DERLEME
DOI:10.4274/nts.galenos.2026.62523
Nucl Med Semin 2026;12:165-173

Nükleer Tıpta Yapay Zekanın Klinik Uygulamaya Alınması: Doğrulama, İş Akışı Entegrasyonu ve Sürekli Kalite Güvencesi

The Implementation of Artificial Intelligence in Nuclear Medicine: Validation, Workflow Integration, and Continuous Quality Assurance

Seyhan Karaçavuş[1,2], Ümit Özgür Akdemir[3,4], Nazım Coşkun[5]

[1]Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Kayseri Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye
[2]Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye
[3]Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye
[4]Gazi Üniversitesi, Nörobilim ve Nöroteknoloji Enstitüsü, Disiplinlerarası Nörobilim Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye
[5]Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

Öz

Nükleer tıpta yapay zeka (YZ), görüntü rekonstrüksiyonu ve düşük sayımlı görüntüleme, atenüasyon ve hareket düzeltmesi, otomatik segmentasyon ve kantifikasyon, radyomik, hastalık tanısı ve prognoz, radyonüklit tedavilerde dozimetri ve bu tedavilerin kişiselleştirilmesi, iş akışı ve raporlamaya kadar uzanan bir uygulama alanına sahiptir. Çok merkezli ve harici doğrulanmış çalışmalar umut verici olmakla birlikte, literatürün önemli bölümü tek merkezli, geriye dönük ve teknik performans ağırlıklıdır. Klinik sonuç, hasta güvenliği, doğruluk ve gerçek yaşam performansı konusunda kanıt daha sınırlıdır. Üretken YZ ve büyük dil modelleri, rapor taslağı, benzer olgu erişimi, eğitim ve araştırma desteği sağlayabilir; ancak halüsinasyon, veri gizliliği, siber güvenlik, önyargı ve otomasyon yanlılığı nedeniyle otomatik raporlama veya klinik karar verme için henüz uygun ve yeterli değildir.
Bu derlemenin amacı, nükleer tıp uzmanlarına YZ araçlarını klinik kullanıma alırken izleyebileceği pratik bir uygulama

Abstract

Artificial intelligence (AI) in nuclear medicine has a wide range of applications, spanning image reconstruction and low-count imaging, attenuation and motion correction, automatic segmentation and quantification, radiomics, disease diagnosis and prognosis, dosimetry in radionuclide therapies and the personalization of these therapies, as well as workflow and reporting. While multicenter and externally validated studies are promising, a significant portion of the literature consists of single-center, retrospective studies with a strong emphasis on technical performance. Evidence regarding clinical outcomes, patient safety, accuracy, and real-world performance is more limited. Generative AI and large language models can provide report templates, access to similar cases, and support for education and research; however, due to hallucinations, data privacy, cybersecurity, bias, and automation bias, they are not yet suitable or sufficient for automated reporting or clinical decision-making.

Sorumlu Yazar/Corresponding Author
Prof. Dr. Seyhan Karaçavuş, Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Kayseri Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı; Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye
E-posta: seyhankaracavus@hotmail.com **ORCID ID:** orcid.org/0000-0002-0651-6441
Geliş Tarihi/Received: 05.10.2026 **Kabul Tarihi/Accepted:** 04.11.2026 **Yayınlanma Tarihi/Publication Date:** 26.11.2026

Cite this article as/Atıf: Karaçavuş S, Akdemir ÜÖ, Coşkun N. The implementation of artificial intelligence in nuclear medicine: validation, workflow integration, and continuous quality assurance. Nucl Med Semin. 2026;12:165-173

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.

yol haritası sunmak, uygulanabilir bir yöntemin güvenli biçimde seçilmesi, denenmesi ve iş akışına yerleştirilmesinin anlatılmasıdır. RELAINCE ve *European Association of Nuclear Medicine* kılavuzları temel alınarak klinik uygulamaya geçişte karar vermeyi kolaylaştıracak, YZ'den güvenli, etkili ve etik biçimde yararlanılabilmesi için kanıta ve uluslararası uzlaşı belgelerine dayalı bir uygulama çerçevesi sunulmuştur.
Anahtar Kelimeler: Yapay zeka, nükleer tıp, klinik uygulama

The purpose of this review is to provide a practical implementation roadmap that nuclear medicine specialists can follow when adopting AI tools for clinical use, and to describe how to safely select, test, and integrate a viable method into their workflow. Based on existing resources, including the RELAINCE and European Association of Nuclear Medicine guidelines, an evidence-based and internationally agreed-upon implementation framework has been presented to facilitate decision-making during the transition to clinical practice and to ensure the safe, effective, and ethical use of AI.
Keywords: Artificial intelligence, nuclear medicine, clinical implementation

Giriş

Yapay zeka (YZ) tabanlı algoritmalar, nükleer tıpta görüntü elde edilmesinden raporlamaya, tanıdan radyonüklit tedavilerin dozimetrisine ve kişiselleştirilmesine kadar uzanan bir iş akışı sürecinde yer almaktadır. Derin öğrenme yöntemleri daha çok, düşük sayımlı pozitron emisyon tomografisi (PET) ve tek foton emisyon bilgisayarlı tomografi (SPECT) görüntülerinin iyileştirilmesi, görüntü rekonstrüksiyonu, atenüasyon düzeltmesi, otomatik segmentasyon ve nicel ölçümlerin standardizasyonu için kullanılmaktadır (1,2). Radyomik ve makine öğrenmesi modelleri ise görüntü özelliklerini klinik, biyokimyasal ve demografik verilerle birleştirerek tanı, evreleme, prognoz ve tedavi yanıtı öngörüsünü hedeflemektedir (3,4).

