

AHA SCIENTIFIC STATEMENT

Value Creation Through Artificial Intelligence and Cardiovascular Imaging: A Scientific Statement From the American Heart Association

Kate Hanneman, MD, MPH, Chair; David Playford, MBBS, PhD; Damini Dey, PhD; Marly van Assen, MSc, PhD;

Domenico Mastrodicasa, MD; Tessa S. Cook, MD, PhD; Judy Wawira Gichoya, MD; Eric E. Williamson, MD;

Geoffrey D. Rubin, MD, MBA, FAHA, Vice Chair; on behalf of the American Heart Association Council on Cardiovascular

Radiology and Intervention; and Council on Lifelong Congenital Heart Disease and Heart Health in the Young

Circulation. 2024;149:e00–e00. DOI: 10.1161/CIR.0000000000001202

AHA BİLİMSEL BİLDİRİMİ

Yapay Zeka Yoluyla Değer Yaratımı ve Kardiyovasküler Görüntüleme: Bilimsel Bir Açıklama

Özet- Amerikan Kalp Derneği'nden Kardiyovasküler görüntülemede makine öğrenimi ve yapay zeka (YZ) için birden fazla uygulama öneriliyor ve geliştirildi. Kardiyovasküler görüntülemede makine geliştirme ve yapay zeka için birden fazla uygulama öneriliyor. Bununla birlikte, yapay zekanın kardiyovasküler görüntülemede uygulanmasına ilişkin süreçler oldukça çeşitlidir, görüntüleme yöntemine, hasta alt tipine, çıkarılacak ve analiz edilecek özelliklere ve klinik uygulamaya göre değişir.

Bu makale, değeri kurumsal bir perspektiften tanımlayan bir çerçeve oluşturmakta ve ardından yapay zekanın en büyük artımlı değer yaratımını üretebileceği faaliyetleri belirlemek için değer zinciri analizini izlemektedir. Klinisyenler, görüntüleyiciler, hastaneler, hastalar ve ödeme yapanlar dahil olmak üzere dikkate alınması gereken çeşitli bakış açıları vurgulanmıştır. Tüm sağlık paydaşlarının bakış açılarını entegre etmek, değer yaratmak ve yapay zeka araçlarının gerçek dünya ortamında başarılı bir şekilde konuşlandırılmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Farklı yapay zeka araçları, kalp bilgisayarlı tomografisi, manyetik rezonans görüntüleme ve pozitron emisyon tomografisi dahil olmak üzere çeşitli kardiyak görüntüleme yöntemlerine yönelik yapay zeka uygulamalarının benzersiz yönleriyle birlikte özetlenmiştir. Yapay zeka uygulanabilir ve daha uygun testin seçilmesinden görüntü alımı ve analizinin optimize edilmesine, sınıflandırma ve tanı için sonuçların yorumlanmasına ve önemli olumsuz kardiyak olay riskinin tahmin edilmesine kadar hasta yolculuğu boyunca her adımda kardiyovasküler görüntülemeye değer katma potansiyeline sahiptir.

Kardiyovasküler görüntülemelerde makine öğrenimi ve yapay zeka (YZ) uygulamaları giderek artan bir hızla önerilmekte ve geliştirilmektedir. Kardiyovasküler görüntülemelerde yapay zekanın uygulanmasına ilişkin süreçler oldukça çeşitlidir ve görüntüleme yöntemine, hasta alt tipine, çıkarılacak ve analiz edilecek özelliklere ve klinik uygulamaya göre değişiklik gösterir. Yapay zekayı keşfetmek ve klinik uygulamaya uyarlamak için sayısız fırsat sunulduğunda sağlık uzmanları, maksimum etki için sınırlı kaynakları nereye yatıracaklarını belirleme konusunda zorlanırlar. Değeri kurumsal bir perspektiften tanımlayan resmi bir çerçeve oluşturmak ve ardından yapay zekanın en büyük artımlı değer yaratımını üretebileceği faaliyetleri belirlemek için değer zinciri analizi yapmak, yapay zeka ile kardiyovasküler görüntülemeyi iyileştirmek için mevcut birçok seçeneğin bağlamsallaştırılması için bir temel sağlar. Bu bilimsel bildiri 3 bölüm halinde düzenlenmiştir.

- Bunlardan ilki, değeri tanımlamayı ve temel sağlık hizmeti paydaşlarının bakış açılarından değerin anlamındaki farklılıkları ele almayı amaçlıyor ve yapay zeka gelişmelerinin nasıl değer yaratabileceğini analiz etmek için bir temel olarak değer zinciri analizini tanıtıyor.
- İkinci bölüm, bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve pozitron emisyon tomografisine odaklanarak, kardiyovasküler (KV) görüntülemenin geniş alanı dahilinde YZ uygulamasına yönelik çeşitli hususlara genel bir bakış sunmaktadır. Bu bilimsel beyan, ekokardiyografideki yapay zeka uygulamalarına odaklanmamakta ve kardiyovasküler tıptaki tüm yapay zeka uygulamalarını ele almamaktadır çünkü odak noktası daha yeni kardiyak görüntüleme teknikleridir.
- Üçüncü bölüm, yapay zeka geliştirmelerinin kardiyovasküler görüntüleme değer zinciri bağlamında değer yaratmayı nasıl artırabileceğini araştırıyor.

DEĞER TANIMLI

Önceki AHA açıklamaları görüntüleme çalışmalarının kalite ve değerini tanımlarken toplumsal perspektife odaklanmıştı^{1,2}. Bireysel paydaş gruplarına odaklanan değer yaratmayı düşünmeye yönelik bir çerçeve, değer zincirindeki katılımcıların motivasyonlarını ve dolayısıyla yapay zekanın benimsenmesini daha iyi bilgilendirebilir.

Bireysel paydaş gruplarına odaklanan değer yaratmayı düşünmeye yönelik bir çerçeve, değer zincirindeki katılımcıların motivasyonlarını ve dolayısıyla yapay zekanın benimsenmesini daha iyi bilgilendirebilir.

Sağlık hizmetlerindeki paydaşlar ve onların bakış açıları oldukça çeşitlidir ve hastayı, görüntüleyiciyi, primer veya yönetici hekimleri, tıp merkezi veya sağlık sistemini, ödeyiciyi ve bir bütün olarak toplumu içerir. Bu paydaşların farklı bakış açıları

matematiksel denklemlerle ifade edilir (**Figür 1**)'te üç örnek sunulmaktadır^{3,4}.

Açık hesaplama ve değişken niceliklendirme için temel oluşturma amacı taşımasa da, sağlık hizmetleri değer zincirindeki paydaşların farklı değerlendirmelerini gösteren kavramsal çerçeveler sağlarlar.

Bir sağlık kuruluşunda uygulanabilir benzersiz değer önerisinin oluşturulmasında çeşitli paydaşların ve değer unsurlarının rölatif rolü, o kuruluşun stratejik ve operasyonel önceliklerini yansıtır. Bu öncelikler arasında maliyet tarafsızlığı, mali marj, sağlık hizmeti kalitesi veya güvenliği, operasyonel verimlilik, hasta hizmeti, yeni klinik prosedürlerin etkinleştirilmesi ve hasta yönetiminin daha etkili olması için klinik sonuçların daha iyi tahmin edilmesi yer alabilir.

Öncelikle paydaşlar olarak hastalara ve topluma odaklanan 2018 AHA "*Kardiyovasküler Görüntülemede Kalitenin Tanımlanması*" beyanı, kaliteli sağlık hizmeti sunumunun temel boyutları olarak güvenlik, uygunluk, hasta merkezlilik, zamanlılık, etkililik, eşitlik ve verimliliği tanımladı¹. Hedeflerin netliğine ulaşıldığında değer zinciri analizi, yapay zeka katılımı için belirli faaliyetlerin tanımlanması ve uygulandıktan sonra etkinin ölçülmesi için bir temel oluşturulmasını kolaylaştırır (Figür (*Figür 2*)⁵).

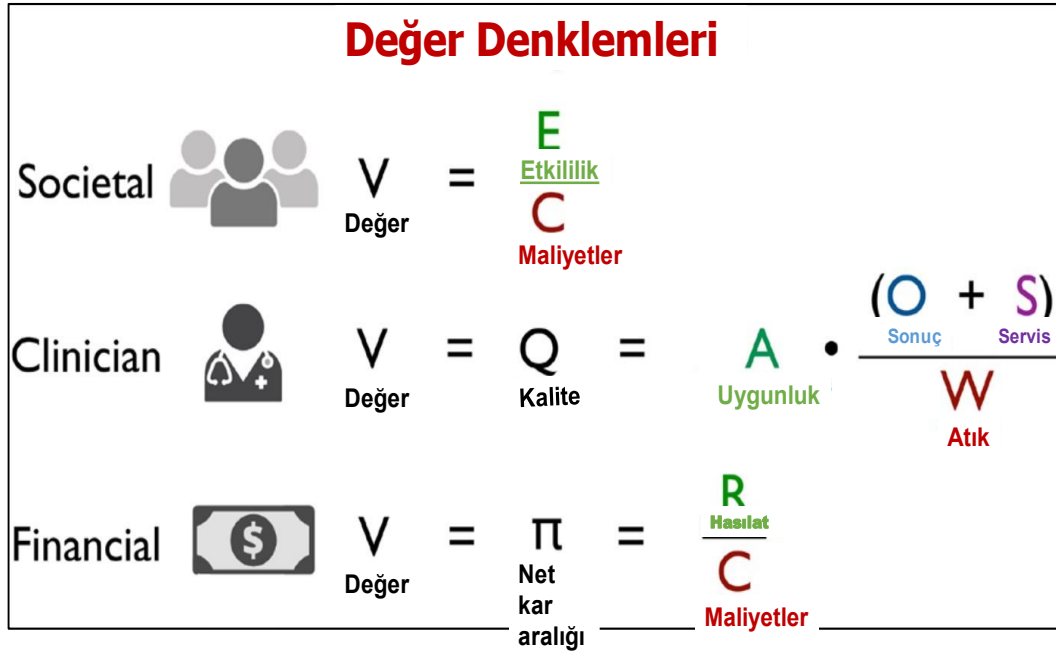
Kimin Bakış Açısı Önemlidir?

