



Nükleer Kardiyolojide Yapay Zeka Uygulamaları

Artificial Intelligence Applications in Nuclear Cardiology

© Seyhan Karaçavuş

Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Kayseri Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye

Öz

Koroner arter hastalığının tanıs ve prognostik değerlendirilmesinde nükleer kardiyoloji yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda bu yöntemlerin işlevsel ve tanıs performanslarının artmasına yardımcı olmak amacıyla yapay zeka algoritmalarından faydalanılmaya başlanmıştır. Yapay zeka, insan zekasını taklit eden, birtakım hesaplama, sınıflandırma ve analitik yöntemleri içeren bir uygulamadır. Tıbbi görüntülerin hızlı ve doğru bir şekilde yorumlanmasını sağlayarak hastalıkların klinik süreçlerine önemli katkılarda bulunmaktadır. Nükleer kardiyoloji alanında da, görüntülemenin veri elde edilmesinden yorumlanmasına kadar her aşamada etkili bir rol oynamaya başlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zeka, nükleer kardiyoloji, analiz

Abstract

Nuclear cardiology methods play a pivotal role in the diagnostic and prognostic assessment of coronary artery disease. Recently, the integration of artificial intelligence algorithms has emerged as a strategy to enhance the functional and diagnostic efficacy of these established methods. Artificial intelligence encompasses a spectrum of computational, classification, and analytical techniques designed to emulate human intelligence. Its application has yielded notable advancements in clinical processes related to diseases, particularly through the prompt and precise interpretation of medical images. In the realm of nuclear cardiology, artificial intelligence has progressively assumed a substantive role across all facets of imaging, spanning from data acquisition to interpretation.

Keywords: Artificial intelligent, nuclear cardiology, analysis

Giriş

Nükleer kardiyoloji, kalp hastalıklarının teşhisi, takibi ve tedavisi için öncü bir teknolojidir. Ancak, bu alandaki veri karmaşıklığı ve hasta görüntülerinin yorumlanması zorlukları, yapay zekanın (YZ) müdahil olmasını gerektiren birçok fırsatı ortaya çıkarmıştır. YZ, birtakım hesaplama, sınıflandırma ve analitik yöntemleri bilgisayar yardımıyla gerçekleştiren bir uygulamadır ve bilgisayar programlarının düşünme yeteneğini ifade eder (1). İnsan zekasını ve düşünme şeklini taklit eder; insan gibi öğrenir, tepki verir, uyum sağlar, sorunları çözer ve genellikle de performansı oldukça iyidir. Çoğu işlevi çok hızlı ve doğru bir şekilde yapabilme kapasitesine sahiptir ve elde edilen veriler aktarılabilir, tekrarlanabilir

ve doküman edilebilir niteliktedir. Aslında insan tarafından yapıldığında zeka olarak adlandırılan bir takım işlevlerin makine tarafından yapılmasıdır. YZ süreçlerinin temelinde veriler üzerinde belli algoritmaları kullanarak analiz eden derin öğrenme (*deep learning* - DL) algoritmalarını da içeren makine öğrenmesi (*machine learning* - ML) vardır (2). ML algoritmaları, büyük miktarda veriyi analiz ederek daha doğru tahminler yapmamızı ve daha iyi kararlar almamızı sağlar.

ML algoritmaları üç kategoriye ayrılır: geleneksel ML, DL ve radyomiks. Geleneksel ML, karar ağaçları ve Bayes sınıflandırıcılarını içerir (3). Fakat bu yöntemin yetersiz ya da aşırı tahmin, sınıflandırma başarısında düşüklük ve veri kalitesine yüksek hassasiyet göstermesi

Yazışma Adresi/Address for Correspondence

Prof. Dr. Seyhan Karaçavuş, Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Kayseri Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye

E-posta: seyhan.karacavus@sbu.edu.tr **ORCID ID:** orcid.org/0000-0002-0651-6441



Copyright © 2024 Yazar. Türkiye Nükleer Tıp Derneği adına Galenos Yayınevi tarafından yayımlanmıştır. Creative Commons Atıf-GayriTicari 4.0 Uluslararası (CC BY-NC 4.0) Uluslararası Lisansı ile lisanslanmış, açık erişimli bir makedir.