Nükleer tıpta kullanılan görüntüleme yöntemleri, yalnızca anatomik yapıyı değil, metabolik ve moleküler süreçleri de yansıtır. Bu nedenle küçük bir rekonstrüksiyon, segmentasyon veya kantifikasyon hatası, yalnızca görüntü kalitesini değil; tümör yükü, tedavi yanıtı, radyonüklit tedavi dozu veya hasta yönetimi hakkındaki klinik kararı da etkileyebilir. PET ve SPECT verileri cihaz, radyofarmasötik, çekim süresi, aktivite, rekonstrüksiyon, atenüasyon düzeltmesi ve hasta hareketinden etkilenir. Aynı klinik sonuç için farklı merkezlerde farklı veri dağılımları oluşur. Bu değişkenlik, modelin eğitim sırasında öğrenmediği bir ortamda beklenmedik hata üretmesine neden olabilir. Düşük sayımlı PET için çok merkezli ve harici doğrulanmış bir çalışma umut verici sonuçlar vermiş olsa da, küçük ve eşik değere yakın lezyonlarda hata riski olduğunu göstermiştir (5).

Literatürde teknik başarı ile klinik fayda çoğu zaman birbirine karıştırılmaktadır. Yüksek bir Dice skoru (iki veri kümesi arasındaki benzerliğin bir ölçüsü), düşük bir hata oranı veya yüksek bir eğri altındaki alan, tek başına daha iyi hasta sonucu ya da daha güvenli klinik karar anlamına gelmez (6,7). Bir YZ aracının geliştirme verisindeki başarısı, gerçek klinik ortamda güvenli ve yararlı çalışacağını garanti etmez. Bu nedenle bir nükleer tıp uzmanının YZ aracını kullanmadan önce sorması gereken temel soru "Bu model ne kadar doğru?" değil, "Bu model belirli klinik amaca, bu hasta grubuna, bu cihaz ve protokole, bu iş akışına güvenli biçimde hizmet ediyor mu?" olmalıdır.

Bu derlemenin amacı, nükleer tıp uzmanlarına YZ araçlarının olası kullanım alanlarını ve klinik yararlarını, teknik ve klinik sınırlılıklarını, kullanım öncesi değerlendirme ve kabul testlerini, insan denetimi ve sorumluluk ilkelerini, üretken YZ'ye özgü güvenlik kurallarını, veri koruma ve siber güvenlik gerekliliklerini içeren, YZ'yi klinik kullanıma alırken izleyebileceği pratik bir uygulama yol haritası sunmak, uygulanabilir bir yöntemin güvenli biçimde seçilip denenerek iş akışına yerleştirilmesini anlatmaktır.

Klinik Uygulamalarda YZ Kullanımı

Nükleer tıpta YZ'nin başlıca kullanım alanları Tablo 1'de sunulmuştur. Klinik uygulamalarda kullanıldığı yerler ve yöntemler aşağıdaki gibi özetlenebilir: (4,8)

- Görüntü Rekonstrüksiyonu ve Düşük Sayımlı Görüntüleme

Düşük sayımlı PET görüntülerinde derin öğrenme ile görüntü iyileştirme, radyasyon dozunu veya çekim süresini azaltma potansiyeli taşır. Çok merkezli ve harici doğrulanmış bir çalışmada, düşük sayımlı tüm vücut PET görüntülerinin derin öğrenme ile iyileştirilmesi, görüntü kalitesi ve tanısal güven bakımından standart görüntülere yakın sonuçlar vermiştir (5). Ancak aynı çalışmada küçük ve eşik değere yakın lezyonlarda yalancı negatiflik riski görülmüş; çalışma yalnızca belirli bir radyofarmasötik ve

sınırlı sayıda hasta ile yürütülmüştür. Bu nedenle "düşük doz" veya "kısa çekim" iddiası, bütün radyofarmasötikler, cihazlar, protokoller ve klinik durumlar için genellenemez. Nükleer tıp uzmanı, YZ ile iyileştirilmiş görüntüyü değerlendirirken yalnızca görüntünün daha temiz görünmesine güvenmemelidir. Özellikle standart tutulum değeri maksimum (SUV_{maks}), SUV_{mean}, metabolik tümör hacmi, lezyon kontrastı ve küçük lezyon saptama duyarlılığı ayrı ayrı incelenmelidir. Görsel iyileşme nicel doğruluğu garanti etmez.

- Segmentasyon, Kantifikasyon ve Radyomik

Otomatik veya yarı otomatik segmentasyon, manuel işlemin süresini ve gözlemciler arası değişkenliği azaltabilir. Bununla birlikte, küçük lezyonlar, düşük kontrastlı bulgular, heterojen tümörler, fizyolojik tutulumlar ve parsiyel hacim etkisi segmentasyon hatalarına açıktır. *European Association of Nuclear Medicine/Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging* (EANM/SNMMI) radyomik kılavuzu, görüntü edinimi, rekonstrüksiyon, segmentasyon, voksel yeniden örnekleme, yoğunluk ayrıklaştırma ve özellik seçiminin ayrıntılı biçimde standardize edilmesini önermektedir (3).

Radyomik modellerde yüzlerce özellik ile küçük hasta gruplarının birleştirilmesi aşırı uyuma yol açabilir. Test verisinin model geliştirme sürecine tekrar tekrar dahil edilmesi veri karışıklığı oluşturur. Bu nedenle test veri seti, modelin son hali belirlenene kadar tamamen ayrı tutulmalı; radyomik model yalnızca klinik değişkenlerden oluşan daha basit bir temel modelle karşılaştırılmalıdır (3,9).