Klinisyenler, görüntüleyiciler, hastaneler, hastalar, yapay zeka geliştiricileri ve ödeme yapanlar, yapay zeka eko sisteminde önemli roller oynar ve farklı sorumluluklara sahiptir. Tüm sağlık paydaşlarının bakış açılarını entegre etmek, değer yaratmak ve yapay zeka araçlarının gerçek dünya ortamında başarılı bir şekilde konuşlandırılmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Klinisyen

Klinisyenler, görüntüleme incelemelerinden elde edilen bilgilerin tanısal olasılıklarını daraltması ve yönetim kararlarına bilgi vermesi amacıyla, hastalarının durumlarına ilişkin anlayışlarını geliştirmek için görüntüleme incelemeleri talep eder. Hastane ve klinisyenlerin iş yükü arttıkça, en yüksek bakım kalitesini sürdürmek giderek zorlaşıyor^{6,7}. Yapay zeka, örneğin göğüs ağrısıyla başvuran bir hastanın durumunda en uygun görüntüleme testinin seçimini kolaylaştırabilir⁸. Yapay zeka uygulamaları aynı zamanda risk ve prognozun⁹ değerlendirilmesi ve elektronik sağlık kaydındaki alanların önceden doldurulması gibi tekrarlanan görevler için de uygulanmıştır¹⁰. Bu tür yapay zeka destekli uzman performansı, klinisyenlerin daha yüksek hasta hacimlerinin ve daha karmaşık vakaların taleplerini yönetmesine yardımcı olabilir¹¹.

Bu yetenekler, ilgili klinik bilgilerin sağlanmasını kolaylaştırabilir ve görüntüleyicilerin hastaya özel ihtiyaçları karşılayacak şekilde edinim protokollerini hassaslaştırmasına olanak tanıyabilir. Klinisyene değer yaratma konusunda bir diğer önemli perspektif, görüntüleme sonuçlarını mevcut hasta verilerine göre bağlamsallaştıran ve tahmine dayalı analitik yoluyla sonraki adımlara rehberlik eden yapay zeka araçlarıdır.



Figür 1. Değerin türetilmesi: (1) toplumsal, (2) klinisyen ve (3) finans perspektiflerini temsil eden, yaygın olarak başvurulanan 3 değer denklemi^{3,4}.

Net kar marjının üçüncü ifadesi muhasebede kullanılan açık bir matematiksel ifadedir; ilk 2 ifade kavramsaldır. Yapay zeka (YZA) çözümlerini elde etmek, uygulamak ve sürdürmek için kaynak tahsisine ilişkin farklı paydaş perspektiflerini anlamak, sağlık hizmetleri ortamında yapay zeka araçlarını seçmenin temelini oluşturur.

Ayaktan Hasta Görüntüleme Değer zinciri Verimlilik, Kalite ve Hasta Deneyimine İlişkin Hususlar



Figür 2. Kardiyovasküler görüntüleme değer zinciri, kardiyovasküler görüntüleme testlerinin performansından elde edilen değer için gerekli faaliyetleri kapsamlı bir şekilde tanımlamayı amaçlayan bir çerçeve sağlar.

Aktiviteler hem primer hem de destek aktiviteleri içerir. Primer aktiviteler sırayla gerçekleşir ve hasta özelliklerine, test özelliklerine ve görüntüleme çalışmasının amacına göre benzersiz şekilde tanımlanır. Dört merkezi aktivite görüntüleme bölümünün alanı dahilinde kontrol edilebilir. İlk ve son direkt faaliyetler, görüntüleme bölümünün dışında gerçekleşmesine rağmen yine de değer yaratma zincirinde önemlidir ve bu nedenle yapay zeka ile düzeltme için önemli hedefleri temsil eder. Destek aktiviteleri tüm görüntüleme testlerinde geçerlidir ve bir kuruluş içinde görüntüleme hizmetlerini etkili bir şekilde sunmak için yeterlilik ve yeteneklerin oluşturulmasına yardımcı olur.

Orijinal Kısaltmalar ve açıklamaları: EMR- elektronik medical record (elektronik tıbbi kayıt); RIS- radiology information system (radyoloji bilgilendirme sistemi); and PACS- picture archiving and communication system (resim arşivleme ve iletişim sistemi).

Görüntüleyiciler, gelişmiş görüntü elde etme, yeniden görüntü oluşturma, görüntülerde özellik algılama ve görüntüden türetilen bilgilerin niceliksel analizi dahil olmak üzere çeşitli açılardan yapay zeka algoritmalarından yararlanır.

- Koroner BT anjiyografiden kantitatif plak karakterizasyonu gibi tekrarlanan ve zaman alan görevleri yüksek tutarlılık ve tekrarlanabilirlik¹² ile otomatik olarak gerçekleştiren yapay zeka araçları, raporlamanın derinliğini artırabilir¹³.
- Ek olarak, koroner arter kalsiyumunun boyutunun BT ile ölçülmesi fırsatçı kardiyovasküler risk değerlendirmesine izin verebilir.

Yapay zeka ayrıca, daha yüksek tekrarlanabilirlik elde etmek ve kantitatif ölçümleri otomatikleştirmek için görüntüleyicilerin görüntüleme edinim protokollerini optimize etmelerine de yardımcı olabilir¹⁶.

- BT için yapay zeka, belirli bir edinim protokolünü kullanarak hasta konumlandırmasını otomatikleştirerek görüntüleyicilere doz optimizasyonunda yardımcı olabilir¹⁷.
- Manyetik rezonans görüntüleme (MRG)'de yapay zeka araçları, görüntü kalitesini iyileştirmek için hareket artefaktlarını tespit edip azaltabilir¹⁸; edinimleri hızlandırarak genel olarak inceleme sürelerinin kısalmasını sağlar¹⁹; ve ventriküler hacimler ve ejeksiyon fraksiyonunun değerlendirilmesi için şekillendirmeyi otomatikleştirir²⁰.

Hastane

Görüntüleme, tanı koymak ve terapötik yanıtları değerlendirmek için kritik bilgilere katkıda bulunur. ancak 2 baskın faktör hastane yönetiminin tıbbi görüntülemeyi değerlendirirken bakış açısını etkiler: (1) hastaların kalış sürelerini verimli bir şekilde en aza indirmek için artan baskılar ve (2) yatan hasta bakımı için geri ödemenin tanıya bağlı grup bazlı olduğu ABD sağlık sistemi içinde görüntülemenin doğrudan gelir elde etmediğini gösteren mali gerçek. Sonuç olarak, hastane yönetiminin muhtemelen tercih edeceği yapay zeka çözümleri, (1) veya her iki konuyu da ele almalıdır. Hastaneler, değer üreten yapay zeka çözümleriyle karşı karşıya kaldıklarında bile uygulama engelleriyle karşı karşıya kalıyor. Ticari olarak temin edilebilen yapay zeka algoritmalarının artan sayısına rağmen, klinik uygulamalar sınırlı kalmaktadır²¹.

Yapay zeka algoritmaları geliştirmek için elektronik sağlık kayıtlarına güvenli erişim şarttır²². Doktorlar, görüntüleyiciler, bilgi teknolojisi bölümleri ve yapay zeka geliştiricileri arasındaki işbirliğini teşvik etmeden bu zorlayıcı olabilir. Hastane liderliği, bazı son kullanıcıların cesaretini kırabilecek aksaklıkları en aza indirirken yapay zeka teknolojisinin mevcut iş akışlarına entegrasyonunu kolaylaştırmak için bu tür ortaklıkları teşvik etmelidir²³.

ABD FDA (Food and Drug Administration)'nın onaya yönelik düzenleyici yolu geliştikçe, Yapay zeka geliştiricileri, geliştirme aşamasında çok bölgesel yapay zeka dağıtımının önemini dikkate almalıdır²⁴.

Coğrafi çeşitlilik, çeşitli hastane ortamlarında ve hasta popülasyonlarında yapay zeka çözümlerinin sağlam ve güvenilir performansı açısından giderek daha önemli hale geliyor. Ayrıca hastaneler ve yapay zeka geliştiricileri, fazla uyum ve istenmeyen

önyargıları azaltmak ve dağıtım sonrasında ortaya çıkabilecek olası sorunları ele almak için ileriye dönük çalışmaları ve pazarlama sonrası gözetimi teşvik etmelidir. Örneğin yapay zeka araçları izleme ve bakım gerektirir; bu da hasta popülasyonuna daha iyi uyum sağlamak için yapay zeka modellerinin yerel verilerle yeniden eğitilmesini gerektirebilir²⁵. Ticari yapay zeka araçlarına ve çözümlerine ek olarak, büyük kurumlar kurum içinde algoritmalar geliştirmek için kamu fonlarını kullanabilir. Bu araçlardan yararlanmak potansiyel olarak önemli değer sağlayabilir ve değere dayalı görüntülemeyi geliştirme potansiyeline sahip olabilir.