Copyright © 2024 The Author. Published by Galenos Publishing House on behalf of Turkish Nuclear Medicine Society. This is an open access article under the Creative Commons AttributionNonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

gibi sınırlamaları vardır. DL, çeşitli yapay sinir ağlarına [evrişimli-*convolutional neural network* (CNN), derin sinir ağları ve tekrarlayan sinir ağları] dayalı olarak çalışan bir algoritmadır ve beyin sinir hücrelerinin yapı, karakter ve bilişsel yeteneklerini taklit edip, bilgilerin katman katman çıkarılıp dönüştürülerek elde edilmesini sağlar (4). Derin öğrenme aslında, giriş verilerinden doğrudan tahminler yapabilen bir yapay sinir ağı olan çok katmanlı ML yöntemidir. Başlıca dezavantajı anlaşılması ve yorumlanmasını zorlaştıran karmaşık yapısıdır. Bununla birlikte sabit kurallara ve uzman bilgisine ihtiyaç göstermeden çalışabilmesi bilinmeyenlere karşı yeni yaklaşımlar keşfedilmesine imkan tanıyabilir. Radyomiks, tıbbi görüntülerden klinik olarak anlamlı kantitatif özelliklerin çıkarılması ve bunların yüksek boyutlu vektörlere dönüştürülmesini ifade eder. Görüntülerin incelenmesi sonucu altta yatan patofizyolojik süreçlere bir iç görü sağlayabileceğinden dolayı hastalıkların daha kapsamlı değerlendirilmesine olanak sağlar (5).

Günümüzde pek çok alanda kullanılan YZ, tıbbi görüntülerin hızlı ve doğru bir şekilde yorumlanmasını sağlayarak hastalıklar hakkında etkin bir şekilde tanısıl ve prognostik veriler ortaya çıkarmaktadır. Nükleer kardiyolojide koroner arter hastalığının (KAH) tanısında ve prognostik değerlendirilmesinde tek foton emisyon tomografisi (SPECT), pozitron emisyon tomografisi (PET), bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans (MR) görüntüleme ve hibrid (SPECT/BT, PET/BT, PET/MR vb.) anatomik ve fonksiyonel görüntüleme teknikleri yaygın olarak kullanılmakta ve bu cihazlardaki teknolojik gelişmelerle birlikte pek çok veri elde edilmektedir. Ancak insanın bu veri setlerini yorumlama, ölçme ve entegre etme yeteneği sınırlıdır. YZ algoritmalarının kullanıma girmesi ile birlikte nükleer kardiyoloji alanında da, görüntülemenin veri elde edilmesinden yorumlanmasına kadar her aşamasında etkili bir rol oynamaya başladığı görülmektedir. Her ne kadar SPECT ve PET görüntülerinin düşük çözünürlüğü, YZ uygulamalarında bazı zorlukları beraberinde getirirse de sağladıkları önemli fonksiyonel ve metabolik bilgilerden dolayı tüm dünyada bu konuda geniş çaplı araştırmalar yapılmaya devam etmektedir.

Nükleer Kardiyolojide Yapay Zeka Uygulama Alanları

Görüntü Elde Etme, Rekonstrüksiyon, Gürültü Giderme, Hareket Artefaktı

Görüntüleme modaliteleri için doğru görüntü kaydı önem taşımaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte

