekiminin Rolü

Klinik karar desteğine YZ entegrasyonu bilişsel yükü azaltabilir; ancak otomasyon yanlılığı, kullanıcıların makine çıktısına gereğinden fazla güvenmesine yol açabilir (1,24,25). Avrupa Radyoloji Derneği'nin EuroAIM anketi, radyologların YZ'nin gelecekteki etkisini önemli gördüğünü ancak mesleki roller konusunda farklı beklentilere sahip olduğunu göstermiştir (45). Klinik iş akışına entegrasyonda teknik uyum kadar organizasyon kültürü, kullanıcı güveni ve sorumluluk paylaşımı da belirleyicidir (46). Mevcut YZ eğitim fırsatlarının heterojenliği, standart bir yeterlilik gereksinimini ortaya koymaktadır (47).

Mesleki kimlik ve insan-makine ilişkisi üzerindeki YZ etkileri de önemlidir (48). 2026 tarihli nükleer tıp eğitimi rehberi, YZ'nin insan yargısı, hesap verebilirlik, eleştirel düşünme, mahremiyet ve kaynak doğrulamasını koruyan; kaynakla temellendirilmiş ve uzman tarafından gözden geçirilmiş iş akışlarında kullanılmasını önermektedir (49). Nükleer tıp hekimi bu nedenle algoritmanın görev-özgül performansını, hastanın değerlerini, belirsizliği, cihaz/protokol farklılıklarını ve klinik bağlamı birleştiren son insan denetim noktasıdır. Yukarıda ele alınan etik boyutlar, başlıca risk ve uygulama gereksinimleri ekseninde Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Güvenilir nükleer tıp YZ'si için uygulama önerileri

Etik alan	Başlıca risk	Uygulama gereksinimi
Mahremiyet/onam	Yeniden kimliklendirme, izinsiz ikincil kullanım	Veri minimizasyonu, uygun hukuki sebep, erişim/aktarım kontrolü
Adalet/yanlılık	Alt gruplarda sistematik hata	Temsil edici veri, alt grup analizi, yerel ve çok merkezli doğrulama
Şeffaflık	Kara kutu, bilinmeyen sınırlılıklar	Amaçlanan kullanım, performans, belirsizlik ve başarısızlık modlarının açıklanması
İnsan gözetimi	Otomasyon yanlılığı, beceri kaybı	*Human-in-the-loop* (insanın karar sürecinde yer aldığı/insan denetimli sistem), eğitim, bağımsız klinik değerlendirme
Yaşam döngüsü	*Model drift* (model kayması), güncelleme, siber risk	Sürüm kontrolü, sürekli kalite güvencesi, algoritmik denetim
Hesap verebilirlik	Sorumluluk boşluğu	Geliştirici-kurum-klinisyen-düzenleyici rollerinin tanımlanması

YZ: Yapay zeka

Sonuç

Nükleer tıpta görüntü üretiminden klinik karara ve teranostik tedavi planlamasına uzanan zincirin yeniden şekillendirilmesinde YZ önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak güvenilirlik, algoritmik performansın sonradan eklenen bir kontrolü değil, sistem tasarımının başlangıç koşulu olmalıdır. Temsil edici veri, mahremiyetin tasarımdan itibaren korunması, görev-özgül ve çok merkezli doğrulama, alt grup performansının şeffaflığı, belirsizlik iletişimi, insan gözetimi, paylaşılan hesap verebilirlik ve yaşam döngüsü boyunca performans izleme temel gereksinimlerdir. Türkiye'de 6698 sayılı Kanun, Kişisel Verileri Koruma Kurumu rehberleri, KVKK Kurumu rehberleri, YÖK etik rehberi ve kullanım amacına göre Tıbbi Cihaz Yönetmeliği birlikte değerlendirilmelidir. Bu süreçte hukuki uygunluk etik uygunluğun yerine geçmez; etik değerlendirme, kişisel verilerin korunması ve tıbbi cihaz mevzuatına uyum süreçlerinin birlikte yürütülmesi gerekir. Temel etik amaç, YZ'nin hekimi ikame etmesi değil; hasta merkezli, kanıta dayalı ve adil karar vermeyi daha güvenli, şeffaf ve denetlenebilir hale getirmektir.

Dipnotlar

Çıkar Çatışması: Yazarlar tarafından çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Finansal Destek: Yazarlar tarafından finansal destek almadıkları bildirilmiştir.

Yapay Zeka (AI) Kullanım Beyanı: Dil düzeltme desteği alınmıştır. Makalenin bilimsel içeriği ve doğruluğuna ilişkin sorumluluk yazarlara aittir.