Uygulamadan sonra, model bozulmasını değerlendirmek ve gerektiğinde bakıma rehberlik etmek için sürekli performans izleme gerçekleştirilmelidir.

- Bu özellikle prognostik modeller için önemlidir çünkü bu modellerin uygulanması sonuçları etkileyen davranışları ve müdahaleleri değiştirebilir²⁶. Bu nedenle, bu tür modeller sonuçları iyileştirmede ne kadar etkili olursa, bu modellerin o kadar hızlı bozulduğu görülecektir. Bu durum, müdahalelerin prognostik modellere dahil edilmesi ve uygun ölçümlerle klinik olarak uygulanan modellerin güçlü performans gözetiminin sağlanmasıyla hafifletilebilir.

Hastalar

Hastalar, masrafları ve rahatsızlıkları en aza indirmeye çalışırken anlaşılır bir şekilde sağlıklarına öncelik veriyorlar. Yapay zeka dağıtım stratejileri, hastaların sağlık hizmetlerinde yapay zeka kullanımına ilişkin beklenti ve endişelerini dikkate almalıdır. Ancak bu konudaki bilgiler şu anda sınırlıdır ve çoğunlukla hasta anketlerinden toplanmaktadır²⁷. Bazı hastalar yapay zekanın bakımı düzeltme kapasitesi konusunda iyimserdir²⁸. Ancak, Yanlış teşhis olasılığı, mahremiyet ihlalleri, klinisyenlerle geçirilen zamanın azalması ve maliyetlerin artması gibi istenmeyen sonuçlarla ilgili endişeler vardır. Bu endişelerden bazıları, doktorların hastaları kendi bakımlarında yapay zekayı ne zaman ve nasıl kullandıkları konusunda bilgilendirilmesiyle giderilebilir. Ancak bu tek başına yeterli olmayabilir. Veriler mevcut olduğunda, göreceli risklerin anlaşılmasına yardımcı olmak amacıyla yapay zeka ile statüko arasındaki performansla ilişkin karşılaştırmalı bilgi sağlamak faydalı olacaktır. Gelecekteki araştırmalar, hastaların yapay zekaya daha aşina hale geldikçe bakış açılarının nasıl değiştiğine bakmalıdır. Yapay zeka modellerinin eğitimi ve çalıştırılması için yüksek enerji gereksinimleri ve ilgili sera gazı emisyonları göz önüne alındığında, yapay zeka araçlarının çevresel etkisi dikkate alınması gereken ek bir değerdir²⁹.

KALP GÖRÜNTÜLEME MODELLERİ

Kardiyak görüntüleme 4 temel yöntemi kapsar: ultrason, BT, MRG ve tek foton emisyon tomografisi ve pozitron emisyon tomografisi (PET) dahil radyonüklid görüntüleme. Piyasada bulunan mevcut yapay zeka uygulamalarının çoğu BT ve ultrasona dayanmaktadır³⁰. Farklı kardiyak görüntüleme yöntemlerindeki doğal farklılıklar ve teknikler herbiri için benzersiz zorluklar ve fırsatlar doğurur. Bu

farklılıklar, görüntü alımını, yeniden yapılandırmayı veya yöntemlerden birine göre uyarlanmış piksel (= Gözek: dijital göstergelerde görüntünün elde edilmesini sağlayan ve kontrol edilebilen en küçük birimdir) tabanlı analizi düzeltmeyi amaçlayan yapay zeka çözümleriyle sonuçlanır.

Alternatif olarak, görüntüleme karar desteği ve görüntüleme sonrası tahmine dayalı analitiklere odaklanan yapay zeka çözümleri, birden fazla görüntüleme yöntemindeki bilgileri birleştirme potansiyeline sahiptir. Yapay zeka çözümleri, görüntü oluşturma ve görüntü yorumlama görevlerini ele alırken modele özgü değişen özellikleri de barındırır.

Görüntü verileri üzerinde çalışmaya yönelik ikinci yaklaşıma genellikle “*piksel tabanlı yapay zeka*” adı verilir. (**Tablo**) modaliteye özgü görüntü oluşturma ve yorumlama faktörlerini özetlemektedir.

- Ekokardiyografi ve kardiyak MRG (KMR) için yapay zeka sıklıkla görüntü alımını düzeltmek, otomatik segmentasyon gerçekleştirmek, ventriküler fonksiyonu tahmin etmek ve kalp hastalığını sınıflandırmak için kullanılır. ^{16,31,32}
- Sol ventriküler fonksiyonu ejeksiyon fraksiyonu, sol ventriküler duvar hareket fonksiyonu, miyokard kontraktilesi ve global uzunlamasına gerilimin otomatik olarak hesaplanması yoluyla ölçülebilir ³³.
- Solunum hareketi ve aritmiler gibi görüntü alımı, ölçümü ve yorumlamasını etkileyen sınırlamaların üstesinden gelmek için birden fazla kaynaktan gelen verileri birleştiren *füzyon modelleri* geliştirilmiştir ³⁴.
- Diğer kardiyak görüntüleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında görüntülemenin heterojenliği göz önüne alındığında, KMR analizi için yapay zeka uygulaması zordur.
- Tipik KMR protokolleri, satıcıya ve kullanılan spesifik vuru dizisi (*pulse sequence*)’ne bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilen birden fazla farklı dizilimin edinilmesini ve analizini içerir; bu da yapay zekanın klinik iş akışlarına entegrasyonu açısından zorluk teşkil eder. Yapay zeka araçları, ventriküler boyutun ve fonksiyonun ölçülmesi ve sine sabit durum serbest devinim kazanımlarından kaynaklanan gerilimin belirlenmesi de dahil olmak üzere, KMR’de işlem sonrası analizini kolaylaştırmak için uygulanmıştır.
- Yapay zeka, standartlaştırılmış duvar hareketi değerlendirmesi ve segmentasyon yoluyla, çeşitli kardiyomiyopatileri ve intrakardiyak kitleleri iyi bir performansla değerlendirmek için kullanılmıştır³². Bu sınıflandırma algoritmalarının çoğu, sınıflandırma performanslarını geliştirmek için doku gibi radyomik* özellikleri çıkarır. Gelişmiş özellik çıkarımına sahip bu kombinasyon modelleri, amiloidoz³⁵ ve perikardit³⁶ tanısını iyileştirmek, iskemik kalp hastalığında beklenen miyokardiyal iyileşmeyi ölçmek ve ablasyon prosedürleri için intraoperatif rehberlik sağlamak üzere uygulanmıştır³⁷. Geç gadolinyum geliştirme ve parametrik haritalama da dahil olmak üzere miyokard dokusunun KMR ile karakterizasyonu için yapay zeka uygulamalarında devam

eden çalışmalar bulunmaktadır ve bu, hastalık sınıflandırması ve prognoz belirleme için faydalı olabilir³¹.

**Radyomik* = Tıp alanında radyomik, veri karakterizasyon algoritmalarını kullanarak tıbbi görüntülerden çok sayıda öznel çıkaran bir yöntemdir; radyomik özellikler olarak adlandırılan bu özellikler, çıplak gözle algılanamayan tümöral paternleri ve özellikleri ortaya çıkarma potansiyeline sahiptir.

Kardiyak BT anjiyografi, koroner arter hastalığının değerlendirilmesinde ilk basamak görüntüleme yöntemidir³⁸. Lokalizasyon, segmentasyon, hastalık sınıflandırması ve risk/ prognoz tahmin modelleri, kardiyak BT anjiyografiye sıklıkla uygulanır^{16,39}. BT tabanlı yapay zeka modelleri, koroner arter stenozu miktarının belirlenmesi ve derecelendirilmesine⁴⁰, hızlı koroner plak karakterizasyonu ve niceliğine¹³ ve koroner inflamasyonun değerlendirilmesine⁴⁰ olanak sağlayabilir. Çeşitli yayınlar, stenoz varlığında kan akışının bir tahmini olan kalp BT'den fraksiyonel akış rezervinin değerlendirilmesi için derin öğrenme modellerinin performansını bildirmiştir^{42,43}.

- Kardiyak BT anjiyografisinden ve klinik parametrelerden görsel olarak değerlendirilen görüntüleme sonuçlarının YZ entegrasyonunun, prognostik sonuçları tek başına klinik veya BT ölçümlerinden önemli ölçüde daha iyi tahmin ettiği gösterilmiştir⁴⁴. Yapay zeka modelleri aynı zamanda gürültüyü ve artefaktları azaltarak görüntü kalitesini artırmak^{45,46} ve düşük dozlu BT görüntülerini rutin BT görüntülerine çeviren üretken rakip ağları kullanarak çeviri sağlamak için de uygulanmıştır.⁴⁷
- Tek foton emisyon tomografisi (*single-photon emission tomography*) gibi nükleer tıp çalışmalarına uygulanan yapay zeka modelleri, obstrüktif koroner arter hastalığının tahminini düzeltmek ve miyokard perfüzyonunu değerlendirmek için kullanılabilir⁴⁸. Ayrıca bu modeller, düşük riskli hastalar için dinlenim taramalarının gerekli olup olmadığını belirleyerek görüntüleme iş akışını basitleştirebilir. Hastalar için olumsuz kardiyak olay riskini tahmin etmek amacıyla pozitron emisyon tomografi-BT'de kontrolsüz azaltma düzeltme BT'sinden koroner arter kalsiyum ölçümü gibi birden fazla yöntemi birleştiren hibrit modeller ortaya çıkıyor^{15,49}.