görüntülerin yeniden yapılandırma (rekonstrüksiyon) algoritmaları cihaz donanımlarına paralel olarak gelişerek, görüntü kalitesinin niteliksel ve niceliksel olarak artışına ve de görüntüleme sürelerinde ve/veya radyasyona maruziyette azalmaya yol açmıştır. Ramon ve ark. (6), SPECT görüntülerinde gürültü giderilmesi DL kullanmışlar ve düşük doz uygulayarak elde edilen görüntülerden görüntü rekonstrüksiyon yöntemleri yardımıyla yüksek doz kullanılarak elde edilen görüntü kalitesine ulaşmışlardır. Bu sayede hem görüntü kalitesi artmış hem de düşük doz kullanılmasından dolayı maruz kalınan radyasyon dozu da düşmüştür. Bir başka çalışmada CNN algoritmalarının geleneksel yöntemler ile karşılaştırıldığında uzaysal çözünürlüğü iyileştirdiği gösterilmiştir (7). Wang ve Liu (8), DL algoritmalarını eğiterek beyin PET görüntülerini bir sinogramdan yeniden elde edip gürültü giderilmesi için kullanmışlar, ayrıca bu verilerin torasik PET görüntüleri üzerine de uygulanabileceğini ve eğitim verilerinin toplanması sürecini kolaylaştırabileceğini göstermişlerdir. Tarayıcılardan gelen ham veriler üzerinde DL yaklaşımı kullanılarak rekonstrüksiyon aşamasını atlayıp doğrudan yeniden yapılandırılmış görüntülerin oluşmasını sağlayan yöntemler de geliştirilmiştir. Yeniden yapılandırma süreçleri sırasında veri düzeltmeleri (atenüasyon, saçılma) ve görüntü işleme (gürültü azaltımı, rezolüsyon iyileştirilmesi, hareket artefaktlarının giderilmesi vb.) uygulamaları da yapılabilmektedir (9,10).

YZ algoritmalarının anatomik ve fonksiyonel görüntülerin doğru bir şekilde kaydedilmesini sağlayabildiği ve hem fizyolojik (kalp, solunum) hem de diğer hareket artefaktlarının düzeltilmesi aşamalarını geliştirme potansiyellerinin mevcut olduğu yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (11). Hareketle ilgili artefaktlar, görüntüleri, analiz için kullanılamaz hale gelecek kadar bozabilir. Bu artefaktlar, görüntüleme sırasında hasta hareket ettiğinde veya ekokardiyografide yanlış tetikleme (trigger) meydana geldiğinde ortaya çıkar. SPECT ve PET görüntülerinde hareket artefaktlarının düzeltilmesinde DL algoritmaları, iteratif yöntemlere göre daha doğru bir düzeltme sağlayabilmektedir (12).

Atenüasyon Düzeltme

BT tabanlı atenüasyon düzeltmeye bir alternatif olarak YZ yöntemleri kullanılabilir. Hagio ve ark. (13), atenüasyon düzeltme yapılmamış polar haritalardan atenüasyon düzeltmesi yapılmış haritaları çıkarabilen bir CNN modeli geliştirdiler ve KAH tanısında doğruluğu artırdığını gösterdiler.

YZ algoritmaları ile yalancı bir BT görüntüsü üretilerek atenüasyon düzeltmesine alternatif bir yol geliştirilmiştir. Cihaz teknolojilerindeki gelişmelerle beraber kadmiyum-çinko-tellürid bazlı kolimatörle donatılmış detektöre sahip bir kardiyak SPECT (D-SPECT) cihazı üretilmiştir. Bu dedektörler yüksek çözünürlüklü ve daha hızlı görüntüleme imkanı tanımaktadır. Fakat bu cihazlarda atenüasyon düzeltme için BT görüntüleme yapılmamakta olup artefaktlar görülebilmektedir. Yang ve ark. (14) orijinal SPECT görüntülerinden atenüasyon düzeltmesi yapılmış SPECT görüntüler elde etmek amacıyla U-net tabanlı bir YZ algoritması geliştirmişlerdir. DL tabanlı modelde voksel bazlı düzeltme uygulanarak atenüasyon artefaktları azaltılmıştır.

PET/MR'de elektron yoğunluğunu yansıtan MR sinyallerinin atenüasyon haritaları çıkarmada kullanılamaması nedeniyle atenüasyon düzeltme bu cihazlarda zor olmaktadır. Liu ve ark. (15), yalancı bir BT atenüasyon haritası çıkararak atenüasyon düzeltmesi yapan DL tabanlı bir YZ algoritması geliştirmişlerdir. Bu yalancı BT atenüasyon haritaları normal BT ile yüksek tutarlılık göstermiştir. Fakat bu DL'ye dayalı algoritmalar genellikle kalp dışı organlar için uygulanmış olup bu konuda çalışmalar devam etmektedir.

