



Arşiv Kaynak Tarama Dergisi Archives Medical Review Journal

DERLEME/REVIEW

Ortopedi Alanındaki Yapay Zeka Uygulamaları

Artificial Intelligence Applications in Orthopedics

Mehmet Kurt¹

¹Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Ortopedi ve Travmatoloji Anabilim Dalı, Türkiye

ABSTRACT

Orthopedics and traumatology is a branch of surgical medicine that deals with the diagnosis and treatment of musculoskeletal diseases. This field includes many topics such as fracture-dislocation treatments, joint prostheses, spinal diseases, sports injuries, pediatric orthopedics and bone tumors. Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) have gained an important place in orthopaedics in recent years. AI/ML technologies, especially in big data analysis, image processing and clinical decision support systems, provide benefits in diagnosis, treatment planning, complication prediction and personalized rehabilitation. These systems, which support surgeons in applications such as total joint replacement, also offer advantages in terms of cost-effectiveness and quality of patient care. However, they also have limitations such as the need for high quality data, model complexity and difficulties in the development process. The aim of this research is to evaluate the use of AI and ML in the field of orthopedics in the light of current literature.

Keywords: Orthopedics, artificial intelligence, machine learning

ÖZET

Ortopedi ve travmatoloji, kas-iskelet sistemi hastalıklarının tanı ve tedavisiyle ilgilenen cerrahi bir tıp dalıdır. Bu alanda kırık-çıkık tedavileri, eklem protezleri, omurga hastalıkları, spor yaralanmaları, çocuk ortopedisi ve kemik tümörleri gibi birçok konu yer almaktadır. Yapay zeka (YZ) ve makine öğrenimi (MÖ), son yıllarda ortopedi alanında önemli bir yer edinmiştir. Özellikle büyük veri analizi, görüntü işleme ve klinik karar destek sistemlerinde kullanılan YZ/MÖ teknolojileri; tanı, tedavi planlama, komplikasyon öngörüsü ve kişiselleştirilmiş rehabilitasyonda fayda sağlamaktadır. Total eklem protezi gibi uygulamalarda cerrahlara destek olan bu sistemler, maliyet etkinliği ve hasta bakım kalitesi açısından da avantaj sunar. Ancak yüksek kaliteli veri ihtiyacı, model karmaşıklığı ve geliştirme sürecinin zorlukları gibi sınırlamaları da bulunmaktadır. Bu araştırmanın amacı, ortopedi alanında YZ ve MÖ kullanımını güncel literatür eşliğinde değerlendirmektir.

Anahtar kelimeler: Ortopedi, yapay zeka, makine öğrenmesi

Giriş

Ortopedi ve travmatoloji bilim dalı, kas-iskelet sistemi hastalıklarının, yaralanmalarının ve deformitelerinin tanı, tedavi ve cerrahi müdahaleleriyle ilgilenen cerrahi bir tıp dalıdır. Bu bilim dalı, kırık-çıkık tedavileri (travmatoloji), eklem protez cerrahisi (artroplasti), omurga hastalıkları (skolyoz, bel fıtığı), pediatrik ortopedi (doğumsal kalça çıkığı gibi), spor yaralanmaları (menisküs, ön çapraz bağın (ACL) yırtıkları), el cerrahisi ve kemik tümörlerinin tedavisi gibi birçok hastalığın yönetiminde rol oynar¹.

Yapay zeka (YZ), genellikle insanların müdahale etmesini gerektiren sorunları çözen algoritmalar olarak tanımlanır. Makine öğrenimi (MÖ), YZ'nin karmaşık programlama olmadan öğrenmesine olanak tanıyan bir alt kümesidir. MÖ iki alt gruba ayrılabilir. (I) Denetimli öğrenme: İnsanlardan talimatlar gerektirir. (II) Denetimsiz öğrenme: Makinenin kendi kendine öğrendiği ve verileri kendi bulduğu kalıplarda sınıflandırdığı ve potansiyel olarak henüz insan kuralları tarafından tanınmayan kalıplar kullandığı tahmin edilmektedir².

Correspondence Address / Yazışma Adresi

Mehmet Kurt, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Ortopedi ve Travmatoloji Anabilim Dalı, Türkiye e-mail: dr_mehmet91@hotmail.com

2026;35(2):97-106

doi:10.17827/aktd.1681629

Geliş tarihi/ Received: 22.04.2025

Kabul tarihi/ Accepted: 02.04.2026

Günümüzde YZ ve MÖ tıp alanında önemli ölçüde yer almaktadır³. YZ alanındaki ilerlemeler ve elektronik tıbbi kayıt koleksiyonlarında büyük miktarda verinin bulunması, ortopedide araştırma ve pratik uygulama için fırsatlar yaratmıştır^{4,5}.

Ortopedistler, yüksek kaliteli tıbbi bakım hedeflerine ulaşmak için YZ ve MÖ'yi giderek daha fazla benimsemektedir. YZ sistemleri, özellikle total eklem artroplastisi gibi alanlarda karar destek mekanizması olarak cerrahlara daha verimli ve hatasız çalışma imkanı sunarken, görüntü işleme, veri analizi ve klinik karar süreçlerinde maliyet etkin çözümler üreterek hasta bakım kalitesini artırmaktadır. Bu nedenle modern ortopedik uygulamalarda YZ teknolojileri vazgeçilmez bir yardımcı haline gelmiştir⁵. YZ, ortopedik görüntüleme, robotik cerrahide (protez yerleşim planlaması), komplikasyon tahmininde ve kişiselleştirilmiş rehabilitasyon programlarında giderek daha fazla kullanılmaktadır^{2,4}. MÖ, çok miktarda verinin işlenmesine olanak sağlar. Ortopedistler, tablo verilerini analiz etmede, tıbbi görüntüleme ve metinden kavramları çıkarmada MÖ'ni kullanmaktadır. Mevcut çalışmalar, radyografilerdeki kırıkları tespit edebilen, implant tiplerini sınıflandırabilen ve yürüyüşü analiz ederek osteoartrit evresini değerlendirebilen modelleri araştırmıştır. Bununla birlikte, MÖ'nin yüksek kaliteli veri ihtiyacı, aşırı uyum riski, zaman alan geliştirme döngüsü ve sınırlı görev kapsamı gibi sınırlamaları vardır⁵.

Bu derleme çalışmasında YZ/MÖ yöntemlerinin ortopedi alanında kullanımı konusunun güncel literatür eşliğinde irdelenmesi amaçlandı.