- Dozimetri ve Teranostik

YZ, radyofarmasötik tedavilerde görüntüleme, organ ve tümör segmentasyonu, zaman-aktivite eğrilerinin tahmini ve doz haritalarının oluşturulması aşamalarında kullanılabilir (10). Bu yaklaşım kişiselleştirilmiş dozimetriyi hızlandırabilir ve çok sayıda görüntüleme zaman noktasına olan ihtiyacı azaltabilir. Ancak dozimetrik hata doğrudan tedavi kararını etkileyebileceği için bu alan tanısal görüntü analizinden daha çok dikkat gerektirir.

YZ tabanlı dozimetri, Monte Carlo simülasyonları, fantom ölçümleri veya bağımsız fiziksel hesaplamalarla karşılaştırılmalı; hata aralıkları organ ve tümör düzeyinde raporlanmalıdır. Modelin hangi radyonüklid, cihaz, çekim zamanı, rekonstrüksiyon ve biyodağılım koşullarında geçerli olduğu açıkça belirtilmelidir. Hekim, fizikçi ve radyofarmasi ekibinin ortak onayı olmadan YZ çıktısı tek başına tedavi aktivitesi veya tedavi döngüsü belirlememelidir (10).

Teranostik dijital ikizler ve öngörücü dozimetri, gelecekte önemli bir gelişme alanıdır; ancak bu modeller henüz yüksek düzeyde veri entegrasyonu, doğrulama, siber güvenlik ve etik yönetim gerektiren araştırma ağırlıklı teknolojilerdir (11,12).

- Üretken YZ ve Büyük Dil Modelleri (LLM)

Üretken YZ, nükleer tıpta yapılandırılmış rapor oluşturma, rapor metnini özetleme, benzer olgu arama, eğitim, literatür taraması ve araştırma, veri madenciliği gibi görevlerde kullanılabilir (13,14). PET raporlarıyla desteklenen geri çağırma ile desteklenmiş üretim yaklaşımını inceleyen tek merkezli bir pilot çalışmada, kaynak raporlara erişim sağlayan sistem genel amaçlı LLM'lere göre daha uygun yanıtlar üretmiş; buna rağmen nadir olgularda başarısızlık sürmüştür (15).

LLM'lerin temel sorunu, yanlış bilgiyi akıcı ve ikna edici biçimde üretebilmesidir. Nükleer tıp görüntülemesinde üretken YZ halüsinasyonları; kaynak görüntüyle uyumsuz bulgu, olgusal yanlışlık, rastlantısal uydurma veya eğitim verisinden kaynaklanan sistematik hata biçiminde ortaya çıkabilir (16). Bu nedenle üretken YZ çıktısı, klinik raporun veya klinik kararın kendisi değil, uzman tarafından doğrulanması gereken bir taslak olarak kabul edilmelidir.

YZ algoritmaları tipik olarak kullanıcı tanımlı kurallar yerine eğitim verilerinin analizi yoluyla bir takım kurallar öğrenirler. Bu kurallar genellikle açık değildir ve bu nedenle kolayca yorumlanamaz, bu da çıktıda öngörülemezliğe ve bazı zorluklara yol açar. İlk olarak YZ algoritmaları, klinik uygulamalardaki performansını olumsuz etkileyebilecek yanlış sonuçlar verebilir. Örneğin, YZ tabanlı rekonstrüksiyon yanlış lezyonlar oluşturabilir, YZ tabanlı gürültü giderme lezyonları ortadan kaldırabilir ve YZ tabanlı lezyon segmentasyonu sağlıklı dokuyu yanlışlıkla malignite olarak tanımlayabilir. Bu nedenle, algoritmanın klinik faydasını değerlendirmek için tanımlamalar çok önemlidir. İkinci bir zorluk ise genelleştirilebilirliktir. YZ algoritmaları genellikle birçok değişken parametreye sahip karmaşık modellerdir. Bu algoritmalar eğitim verilerinde iyi performans gösterebilir, ancak farklı bir kurumdan, farklı popülasyon gruplarından veya tarayıcılardan gelen veriler gibi yeni verilere genelleme yapamayabilir. Bunun olası nedenleri arasında, algoritmanın hedef sonuçla eğitim verileri içinde yalnızca korelasyon gösteren veri özelliklerini kullanması veya eğitim verilerinin hasta popülasyonunu yeterince temsil etmemesi yer almaktadır. Bu algoritmaların genellenebilirliğini değerlendirmek için de tanımlamalar gereklidir. Üçüncü bir zorluk ise klinik uygulama sırasında

veri kaymasıdır. YZ sistemleri klinik olarak kullanıldığında, zamanla, hasta demografisi, donanım, edinim ve analiz protokollerindeki değişiklikler nedeniyle girdi verisi dağılımı eğitim verilerinin dağılımından farklılaşabilir (6,7).

YZ, tedaviye rehberlik etmek gibi önemli uygulamalarda karar destek mekanizması olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle YZ algoritmalarının titiz bir şekilde değerlendirilmesi ve YZ'nin kullanım amacının klinik çerçevede belirlenmesi gereklidir. Nükleer tıpta YZ için yayımlanmış en önemli kılavuzlardan biri, algoritma değerlendirmesini çeşitli aşamalarda ele alan RELAINCE: Recommendations for EvaLuation of AI for NuClear medicinE kılavuzu, YZ değerlendirmesinin belirli bir "amaç" ile başlamasını ve bu amacın hedef popülasyon, görüntüleme süreci, bilgi çıkarma süreci ve başarı ölçütlerini içermesini önermektedir (6). EANM kılavuzu ve nükleer tıpta YZ'nin fırsat, zorluk ve sorumluluklarını ele alan bir uzlaşı metni de YZ'nin yalnızca teknik bir araç olarak değil; hasta, hekim, tıbbi fizikçi, bilişim birimi, geliştirici, sağlık kurumu ve düzenleyici kurumları içeren bir ekosistem olarak ele alınmasını önermektedir (17,18).