Kaynaklar

1. Saboury B, Bradshaw T, Boellaard R, et al. Artificial intelligence in nuclear medicine: opportunities, challenges, and responsibilities toward a trustworthy ecosystem. J Nucl Med. 2023;64:188-196.
2. Alpizar-Rojas M, Jaromirski-Segura H, Herrera-Jiménez LG, et al. Artificial intelligence in nuclear medicine (2015-2025): clinical applications, regulatory governance, and pharmacotherapeutic implications. Cureus. 2026;18:e113457.
3. Decuyper M, Maebe J, Van Holen R, Vandenberghe S. Artificial intelligence with deep learning in nuclear medicine and radiology. EJNMMI Phys. 2021;8:81.
4. Currie G, Rohren E. Intelligent imaging in nuclear medicine: the principles of artificial intelligence, machine learning and deep learning. Semin Nucl Med. 2021;51:102-111.
5. Tamam MO, Tamam MC. Artificial intelligence technologies in nuclear medicine. World J Radiol. 2022;14:151-154.
6. Aktolun C. Artificial intelligence and radiomics in nuclear medicine: potentials and challenges. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2019;46:2731-2736. Erratum in: Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2020;47:513.
7. Slart RHJA, Williams MC, Juarez-Orozco LE, et al. Position paper of the EACVI and EANM on artificial intelligence applications in multimodality cardiovascular imaging using SPECT/CT, PET/CT, and cardiac CT. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2021;48:1399-1413.
8. Visvikis D, Lambin P, Beuschau Mauridsen K, et al. Application of artificial intelligence in nuclear medicine and molecular imaging: a review of current status and future perspectives for clinical translation. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2022;49:4452-4463.
9. Trägårdh E, Borrelli P, Kaboteh R, et al. RECOMIA-a cloud-based platform for artificial intelligence research in nuclear medicine and radiology. EJNMMI Phys. 2020;7:51.
10. Delso G, Cirillo D, Kaggie JD, Valencia A, Metser U, Veit-Haibach P. How to design ai-driven clinical trials in nuclear medicine. Semin Nucl Med. 2021;51:112-119.
11. Islıcık S. Sağlıkta yapay zekâ ve etik konular: sistematik bir inceleme. GÜSBD. 2026;15:679-698.
12. Currie G, Hawk KE. Ethical and legal challenges of artificial intelligence in nuclear medicine. Semin Nucl Med. 2021;51:120-125.
13. Currie G, Hawk KE, Rohren EM. Ethical principles for the application of artificial intelligence (AI) in nuclear medicine. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2020;47:748-752.
14. Ursin F, Timmermann C, Steger F. Explicability of artificial intelligence in radiology: is a fifth bioethical principle conceptually necessary? Bioethics. 2022;36:143-153.
15. Zhang J, Zhang ZM. Ethics and governance of trustworthy medical artificial intelligence. BMC Med Inform Decis Mak. 2023;23:7.
16. Akinci D'Antonoli T. Ethical considerations for artificial intelligence: an overview of the current radiology landscape. Diagn Interv Radiol. 2020;26:504-511.
17. Brady AP, Neri E. Artificial intelligence in radiology-ethical considerations. Diagnostics (Basel). 2020;10:231.
18. Jaremko JL, Azar M, Bromwich R, et al.; Canadian Association of Radiologists (CAR) Artificial Intelligence Working Group. Canadian Association of Radiologists White Paper on ethical and legal issues related to artificial intelligence in radiology. Can Assoc Radiol J. 2019;70:107-118.
19. Naik N, Hameed BMZ, Shetty DK, et al. Legal and ethical consideration in artificial intelligence in healthcare: who takes responsibility? Front Surg. 2022;9:862322.
20. Geis JR, Brady AP, Wu CC, et al. Ethics of artificial intelligence in radiology: summary of the Joint European and North American Multisociety Statement. J Am Coll Radiol. 2019;16:1516-1521.
21. Sağıroğlu E, Tosun H. Yapay zekânın sağlık uygulamalarındaki kullanımı ve etik açıdan tartışılması: geleneksel derleme. Türkiye Klinikleri J Med Ethics. 2023;31:140-148.