Yöntem

Bu araştırma, PubMed ve Google Scholar veri tabanlarında "ortopedi" ve "yapay zeka + "AI + +" makine öğrenmesi"+ "derin öğrenme"+ "robotik cerrahi" anahtar kelimeleri ile tarama yapılarak hazırlanmıştır. Çalışmaya 2000-2024 yılları arasındaki yayınlanan 112 adet klinik çalışmalar ve sistematik derlemeler incelenmiştir.

Dahil edilme kriterleri şu şekilde belirlenmiştir:

- ortopedi alanında yapay zekâ, makine öğrenimi, derin öğrenme veya ilişkili hesaplamalı yöntemlerin kullanımını ele alan yayınlar;
- tanı, görüntü analizi, sınıflandırma, prognoz tahmini, cerrahi planlama, robotik uygulamalar, rehabilitasyon ya da klinik karar destek sistemleri gibi ortopedik uygulama alanlarına odaklanan çalışmalar;
- tam metnine erişilebilen yayınlar;
- İngilizce yayımlanmış çalışmalar.

Dışlama kriterleri ise şu şekilde tanımlanmıştır:

- ortopedi ile doğrudan ilişkili olmayan yapay zekâ uygulamalarını ele alan yayınlar;
- yalnızca genel yapay zekâ kavramlarını tartışan, ancak ortopedik pratiğe özgü veri, yöntem veya klinik bağlam sunmayan çalışmalar;
- kongre özeti, tez, poster bildirisi, teknik rapor veya tam metnine ulaşılamayan yayınlar;
- yinelenen kayıtlar;
- İngilizce dışındaki dillerde yayımlanmış çalışmalar.

Yapay zekanın tanımı, makine öğrenimi ve derin öğrenme

YZ, John McCarthy tarafından bilgisayarların en az insan müdahalesi veya hiç müdahalesi olmadan desen tanıma yoluyla görevleri yerine getirmeyi öğrenebileceği teorisi olarak ortaya atılan bir terimdir⁶. YZ'nin daha modern ve doğru tanımı, geleneksel olarak insan zekası gerektiren sorunları çözme yeteneği sağlayan algoritmaların uygulanmasıdır⁷. YZ, makine öğrenimi (MÖ) de dahil olmak üzere çok çeşitli alt alanları kapsayan bir şemsiye terim olarak düşünülebilir; bu da derin öğrenme (DÖ) adı verilen bir alt alanı içerir⁸. Uygun fiyatlı hesaplama gücünün hızla artması ve son derece büyük veri kümelerinin ("Büyük Veri") katlanarak artmasıyla birlikte, YZ, benzeri görülmemiş bir ölçekte salt teoriden somut uygulamaya

dönüşmüştür⁷. YZ'nın amacı, bir makinenin (bilgisayarın) insan performansına denk veya onu aşabilen belirli görevleri gerçekleştirmesini sağlamaktır. Bilgisayar gücü, veri depolama ve yüksek kaliteli verilerin kullanılabilirliğindeki ilerlemeler, YZ'nın sağlık alanına yayılmasını sağlamıştır. Görüntü tanıma, ameliyat öncesi risk değerlendirmesi, klinik karar verme ve büyük veri kümelerinin analizi gibi sorunlar, YZ tabanlı yöntemler kullanılarak ele alınmaya başlanmıştır⁹.

MÖ eğitimi, denetimli (supervised) veya denetimsiz (unsupervised) şekilde gerçekleştirilebilir¹⁰. Denetimli öğrenmede, eğitim verileri insanlar tarafından etiketlenir. Örneğin, bir MÖ algoritmasından bir radyografide artrit tespit etmesi isteniyorsa, artritlik özellikler (eklem aralığı kaybı, subkondral skleroz gibi) ve ilgili klinik bilgiler (non steroid anti inflamatuvar kullanımı, hasta bildirimli sonuçlar vb.) öncelikle bir uzman tarafından işaretlenmeli ve "artrit var" veya "normal diz" şeklinde sınıflandırılmalıdır. Algoritmanın doğru desenleri tanıyabilmesi ("artrit varlığı/yokluğu") için yüzlerce veya binlerce doğru etiketlenmiş örneğe ihtiyacı vardır. Ancak, hatalı etiketleme, algoritmada yanlılığa (bias) ve yanlış sonuçlara yol açabilir¹¹. Denetimli MÖ'de veri kalitesi ve doğru etiketleme, modelin performansını doğrudan etkiler⁹.

Yapay zekanın ortopedideki uygulama alanları

Ortopedi araştırmalarında MÖ kullanımı, 2010-2017 yılları arasında yayınlanan makale sayısında on kat artış göstermiştir¹². 2021 itibarıyla, ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından ortopedi alanında kullanımı onaylanan 6 adet MÖ destekli görüntü analiz sistemi bulunmaktadır. Bu sistemler primer ve sekonder osteoporoz, servikal omurga kırıkları, vertebral kompresyon kırıkları, kaburga kırıkları ve osteoartrit tanısını radyografiler veya bilgisayarlı tomografi görüntüleri üzerinden yapabilmektedir¹³. MÖ temelli ortopedi araştırmalarında en çok çalışılan konular arasında osteoartrit, kemik ve kırıkta segmentasyonu, omurga patolojilerinin tespiti, protez üretim sınıflandırması, kemik yaşı değerlendirmesi ve yürüyüş paternlerinin analizi yer almaktadır¹².

Tanı ve görüntüleme

Literatür incelendiğinde, YZ ve MÖ algoritmalarının, ortopedik görüntülemelerde kırık ve diğer patolojilerin tespitinde klinisyenlerle karşılaştırıldığı, hatta bazı durumlarda daha üstün performans göstererek tanılarda doğruluğu artırmakta ve klinik karar sürecini desteklediğine yönelik birçok bilimsel kanıt mevcuttur¹⁴⁻¹⁹.

El bileği, humerus, kalça ve femur gibi kırıkların teşhisinde MÖ'nin bir alt kümesi olan DÖ modellerinin etkinliği, 5.434 görüntüyü temsil eden 17 çalışmanın meta-analizi ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, modellerin sırasıyla 0,87 ve 0,91'lik bir havuzlanmış duyarlılık ve özgüllüğe sahip olduğunu göstermiştir¹⁴.

Groot ve arkadaşları¹⁵, MÖ modellerini kas-iskelet sistemi görüntülemelerini yorumlayan klinisyenlerle karşılaştıran sistematik bir inceleme gerçekleştirmiştir. Çalışma, ML modellerinin radyografileri yorumlamada klinisyenlerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. MÖ modellerinin ayrıca humerus, radius, el bileği, el, ayak bileği ve intertrokanterik kalça kırığı dahil olmak üzere kemik kırıklarını tespit ederken manyetik rezonans görüntüleme (MR) ve radyografileri değerlendirmede radyologlar ve ortopedik cerrahlarla eşit olduğu bulunmuştur. Modeller ayrıca kalça osteoartritini, genel anormallik tespiti edebilmiş ve tüberküloz ile piyojenik spondilit arasında ayrım yapabilmıştır¹⁵.