Görüntü Segmentasyonu

Görüntü segmentasyonu, bir görüntünün anatomik olarak anlamlı kısımlara/bölgelere ayrıldığı bir işlemdir. DL'nin medikal görüntüleme alanındaki en çok araştırılan ve geliştirilen uygulamalarından biridir ve kardiyovasküler görüntülemelerde de kullanılır (16). Sol ventrikülün hacimsel ve fonksiyonel işlevlerini belirleme ve görüntülerin yorumlanmasından önceki görüntü işleme basamaklarının en kritik aşamasıdır. Nükleer kardiyolojide perfüzyon ve fonksiyon görüntülerinin kantitasyonunda ilk basamak "gated" ve statik rekonstrükte görüntülerden sol ventrikülün segmentasyonu işlemidir. Kalp konturlarını belirlerken yapılan segmentasyon işlemi sırasındaki en yaygın hata kaynakları barsak aktivitesi, görüntülerdeki gürültü ve yanlış aks (mitral kapak düzlemi) seçimidir. Kardiyak SPECT görüntülerinde segmentasyon ve kalp konturlarını (endokardiyal ve epikardiyal yüzeyler) belirlemek için çeşitli otomatik YZ algoritmaları geliştirilmiş ve deneyimli uzmanların elle yaptığı uygulamalar ile eşdeğer oldukları bulunmuştur. U-NET algoritması yaygın olarak kullanılan segmentasyon işlemlerine iyi bir örnektir. U-NET, 2D ve 3D görüntüleme modaliteleri ve klinik uygulamalar için kullanılan en son teknolojiye sahip segmentasyon algoritmasıdır (17).

Hibrit Görüntüleme

Atenüasyon düzeltmesi amacıyla elde edilen BT görüntüleri aynı zamanda değerli anatomik bilgiler de içermektedir. Örneğin düşük dozlu BT görüntüleri üzerinden elde edilebilen koroner arter kalsiyum (*coronary artery calcium* - CAC) skoru hastaların risk sınıflamasında kullanılmaktadır. Zeleznik ve ark. (18), geliştirdikleri gated ve non-gated BT görüntüleri üzerinden CAC skorunu hesaplayabilen DL modeli ile uzman okuyucuların hesapladığı CAC skoru arasında mükemmel bir uyum olduğunu göstermişlerdir. Ancak atenüasyon düzeltmesi için düşük doz BT ile yapılan görüntülerde gürültü daha fazladır ve segmentasyon işlemleri de daha zordur. Önemli bir nokta olarak, tam otomatik DL algoritması ile CAC skoru hesaplanması bir dakikadan daha kısa bir zamanda yapılırken uzman okuyucular tarafından yaklaşık beş dakikada hesaplanabilmektedir. Ayrıca bu algoritmaların epikardiyal yağ dokusu hacmi ve atenüasyon etkileri vb. diğer ek bilgileri sağlama ve BT'den elde edilebilecek tüm anatomik bilgilerin kullanılmasına imkan tanıma potansiyeli de mevcuttur. Miyokardiyal kan akımı ölçümü amacıyla yapılan PET perfüzyon görüntülemeye CAC skoru da eklendiği zaman tüm nedenlere bağlı mortalite tahmininde daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda çoklu modalite ile gerçekleştirilen görüntülemelerdeki ek bilgilerin dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır. ML tabanlı bir model uygulanarak yapılan F-18 sodyum florid PET miyokart çalışmasında klinik veriler ve aterosklerotik plakların kantitatif analizleri de değerlendirmeye dahil edildiğinde miyokart enfarktüsünün daha yüksek doğrulukta teşhis edilebildiği gösterilmiştir (19).