RELAINCE Kılavuzunun Temel İlkeleri

- Kullanım amacı klinik bir cümleyle tanımlanmalıdır: Her YZ aracı için bazı unsurlar yazılı olarak tanımlanmalıdır. Hangi klinik görevi yerine getirdiği, hangi hasta grubunda kullanılacağı, hangi görüntüleme ve rekonstrüksiyon koşullarında çalıştığı, çıktının klinik karar sürecinde hangi noktada kullanılacağı, başarı ve güvenlik ölçütlerinin ne olduğu belirtilmelidir (6).

- Teknik performans klinik yararın yerine konulmamalıdır: Model performansı, klinik soruya uygun metriklerle ölçülmelidir. Segmentasyon için yalnızca Dice skoru; görüntü rekonstrüksiyonu için yalnızca RMSE (*root mean squared error,* kök ortalama kare hatası, istatistiksel bir modelin tahmin edilen değerleri ile gerçek değerler arasındaki ortalama farkı ölçer); sınıflandırma için yalnızca doğruluk oranı yeterli değildir. Yanlış negatif ve yanlış pozitiflerin klinik maliyeti, güven aralıkları, kalibrasyon, alt grup performansı, iş akışı etkisi ve hasta sonuçları değerlendirilmelidir (6,19).

- Harici doğrulama zorunlu bir güven basamağıdır: Eğitim ve test verileri hasta, merkez, cihaz veya zaman bakımından örtüşmemelidir. Modelin başka merkez, başka cihaz, başka protokol ve farklı hasta özellikleri üzerindeki performansı ayrıca test edilmelidir (6,7).

- İnsan denetimi klinik kararın ayrılmaz parçasıdır: Nükleer tıp uzmanı, YZ çıktısını ham görüntü ve klinik bağlamla karşılaştırmalı, modelin kullanım amacının dışına çıkıp çıkmadığını kontrol etmeli, beklenmedik veya belirsiz çıktıyı reddedebilmeli, gerektiğinde modeli devre dışı bırakabilmeli, nihai rapor ve tedavi kararının gerekçesini bağımsız olarak kurabilmelidir (20).

"İnsanın sürece dahil olduğu (*human-in-the-loop*)" ilkesi, özellikle tanı, prognoz ve dozimetri gibi doğrudan hasta yönetimini etkileyen görevlerde korunmalıdır (17,18,20). İnsan denetimi yalnızca raporun sonunda bir onay düğmesine basmak değildir; kullanıcının çıktıyı sorgulayabildiği, modelin belirsizliğini gördüğü ve gerektiğinde karşı kanıtı inceleyebildiği bir iş akışıdır.

- Veri temsili, kaliteli ve izlenebilir olmalıdır: Veri setleri hedef klinik popülasyonu, cihazları, radyofarmasötikleri, protokolleri, hastalık şiddetini ve belirli demografik grupları yansıtmalıdır. Dahil etme ve dışlama kriterleri, referans standart, etiketleme süreci, eksik veri yönetimi ve veri ön işleme adımları dokümante edilmelidir (7,21). Nükleer tıp verilerinde görüntü ile birlikte doz, çekim süresi, radyofarmasötik, cihaz, rekonstrüksiyon, kalibrasyon ve hareket bilgisi de kayıt altına alınmalıdır. Ortak terminoloji, DICOM uyumu, yapılandırılmış veri sözlükleri ve FAIR ilkeleri (*findable*-bulunabilir, *accessible*-erişilebilir, *interoperable*-birlikte çalışabilir, *reusable*-yeniden kullanılabilir), kurumlar arası YZ geliştirme ve doğrulamanın temelini oluşturur (22,23).

- Alt grup performansı izlenmelidir: Genel ortalama performans, belirli hasta gruplarındaki düşük performansı gizleyebilir. Cinsiyet, yaş, vücut kitle indeksi, böbrek fonksiyonu, etnik veya coğrafi özellikler, hastalık evresi, cihaz ve protokol alt grupları mümkün olduğunca ayrı incelenmelidir (20,21). Alt grup bilgisi modele doğrudan verilse de verilmese de, modelin farklı gruplarda aynı klinik güvenilirliği sağlayıp sağlamadığı değerlendirilmelidir.

- Şeffaflık, açıklanabilirlik ve belirsizlik birlikte ele alınmalıdır: Klinisyenin ihtiyacı her zaman modelin tüm matematiksel akıl yürütmesini görmek değildir. Daha temel olarak, modelin hangi amaçla tasarlandığı, hangi verilerle eğitilmiş ve doğrulanmış olduğu, hangi durumlarda kullanılmaması gerektiği, hangi hataları daha sık yaptığı, çıktının belirsizliği veya güven düzeyinin ne olduğu, hangi yazılım sürümünün kullanıldığı ve son güncellemenin ne zaman yapıldığı bilinmelidir. Model kartı, kullanım talimatı, performans raporu ve hata günlüğü bu şeffaflığın temel gerekliliklerdir (21,24,25).

- YZ araçları sürekli izlenmelidir: YZ bir kez doğrulanıp süresiz kullanılacak statik bir ürün değildir. Yeni PET/SPECT cihazı, yeni rekonstrüksiyon yazılımı, yeni radyofarmasötik, değişen hasta profili veya model güncellemesi veri ve kavram kaymasına neden olabilir (26,27,28).