Lindsey ve ekibinin yaptığı çalışma¹⁶, MÖ destekli tanı sistemlerinin klinisyenlerin el bileği kırıklarını tespit performansını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Araştırma sonuçlarına göre, MÖ algoritmalarıyla desteklenen klinisyenlerin tanı doğruluğu %47 oranında artarken, yanlış yorumlama oranlarında belirgin düşüş gözlemlenmiştir ($p<0.001$). Bu bulgular, YZ destekli tanı sistemlerinin ortopedik görüntüleme alanında klinik karar verme süreçlerini iyileştirme potansiyelini açıkça göstermektedir¹⁶. Bien ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada¹⁷, MÖ destekli sistemlerin diz MR'lerinde, özellikle ACL yırtıklarının tespitinde klinisyenlerin performansını önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Sonuçlar, MÖ destekli tanının özgüllük değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir artışa neden olduğunu göstermiştir ($p<0.001$)¹⁷. Bien ve ekibinin geliştirdiği MRNet modeli, diz MR görüntülerinde genel anormallikleri (%93,7 AUC), ACL yırtıklarını (%96,5 AUC) ve menisküs yırtıklarını (%84,7 AUC) yüksek doğrulukla tespit etmiştir. Modelin klinisyenlere entegre edilmesi, özellikle ACL yırtıklarında uzmanların özgüllüğünü anlamlı ölçüde artırmıştır ($p<0.001$). Stanford (1370 vaka) ve Hırvatistan'dan (917 vaka) alınan verilerle eğitilen sistem, farklı merkezlerde de

başarılı sonuçlar vermiştir. Bulgular, derin öğrenmenin radyolog performansını destekleyerek tanı süreçlerini optimize edebileceğini göstermektedir¹⁸. Hung ve ekibinin geliştirdiği YOLOv4 tabanlı DÖ modeli, diz MR'larında menisküs yırtıklarını tespit etmede %95,8 doğruluk (internal validasyon) ve %78,8 doğruluk (eksternal validasyon) oranlarına ulaşmıştır. Cerrahi raporların altın standart olarak kullanıldığı bu çalışmada, modelin performansı bir radyologun performansını anlamlı ölçüde aşmıştır (0,958 vs 0,903 doğruluk, $p < 0,05$)¹⁹.

Chee ve arkadaşlarının çok merkezli retrospektif çalışmasında²⁰, DÖ algoritmasının dijital radyografilerde femur başı osteonekrozu tanısında radyologlarla karşılaştırılabilir duyarlılık (%84,8 vs %77,6-82,4) gösterdiği saptanmıştır. Algoritma, özellikle erken evre (prekollaps) lezyonlarda deneyimsiz radyologlardan anlamlı derecede üstün performans sergilemiştir (%75,9 vs %57,4) ve yüksek özgüllük (%97,2) bulunmuştur. Bu çalışmanın bulguları, DÖ tabanlı sistemlerin klinik tanıyı desteklemede potansiyelini ortaya koymaktadır²⁰.

Yang ve arkadaşlarının 17 çalışmayı dahil ettikleri meta-analiz çalışması, DÖ algoritmalarının ortopedik kırık teşhisinde yüksek tanısal doğruluk (%87 duyarlılık, %91 özgüllük) gösterdiğini ve özellikle uzun kemik kırıklarında daha da yüksek performans sergilediğini (AUC: 0,99) ortaya koymuştur. Bulgular, bu teknolojinin klinik ön sınıflandırmada yardımcı bir araç olarak kullanılabileceğini, ancak kırık lokalizasyonu konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir¹⁴. Bir diğer güncel metaanaliz çalışmasında, YZ ve klinisyenlerin kırık tespitindeki tanı performansını karşılaştırmak amacıyla 2018-2021 yılları arasında yayınlanan 42 çalışma analiz edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, YZ'nin iç ve dış doğrulama testlerinde klinisyenlerle benzer duyarlılık (%91-92) ve özgüllük (%91-94) sergilediği görülmüştür. Çalışmaların %52'sinde yüksek önyargı riski tespit edilse de YZ'nin kırık tespitinde klinisyenlere yardımcı bir araç olarak umut vaat ettiği vurgulanmıştır. Bulgular, YZ'nin radyolojik değerlendirmelerde tanıyı destekleyebileceğini göstermektedir²¹.

Bedrikovetski ve ekibinin metaanaliz çalışması²², BT görüntülerinde YZ tabanlı vücut kompozisyonu analizlerinin performansını 24 çalışma üzerinden değerlendirmiştir. DÖ modelleri, iskelet kası segmentasyonunda 0,941'lik ve 0,967'lik yüksek benzerlik katsayılarına ulaşırken, subkutan yağ dokusu, visseral yağ dokusu ve kemik segmentasyonunda sırasıyla 0,967, 0,963 ve 0,970 değerleri elde etmiştir. Bulgular, YZ'nin sarkopeni tanısında otomasyon sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermekle birlikte, klinik uygulamaya entegrasyon için daha standartlaştırılmış protokollere ihtiyaç olduğunu vurgulamaktadır.

Ortopedi alanında yapay zeka destekli robotik cerrahi uygulamaları

Robotik cerrahi, tıp bilimi, robotik ve mühendisliği birleştiren minimal invaziv cerrahinin bir evrimidir. Robot destekli cerrahi olarak da bilinen bu teknik, karmaşık prosedürlerde ve küçük anatomik alanlarda cerrahların hareketlerinin hassasiyetini artırmak için cerrahi prosedürler sırasında özel robotik platformların kullanılmasını içeren sofistike bir tekniktir. Bu sistem, veri kablolarıyla bir bilgisayara bağlı cerrahın ana konsolu ve kontrol cihazlarından oluşan iki ana sistem içerir. Bu sistem el titremelerinin filtrelenmesine olanak tanıyarak esnekliği artırır ve istemsiz yanlışlıkları en aza indirir²³.