Tablo- Kardiyak Görüntüleme Modellerinin 4 Ana Türünde Görüntüleme Mekanizmaları, Edinme Yöntemleri ve Görüntüleme Verilerinin Piksel Tabanlı Gösterimindeki Önemli Değişiklikler, Modaliteye Özel Kardiyak Görüntüleme Yapay Zeka Algoritmalarıyla Sonuçlanıyor

Model	Temel görüntü özellikleri	Edinim ve yeniden yapılanma hususları	Piksel tabanlı hususlar
Eko-Kardiyo grafi	Anatomik olarak kısıtlanmış akustik pencerelerden ve heterojen doku kompozisyonu yoluyla değişen ses iletiminden etkilenen sonik yansımaların operatör tarafından yönlendirilen düzlemsel temsilleri	Operatöre bağlı çekim düzlemleri, hastaya özel akustik pencereler	Statik düzlemsel gri tonlama, zamanla değişen düzlemsel sine gri tonlama ve akışla ilgili renklerde sunulan standart olmayan ve uzamsal olarak heterojen piksel yoğunlukları
BT	X-ışını zayıflamasındaki değişikliklerle ortaya çıkan elektron yoğunluğunu gösteren kalibre edilmiş piksel yoğunluk değerleri ile tutarlı ve izotropluğa yakın hacimsel kazanım. Baskın artefaktlar hareketten (kalp, solunum ve tüm vücut) ve görüntü gürültüsünden kaynaklanır. Her ikisi de tarayıcıya özgü ve hastaya özgü faktörlere bağlıdır.	Radyasyona maruz kalmanın azaltılması görüntü gürültüsünü artırır. Röntgen ışınının, masa hızının ve gantri dönüş sıklığının optimal reçetesi hastaya ve endikasyona özeldir.	İzotropik hacimsel uzaysal çözünürlüğe sahip öngörülebilir piksel yoğunlukları, anatomik segmentasyonu kolaylaştırır. Hareket, gürültü ve metalle ilgili artefaktlar önemli anatomik sınırları gizleyebilir
SPECT/PET	Görüntüler, vücuttaki hedeflere dağıtılan radyonüklid etiketli ajanlardan gelen gama ışını emisyonunu göstermektedir. Sinyal-gürültü oranı diğer yöntemlere göre daha düşüktür. Sinyal heterojenlikleri, üstteki gama ışını zayıflatıcılarının değişmesinden kaynaklanır. Anatomik bulanıklık, diğer yöntemlere göre önemli ölçüde daha düşük olan uzaysal çözünürlükten kaynaklanır	Daha uzun çekim süresi, hastanın rahatsızlığı, verim ve hareket artefaktları pahasına kontrast-gürültü oranını artırır. Radyofarmasötik türü ve dozunun seçimi, kolimatör seçimi ve yeniden yapılandırma, zayıflama düzeltmesi ve hareket düzeltme algoritmaları görüntü kalitesini etkiler	Piksel yoğunlukları, yerel radyotraktör alımına, üstteki doku zayıflamasına ve görüntü gürültüsüne göre değişir. Voksel boyutları diğer modalitelerden daha yüksektir, bu da diğer modalitelere göre daha düşük uzaysal çözünürlüğe neden olur.
MKG	Proton çekirdeklerinin manyetik rezonansından oluşturulan yığılmış düzlemsel, hacimsel ve sine görüntüler	Verimli darbe dizisi seçimi inceleme süresini azaltır. İzotropik hacimsel edinimler daha verimlidir ve operatörün yığılmış düzleme özgü edinimlere olan bağımlılığını azaltır. Seyrek k-uzay örnekleme yoluyla yeniden yapılandırma, edinme süresini azaltır ancak görüntü kalitesini düşürebilir	Standardize edilmemiş edinim stratejilerinden, lokal manyetik alan heterojenliğinden ve hastaya özel faktörlerden etkilenen oldukça çeşitli doku kontrast mekanizmaları, hastalar ve tarayıcı modelleri arasında değişken sinyal özelliklerine neden olur.

YAPAY ZEKA ARAÇLARI

Yapay zeka, kardiyovasküler görüntüleme uygulamalarında uygulanabilecek çok sayıda farklı aracı kapsar. Nisan 2023 itibarıyla, kardiyak görüntüleme için, koroner arter kalsifikasyon ölçümü de dahil olmak üzere birden fazla kullanıma yayılan 46 ABD FDA onaylı uygulama bulunmaktadır; görüntü edinme ve kalite düzeltme; ejeksiyon fraksiyonu, kalp akışı ve damar çapı ölçümleri; ve görüntü segmentasyonunu içerir^{50,51}. Uygulama kapsamına kardiyak ölçümler, görüntü işleme ve segmentasyon algoritmaları hakimdir.

Doğal Dil İşleme

Doğal dil işleme (DDİ ([NLP - *natural language processing*]), buluşsal (kural tabanlı) veya makine öğrenimine dayanan⁵² teknikler kullanılarak uygulanabilecek yapılandırılmamış metinden yapılandırılmış verilerin çıkarılmasına olanak tanır.

DDİ, kardiyak görüntülemekten elde edilen sonuçların klinik olarak anlamlı bir yorumunu oluşturmak için elektronik tıbbi kayıttan (ETK [EMR - *electronic medical record*]) görüntülemeyle ilgili olmayan verileri çıkarıp sentezleyerek anlamlı umutlar vaat eden gelişen bir alandır. DDİ ile bağlama uygun yorumlama oluşturmak için hasta kayıtlarından büyük miktarlarda

yapılandırılmamış metin verilerini toplamak mümkündür. İlgili yapılandırılmamış metin, çeşitli görüntüleme incelemelerinden elde edilen raporları, klinik karşılaşma/ raslantı veya prosedür notlarını ve hatta özel genetik veya biyomarker test sonuçlarını içerebilir. DDI'nin tıbbi kayıtlara uygulanmasındaki en büyük zorluklardan biri, kurala dayalı yaklaşımların performansını sınırlayabilen girdi verilerinin heterojenliğidir⁵³. Karşılaştırıldığında, makine öğrenimine dayanan yaklaşımlar, iyi performans gösteren modeller geliştirmek için yeterli eğitim verisine ihtiyaç duyar.

DDI'nin sistematik olarak anlamlı verileri çekip çıkaramayacağı gerçek dünyadaki ETK depoları veya klinik uygulamaların düzeltilmesi henüz bilinmemektedir. Çok sayıda büyük dil modelinin yakın zamanda piyasaya sürülmesi, klinik karar desteğinde, lisans ve lisansüstü tıp eğitiminde ve klinisyen-hasta iletişimde kullanılmasıyla DDI'nin sağlık hizmetleri üzerindeki potansiyel etkisini ve ona olan ilgiyi hızla artırdı⁵⁴.

Diğer makine öğrenimi yaklaşımlarına benzer şekilde, önyargıyı önlemek için DDI algoritmaları tarafından toplanan kalıpların değerlendirilmesi önemlidir. Eğitim için kullanılan veriler (kasıtsız) önyargılar içeriyorsa, DDI modeli potansiyel olarak bunları yakalayabilir ve bu verileri anlama ve yorumlama sürecine dahil edebilir.

Aşırı uyum ve yetersiz uyumdan kaçınarak doğru model geliştirme, performans ölçümlerinin doğru kullanımı ve yapay zekanın yorumlanabilirliğini artırmak kritik öneme sahiptir.

Görüntü İşleme ve Üretimi (Yeniden yapılanma)

Kardiyak görüntüleme alanındaki bu tür yapay zeka uygulamaları esas olarak görüntü kalitesini düzeltme ve ek görüntüler oluşturmaya odaklanıyor.

Tanısal görüntü kalitesi korunurken görüntü kaydı ve görüntü kalitesinin radyasyon dozunu düşürecek şekilde optimize edilmesi için yapay zeka uygulandı⁵⁵.

Radyasyon dozunu azaltmanın bir başka yolu da, sanal görüntüler oluşturarak elde edilen serilerin sayısını azaltmaktır; örneğin, düzeltilmemiş görüntülerden kontrastı artırılmış BT görüntüleri oluşturmak veya tam tersi⁵⁶. Ek olarak, azaltılmış görüntüleme protokolleri kullanılarak ve tüm görüntüyü yeniden oluşturmak için yapay zeka kullanılarak MRG çekim süreleri kısaltılabilir.

Segmentasyon

Nesne lokalizasyonu, nesnelerin, bölgelerin ve ilgilenilen yer işaretlerinin tanımlanmasında önemli bir ön işleme adımı olan “Parçalama/bölümleme” (Segmentasyon) görevleri olmuştur.

Segmentasyon birçok kardiyak görüntüleme uygulamasının temelinde yatmaktadır. Segmentasyon, piksele dayalı etiketleme veya sınıflandırma olarak düşünülebilir. U-net evrişimli sinir ağı etiketi (*U-net convolutional neural network*)* gibi segmentasyon algoritmaları veya her pikseli bir sınıfa/nesneye ait olup olmadığına göre sınıflandırır. Birleştirilen tüm pikseller segmentasyonlar veya konturlar oluşturabilir. Segmentasyonda genellikle performans ölçütü olarak “Zar benzerlik katsayısı” (*Dice similarity coefficient*)** kullanılır ^{13,16,39,57}.