Görüntü Yorumlama, Tanı ve Risk Sınıflaması

YZ, KAH olan hastaların tanısında ve risk sınıflamasında etkin ve doğru bir şekilde rol oynayabilir. DL metotları ile, total perfüzyon defekt skoru ve fonksiyonel veriler mevcut yazılım programlarına benzer şekilde elde edilebilmektedir (20). Bu algoritmalar görüntü kalitesini iyileştirmekte, işlem süresini kısaltmakta ve radyasyon maruziyetini düşürmektedir. Makine öğrenimi algoritmaları çok değişkenli veri setlerini işleyerek faydalı bilgiler edinilmesi sağlarlar. Miyokart perfüzyon görüntülerinden elde edilen veriler ile klinik bilgilerin birlikte değerlendirilmesi en doğru tanıs ve prognostik bilgiyi sağlayacaktır. Yapılan bir çalışmada sadece stres miyokart perfüzyon sintigrafisi (MPS) KAH çalışmasından elde edilen kantitatif veriler ve klinik bilgilerin birlikte

değerlendirilerek ML ile otomatik olarak elde edilen skor (MLS) ile deneyimli bir uzmanın yorumu ve kantitatif MPS verileri karşılaştırılmış ve KAH'ı belirlemede MLS skor üstün bulunmuştur (21). Diğer bir yöntem olan DL algoritmaları, önceden tanımlanmış görüntü özelliklerine ihtiyaç duyan ML'nin aksine, yapay sinir ağları yardımıyla doğrudan görüntü pikselleri üzerinden kendi kendine öğrenir. KAH tanısı için uygulanan bir DL algoritmasında (CAD-DL), MPS çalışmasından elde edilen perfüzyon, duvar hareketi, duvar kalınlaşması skorları, sol ventrikül sistol ve diastol sonu hacimleri ile yaş, cinsiyet değişkenleri birlikte değerlendirilmiş ve CAD-DL, total perfüzyon defekt skoru veya okuyucunun tespit edebildiği sonuçlara göre daha yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır (22).

Benzer şekilde çeşitli perfüzyon, fonksiyonel ve anatomik görüntüleme modalitelerinden elde edilen parametrelerin ciddi kardiyak olay gelişme (MACE) riskini belirleyebileceği bilinmektedir. Yine burada da YZ algoritmalarının tüm bu verileri objektif bir şekilde entegre edebildiği ve doğru sonuçlara ulaşabildiği, uzman okuyuculara benzer hatta bazı durumlarda daha iyi sonuçlara ulaşabildiği gösterilmiştir (23). Bir miyokart PET perfüzyon çalışmasında, DL algoritmasının, kantitatif kan akımı parametreleri ile karşılaştırıldığında MACE'yi daha iyi tahmin ettiği gösterilmiştir (24). Önerilen bu YZ algoritmalarının veri toplama sürecini kolaylaştırma, eksik bilgiler olsa bile tanısal ve prognostik doğruluğun korunmasına yardımcı olabilme potansiyeli de mevcuttur (25). Yapılan çalışmalar, görüntülerin yeniden yapılandırılması, ilgili veri düzeltmeleri, tanısal ve prognostik kantitatif sonuçların elde edilmesinde YZ algoritmalarının uygulanabilirliğini gösterse de, klinik pratikte kullanılabilmesi için karşılaştırmalı çalışmalara ihtiyaç vardır.

Radyomiks

Tıbbi görüntüler halihazırda görsel olarak değerlendirilmekte olup çok sayıda değerli bilgi fark edilmeden göz ardı edilmektedir. Radyomiks tıbbi görüntülerden insan gözüyle görülemeyen kantitatif özelliklerin birtakım hesaplamalar yardımıyla çıkarılması işlemidir. Bu özellikler seçilen ilgi alanındaki vokseller arasında bulunan mekansal, geometrik vb. ilişkileri yansıtır. Daha sonra bu verilere ML algoritmaları uygulanarak klinik olarak önemli biyobelirteçler elde edilebilir (26).