YZ'nin tıp alanındaki gelişimi, cerrahi planlama ve robotik ortopedik cerrahide giderek daha kritik bir rol üstlenmesine yol açmaktadır. Klinisyenler, veri bilimcileri ve teknoloji uzmanları arasındaki disiplinlerarası iş birliği, sağlık hizmetlerinde yeni ufukların keşfedilmesini sağlamaktadır. YZ'nin cerrahideki dönüştürücü etkisi, tıptaki bilimsel ilerlemeleri yansıtırken; ileri teknolojilerin klinik uzmanlıkla bütünleşerek hasta bakım kalitesini artırması beklenmektedir²⁴. YZ destekli cerrahi teknolojiler, preoperatif planlama (doğruluk ve otomasyon), intraoperatif yönlendirme (gerçek zamanlı navigasyon) ve robotik cerrahi (hassas kontrol) olmak üzere üç temel alanda gelişmektedir. Her alan kendine özgü teknik zorluklar barındırmakla birlikte, cerrahi karar destek sistemlerinden robotik müdahalelere kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu disiplinler, cerrahi süreçlerin optimizasyonu ve hasta sonuçlarının iyileştirilmesi için multidisipliner yaklaşımlar gerektirmektedir²⁵. Güncel literatürde, ortopedik cerrahide YZ'nin; (1) kişiselleştirilmiş tedavi planları oluşturduğu, (2) robotik sistemlerle artroplastî hassasiyetini artırdığı, (3) 3D planlama ve gerçek zamanlı analizle cerrahi sonuçları iyileştirdiği bildirilmektedir²⁶.

Ortopedik cerrahide robot kullanımı ivme kazanmakta olan yeni bir alandır²⁷. Ortopedik cerrahideki ilk robotik uygulama 1992 yılında ROBODOC sistemiyle başlamış²⁸, önce kalça artroplastisiyle, ardından diz

artroplastisiyle devam etmiştir²⁷. CASPAR (Ortho- Maquet/URS, Schwerin, Almanya) bir başka erken otonom sistemdi. ROBODOC'a benzer şekilde total kalçaartroplastisi ve total diz artroplastisi için kullanılan görüntü kılavuzlu, aktif bir robottu²⁹. RIO® Robotik Kol İnteraktif Ortopedik Sistem (MAKO Surgical Corp., Lauderdale, FL, ABD), cerrahın aktif katılımını gerektiren ve diz artroplastisinde cerraha yardımcı olan haptik bir robotik sistemdir. Hastanın anatomisinin üç boyutlu bir modelini oluşturarak cerrahın ameliyat öncesi bir plan geliştirmesini sağlar. Bu sistemler femur ve tibiya yerleştirilen pinler sayesinde ameliyat sırasında navigasyon sağlar. Dönen çapak, RIO robotik kolunun kemiği rezeke etmesini sağlar³⁰. Tüm yeni tekniklerde olduğu gibi, robotik cerrahinin ilk kullanımlarında patellar tendon rüptürü, peroneal sinir yaralanması, artmış kanama miktarı ve uzamış ameliyat süresi gibi ciddi komplikasyonlar bildirilmiştir³¹.

Başlangıç dönemlerinde operasyon süresinin uzunluğuna bağlı olarak ortaya çıkan kan kaybı ve enfeksiyon gibi sorunlar, zaman içinde öğrenen sistemlerin katkısıyla büyük ölçüde aşılmıştır³⁰. Cerrahi planlamada, bileşen implantasyonunun doğruluğunda ve hasta güvenliğinde önemli gelişmeler sağlama potansiyeline sahiptir²⁷. Robotik sistemler temel olarak iki kategoriye ayrılır: haptik ve aktif. Haptik (cerrah rehberli) sistemler, ameliyatın başarı oranını artırmak için kullanıcının fiziksel manipülasyonlarından oluşur. Aktif veya otonom sistemler ise ameliyat öncesi eksiksiz bir planı takip eder ve ameliyat cerrahın müdahalesi olmadan gerçekleştirilir³².

1990'ların başında total kalça artroplastisi ilk robotik ortopedik cerrahi uygulaması olmuş, bunu diz artroplastisi izlemiştir^{30,33}. Daha sonra omurga, ortopedik RS'de de en popüler cerrahi prosedürlerden biri olan pedikül vidası implantasyonu ile onarılmıştır³³. 2014'ten bu yana ciddi bir artış gösteren çalışmalar, robotik cerrahinin hizalamayı, uzuv uzatmayı ve hasta memnuniyetini artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, finansal ve klinik engellere rağmen, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki birçok cerrah yalnızca geleneksel, robot yardımlı olmayan ortopedik cerrahi yapmaya devam etmektedir³⁴. İlginç bir şekilde, kırık fiksasyonu travma cerrahisinde gelecekteki ilerlemeler için potansiyele sahip görünmektedir³⁵.

Son dönemde literatürde oldukça başarılı olduğu bildirilen bu sistemlerin uzun dönem sonuçlarına ilişkin veriler oldukça sınırlıdır. Ayrıca cerrahi robotun ameliyat sırasında arızalanma oranının %0,4-4,6 arasında değiştiği bildirilmiştir^{36,37}.

Robotik teknoloji, total diz artroplastisinde hizalamayı ve doku dengesini iyileştirme potansiyeliyle giderek daha fazla ilgi görmektedir. Özellikle yarı-aktif haptik sistemler, cerrahlara dokunsal geri bildirim sağlayarak daha doğru implant yerleşimine olanak tanır. Kısa vadeli çalışmalar, radyografik sonuçlarda iyileşme olduğunu gösterse de fonksiyonel faydalar ve maliyet etkinliği konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Ancak, erken sonuçlar umut verici olup, robot destekli sistemlerin total diz artroplastisinde gelecekte daha yaygın kullanımını destekleyebilir³⁸. Güncel bir derleme çalışmasında, omuz eklem artroplastisinde ve yumuşak doku cerrahilerinde (artroskopi, tendon transferi, brakiyal plexus cerrahisi) robot destekli tekniklerle ilgili literatürü incelemektedir. Robotik cerrahi, ortopedide özellikle kalça ve diz protezlerinde hassasiyet ve planlama açısından önemli ilerlemeler sağlamıştır. Omuz cerrahisinde hasta özel planlama, intraoperatif navigasyon ve robot yardımlı artroplasti kullanılmaya başlanmıştır. Yumuşak doku cerrahilerinde de robotik uygulamalar denenmektedir. Ayrıca, robot destekli rehabilitasyonun da potansiyel faydaları olduğu düşünülmektedir. Ancak bu teknolojilerin etkinliğini ve güvenliğini belirlemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır³⁹.

Robot destekli cerrahi, operasyon sırasında cerrahın robot hareketlerini kontrol etmesiyle hassasiyet ve kolaylık sağlar. Ancak, kullanıcı kaynaklı hatalar tamamen önlenemez ve karmaşık yüzeylerde (frezeleme, kesme gibi işlemlerde) hassasiyet operatörün becerisine bağlıdır. Özellikle spinal stenoz gibi durumlarda hassas kesiler veya yapışık dokuların çıkarılması gibi prosedürlerde, BT veya MR görüntüleri temel alınarak yüzeye uygun hareket planlaması yapılır. Operatör tarafından kabaca işaretlenen noktalardan yola çıkan sistem, uygun yolu ve alet yönlendirmesini otonom olarak hesaplar, kontrol sonrası işlemi hatasız gerçekleştirir. Bu sayede robot kullanım eğitimi ihtiyacı azalırken hata payı en aza indirilir. Yöntem, simülasyon ve 3D baskılı lomber vertebranın Stäubli TX2-60 robotuyla deneysel uygulamasında test edilmiş olup da Vinci gibi diğer robotik sistemlere de uyarlanabilir⁴⁰.