® *U-Net, Freiburg Üniversitesi Bilgisayar Bilimleri Bölümü'nde biyomedikal alanlardaki görüntü işleme çalışmalarında bölümlere yapmak için geliştirilmiş bir evrişimsel sinir ağıdır. Ağ mimarisi, tamamen evrişimli ağa dayanmaktadır ve daha az eğitim görüntüsü ile çalışmak ve daha hassas bölümler (segmentasyonlar) sağlamak için değiştirilmiş ve genişletilmiştir. Ayrıca bu ağ o kadar hızlıdır ki, 512x512 piksellik bir görüntünün bölümlenmesi GPU (*Graphics Processing Unit* = *grafik işlem birimi*)'da 1 saniyeden daha kısa sürer.

® ** Sørensen-Dice endeksi (*the Sørensen–Dice index*) veya basitçe Zar katsayısı (*Dice coefficient*) olarak da bilinen Zar benzerliği katsayısı, iki veri kümesi arasındaki benzerliği ölçen istatistiksel bir araçtır. Bu indeks, yapay zeka ile oluşturulan görüntü segmentasyon algoritmalarının doğrulanmasında tartışmasız en yaygın kullanılan araç haline geldi.

Sınıflandırma

Destek vektör makineleri gibi sınıflandırma algoritmaları lezyonları, görüntüleri veya hastaları 1 veya daha fazla hastalık içeren veya hastalık içermeyen kategorilere ayırır.

Genellikle çıktıları, girdilerin bu kategorilerin her birine girme olasılığından oluşur. Bu çıktı, hastalığı teşhis etmek, spesifik görüntüleme markerlerini sınıflandırmak ve hasta gruplarını tanımlamak için kullanılabilir.

- Performansı değerlendirmek için kesinlik, hatırlama, doğruluk ve F1 puanları gibi ölçümler kullanılır ^{16,39,57}.

İlişkilendirme ve içgörü

Gerçek büyük verileri (büyük, heterojen, son derece değişken ve karmaşık veri kümeleri) işlemek için bilgi işlem gücü giderek daha fazla kullanılabilir hale geldikçe istatistiksel ilişkilendirme yapay zekada popüler bir teknik haline geldi.

- Radyomik, radyo-genomik ve genom çapında ilişkilendirme çalışmaları klinik semptomlar, görüntüleme görünümüleri ve hastaların genetik yapısı arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için kullanılmıştır⁵⁸. Bu analiz, atriyal fibrilasyondan çeşitli kardiyomiyopatilere kadar çeşitli durumların tedavisinde hassas, kesin kardiyovasküler tıp umudu yaratıyor.

Karar analizi

Gelişmiş görüntüleme siparişi verirken klinik karar destek mekanizmalarının kullanımı, 2014 tarihli “Medicare Erişimini Koruma Yasası” sayesinde son yıllarda artmıştır.

Geçmişte bu sistemler ağırlıklı olarak kurallara dayalıdır ve görüntüleme incelemeleriyle eşleştirilen kabul edilebilir endikasyonlardan oluşan bir veri tabanı kullanır.

Ancak endikasyon ETK (elektronik tıbbi kayıt) içindeki bir menü seçeneğinde net bir şekilde kapsamadığında klinik karar destek mekanizmaları başarısız olabilir. Yapay zeka destekli klinik karar desteği, klinik karar destek mekanizmasına yönelik girdilerin esnekliğini potansiyel olarak artırabilir ve hem kullanıcı deneyimini hem de hasta bakımını düzeltebilir. Ancak klinik karar destek mekanizması çıktısının mantığı her zaman açık olmayabilir⁵⁹.

Hastalık ve Sonuçların Direk Öngörümü

Öngörü ve prognostifikasyon (tahmin /kehanet) yapay zeka uygulamaları regresyona, topluluk güçlendirme (XGBoost dahil) gibi makine öğrenme yöntemlerine veya hibrit derin öğrenme yöntemlerine dayanır^{60,61}.

Sol ventriküler fonksiyonel ölçümleri veya tahmini kardiyovasküler hastalık veya prognoz riski gibi sayısal çıktılarla sonuçlanabilir.

Algoritma mimarisine bağlı olarak ilk olarak görüntülerden görüntüleme özellikleri çıkarılabilir veya görüntü doğrudan algoritma içinden beslenebilir^{16,39,57}; Klinik veriler tanı ve sonuç tahmini için entegre edilebilir.

Yapay Zeka Sistemlerinin Kardiyovasküler Görüntülemedeki Performansının Değerlendirilmesi

Yapay zeka sistemlerinin titiz bir şekilde değerlendirilmesi, risk öngörüsü, teşhis, klinisyenler arasında verimlilik ve hata oranlarında düzelme ve de gerçek klinik fayda olup olmadığı konusunda objektif bir değerlendirme gerektirir.

- Bu yaklaşım, geleneksel randomize kontrollü çalışma metodolojisinin uygulanmasını gerektirir ve bu yapay zekaya dayanan teknolojinin yaygın olarak benimsenmesinden önce uygulamaya konulmalıdır. Büyük verinin genişliği ve ölçeğinin avantajıyla, yapay zeka sistemleriyle tanımlanan rahatsızlıklara sahip hastalar, progresif bir klinik araştırma için gereken geleneksel toplamaya(çalışmaya dahil etme) gerek kalmadan kolayca belirlenebilir.
- Uygun hastaları retrospektif olarak belirleyerek ve bunları yapay zeka kullanan veya yapay zeka- kullanmayan mevcut yola göre rastgele gruplandırarak (randomize ederek) yapay zekaya dayanan sonuç tahminleri, bilinen sonuçlarla karşılaştırılabilir. Bu tür kayıt tabanlı randomize klinik araştırmalar

(registry-based randomized clinical trials), son zamanlarda sonuç raporlamanın ölçeğini, maliyet ve hızını düzeltmek için önerilmiştir⁶².

Kavramsal olarak benzer olan dijital ikiz metodolojisi (*the digital twin methodology*), hastalık ve tedavi yanıtlarını tahmin etmek amacıyla birden fazla veri değişkeninin gerçek zamanlı güncellemeleriyle bir hastanın sanal bir temsilinin oluşturulmasını içerir⁶³. Dijital ikiz süreçleri (*Digital twin processes*) başlangıçta Endüstri 4.0 Girişiminin bir parçası olarak geliştirildi ve sanal modelde veri toplamak, analiz etmek ve gerçek sistemin performansını artırmak için simüle etmek için gerçek ve sanal sistemler arasında bağlantı sağlayarak fiziksel sistemin sanal bir kopyasının oluşturulmasını içeriyordu⁶⁴.

İnsanlara uygulandığında bu yaklaşım, büyük verilere dayalı derinlemesine fenotiplendirilmiş modellere dayalı gelişmiş istatistiksel modelleme ile birleştirilen gerçek zamanlı verileri elde etmek için giyilebilir cihazlar gibi birden fazla biyosensör gerektirir. Müdahalelerin gerçek hayattaki sonuçları, yapay zekayı bilgilendirmek ve eğitmek amacıyla dijital ikize sürekli geri bildirim sağlamak için kullanılır⁶⁵.

- Bu tür bir teknoloji, biri müdahalenin sonucunu içeren, diğeri ise müdahalenin sonucunu doğru bir şekilde tahmin etmek için makine öğrenimi göreviyle bu verileri "tutan" dijital ikizlerin yaratıldığı tamamen sanal bir ortamda uygulanabilir. Yeterli sayıda dijital ikiz modeliyle sonuç tahmini düzeltilebilir, böylece farmakolojik veya cihazı esas alan tedaviler için daha kesin hasta seçimi yapılabilir.

Kardiyovasküler görüntülemelerde yapay zeka, görüntüleme klinik çalışmalarının ve geniş prospektif kayıtların *post- hoc* analizlerinde kullanılmıştır. Klinik, tanısal ve prognostik veriler zaten toplanmış olduğundan, bu tür bir analiz hastaların tanı ve prognozunda düzelme gösterebilir ^{13,61,66}.

- Ayrıca, klinik çalışmaların *post-hoc analizi*, koroner BT anjiyografiden koroner ağaç üzerindeki toplam aterosklerotik plak hacminin YZ'ye dayanan kantitatif ölçümlerinin prognostik değerini göstermiştir¹³.

Klinik değerlendirmenin fayda ve etkinliğini göstermek ve yapay zeka araçlarının klinik kullanımına olan güveni artırmak için ilaç çalışmalarına benzer şekilde yapay zeka araçlarının ileriye dönük değerlendirilmesi de değerlidir. Yakın zamanda yapay zekânın etkin olduğu sol ventriküler ejeksiyon fraksiyonunun randomize, körleştirilmiş bir güvenlik ve etkinlik çalışmasının sonuçları rapor edildi⁶⁷. Resim arşivleme ve iletişim sistemiyle entegre YZ tabanlı ve sonografi uzmanı tarafından sol ventriküler ejeksiyon fraksiyonu değerlendirmeleri 3495 hastada prospektif olarak karşılaştırıldı.

- Yapay zekaya dayanan sol ventriküler ejeksiyon fraksiyonunun, sonografi uzmanının ilk değerlendirmesinden daha düşük olmadığı ve daha üstün olduğu, kardiyologların nihai klinik raporlarında daha az değişiklik ve daha az zaman gerektirdiği bulundu. Yapay zeka uygulamalarının potansiyel maliyet tasarrufu ve maliyet etkinliği yakın zamanda rapor edilmiştir⁶⁸.