Klinik Kullanıma Alma için Önerilen Süreç

- Kullanım Öncesi Değerlendirme

Klinik birim, YZ aracını satın almadan veya kullanmaya başlamadan önce Tablo 2'de verilmiş olan soruları yanıtlamalıdır. Satın alma kararında yalnızca pazarlama materyali veya tek bir yüksek performans sonucu yeterli kabul edilmemelidir. Çok merkezli çalışmalar, yerel veriyle kabul testi, kullanıcı eğitimi, iş akışı entegrasyonu, tedarikçi değerlendirmesi ve dağıtım sonrası izlemi birlikte ele almaktadır (29).

- Yerel Kabul Testi

Klinik kullanımdan önce multidisipliner bir ekip oluşturulmalıdır. Ekipte en az bir nükleer tıp uzmanı, tıbbi fizikçi, teknoloji uzmanı, bilişim/güvenlik sorumlusu ve kurumun kalite veya hukuk biriminden uygun bir temsilci bulunmalıdır (29,30).

Yerel kabul testi üç aşamada yürütülmelidir:

1. Yerel cihaz ve protokolleri temsil eden retrospektif veriyle teknik ve klinik test,

2. Çıktının hasta yönetimini etkilemediği deneysel test çalışması,

3. Önceden belirlenmiş olgu grubu ve süre içinde uzman denetimli kısıtlı prospektif kullanım (19,30).

DECIDE-AI (Developmental and Exploratory Clinical Investigations of DEcision support systems driven by

Tablo 1. Nükleer tıpta yapay zekanın başlıca kullanım alanları (3,6,8,10,13,31)

Kullanım alanı	Olası klinik yarar	Başlıca risk	Asgari güvenlik koşulu
Görüntü rekonstrüksiyonu ve düşük sayımlı PET/SPECT	Daha kısa çekim, daha düşük aktivite veya daha düşük sayımla kabul edilebilir görüntü kalitesi	Gerçek lezyonun silinmesi, yapay lezyon oluşması, SUV ve diğer nicel ölçümlerin değişmesi	Çok merkezli ve harici doğrulama; görüntü kalitesi yanında kantitatif eşdeğerlik ve hata analizi
Atenüasyon, saçılma ve hareket düzeltmesi	Artefakt azalması, PET/MRG ve BT'siz düzeltme olanakları	Yanlış düzeltme, yalancı tutulum veya gerçek bulgunun bastırılması	Cihaz, radyofarmasötik ve protokol çeşitliliğinde test; uzman görsel kontrolü
Segmentasyon ve kantifikasyon	Tümör yükü, organ hacmi, SUV ve metabolik hacim ölçümlerinde hız ve tekrarlanabilirlik	Küçük lezyonlarda sınır hatası, parsiyel hacim etkisi, fizyolojik tutulumun yanlış işaretleme	Referans standart, uzman düzeltmesi, belirsizlik ve başarısızlık durumlarının gösterilmesi
Radyomik ve sonuç modelleri	Prognostik ve prediktif biyobelirteçlerin araştırılması	Aşırı uyum, veri sızıntısı, düşük yeniden üretilebilirlik, protokol kaynaklı önyargı	IBSI/EANM-SNMMI uyumu, harici doğrulama, baz modelle karşılaştırma
Lezyon saptama ve sınıflandırma	Gözden kaçan bulguların azaltılması, önceliklendirme	Yanlış negatif veya yanlış pozitif; otomasyon yanlılığı	Tanımlı kullanım amacı, klinik değerlendirme, uzman tarafından nihai karar
Radyofarmasötik tedavilerde dozimetri	Kişiselleştirilmiş doz, hızlı segmentasyon, daha az zaman noktası	Yanlış doz haritası veya yanlış riskli organ dozu; tedavi zararının doğrudan artması	Yüksek riskli yardımcı sistem olarak kullanım; fizikçi ve uzman doğrulaması; bağımsız yöntemle karşılaştırma
İş akışı ve raporlama	Triyaj, yapılandırılmış rapor, benzer olgu erişimi, idari zaman tasarrufu	Yanlış önceliklendirme, önemli bulgunun atlanması, hatanın rapora otomatik taşınması	Loglama, kullanıcı eğitimi, klinik doğrulama, otomatik imzanın engellenmesi
Üretken YZ ve LLM	Rapor taslağı, metin yapılandırma, eğitim, araştırma ve kaynak erişimi	Halüsinasyon, gizlilik ihlali, uydurma kaynak, güvenli görünen yanlış öneri	Güvenli kurumsal ortam, kaynakla sınırlı üretim, uzman doğrulaması ve açık dokümantasyon

IBSI: *Image Biomarker Standardisation Initiative,* EANM: *European Association of Nuclear Medicine,* SNMMI: *Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging,* YZ: Yapay zeka, LLM: Büyük dil modelleri, BT: Bilgisayarlı tomografi, SUV: Standart tutulum değeri, PET: Pozitron emisyon tomografisi, SPECT: Tek foton emisyon bilgisayarlı tomografi, MRG: Manyetik rezonans görüntüleme