Omurga cerrahisinde ise robotik sistemlerin benimsenmesi daha yavaş olmakla birlikte, bu alandaki potansiyel uygulamalar cerrahlar arasında büyük heyecan uyandırmaktadır. Omurga cerrahisi, dar cerrahi

koridorlar içinde hayati yapıların hassas manipülasyonunu ve uzun süreli tekrarlayan görevleri gerektirebilir; bu da robotik asistanın insan becerisini tamamlamak için ideal bir çözüm sunmasını sağlar. Günümüzde, ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından omurga cerrahisinde kullanım için 4 farklı şirkete ait 7 robotik sistem onaylanmıştır. Mevcut klinik veriler, bu sistemlerin genel olarak doğru ve güvenli olduğunu göstermektedir. Ancak, robotik cerrahinin omurga alanında daha yaygın kabul görmesi için, robotik yardımın faydasını sorgulayan titiz karşılaştırmalı çalışmaların tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir⁴¹.

Robot destekli sistemlerin savunucuları, ameliyat öncesi planlamanın iyileştirilmesi ve cerrahinin daha iyi yürütülmesi yoluyla daha iyi hasta sonuçları tanımlamaktadır²⁶. İnsanlarla yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, robotların uzuv uzunluğunun ayarlanması, hasta memnuniyeti ve maliyet açısından insanlardan daha başarılı olduğunu göstermektedir³⁰.

Ancak, maliyetler, sınırlı bulunabilirlik, bu tür sistemlerin verimliliği ve güvenliğine ilişkin kanıt eksikliği ve uzun vadeli yüksek etkili çalışmaların yokluğu, bu sistemlerin yaygın olarak uygulanmasını kısıtlamıştır²⁷. Her yeni teknolojiye olduğu gibi hem YZ uygulamalarında hem de robotik cerrahi alanında yaşanan gelişmeler, maliyet/fayda analizleri açısından teknolojinin avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, mevcut çalışmalar her ne kadar yeni teknolojilerin insanlardan daha başarılı olduğunu gösterse de teknolojinin tecrübenin yerini alması ve geleneksel yöntemlerin uzun vadeli sonuçlarının yerini tamamen doldurması yakın gelecekte beklenmemektedir³⁰.

Ayrıca bir çalışmada, ortopedi cerrahisinde robotik ve navigasyon sistemleri hakkında hastaların bilgi düzeyini değerlendirmiştir. 98 hastadan alınan verilere göre, çoğu hasta bu teknolojilere aşina değildir ancak daha doğru ve hızlı cerrahi sağladığına inanmaktadır. Katılımcıların yarısı ameliyatlarının bir kısmının bu sistemlerle yapılmasına olumlu bakarken, çoğu kişi bu teknolojilerin daha pahalı olduğunu düşünmektedir. Sonuç olarak, hastaların bu sistemler hakkında daha fazla bilgilendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır⁴².

Postoperatif rehabilitasyon ve fizik tedavi

Yakın zamanda yayınlanan, YZ'nin ön çapraz bağ (ÖÇB) yaralanmalarının yönetimindeki rolünü inceleyen bu sistematik derlemede, 2020 Ağustos'a kadar PubMed, MEDLINE ve diğer tıbbi veritabanlarında yayınlanan 19 çalışma analiz edilmiş olup, YZ uygulamalarının ÖÇB yaralanmalarının tahmini (n=2), teşhisi (n=12), cerrahi tedavisi (n=1) ve rehabilitasyonu (n=4) aşamalarında kullanıldığı görülmüştür. Çalışmalarda YZ'nin görüntü analizi, otomatik hasta kaydı değerlendirmesi, optik takip sistemleriyle fizik muayene desteği ve rehabilitasyon sürecinin optimizasyonu gibi çeşitli alanlarda başarıyla uygulandığı tespit edilmiş, geleneksel yöntemlerle benzer veya daha iyi sonuçlar alındığı belirtilmiştir. Ancak, bu teknolojinin yaygın klinik kullanıma girebilmesi için standardizasyon, veri güvenliği ve klinik validasyon gibi konularda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır⁴³. Rashkovska ve arkadaşları, ön çapraz bağ ameliyatı sonrası kriyoterapiye iç diz sıcaklığını tahmin etmek için cilde yerleştirilen dört sensörle çalışan bir makine öğrenimi algoritması geliştirmiştir. Bilgisayar simülasyonları ve gerçek hasta verileriyle test edilen model, iç sıcaklık tahminlerinde yüksek doğruluk göstermiş, kişiselleştirilmiş soğutma protokolleri için YZ'nin potansiyel rolünü ortaya koymuştur⁴⁴. ÖÇB rekonstrüksiyonu sonrası rehabilitasyon sürecinde en önemli risk faktörlerinden biri, sağlıklı bireylere göre 15 kat daha yüksek olan yeniden yaralanma riskidir. Bu riskin önemli bir nedeni, özellikle sporcuların rehabilite olmamış dizlerle spora erken dönüş yapmalarıdır. Günümüzde rehabilitasyon programının sonlandırılmasına karar vermek için kullanılabilecek tek bir objektif ölçüt bulunmamaktadır. Ancak Richter ve ark.'nın geliştirdiği MÖ algoritması, postoperatif 9. aya kadar rekonstrükte diz ile sağlıklı diz arasında >%70 doğrulukla ayırım yapabilmektedir. Bu bulgular, biyomekanik asimetrielerin belirlenmesi yoluyla rehabilitasyon sürecinin kişiselleştirilmesine ve kişiye özel terapi programları geliştirilmesine olanak sağlayabileceğini göstermektedir⁴⁵.

Cerrahi eğitim

Tıp eğitimi karmaşık ve uzun bir süreçtir. Sadece kitap ve örnekler üzerinden eğitim, gelişimi sınırlayabilir. YZ teknolojilerinin eğitime entegrasyonu, öğrenme süreçlerini zenginleştirmiştir. Problem bazlı YZ destekli öğrenme, öğrencilerin klinik bilgi ve anlayışlarını artırmıştır. YZ destekli cerrahi eğitim sistemleri, öğrencilerin performansını ve özgüvenini geliştirmiştir. Ayrıca, simülasyon ve YZ birleşimiyle geliştirilen sistemler, objektif geri bildirimlerle öğrenmeyi desteklemiştir⁴⁶⁻⁴⁸. Eğitim açısından simülasyon, özellikle

hasta maruziyetine ilişkin mevcut sınırlamalar göz önüne alındığında, ortopedik cerrahi eğitimine ve beceri kazanımına faydalı bir yardımcı haline gelmiştir⁴⁹.