TANIMLAMA VE DENGEMEDEKİ ZORLUKLAR VE TUZAKLAR

Ön yargı

Tüm yapay zeka uygulamalarının geliştirilmesinde karşılaşılan bir sorun olan önyargılar, geliştirme ve dağıtım sürecinin birçok noktasında yapay zeka modellerine dahil edilebilir⁶⁹. Sistemik veri işleme önyargıları, veri setindeki popülasyonun modelin uygulandığı popülasyona benzemediği spektrum önyargısını ve benzer verilerin tutarlı bir şekilde etiketlenmediğini hatırlama önyargısını içerir.

İnsan önyargıları, veri düzeltme veya etiketleme sırasında model geliştirmeye de dahil edilebilir. Model geliştirmenin kendisi önyargıya açıktır⁷⁰. Aşırı uyumu azaltmaya yönelik teknikler, yanlışlıkla eğitim ve test kümeleri arasında veri sızıntısına atfedilebilecek önyargılara neden olabilir. Daha karmaşık modeller, istenmeyen bir şekilde verilerdeki ince özelliklere odaklanabilir.

- Model değerlendirme metrikleri, yanlış bir şekilde güçlü bir model sunmamak için modelin gerçekleştirmeyi amaçladığı göreve uyacak şekilde dikkatlice seçilmelidir⁷¹.

Etikler

“*Otomasyon önyargısı*”, bilgisayarın her zaman insandan daha doğru olduğu kavramıdır.

Yapay zeka klinik iş akışına daha fazla nüfuz ettikçe, uzmanların yapay zeka yanlış bir çıktı ürettiğinde kimin sorumlu olacağını düşünmesi gerekecektir. Şu anda, diyabetik retinopati taraması ve normal göğüs radyografilerinin değerlendirilmesi gibi görüntülemeye dayalı dikkate değer istisnalar dışında, tıpta çok az otonom yapay zeka bulunmaktadır⁷².

Kardiyovasküler görüntülemeye çeşitli kullanımlara yönelik birçok yapay zeka çözümü mevcuttur. Bununla birlikte, kardiyak fonksiyonun MRG'de otomatik olarak ölçülmesi veya BT'de fraksiyonel akış rezervinin belirlenmesi bile, klinik bir karar verilmeden önce görüntüleme doktoru tarafından incelenir⁷³.

Yapay zeka denetimli bir ortamda çalıştığında fikir birliği, insan doktorun yapay zeka sonucunu kabul etmekten veya kabul etmemekten ve buna göre hareket etmekten sorumlu olduğu anlamına gelir. Ancak gelecekte, klinik olarak daha fazla görüntüleme yapay zeka aracı kullanıldığında, bunların bazıları muhtemelen özerk olabilir.

- Bu senaryoda yanlış yapay zeka çıktılarından kim sorumlu olacak: görüntüleme doktoru mu, model geliştirici mi yoksa başka biri mi? Ayrıca,

yapay zekanın etik açıdan sorgulanabilir sonuçlar ürettiği veya sağlık hizmetlerindeki eşitsizlikleri artıran sonuçlar ürettiği tespit edilirse, hangi hafifletme adımları atılmalıdır ve bu adımlara kimin liderlik etmesi beklenecektir?⁷⁴.

DEĞER ZİNCİRİNDE YAPAY ZEKA UYGULAMASI

Yapay zekanın kardiyak görüntülemeye uygulanması, değer zincirinin tüm aşamalarında zamanlama, verimlilik ve kaçırılan teşhislerle ilgili sorunları önlemek için hasta yolculuğunun her adımıyla ilgilidir⁷⁵.

Değer yaratımını en üst düzeye çıkarmak için, her adımın klinik entegrasyondan önce titiz bir değerlendirmeye tabi tutularak birden fazla adımda verimliliği otomatikleştirmek ve artırmak uygun olabilir.

Kardiyak Görüntülemede Yapay Zeka İçin Değer Zincirinde Tanımlanan Adımlar

(Figür 3), potansiyel yapay zeka uygulamalarını kardiyak görüntüleme değer zincirindeki faaliyetlerle eşleştirmektedir. Yapay zekanın her adımda uygulanması, her modeli eğitmek ve test etmek için yeterli veri gerektirir. Ortaya çıkan büyük veri çağı, yaygın hastalıkların sık görülen örnekleri ve daha nadir hastalıklara ilişkin anlamlı veri kümelerini içeren büyük veri kümelerinin⁷⁶ incelenmesine olanak tanıdı.

Yapay zeka eğitimi için büyük görüntüleme veri setlerinin paylaşılması, yapay zeka gelişiminin gerçekleştirilebileceği ölçeği önemli ölçüde artıracak⁷⁶ ve eğitilmiş yapay zeka sistemlerinin farklı coğrafi alanlarda farklı görüntü edinme teknikleriyle test edilmesine olanak sağlayacak. Veri setlerinin ulusal komorbidite ve mortalite veritabanlarına bağlanması ek bilgiler sağlayacaktır.

- Çok yönlü bir yapay zeka sistemi büyük verilerle eğitildiğinde, kalp yetersizliği, atriyal fibrilasyon ve pulmoner hipertansiyon gibi heterojen kalp hastalıkları, halihazırda yürürlükte olan her hastalık için tek tip strateji yerine daha kişiselleştirilmiş yönetim stratejileri potansiyeline sahiptir⁷⁷.

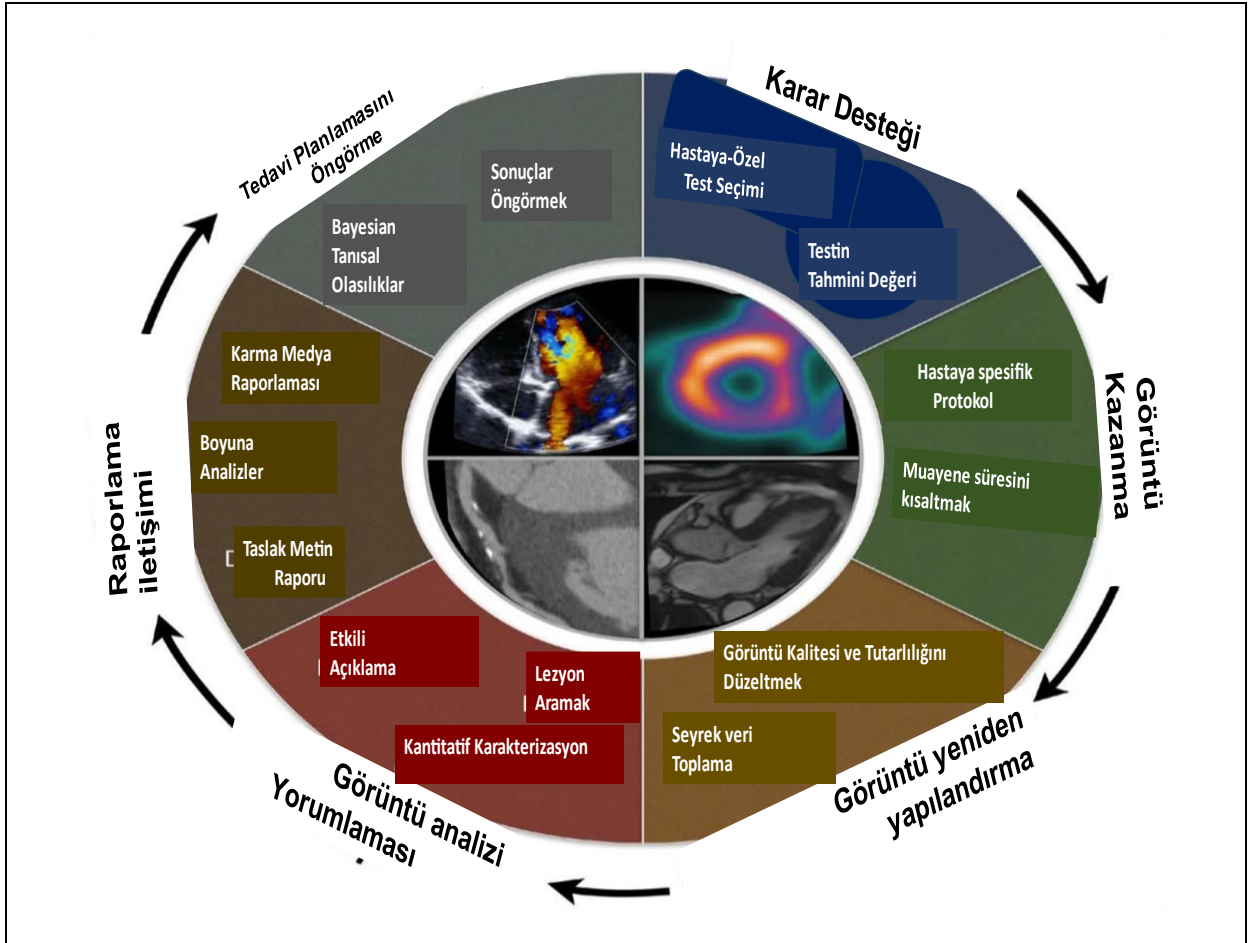
Ulusal Sağlık Enstitüleri (*National Institutes*)'nin veri paylaşımına yönelik güncel politikası, Ulusal Sağlık Enstitüleri tarafından finanse edilen araştırmaların etkili veri yönetimi ve paylaşım süreçleri yoluyla kamuya açık hale getirilmesi konusundaki kararlılığı güçlendirdi⁷⁸. Yapay zeka sistemlerinin eğitimi, bazıları doğası gereği hassas olabilen (sağlık kayıtlarında yer alan) veya büyük dosya boyutları (sıkıştırılmamış ham görüntüleme verileri) içerebilen büyük veri kümelerine maruz kalmayı gerektirir.