Tablo 2. Yapay zeka araçlarının klinik kullanım öncesi değerlendirilmesi (25,27,29,30)		
Değerlendirme sorusu	**Gerekli kanıt**	**Karar ölçütü**
Araç hangi klinik amaca yöneliktir?	Kullanım amacı ve kullanım dışı durumlar	Klinik soruyla uyum
Tıbbi cihaz veya SaMD olarak düzenleyici statüsü nedir?	Uygunluk, ruhsat/izin, sınıf ve kullanım talimatı	İlgili mevzuata uygunluk
Hangi veriyle doğrulanmıştır?	Merkez, cihaz, protokol, radyofarmasötik ve hasta özellikleri	Yerel ortama makul benzerlik
Harici doğrulama yapılmış mıdır?	Bağımsız merkez veya cihaz sonuçları	Genellenebilirlik için yeterli kanıt
Bilinen hata ve kısıtlılıklar nelerdir?	Model kartı, hata analizi, güvenlik raporu	Kritik hatalar yönetilebilir olmalı
Güncelleme politikası nedir?	Sürüm, değişiklik ve yeniden doğrulama planı	Klinik birimin onayı olmadan sessiz güncelleme olmamalı
Veriler nerede işlenmektedir?	Veri işleme sözleşmesi, sunucu konumu, siber güvenlik	Hasta verisi için kurumsal onay
Satış sonrası destek var mıdır?	Olay bildirimi ve performans izleme planı	Sorumluluk ve iletişim zinciri belirli olmalı
SaMD: *Software as a medical device*		

Artificial Intelligence), erken klinik değerlendirmelerde sistem sürümünün, kullanıcı eğitiminin, iş akışına entegrasyonun, hataların, güvenlik olaylarının ve insan-YZ uyumunun raporlanmasını önermektedir (19). Yeni cihaz, protokol, radyofarmasötik veya yazılım güncellemesi sonrasında yeniden doğrulama yapılmalıdır. Uygulama sonrası izlemde kritik yanlış negatif ve pozitifler, kullanıcı düzeltme oranı, başarısız analizler, alt grup performansı ve model kayması kaydedilmelidir (26,27).

- Kabul Kriterleri

Kabul kriterleri kullanım amacına göre belirlenmelidir. Görüntü iyileştirme aracında belirli SUV ölçümleri için önceden belirlenmiş hata sınırı, segmentasyon aracında klinik olarak kabul edilebilir sınırlar içinde hacim ve kontur uyumu, lezyon saptama aracında kritik yanlış negatif oranı için üst sınır, raporlama aracında olgusal hata ve klinik anlamı değiştiren hata oranı, dozimetri aracında bağımsız referans yöntemle organ ve tümör dozlarının kabul edilebilir farkı, iş akışı aracında işlem süresi, başarısız işlem oranı ve kullanıcı düzeltme oranı gibi kriterler olmalıdır (6,27,30).

Başarı ölçütleri, "ortalama doğruluk" yerine hasta güvenliğini ve klinik amacı yansıtmalıdır. Bir modelin ortalama performansı iyi olsa bile kritik bir yanlış negatif sonuç kabul edilemez düzeydeyse rutin kullanıma alınmamalıdır.

- Rutin Kullanıma Alınma

Rutin kullanım için YZ çıktısı, rapor veya tedavi kararına otomatik ve denetimsiz biçimde aktarılmamalıdır. Uzman, YZ'nin çıktısını ham veri, önceki görüntü, klinik bilgi ve gerektiğinde diğer görüntüleme yöntemleriyle karşılaştırmalıdır. Kullanıcı, çıktıyı kabul ettiğinde veya reddettiğinde gerekçeyi kısa biçimde kaydedebilmelidir. Yazılım sürümü, model adı ve kritik parametreler rapor veya işlem kaydında izlenebilir olmalıdır. Kullanım dışı bir hasta, radyofarmasötik, cihaz veya protokol ile karşılaşıldığında araç devre dışı bırakılmalı veya çıktı yalnızca araştırma amaçlı değerlendirilmelidir. Klinik raporda YZ kullanımı, kurum politikasına göre uygun düzeyde açıklanmalıdır (20,29).

- Uygulamada Kalite Güvencesi

Kalite güvencesi; ilk kabul testini, periyodik kalite kontrolünü, sürüm değişikliği sonrasında yeniden doğrulamayı ve sorun bildirimini içermelidir. YZ aracının performansı; kritik yanlış negatif ve yanlış pozitif sayısı, başarısız veya tamamlanamayan analiz oranı, uzman tarafından düzeltme veya reddetme oranı, kullanım dışı veri oranı, işlem süresi ve sistem kesintisi, alt grup performansı, model güncellemesi öncesi ve sonrası performans, klinik yönetimi değiştiren hata sayısı gibi göstergelerle izlenebilir (27,28).

Kurulum sonrası gözetim, sağlayıcı ve sağlık kurumunun ortak sorumluluğundadır. Yapılan öneriler, performansın kullanım süresi boyunca izlenmesini, bazal performans değerlerinin ve güven aralıklarının tanımlanmasını, sorunların kaydedilmesini ve düzenli incelemeyi vurgulamaktadır (26). En az yıllık kurumsal performans değerlendirmesi yapılmalı ve her kritik yazılım, cihaz veya protokol değişikliğinde yeniden kabul testi uygulanmalıdır (27,29).

Kritik yanlış negatif veya yanlış pozitiflerde beklenmeyen artış, yeni cihaz veya protokol sonrasında

performans düşüşü, modelin kullanım amacı dışındaki verilerde kullanılması, veri gizliliği veya siber güvenlik olayı, sağlayıcının haber vermeden model güncellemesi, çıktıların tekrarlanamaz hale gelmesi, kullanıcıların modelin hata sınırlarını anlayamadığının görülmesi durumlarında kullanım durdurulmalıdır (26,29).