Radyomiks, doku analizi olarak adlandırılan, tanısal ve tedaviye yanıt gibi prognostik bilgiler ile ilgili patofizyolojik

özellikleri yansıtan, gri skaladaki dağılımı ve en küçük bileşenleri gösteren özellikler olarak tanımlanabilir ve bu nedenle tıbbi kararları destekleme potansiyeli vardır. Temel varsayım, bu mikro özelliklerin, gri skala değerlerinin ve bunların uzay-zamansal ilişkilerinin, görüntülenen dokudaki fenotipik varyasyonları yansıttığı ve moleküler varyasyonları gösterebileceğidir (27). Onkoloji alanında doku analizine önemli bir ilgi olmuştur. Yapılan çalışmalarda tümör agresifliğini yansıtan tümör içi heterojeniteyi değerlendirmek için Flor-18 florodeoksiglukoz PET/BT görüntüleri doku analizi yöntemiyle incelenmiş ve tedavi yanıtı ve sağkalımı tahmin etmede umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Kardiyovasküler görüntüler üzerinde yapılan radyomiks çalışmaları nükleer veya metabolik görüntülemelerden ziyade tomografik görüntülere odaklanmıştır. Fakat özellikle ateroskleroz için PET görüntüleme araştırmalar için oldukça büyük potansiyel taşımaktadır. Kafouris ve ark. karotid arterlerdeki plakların immünohistokimyasal özelliklerini tahmin etmek için PET görüntüleri üzerinde doku analizi yöntemlerini kullanmışlar ve plağın hassasiyetini gösteren çeşitli parametreler bulmuşlardır (28).

Sınırlamalar

YZ tekniklerinin her ne kadar insan zekasından üstün yanları gösterilse de, doğası gereği bir kara kutu gibi çalışması klinik pratikte kullanılmasının önündeki en büyük engeldir. Örneğin herhangi bir hastalık için ML hastanın yüksek risk grubunda olduğunu söylese bile, hekimler hangi sebepten dolayı yüksek risk grubunda olduğunu bilemedikleri için bu bilgiyi kullanmakta tereddüt yaşamaktadırlar. Bu sorunu çözmek amacıyla son zamanlarda yapılan işlemlerin mantığını görselleştiren bir DL modeli (CAD-DL) tasarlanmıştır. Bir gradyan sınıf aktivasyon eşleşmesi yardımıyla görüntüler üzerinde vurgulanan alanları göstermek için bir CAD dikkat haritası oluşturulur. Bu DL algoritmaları, insan zekası tarafından fark edilemeyen verilerden bazı bilgiler elde edebilir ve okuyucuya karar için dikkat etmesi gereken yerleri gösterebilir. CAD-DL modeli yoruma yardımcı olacak tahminleri sunmak ve bulguları açıklamak üzere tasarlanmış olsa da hekimler halen nihai kararı vermede YZ sonuçları da dahil olmak üzere tüm bilgileri birleştirme ihtiyacı duymaktadır (29).

Bir diğer konu ML modeli eğitiminde kullanılan hasta popülasyonunun, bu modelin uygulanacağı hastaları yansıtmayacağıdır. YZ yöntemleri ile hastalıkları kesin olarak teşhis etmek için ideal olarak eğitim için

kullanılan ve modelin uygulanacağı popülasyonun özelliklerinin ve görüntüleme protokollerinin benzer olması gereklidir.

Etik Hususlar

YZ uygulamalarının her aşamasında çözülmesi gereken birtakım problemler vardır. İlk olarak, YZ algoritmalarının eğitiminde kullanılan verilerin, kişisel verilerin gizliliği, bilgilendirilmiş onam ve rıza gibi hususlara dikkat edilerek oluşturulması gerekmektedir. Hasta mahremiyetinin korunması önemlidir ve veriler mutlaka kimliksizleştirilmelidir. Yapılan seçimlerin ve olası önyargıların YZ algoritması üzerindeki etkisini önlemek amacıyla verilerin temsili olması ve genellenebilirliklerini sağlamak için çaba gösterilmelidir. İkinci olarak, YZ algoritmalarının nasıl eğitildiği ve işlevleri konularında şeffaflık gereklidir ve kara kutu modellerinden vazgeçilmelidir. Üçüncü olarak, klinik uygulamalar için geliştirilen YZ algoritmalarının doğruluğunun ve güvenilirliğinin kontrol edilmesine ve elde edilen sonuçların deneyimli klinisyenler tarafından yorumlanmasına devam edilmelidir.