- Ekokardiyografi görüntüleri için EchoNet-Dynamic gibi^{76,79} Koroner BT anjiyografi için ImageCAS veya COCA^{80,81} ve MRG veri setlerinin Kardiyak

Atlas Projesi⁸²⁻⁸⁴ yakın zamanda hayata geçirilmiştir. Ancak şu anda yalnızca sınırlı sayıda kardiyak görüntüleme çalışması kamuoyuna sunulmuştur.

Bir yapay zeka sistemini eğitmek için kullanılan metodolojiler, eğitilen model için yapay zeka kodunun paylaşılması da dahil olmak üzere, gerektiğinde bağımsız doğrulamaya izin verecek kadar ayrıntılı bir şekilde açıklanmalıdır^{85,86}. Bununla birlikte, yapay zeka kodunun paylaşılması, fikri mülkiyetin korunmasının, genellikle patent başvuruları ve altta yatan yapay zeka mimarisinin ifşa edilmemesi yoluyla yapay zeka modellerinin ticari kazanç için satılmasına izin vermesi nedeniyle ticari şirketler için lojistik zorluklar doğurabilir. Yapay zeka geliştirme şeffaflığı, fikri mülkiyet koruması ve ticari zorunlulukların çıkarları her zaman uyumlu olmasa da, bunların her biri için yeterli güvenlik önlemlerinin uygun düzenleyici gereklilikler tarafından sağlanması gerekir.

Klinik prezentasyon/ sunum karar destekli YZ, tıbbi geçmişi, önceki ilaçları ve olası olumsuz reaksiyonları otomatik sorun listeleri içerisinde oluşturmak üzere sınıflandırmak için ETK'nin İDD'sinin kullanılması gibi ayakta tedavi ziyaretlerinin otomatik olarak yorumlanmasını içerebilir. Klinik karar desteği, potansiyel hasta durumunun kötüleşmesine işaret edecek "*kırmızı bayrakları*" belirlemek amacıyla yatan hastalara uygulanabilir.



Figür 3. Kardiyovasküler görüntüleme değer zincirinin primer aktiviteleri genelinde yapay zeka uygulamalarına yönelik hedefler.

Farklı kardiyak görüntüleme yöntemlerinin benzersiz özelliklerinin dikkate alınması, birçok piksel tabanlı ve iş akışı uygulamasının bu yöntemlerden birine göre uyarlanmasını gerektirir.

- Hasta için en iyi görüntüleme testinin yapay zeka destekli seçimi semptomların varlığından ziyade risk faktörlerine ve tıbbi geçmişe dayanabilir. Uygunluk kriterleri ve kılavuzların uygulanmasının yanı sıra, ikili karar süreçlerini uygulama eğiliminde olan hasta riskinin önceki bilgilerden yapay zeka destekli belirlenmesi, görüntüleme testi seçiminde değerli bir rehberlik sağlayabilir⁸⁷. Daha önce farklı bir endikasyon için göğüs BT taraması yapılmış olan hastalara AI koroner arter kalsiyum ölçümü retrospektif olarak uygulanabilir ve bu, aynı hastalarda gerçekleştirilen özel bir koroner arter kalsiyum taramasıyla iyi uyum gösterir^{14,88}.

Potansiyel uygulamalar arasında, ilgisiz nedenlerle görüntüleme uygulanan hastaların fırsatçı kardiyovasküler risk taramasının yapılması ve yönetim kararlarının düzeltilmesi için ideal kardiyak görüntüleme incelemesine yönelik rehberlik sağlanması da yer alır⁸⁹. Risk faktörlerinin, kan biyomarkerlerinin ve tıbbi öykünün (ETK'den DDİ ile elde edilebilecek) entegrasyonu, klinisyenlere en uygun kardiyak görüntüleme testi yönlendirmesinde daha fazla yardımcı olabilir⁹⁰.

Görüntüleme testi yönlendirmesine ek olarak yol otomasyonu hasta akışı, faturalandırma ve dokümantasyonu düzeltmek için yararlı olabilir. Robotik yol otomasyonu, genellikle idari personel tarafından gerçekleştirilen aynı tekrarlanan görevlere en uygun olanıdır⁹¹. Bu yapay zeka otomasyonu, tekrarlanan görevlerin hızını, verimliliğini ve doğruluğunu önemli ölçüde azalmış bir maliyetle düzeltme potansiyeline sahiptir.

Yapay zekanın kardiyak görüntüleme için değer zincirini nasıl önemli ölçüde etkinleştirebileceğine dair beş örnek burada tartışılmaktadır:

- (1) İlk olarak, görüntü alımı yapay zeka rehberliğiyle daha fazla otomasyon gerektirebilir. Otomatik görüntü elde etme rehberliği, görüntülerin elde edilmesinin operatörün becerisine ve eğitimine bağlı olduğu durumlarda uygulanan, yeni ortaya çıkan bir teknolojidir⁹².
Kardiyak BT'de görüntü edinimi, tarama ayarlarında, hasta konumlandırmasında ve doz modülasyonunda yapay zeka ile geliştirilebilir⁹³. Yapay zekanın bir diğer potansiyel uygulaması, birçok edinim ve yeniden yapılandırma görevi için temel olan elektrokardiyografik izlemenin yorumlanmasıdır. Yapay zeka analizi benzersiz klinik bilgiler sağlar ve hareket artefaktlarını daha tutarlı bir şekilde baskılayan edinimler için bir temel sağlayabilir^{94,95}.
- (2) İkinci, ham görüntüleme verilerinde bulunan özelliklerin otomatik olarak yorumlanması da dahil olmak üzere, görüntü yorumlama ve kantitatif analiz için yapay zeka araçları kullanılabilir⁹⁶.

Otomatik anatomik yer işareti tanımlama, daha fazla analiz için ilgilenilen bölgelerin sınıflandırılmasına yardımcı olur⁹⁷.

Koroner kalsiyum skorlaması yapay zeka tarafından hem kapılı hem de kapısız kardiyak BT için tam otomasyonla gerçekleştirilebilir^{15,98}.

Derin öğrenmeye dayalı koroner kalsiyum skorlamasının, geniş veri setlerinde gelecekteki olumsuz kardiyovasküler sonuçları öngördüğü, miyokardiyal perfüzyon pozitron emisyon tomografi görüntülemesi için gerçekleştirilen attenuasyon düzeltme BT'nin değerini artırdığı gösterilmiştir¹⁵.

- Kardiyak BT anjiyografi için YZ, invazif referans standartlarına⁹⁹ göre doğrulanmış olan luminal stenoz ve aterosklerotik plağın otomatik olarak ölçülmesine ve aterosklerotik plağın kalsifiye olmayan, düşük atenüasyonlu kalsifiye olmayan ve kalsifiye bileşenler halinde karakterizasyonuna olanak sağlayabilir¹³.
- Yüksek riskli plağın morfolojik özellikleri gelecekteki kardiyovasküler olay riskine karşılık gelir¹⁰⁰ ve yönetime rehberlik etmek için kullanılabilir¹⁰¹. invaziv anjiyografiye yönlendirme dahil ¹⁰² bu hassas tıp sistemleri, gelecekte hasta yönetimini önemli ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir.
- Otomatik sol ventriküler segmentasyon herhangi bir kardiyak görüntüleme yöntemine uygulanabilir¹⁰³ ve bireysel duvar segmentlerinin tanımlanması ve karakterize edilmesine olanak tanır.

Ekokardiyografiye uygulandığında yapay zeka tabanlı benek deseni (*speckle pattern*) tespiti, otomatik gerinim ölçümü (*automated strain measurement*)¹⁰⁴, sol ventriküler ejeksiyon fraksiyonu değerlendirmesi¹⁰⁵ ve hastalık (örn. kardiyak amiloidoz ve hipertrofik kardiyomiyopati),tespitini mümkün kıldı. CMR verilerine uygulama, benzersiz miyokardiyal özelliklerin çıkarılmasını sağlayarak otomatik hastalık tespitine olanak tanıdı.

(3) Üçüncü, görüntü yapay zekasının çıktıları daha fazla yapay zeka tabanlı risk sınıflandırması için uygun olabilir. Koroner arter kalsiyum skoru ve kardiyak BT'den elde edilen derin öğrenmeye dayalı epikardiyal yağ dokusu ölçümleri, dolaşımdaki biyomarkerler de dahil olmak üzere klinik değişkenlerle, koroner kalsiyum skorlamasından sonra olumsuz kardiyak olayların öngörülmesi için YZ ile birleştirildi^{106,107}. Bu araçlar, hastaların klinik yönetimine rehberlik etmeye yardımcı olacak otomatik risk fenotipleri sağlayarak özellikle kardiyak görüntülemeye yönelik değer zinciriyle ilgili olabilir.

- YZ, ejeksiyon fraksiyonu korunmuş kalp yetersizliği hastalarında, olağan tanı kriterlerine dahil edilmeyen anormallikler de dahil olmak üzere¹⁰⁸, sağlıktan hastalığa kadar olan spektrumu tanımlamak için kullanılmıştır.
- Aort darlığı tanısının yapay zeka tabanlı otomasyonuna ve hayat kurtarıcı tedavi kararlarının daha erken alınmasını sağlamak için klinik karar desteğine yönelik çağrılar teşvik eden köklü klinik kılavuzlara rağmen, aort darlığı hâlâ yeterince teşhis ve yeterince tedavi edilmiyor¹⁰⁹⁻¹¹³.