YZ, öğrencilerin ruh sağlığı ve akademik performanslarının izlenmesinde de kullanılmıştır. 3D baskı (3DP) ve sanal gerçeklik (VR) teknolojileriyle, öğrenciler 3 boyutlu anatomi çalışabilir, model üzerinde ameliyat pratiği yapabilir ve risksiz şekilde simülasyon eğitimi alabilir. Bu teknolojiler artık yaygın şekilde tıp eğitiminde kullanılmaktadır^{50,51}.

Lum'un çalışmasında, ChatGPT'nin Ortopedi Eğitim Sınavı'ndaki performansı, 207 soruya verdiği yanıtlarla analiz edilmiştir. ChatGPT, soruların %47'sine doğru cevap vermiş ve 1. yıl uzmanlık öğrencileri ile benzer bir performans sergilemiştir, ancak daha karmaşık sorularda doğruluk oranı düşmüştür⁵². Cuthbert ve arkadaşları, ChatGPT'nin FRCS (Fellowship of the Royal College of Surgeons) Ortopedi sınavının ilk bölümünü geçme yeteneğini değerlendirmiştir. YZ, %35,8 skorla başarı gösterememiş ve travma alanında %0'lık çok düşük bir performans sergilemiştir⁵³. Bu çalışmalar, YZ'nin ortopedi eğitiminde bilgi tabanlı sorular için faydalı olabileceğini, ancak bilgi uygulama konusunda sınırlamaları olduğunu göstermektedir^{52,53}. Massey ve arkadaşlarının yaptığı bir başka çalışmada, ortopedi ihtisası gören uzmanlık öğrencilerinin performansları, ChatGPT-3.5 ve GPT-4 ile karşılaştırılmıştır. 180 ortopedi değerlendirme sorusu üzerinden yapılan testte, uzmanlık öğrencileri %74,2; GPT-4 %47,2; ve ChatGPT-3.5 %29,4 başarı oranı göstermiştir. Uzmanlık öğrencileri, her iki YZ modelini de önemli ölçüde geride bırakmıştır, ancak GPT-4, ChatGPT-3.5'ten daha iyi performans sergilemiştir. Her iki YZ, metin tabanlı sorularda daha başarılı olurken, ChatGPT-3.5 metin tabanlı sorularda %37,8, görsel tabanlı sorularda ise %22,4 doğru yanıt verirken; GPT-4 metin tabanlı sorularda %61,0, görsel tabanlı sorularda ise %35,7 doğru cevaplar vermiştir. Uzmanlık öğrencilerinin performansı ise metin ve görsel sorular arasında anlamlı bir fark göstermemiştir. Çalışma, GPT-4'ün ChatGPT-3.5'ten daha iyi olduğunu, ancak her iki YZ modelinin de ABOS yazılı sınavını geçmeyeceğini öngörmüştür⁵⁴.

Chen ve arkadaşlarının çalışması Bing AI GPT 4.0 ve ChatGPT 3.5'in Ortopedi Eğitim Sınavı (OITE) üzerindeki performansını karşılaştırmıştır. Bing AI GPT 4.0, ortalama %80 başarı ile ChatGPT 3.5'in %55'lik performansını ve ortopedi uzmanlık öğrencilerinin %62'lik ortalama puanını geride bırakmıştır. Bing AI, derin bilgi aramaları ve kaynak alıntıları ile yanıtlar arasında mantıklı bir bağlam sunarak tıbbi eğitimde etkileşimli bir öğrenme aracı olarak potansiyel göstermektedir⁵⁵.

Ortopedi eğitiminde, YZ, kişiselleştirilmiş öğrenme materyalleri, gerçek zamanlı açıklamalar ve sanal simülasyonlar gibi uygulamalarla önemli faydalar sunmaktadır. Ancak, YZ'nin entegrasyonu, doğruluk, önyargı, tutarsız çıktıların üretimi, etik ve düzenleyici kaygılar gibi zorluklarla karşı karşıyadır. Ayrıca, YZ modellerinin, özellikle ortopedi sınavlarında henüz tatmin edici bir performans sergilememesi, klinik akıl yürütme ve bilgi uygulama açısından daha fazla gelişme gerektirdiğini göstermektedir. Gelecekteki araştırmalar, bu zorlukları aşarak YZ modellerini tıbbi içerikler için optimize etmeli, etik kullanım pratiklerini geliştirmeli ve bu teknolojilerin eğitim üzerindeki uzun vadeli etkilerini değerlendirmelidir. YZ'nin bilgi tabanını genişletme, klinik görüntüleri daha doğru yorumlama ve çıktıları güvenilir hale getirme potansiyeli, ortopedi eğitiminde devrim yaratma kapasitesine sahiptir. Bu teknoloji, gelecekteki ortopedik eğitimciler için daha etkili ve uyarlanabilir bir öğrenme ortamı yaratma yolunda önemli bir adım olabilir⁵⁶.

Kişiselleştirilmiş tedaviler ve radyomiks

Jayakumar ve arkadaşlarının çalışmasında, ileri düzey diz osteoartriti (OA) olan hastalarda, YZ destekli bir hasta karar destek aracının etkileri araştırılmıştır. Bu randomize klinik çalışmada, hasta eğitimi, tercih değerlendirmesi ve kişiselleştirilmiş sonuç tahminlerini içeren YZ tabanlı karar destek aracı; yalnızca eğitim materyali alan kontrol grubu ile karşılaştırılmıştır. Çalışma bulgularına göre, YZ destekli araç kullanılan grupta karar kalitesi, ortak karar verme düzeyi, hasta memnuniyeti ve fonksiyonel sonuçlar anlamlı ölçüde daha iyi bulunmuştur. Özellikle Knee OA Decision Quality Instrument (K-DQI) skorları YZ destekli grupta belirgin şekilde yüksek saptanmıştır (fark: %20; P < ,001). Bununla birlikte, konsültasyon süresi, total diz protezi uygulanma oranı ve tedavi uyumu açısından gruplar arasında anlamlı bir fark saptanmamıştır. Bu sonuçlar, bireyselleştirilmiş ve veri temelli yaklaşımlar içeren YZ destekli karar araçlarının, hastaların tedavi sürecine daha bilinçli katılımını sağladığını ve hasta deneyimini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir⁵⁷.