Ülkeler arasında yasalar ve sorumluluklar farklılık gösterecektir. YZ algoritmalarının hem eğitimi hem de kullanımı sırasında kötü niyetli saldırılardan kaynaklanan potansiyel tehlikeler vardır ve bu nedenle siber güvenlik açıklarına dikkat edilmesi gereklidir. YZ araştırmaları ve YZ'nin klinik araştırmalarda kullanımı için etik kurallar belirlenmiştir ve bu araştırmaların raporlama standartlarına bağlı kalması önemlidir (30).

Sonuç

YZ'nin kardiyovasküler alanda kullanılması KAH'nin erken tanısı, daha iyi klinik kararlar ve prognoz değerlendirmesi açılarından yeni imkanlar doğurmuştur. Fakat tam otomatik YZ algoritmaları ile uzman hekimler arasında uyumun sağlanması yeni ve en temel sorundur. YZ algoritmaları, ancak en az uzman hekim kadar doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar üretebilirse rutin uygulamalarda hasta yönetimine katkıda bulunabilir. Diğer yandan sağlık camiası kara kutu algoritmalarını körü körüne kabullenmeye hazır değildir ve olmamalıdır. YZ algoritmalarının kardiyovasküler görüntüleme alanında kullanılmasına yönelik bazı temel unsurların açıklığa kavuşturulması gereklidir. Yapay zekanın gelecekteki tıbbi uygulamaları şekillendirmesinden önce etik ve yasal konular daha çok tartışılmalıdır. YZ algoritmalarının nasıl çalıştığına açıklık getirilmesi, hekimin bu sistemlerle

etkileşimde bulunma ve kullanma becerisi açısından oldukça önemlidir. Ayrıca yapay zekanın tıp alanındaki uygulamalarını standartlaştırmak için kılavuzlar geliştirilmelidir.

Kaynaklar

1. Russell S, Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach. 3rd edition. Pearson Education Limited; 2016.
2. Géron A. Hands-on machine learning with scikit-learn, Keras, and tensorflow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. 2nd edition. Incorporated, editor. O'Reilly Media, USA; 2019.
3. Li J, Yang G, Zhang L. Artificial Intelligence Empowered Nuclear Medicine and Molecular Imaging in Cardiology: A State-of-the-Art Review. *Phenomics* 2023;3:586-596.
4. Visvikis D, Cheze Le Rest C, Jaouen V, Hatt M. Artificial intelligence, machine (deep) learning and radio(geno)mics: definitions and nuclear medicine imaging applications. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2019;46:2630-2637.
5. Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to Radiomics. *J Nucl Med* 2020;61:488-495.
6. Ramon AJ, Yang Y, Pretorius PH, et al. Initial investigation of low-dose SPECT-MPI via deep learning. *IEEE Nucl Sci Symp* 2018;1-3.
7. Song C, Yang Y, Wernick MN, et al. Low-dose cardiac-gated spect studies using a residual convolutional neural network. *IEEE Int Symp Biomed Imaging* 2019;1:653-656.
8. Wang B, Liu H. FBP-Net for direct reconstruction of dynamic PET images. *Phys Med Biol* 2020;6.
9. Hu Z, Xue H, Zhang Q, et al. DPIR-Net: Direct PET image reconstruction based on the Wasserstein generative adversarial network. *IEEE Trans Radiat Plasma Med Sci* 2020.
10. Lee JS. A review of deep learning-based approaches for attenuation correction in positron emission tomography. *IEEE Trans Radiat Plasma Med Sci* 2021;5.
11. Li T, Zhang M, Qi W, Asma E, Qi J. Motion correction of respiratory-gated PET images using deep learning based image registration framework. *Phys Med Biol* 2020;65:155003.
12. Shi L, Lu Y, Dvornek N, et al. Automatic Inter-Frame Patient Motion Correction for Dynamic Cardiac PET Using Deep Learning. *IEEE Trans Med Imaging* 2021;40:3293-3304.
13. Hagio T, Poitrasson-Rivière A, Moody JB, et al. "Virtual" attenuation correction: improving stress myocardial perfusion SPECT imaging using deep learning. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2022;49:3140-3149.
14. Yang J, Shi L, Wang R, et al. Direct Attenuation Correction Using Deep Learning for Cardiac SPECT: A Feasibility Study. *J Nucl Med* 2021;62:1645-1652.
15. Liu F, Jang H, Kijowski R, Bradshaw T, McMillan AB. Deep Learning MR Imaging-based Attenuation Correction for PET/MR Imaging. *Radiology* 2018;286:676-684.