Üretken YZ Kullanımı

Üretken YZ, aşağıdaki görevlerde yardımcı araç olarak değerlendirilebilir: (13,14)

- Nükleer tıp raporunun yapılandırılmış taslağını oluşturma,
- Bulgular ile sonuç arasındaki tutarlılığı kontrol etme,
- Uzun raporları klinisyen için kısa özet haline getirme,
- Anonimleştirilmiş araştırma verilerini ön sınıflandırma,
- Eğitim amacıyla olgu soruları ve açıklamaları oluşturma,
- Kurum içi onaylı kılavuz veya veri tabanında benzer olgu arama,
- Rapor dilini hastanın anlayabileceği biçimde sadeleştirme; ancak klinik sonucun uzman tarafından kontrol edilmesi.

Üretken YZ kullanımı sırasında zorunlu güvenlik kurallarına dikkat edilmelidir. Kimlik belirleyici hasta verileri, kurum tarafından onaylanmamış genel amaçlı çevrim içi modellere girilmemelidir. Kullanılan modelin adı, sürümü, veri işleme yeri ve eğitim verilerinin yeniden kullanım politikası bilinmelidir. Klinik çıktılar kaynak görüntü veya kaynak metinle ilişkilendirilebiliyorsa bu bağlantı görünür olmalıdır. Üretilen her rapor taslağı uzman tarafından satır satır doğrulanmalıdır. Modelin ürettiği kaynaklar, DOI'ler, kılavuz atıfları ve doz önerileri bağımsız olarak kontrol edilmelidir. LLM çıktısı otomatik olarak imzalanmamalı veya hasta dosyasına doğrudan aktarılmamalıdır. Komut, çıktı ve düzeltmeler; araştırma veya kalite amacıyla saklanacaksa veri koruma ve etik kurul gereklilikleri değerlendirilmelidir (31,32).

LLM'nin tek başına tanı koyması, radyofarmasötik tedavi aktivitesini veya dozimetri kararını belirlemesi, uzman incelemesi olmadan nihai rapor oluşturulması, hastaya klinik öneri veya tedavi planı gönderilmesi, uydurma veya doğrulanmamış literatür kaynaklarının kullanılması, hasta verilerinin kamuya açık modelle paylaşılması, görüntüde olmayan bir bulgunun yalnızca metinsel istem nedeniyle rapora eklenmesi uygun olmayan kullanım şekilleridir. Üretken YZ halüsinasyonları için geliştirilen DREAM (Definition- representative examples- evaluation- causes- mitigation) raporu, bu sistemlerin mevcut aşamada otonom karar verici değil, klinik riski artırmadan yardımcı araç olarak konumlandırılması gerektiğini vurgulamaktadır (16).

İş Akışı Entegrasyonu ve İnsan Faktörleri

YZ aracının klinik değeri, algoritmanın kendisi kadar iş akışındaki konumuna da bağlıdır. Uzmanın görüntüyü açmasından önce ön okuma aracı olarak, raporlama sırasında ikinci göz olarak, rapor imzalanmadan önce tutarlılık denetleyicisi olarak, kalite kontrol veya araştırma veri düzenleme aracı olarak farklı risk ve fayda profillerine sahip olabilir (19,29).

Klinik değerlendirmede yalnızca "model doğru mu?" değil, "model doğru zamanda ve doğru biçimde mi sunuluyor?" sorusu da yanıtlanmalıdır. Gereksiz uyarılar alarm yorgunluğu oluşturabilir; çok geç gelen çıktı iş akışına katkı sağlamayabilir. Aracın PACS, raporlama veya dozimetri yazılımına entegrasyonu, ayrı bir uygulama açma zorunluluğuna göre kullanıcı davranışını değiştirebilir (29,30).

Kullanıcıların YZ çıktısına gereğinden fazla güvenmesi otomasyon yanlılığına; model hatası görüldüğünde her türlü YZ yardımını reddetmesi ise algoritmik reddetmeye yol açabilir. Her iki durum da hasta güvenliği açısından sorunludur. Kullanıcı eğitimi, modelin yalnızca nasıl kullanılacağını değil, hangi koşullarda hata yapabileceğini de öğretmelidir (29).

Sonuç

Nükleer tıpta YZ kullanımı teknik bir yazılım seçimi değil, klinik bir süreç yönetimidir. RELAINCE kılavuzu algoritma değerlendirmesini kullanım süreci boyunca ele alırken, EANM ve SNMMI belgeleri bu sürece etik, eğitim, veri standardizasyonu ve mesleki sorumluluğu eklemektedir (6,17,18). Fakat mevcut çalışmaların çoğu geriye dönük, tek merkezli ve teknik performans odaklıdır. Hasta yönetimi, sağkalım, yaşam kalitesi, gereksiz işlem azalması, maliyet-etkinlik gibi sonuçlar daha az incelenmiştir. Ayrıca birçok YZ aracı belirli bir cihaz, radyofarmasötik veya kurumun veri dağılımına bağımlıdır. Bu nedenle nükleer tıp uzmanları, "yayınlanmış olması" ile "kendi kurumunda güvenli kullanıma hazır olması" arasındaki farkı korumalıdır. YZ nükleer tıpta hekimin yerini alacak bağımsız bir karar verici olarak değil; görüntüleme kalitesini, nicel doğruluğu, iş akışını ve kişiselleştirilmiş tedaviyi destekleyebilecek, ancak

kullanım süreci boyunca denetlenmesi gereken bir teknolojik araç olarak konumlandırılmalıdır.

Dipnotlar

Çıkar Çatışması: Makalenin yazarı, Seyhan Karaçavuş, Kasım sayısında konuk editör olarak görev yapmıştır. Ancak kendisi bu makalenin editoryal değerlendirme ve hakemlik sürecinde yer almamış, hakem değerlendirmelerine ilişkin herhangi bir bilgiye erişmemiş ve nihai karar sürecine dahil olmamıştır. Yazarlar tarafından çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Finansal Destek: Yazarlar tarafından finansal destek almadıkları bildirilmiştir.