22. Pesapane F, Volonté C, Codari M, Sardanelli F. Artificial intelligence as a medical device in radiology: ethical and regulatory issues in Europe and the United States. Insights Imaging. 2018;9:745-753.
23. Cath C. Governing artificial intelligence: ethical, legal and technical opportunities and challenges. Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2018;376:20180080.
24. Herington J, McCradden MD, Creel K, et al. Ethical considerations for artificial intelligence in medical imaging: deployment and governance. J Nucl Med. 2023;64:1509-1515.
25. Herington J, McCradden MD, Creel K, et al. Ethical considerations for artificial intelligence in medical imaging: data collection, development, and evaluation. J Nucl Med. 2023;64:1848-1854.
26. Shreve JT, Khanani SA, Haddad TC. Artificial intelligence in oncology: current capabilities, future opportunities, and ethical considerations. Am Soc Clin Oncol Educ Book. 2022;42:1-10.
27. Xia M, Bayerlein R, Chemli Y, et al. On Hallucinations in artificial intelligence-generated content for nuclear medicine imaging (the DREAM Report). J Nucl Med. 2026;67:166-174.
28. Vayena E, Blasimme A, Cohen IG. Machine learning in medicine: addressing ethical challenges. PLoS Med. 2018;15:e1002689.
29. Obermeyer Z, Powers B, Vogeli C, Mullainathan S. Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. Science. 2019;366:447-453.
30. Vayena E, Blasimme A. Health research with big data: time for systemic oversight. J Law Med Ethics. 2018;46:119-129.
31. Parker W, Jaremko JL, Cicero M, et al. Canadian Association of Radiologists White Paper on de-identification of medical imaging: Part 1, General Principles. Can Assoc Radiol J. 2021;72:13-24.
32. Parker W, Jaremko JL, Cicero M, et al. Canadian Association of Radiologists White Paper on De-identification of medical imaging: part 2, practical considerations. Can Assoc Radiol J. 2021;72:25-34.
33. Cohen IG, Evgeniou T, Gerke S, Minssen T. The European artificial intelligence strategy: implications and challenges for digital health. Lancet Digit Health. 2020;2:e376-e379.
34. Hustinx R, Pruim J, Lassmann M, Visvikis D. An EANM position paper on the application of artificial intelligence in nuclear medicine. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2022;50:61-66.
35. Giansanti D. The regulation of artificial intelligence in digital radiology in the scientific literature: a narrative review of reviews. Healthcare (Basel). 2022;10:1824.
36. Blasimme A, Vayena E. The ethics of AI in biomedical research, patient care, and public health. In: Dubber MD, Pasquale F, Das S, editors. The Oxford Handbook of Ethics of AI. New York: Oxford University Press; 2020:703-718.
37. European Parliament, Council of the European Union. Regulation (EU) 2024/1689 of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828 (Artificial Intelligence Act). Official Journal of the European Union [Internet]. 2024;L 2024/1689. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401689
38. European Parliament, Council of the European Union. Regulation (EU) 2026/1744 of 8 July 2026 amending Regulations (EU) 2024/1689, (EU) 2018/1139 and (EU) 2023/1230 as regards the simplification of the implementation of harmonised rules on artificial intelligence (Digital Omnibus on AI). Official Journal of the European Union [Internet]. 2026;L 2026/1744. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202601744
39. Türkiye Cumhuriyeti. 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu. Resmî Gazete [Internet]. 2016;(29677). Erişim linki: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2016/04/20160407-8.pdf
40. Kişisel Verileri Koruma Kurumu. Yapay Zekâ Teknolojilerine Akademik Bakış. Ankara: Kişisel Verileri Koruma Kurumu; 2025. Erişim linki: https://kvkk.gov.tr/SharedFolderServer/CMSFiles/58f74957-ac01-4d67-97bd-8edd8287bd4e.pdf
41. Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu. Tıbbi Cihaz Yönetmeliği. Resmî Gazete [Internet]. 2021;31499 (1. Mükerrer).
42. Yükseköğretim Kurulu. Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber. Ankara: Yükseköğretim Kurulu; 2024. Erişim linki: https://proje.yok.gov.tr/tr/page/635
43. Currie GM. Academic integrity and artificial intelligence: is ChatGPT hype, hero or heresy? Semin Nucl Med. 2023;53:719-730.
44. Kişisel Verileri Koruma Kurumu. Üretken yapay zekâ ve kişisel verilerin korunması rehberi (15 soruda) [Internet]. Ankara: Kişisel Verileri Koruma Kurumu; 2025. Yayın No: 113. Erişim linki: https://www.kvkk.gov.tr/SharedFolde rServer/CMSFiles/MTY5MjNmNmIwZWY3YTE.pdf
45. European Society of Radiology (ESR). Impact of artificial intelligence on radiology: a EuroAIM survey among members of the European Society of Radiology. Insights Imaging. 2019;10:105.
46. Kotter E, Ranschaert E. Challenges and solutions for introducing artificial intelligence (AI) in daily clinical workflow. Eur Radiol. 2021;31:5-7.
47. Schuur F, Rezazade Mehrizi MH, Ranschaert E. Training opportunities of artificial intelligence (AI) in radiology: a systematic review. Eur Radiol. 2021;31:6021-6029.
48. Coppola F, Faggioni L, Gabelloni M, et al. Human, all too human? An all-around appraisal of the "artificial intelligence revolution" in medical imaging. Front Psychol. 2021;12:710982.
49. Jacobs KM, Peacock JG. AI-empowered nuclear medicine education, part 1: theoretical and ethical foundation. J Nucl Med Technol. 2026;54:221-227.