Güncel bir sistematik derleme çalışmasında, rejeneratif ortopedide YZ uygulamalarının potansiyel etkileri incelenmiş ve MÖ ile DÖ) tekniklerinin, kök hücre tedavisi, PRP uygulamaları ve doku mühendisliği gibi alanlarda kişiselleştirilmiş tedavilerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynadığı vurgulanmıştır. Çalışma, YZ'nin hasta verilerini analiz ederek tedavi sonuçlarını optimize etme ve invaziv olmayan çözümler sunma konusundaki avantajlarına dikkat çekerken, klinik entegrasyon önündeki etik ve teknik zorlukların da altını çizmiştir. Araştırmacılar, YZ destekli rejeneratif ortopedinin gelecekte daha geniş klinik uygulamalara yol açabileceğini, ancak standartlaştırma, veri güvenliği ve etik düzenlemeler gibi konuların çözülmesi gerektiğini belirtmiştir⁵⁸.

Radyomiks, tıbbi görüntülerden matematiksel özellikler çıkararak tanı, prognoz ve tedavi yanıtını öngörmede kullanılan bir yöntemdir. YZ ile birlikte kemik tümörlerinin tanısı, evrelemesi, metastaz ve nüks tahmini gibi birçok alanda başarılı sonuçlar vermektedir⁵⁹.

Radyomiks, 2012 yılında ortaya çıkan ve tıbbi görüntülerden otomatik olarak çok sayıda nicel özellik çıkaran bir görüntüleme analiz yöntemidir. Bu yöntem, klinik kararları desteklemek amacıyla görüntü verilerinin hızlı ve tekrarlanabilir şekilde analizini mümkün kılar. Radyomiks, tanı, prognoz ve tedavi gibi alanlarda bilgisayar destekli sistemlerin gelişmesiyle büyük ilerleme kaydetmiştir. Güvenilir radyomiks yöntemleri, görüntülerden özellik çıkarmı, bu bilgilerin bağımsız veri tabanlarında depolanması ve ardından klinik sonuçlar için veri madenciliği yapılmasını içerir⁵⁹⁻⁶¹. Özellikle osteosarkom, Ewing sarkomu ve kondrosarkom gibi primer kemik tümörlerinde etkili olup, tedavi planlamasında da yardımcı olabileceği düşünülmektedir⁵⁹. BT, MR ve PET gibi görüntüleme yöntemleriyle elde edilen veriler; tarama, tanı, takip, prognoz ve ilaç araştırmalarında kullanılmaktadır. TCIA, MedPix ve IDA gibi büyük veri tabanları bu alanda önemli kaynaklardır. Ancak yönetimsel zorluklar sürmektedir. Bu nedenle, radyomiksin etkinliği kanıtlanmış olsa da özellikle kemik tümörlerinde dikkatli ve bilinçli şekilde uygulanmalıdır^{60,61}.

Sonuç

YZ, ortopedi alanında görüntü tanıma, risk tahmini, hasta özelinde tedavi planlaması ve klinik karar destek sistemleri gibi çeşitli uygulamalarla giderek daha önemli hale gelmektedir. Büyük veri setleri, güçlü bilgisayarlar ve gelişmiş algoritmalar sayesinde YZ, hekimlerin tanı ve tedavi süreçlerini optimize edebilir, tıbbi hataları azaltacağı düşünülmektedir ve hasta sonuçlarını iyileştirebilir. Ancak, bu teknolojinin klinik uygulamaya tam olarak entegre edilebilmesi için etik sorunlar, veri güvenliği ve geleneksel yöntemlere üstünlüğünün kanıtlanması gibi zorlukların aşılması gerekmektedir. Ortopedi uzmanlarının YZ'yi benimseyerek hasta bakım kalitesini artırması önerilmektedir.

Kaynaklar

1. Orthopaedic surgery [Internet]. Cleveland (OH): Cleveland Clinic; c2023 [cited 2025 April 12]. Available from: <https://my.clevelandclinic.org/health/treatments/24801-orthopaedic-surgery>.
2. Salimi M, Parry JA, Shahrokhi R, Mosalamiaghili S. Application of artificial intelligence in trauma orthopedics: Limitation and prospects. *World J Clin Cases*. 2023;11:4231-40.
3. Liu PR, Lu L, Zhang JY, Huo TT, Liu SX, Ye ZW. Application of Artificial Intelligence in Medicine: An Overview. *Curr Med Sci*. 2021;41:1105-15.
4. Atik OŞ. Artificial intelligence, machine learning, and deep learning in orthopedic surgery. *Jt Dis Relat Surg*. 2022;33:484-85.
5. Padash S, Mickley JP, Vera Garcia DV, Nugen F, Khosravi B, Erickson BJ et al. An Overview of Machine Learning in Orthopedic Surgery: An Educational Paper. *J Arthroplasty*. 2023;38:1938-42.
6. Topol EJ. Deep medicine: how artificial intelligence can make healthcare human again. 1st ed. New York: Basic Books; 2019.
7. Hashimoto DA, Rosman G, Rus D, Meireles OR. Artificial intelligence in surgery: promises and perils. *Ann Surg*. 2018;268:70-6.
8. Chollet F. Deep learning with Python. Shelter Island, New York: Manning Publications; 2018.
9. Myers TG, Ramkumar PN, Ricciardi BF, Urish KL, Kipper J, Ketoni C. Artificial Intelligence and Orthopaedics: An Introduction for Clinicians. *J Bone Joint Surg Am*. 2020;102:830-40. doi: 10.2106/JBJS.19.01128.
10. Galbusera F, Casaroli G, Bassani T. Artificial intelligence and machine learning in spine research. *JOR Spine*. 2019;2:e1044.
11. Urish KL, Keffalas MG, Durkin JR, Miller DJ, Chu CR, Mosher TJ. T2 texture index of cartilage can predict early symptomatic OA progression: data from the osteoarthritis initiative. *Osteoarthritis Cartilage*. 2013;21:1550-7.
12. Cabitza F, Locoro A, Banfi G. Machine Learning in Orthopedics: A Literature Review. *Front Bioeng Biotechnol*. 2018;6:75.
13. van Leeuwen KG, Schalekamp S, Rutten MJCM, van Ginneken B, de Rooij M. Artificial intelligence in radiology: 100 commercially available products and their scientific evidence. *Eur Radiol*. 2021;31:3797-804.