(4) Dördüncü, kardiyak görüntüleme raporlarının otomasyonu, görüntü ve ölçüm yorumlamasından elde edilen çıktı verileri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Mevcut gözleme dayalı raporların aksine, klinisyenlere yönetim kararlarında rehberlik etmeye yardımcı olmak için risk fenotiplerinin raporlanmasıyla ek değer yaratılabilir.

(5) Beşinci, görüntüleme ve rapor verilerinin ETK ve diğer klinik verilere entegrasyonu, gelişmiş karar destek sistemlerinin oluşturulmasını sağlayabilir. ASCEND-HF (*Acute Study of Clinical Effectiveness of Nesiritide in Decompensated Heart Failure*) çalışmasında, ejeksiyon fraksiyonu korunmuş kalp yetersizliği nedeniyle hastaneye yatırılan hastalar, kardiyak görüntüleme, komorbiditeler ve diğer klinik verileri dikkate alan bir yapay zeka sistemine tabi tutulduklarında benzersiz klinik profillere ve farklı tedavi yollarına sahip farklı kümeler sergilediler¹¹⁴.

- Kardiyak görüntüleme verilerinin klinik bilgilerle birleşimi, yapay zekanın, bu sonucu önlemek amacıyla daha yoğun tedaviye uygun, korunmuş ejeksiyon fraksiyonlu¹¹⁵ kalp yetersizliği gelişme riski taşıyan hipertansiyon grupları gibi hastaları spesifik fenogruplara ayırması için mükemmel bir alt tabaka sağlar.

Farklı paydaşların yapay zeka gelişimiyle ilgili farklı ilgi alanları ve öncelikleri olabilir. Bazı senaryolarda farklı bakış açıları, birbiriyle örtüşmeyen farklı hedeflerle sonuçlanabilir. Örneğin, ödeme yapanlar maliyeti en aza indirmek için yapay zeka araçlarını kullanmaya teşvik edilebilirken, klinisyenler hasta sonuçlarını düzeltmek için yapay zeka araçlarını kullanmaya teşvik edilebilir. Ancak bu teşvikler, ödemeyi yapan kişi için algılanan düşük değer nedeniyle bir yapay zeka aracının belirli bir tedaviye karşı tavsiyede bulunduğu ancak tedavinin etkili olma ihtimalinin olduğu bir senaryoda çatışabilir. Paydaşlar arasındaki çıkarların uyuşmaması durumunda etik bir çerçeveye ve açık kılavuzlara ihtiyaç vardır. Hasta bakımı, güvenliği ve mahremiyetine öncelik verilmesini sağlamak için bu mekanizmalar mevcut olmalıdır.

Güven

Yapay zeka ancak insan- klinisyenlerin yapay zeka araçlarını iş akışlarına dahil edecek kadar çıktılarını güvenmesi durumunda etkili olabilir. Önyargı riski ve daha önce tartışılan etik hususlar, bir yapay zeka çözümünün genel güvenine katkıda bulunur. Yapay zeka çıktılarının 'açıklanabilirliği'nin artırılması, bu yeni araçlara olan güvenin artırılmasına yönelik bir yol olarak gösterilmektedir¹¹⁶. En uygun açıklanabilirlik ölçüsünün seçilmesi genellikle yapay zeka çıktısının özel kullanımına veya doğasına bağlı olacaktır ve yapay zeka aracının ne kadar güvenilir olduğunun belirlenmesini önemli ölçüde etkileyebilir.

Eğitim Veri Kümeleri

Yapay zeka uygulamalarının doğruluğu ve klinik faydası, büyük ölçüde eğitim verilerinin ve referans etiketlerinin kalitesine bağlıdır. Görüntü kalitesi ve görüntüleme uzmanları tarafından yapılan etiketlemenin doğruluğu, yapay zeka performansını büyük ölçüde etkileyebilir. Tüm hasta alt popülasyonlarını yeterince temsil etmeyen dengesiz veri setleri, yapay zeka performansında istenmeyen önyargılar yaratabilir. Ancak tıbbi verilerin paylaşılması, yeniden tanımlanabilecek gizli kişisel sağlık bilgileri içerebileceği düşünüldüğünde zordur.

Demografik bilgiler, referans etiketi prosedürleri ve benzerleri açısından şeffaflık sunan yeterli kimlik tanımlama/anonimleştirme hatları ve kamuya açık veri kümeleri, verilerin yapay zeka geliştirme için daha geniş çapta kullanılabilir hale getirilmesine yardımcı olabilir^{69,70}.

Yapay zekanın uygulanması

Yapay zekanın başarılı bir şekilde uygulanması, iş akışı entegrasyonu ve paydaşlar arasındaki işbirliği yeteneğine bağlıdır.

- Yapay zeka ilerlemelerinin klinik uygulamada faydalı olabilmesi için yapay zeka uygulamalarının klinik iş akışlarına kolayca entegre edilebilecek ve halihazırda kullanılan radyoloji platformlarıyla birlikte çalışabilecek şekilde tasarlanması gerekiyor.

YZ sonuçları resim arşivlemeye dahil edildiğinde ve Görüntüleme profilleri için Sağlık Hizmeti Kurumsal Yapay Zeka Sonuçlarının ve Yapay Zeka İş Akışı (*Healthcare EnterpriseAI Results and AIWorkflow*)'nın Entegrasyonu¹¹⁷ gibi standartlaştırılmış entegrasyon yöntemlerini kullanan iletişim sistemi sayesinde, entegrasyon süreci daha akıcı hale gelir ve sistem, kardiyak görüntüleme uzmanları ve diğer ilgili profesyoneller için daha kullanıcı dostu hale gelir. Ancak yapay zeka sonuçlarının resim arşivleme ve iletişim sistemine otomatik olarak eklenmesi, kardiyak görüntüleyicilerin çıktıları incelemesi için belirli bir yapay zeka şeffaflığı gerektirir. Yapay zeka şeffaflığını artırmak, yapay zeka sonuçlarına kolay erişim sağlamak ve yapay zeka uygulamalarını kardiyak görüntüleme cihazlarının ihtiyaçlarına uygun şekilde optimize etmek için disiplinler arası çabalara ihtiyaç var.

- 'İnsan-makine' işbirliğini değerlendiren ilk çalışmalar, daha yetenekli uzmanlar için performansın değiştiğini, asistan hekimlerin becerilerinin arttığını göstermektedir¹¹⁸⁻¹²¹.

Daha da endişe verici olanı, son kullanıcıya sağlanan açıklamaların türünün performansını etkilemesidir: Model çıktısında bir hata olduğunda, uzmanın performansı düşer; radyologlar yapay zeka algoritmalarına giderek daha fazla güvendikçe bu, daha fazla otomasyon yanlılığıyla artan bir endişe alanı olacaktır.

Yapay zekanın gerçek dünyada uygulanmasındaki diğer zorluklar arasında, yapay zeka dağıtım dışı verilerle karşılaştığında ortaya çıkan model bozulması yer alıyor.

Görüntülemede dağılım dışı veriler genellikle görüntüleme protokollerindeki bir değişiklikten, yeni ekipmanın kullanıma sunulmasından, hastalık sınıflandırma tanımlarındaki bir değişiklikten veya hedef popülasyondaki bir değişiklikten (yeni bir endikasyon uygun hastaları genişlettiğinde ortaya çıkabilir) meydana gelir.

Yapay zeka modelleri şu anda dağıtım dışı verileri incelikli bir şekilde ele almıyor ve tahmin ederek tahminlerde bulunmaya eğilimlidirler¹²². Azaltma çabaları, sınıflar arası dağıtım dışı veri tespitinin, sınıf içi tespiti kıyasla daha uygun olduğunu göstermiştir¹²³.

Yapay zeka performansının gerçek sonuçlardan ziyade kısayollardan (göğüs röntgeninin yoğun bakım ünitesinden veya belirli bir hastaneden geldiğini öğrenmek ve pnömoniye tahmin etmek) kaynaklandığını gösteren çok sayıda çalışma

hastalık özellikleri, yapay zeka modellerinin gerçek dünya ortamındaki kırılganlığını göstermektedir. Başarılı klinik uygulamalar için yapay zekanın etkinliğini kanıtlamak amacıyla, yapay zekanın açıklanabilirliğini ve yorumlanabilirliğini ve insan-makine işbirliğini geliştirmek, kısa yoldan öğrenmeyi ve dağıtım değişimlerinden kaynaklanan performans başarısızlığını azaltmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

SONUÇLAR

Yapay zeka uygulanabilir ve hasta yolculuğu boyunca; daha uygun testin seçilmesinden görüntü alımı ve analizinin optimize edilmesine, sınıflandırma ve teğhis için sonuçların yorumlanmasına ve önemli olumsuz kardiyak olayların riskinin tahmin edilmesine kadar her adımda kardiyak görüntülemeye değer katma potansiyeline sahiptir. Çeşitli sağlık hizmeti paydaşlarının bakış açılarını entegre etmek, değer yaratmak ve yapay zeka araçlarının gerçek dünya ortamında başarılı bir şekilde dağıtılmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Temel kaynak:

Value Creation Through Artificial Intelligence and Cardiovascular Imaging: A Scientific StatementFrom the American Heart Association, the American Heart Association Council on CardiovascularRadiology and Intervention; and Council on Lifelong Congenital Heart Disease and Heart Health in the Young. **Circulation**. 2024;**149**:e00–e00. DOI: 10.1161/CIR.0000000000001202