Yapay Zeka (AI) Kullanım Beyanı: Makalenin hazırlanması sırasında yapay zeka araçları metin düzenleme, dil düzeltme ve literatür desteği amacıyla kullanılmıştır.

Kaynaklar

1. Zaidi H, El Naqa I. Quantitative molecular positron emission tomography imaging using advanced deep learning techniques. Annu Rev Biomed Eng. 2021;23:249-276.
2. Seifert R, Weber M, Kocakavuk E, Rischpler C, Kersting D. Artificial intelligence and machine learning in nuclear medicine: future perspectives. Semin Nucl Med. 2021;51:170-177.
3. Hatt M, Krizsan AK, Rahmim A, et al. Joint EANM/SNMMI guideline on radiomics in nuclear medicine : Jointly supported by the EANM physics committee and the SNMMI physics, instrumentation and data sciences council. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2023;50:352-375.
4. 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.
5. Chaudhari AS, Mittra E, Davidzon GA, et al. Low-count whole-body PET with deep learning in a multicenter and externally validated study. NPJ Digit Med. 2021;4:127.
6. Jha AK, Bradshaw TJ, Buvat I, et al. Nuclear medicine and artificial intelligence: best practices for evaluation (the RELAINCE guidelines). J Nucl Med. 2022;63:1288-1299.
7. Bradshaw TJ, Boellaard R, Dutta J, et al. Nuclear medicine and artificial intelligence: best practices for algorithm development. J Nucl Med. 2022;63:500-510.
8. Arabi H, AkhavanAllaf A, Sanaat A, Shiri I, Zaidi H. The promise of artificial intelligence and deep learning in PET and SPECT imaging. Phys Med. 2021;83:122-137.
9. Zwanenburg A. Radiomics in nuclear medicine: robustness, reproducibility, standardization, and how to avoid data analysis traps and replication crisis. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2019;46:2638-2655.
10. Brosch-Lenz JF, Delker A, Schmidt F, Tran-Gia J. On the use of artificial intelligence for dosimetry of radiopharmaceutical therapies. Nuklearmedizin. 2023;62:379-388.
11. Currie GM, Rohren E. The role of artificial intelligence in theranostics. J Nucl Med Technol. 2025;53:82S-91S.
12. Strigari L, Schwarz J, Bradshaw T, et al. Computational nuclear oncology toward precision radiopharmaceutical therapies: ethical, regulatory, and socioeconomic dimensions of theranostic digital twins. J Nucl Med. 2025;66:748-756.
13. Hirata K, Matsui Y, Yamada A, et al. Generative AI and large language models in nuclear medicine: current status and future prospects. Ann Nucl Med. 2024;38:853-864. Erratum in: Ann Nucl Med. 2025;39:404-405.
14. Bradshaw TJ, Tie X, Warner J, Hu J, Li Q, Li X. Large language models and large multimodal models in medical imaging: a primer for physicians. J Nucl Med. 2025;66:173-182.
15. Choi H, Lee D, Kang YK, Suh M. Empowering PET imaging reporting with retrieval-augmented large language models and reading reports database: a pilot single center study. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2025;52:2452-2462.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Vasey B, Nagendran M, Campbell B, et al.; DECIDE-AI expert group. Reporting guideline for the early stage clinical evaluation of decision support systems driven by artificial intelligence: DECIDE-AI. BMJ. 2022;377:e070904.
20. 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.
21. 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.
22. Bradshaw TJ, Brosch-Lenz J, Uribe C, et al. Recommendations for Standardizing nuclear medicine terminology and data in the era of theranostics and artificial intelligence. J Nucl Med. 2025;66:1471-1479.
23. 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.
24. Kotter E, D'Antonoli TA, Cuocolo R, et al.; European Society of Radiology (ESR). Guiding AI in radiology: ESR's recommendations

for effective implementation of the European AI Act. Insights Imaging. 2025;16:33.

25. Zanca F, Brusasco C, Pesapane F, Kwade Z, Beckers R, Avanzo M. Regulatory Aspects of the Use of Artificial Intelligence Medical Software. Semin Radiat Oncol. 2022;32:432-441.
26. Cuocolo R, Bernardini D, Pinto Dos Santos D, et al.; European Society of Radiology (ESR). AI medical device post-market surveillance regulations: consensus recommendations by the European Society of Radiology. Insights Imaging. 2025;16:275.
27. Mahmood U, Shukla-Dave A, Chan HP, et al. Artificial intelligence in medicine: mitigating risks and maximizing benefits via quality assurance, quality control, and acceptance testing. BJR Artif Intell. 2024;1:ubae003.
28. Allen B, Dreyer K, Stibolt R Jr, et al. Evaluation and real-world performance monitoring of artificial intelligence models in clinical practice: try it, buy it, check it. J Am Coll Radiol. 2021;18:1489-1496.
29. Brady AP, Allen B, Chong J, et al. Developing, purchasing, implementing and monitoring AI tools in radiology: practical considerations. A multi-society statement from the ACR, CAR, ESR, RANZCR and RSNA. Radiol Artif Intell. 2024;6:e230513.
30. Ketola JHJ, Inkinen SI, Mäkelä T, et al. Testing process for artificial intelligence applications in radiology practice. Phys Med. 2024;128:104842.
31. Yi PH, Haver HL, Jeudy JJ, et al. Best practices for the safe use of large language models and other generative AI in radiology. Radiology. 2025;316:e241516.
32. Currie G, Hawk KE. Ethical and legal challenges of artificial intelligence in nuclear medicine. Semin Nucl Med. 2021;51:120-125.