16. Tao Q, Yan W, Wang Y, et al. Deep Learning-based Method for Fully Automatic Quantification of Left Ventricle Function from Cine MR Images: A Multivendor, Multicenter Study. *Radiology* 2019;290:81-88.
17. Guo Z, Li X, Huang H, Guo N, Li Q. Deep Learning-based Image Segmentation on Multimodal Medical Imaging. *IEEE Trans Radiat Plasma Med Sci* 2019;3:162-169.
18. Zeleznik R, Foldyna B, Eslami P, et al. Deep convolutional neural networks to predict cardiovascular risk from computed tomography. *Nat Commun* 2021;12:715.
19. Kwiecinski J, Tzolos E, Meah MN, et al. Machine Learning with ¹⁸F-Sodium Fluoride PET and Quantitative Plaque Analysis on CT Angiography for the Future Risk of Myocardial Infarction. *J Nucl Med* 2022;63:158-165.
20. Betancur J, Hu LH, Commandeur F, et al. Deep Learning Analysis of Upright-Supine High-Efficiency SPECT Myocardial Perfusion Imaging for Prediction of Obstructive Coronary Artery Disease: A Multicenter Study. *J Nucl Med* 2019;60:664-670.
21. Eisenberg E, Miller RJH, Hu LH, et al. Diagnostic safety of a machine learning-based automatic patient selection algorithm for stress-only myocardial perfusion SPECT. *J Nucl Cardiol* 2022;29:2295-2307.
22. Otaki Y, Singh A, Kavanagh P, et al. Clinical Deployment of Explainable Artificial Intelligence of SPECT for Diagnosis of Coronary Artery Disease. *JACC Cardiovasc Imaging* 2022;15:1091-1102.
23. Hu LH, Miller RJH, Sharir T, et al. Prognostically safe stress-only single-photon emission computed tomography myocardial perfusion imaging guided by machine learning: report from REFINE SPECT. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2021;22:705-714.
24. Juarez-Orozco LE, Martinez-Manzanera O, van der Zant FM, Knol RJJ, Knuuti J. Deep Learning in Quantitative PET Myocardial Perfusion Imaging: A Study on Cardiovascular Event Prediction. *JACC Cardiovasc Imaging* 2020;13:180-182.
25. Rios R, Miller RJH, Hu LH, et al. Determining a minimum set of variables for machine learning cardiovascular event prediction: results from REFINE SPECT registry. *Cardiovasc Res* 2022;118:2152-2164.
26. Kolossváry M, Kellermayer M, Merkely B, Maurovich-Horvat P. Cardiac Computed Tomography Radiomics: A Comprehensive Review on Radiomic Techniques. *J Thorac Imaging* 2018;33:26-34.
27. Motwani M. Hiding beyond plain sight: Textural analysis of positron emission tomography to identify high-risk plaques in carotid atherosclerosis. *J Nucl Cardiol* 2021;28:1872-1874.
28. Tawakol A, Migrino RQ, Bashian GG, et al. In vivo ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography imaging provides a noninvasive measure of carotid plaque inflammation in patients. *J Am Coll Cardiol* 2006;48:1818-1824.
29. Otaki Y, Miller RJH, Slomka PJ. The application of artificial intelligence in nuclear cardiology. *Ann Nucl Med* 2022;36:111-122.
30. 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.