14. Yang S, Yin B, Cao W, Feng C, Fan G, He S. Diagnostic accuracy of deep learning in orthopaedic fractures: a systematic review and meta-analysis. *Clin Radiol*. 2020;75:713.e17–713.e28.
15. Groot OQ, Bongers MER, Ogink PT, Senders JT, Karhade AV, Bramer JAM et al. Does Artificial Intelligence Outperform Natural Intelligence in Interpreting Musculoskeletal Radiological Studies? A Systematic Review. *Clin Orthop Relat Res*. 2020;478:2751-64.
16. Lindsey R, Daluiski A, Chopra S, Lachapelle A, Mozer M, Sicular S, et al. Deep neural network improves fracture detection by clinicians. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2018;115:11591-6.
17. Bien N, Rajpurkar P, Ball RL, Irvin J, Park A, Jones E et al. Deep-learning-assisted diagnosis for knee magnetic resonance imaging: Development and retrospective validation of MRNet Saria S, ed. *PLOS Med*. 2018;15:e1002699.
18. Bien N, Rajpurkar P, Ball RL, Irvin J, Park A, Jones E et al. Deep-learning-assisted diagnosis for knee magnetic resonance imaging: Development and retrospective validation of MRNet. *PLoS Med*. 2018;15:e1002699.
19. Hung TNK, Vy VPT, Tri NM, Hoang LN, Tuan LV, Ho QT et al. Automatic Detection of Meniscus Tears Using Backbone Convolutional Neural Networks on Knee MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2023;57:740-9.
20. Chee CG, Kim Y, Kang Y, Lee KJ, Chae HD, Cho J et al. Performance of a Deep Learning Algorithm in Detecting Osteonecrosis of the Femoral Head on Digital Radiography: A Comparison With Assessments by Radiologists. *AJR Am J Roentgenol*. 2019;213:155-62.
21. Kuo RYL, Harrison C, Curran TA, Jones B, Freethy A, Cussons D et al. Artificial Intelligence in Fracture Detection: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Radiology*. 2022;304:50-62.
22. Bedrikovetski S, Seow W, Kroon HM, Traeger L, Moore JW, Sammour T. Artificial intelligence for body composition and sarcopenia evaluation on computed tomography: A systematic review and meta-analysis. *Eur J Radiol*. 2022;149:110218.
23. Morris B. Robotic surgery: applications, limitations, and impact on surgical education. *MedGenMed*. 2005;7:72.
24. Ahuja AS. The impact of artificial intelligence in medicine on the future role of the physician. *PeerJ*. 2019;7:e7702.
25. Gupta A, Singla T, Chennatt JJ, David LE, Ahmed SS, Rajput D. Artificial intelligence: A new tool in surgeon's hand. *J Educ Health Promot*. 2022;11:93.
26. Hasan S, Ahmed A, Waheed MA, Saleh ES, Omari A. Transforming Orthopedic Joint Surgeries: The Role of Artificial Intelligence (AI) and Robotics. *Cureus*. 2023;15:e43289.
27. Karthik K, Colegate-Stone T, Dasgupta P, Tavakkolizadeh A, Sinha J. Robotic surgery in trauma and orthopaedics: a systematic review. *Bone Joint J*. 2015;97-B:292-9.
28. Mittelstadt B, Paul H, Kazanzides P, Zuhars J, Williamson B, Pettitt R et al. Development of a surgical robot for cementless total hip replacement. *Robotica*. 1993;11:553–60.
29. Faust RA. *Robotics in Surgery: History, Current, and Future Applications*. New York: Nova Science Publishers. 2007.
30. Beyaz S. A brief history of artificial intelligence and robotic surgery in orthopedics & traumatology and future expectations. *Jt Dis Relat Surg*. 2020;31:653-5.
31. Siebel T, Käfer W. Clinical outcome following robotic assisted versus conventional total hip arthroplasty: a controlled and prospective study of seventy-one patients. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*. 2005;143:391–8.
32. Jahng KH, Kamara E, Hepinstall MS. Haptic robotics in total hip arthroplasty. In: Scuder G, Tria A, editors. *Minimally invasive surgery in orthopedics*. Cham: Springer; 2015. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-319-15206-6_131-1
33. Goradia VK. Computer-assisted and robotic surgery in orthopedics: where we are in 2014. *Sports Med Arthrosc Rev*. 2014;22:202-5.
34. Li C, Wang L, Perka C, Trampuz A. Clinical application of robotic orthopedic surgery: a bibliometric study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22:968.
35. Lang JE, Mannava S, Floyd AJ, Goddard MS, Smith BP, Mofidi A, Seyler TM, Jinnah RH. Robotic systems in orthopaedic surgery. *J Bone Joint Surg Br*. 2011 ;93:1296-9. Erratum in: *J Bone Joint Surg Br*. 2011;93:1679.
36. Kozlowski PM, Porter CR, Corman JM. Mechanical failure rate of DaVinci robotic system: Implications for pre-op patient counseling. *Journal of Urology*. 2006;175:372–3.
37. Lavery HJ, Thaly R, Albala D, Ahlering T, Shalhav A, Lee D et al. Robotic equipment malfunction during robotic prostatectomy: a multi-institutional study. *J Endourol*. 2008;22:2165–8.
38. Banerjee S, Cherian JJ, Elmallah RK, Jauregui JJ, Pierce TP, Mont MA. Robotic-assisted knee arthroplasty. *Expert Rev Med Devices*. 2015;12:727-35.
39. Lim JR, Chun YM. Robot-assisted orthopedic surgeries around shoulder joint: where we are? *Biomed Eng Lett*. 2023;13:553-9.
40. Reinhold J, Olschewski J, Heilemann LL, Seekamp A, Lippross S, Meurer T. Entwicklung einer geplanten und überwachenden Roboterassistenz und -automation für den Einsatz in der Orthopädie und Unfallchirurgie [Development of a planned and monitoring robotic assistance and automation for application in orthopedics and trauma surgery]. *Chirurgie (Heidelb)*. 2023;94:312-7.
41. Jiang B, Azad TD, Cottrill E, Zygourakis CC, Zhu AM, Crawford N et al. New spinal robotic technologies. *Front Med*. 2019;13:723-29. doi: 10.1007/s11684-019-0716-6.
42. Jassim SS, Benjamin-Laing H, Douglas SL, Haddad FS. Robotic and navigation systems in orthopaedic surgery: how much do our patients understand? *Clin Orthop Surg*. 2014;6:462-7.
43. Corban J, Lorange JP, Laverdiere C, Khoury J, Rachevsky G, Burman M et al. Artificial Intelligence in the Management of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Orthop J Sports Med*. 2021;9:23259671211014206.
44. Rashkovska A, Kocov D, Trobec R. Noninvasive real time prediction of inner knee temperatures during therapeutic cooling. *Comput Methods Programs Biomed*. 2015;122:136–48.

45. Richter C, King E, Strike S, Franklyn-Miller A. Objective classification and scoring of movement deficiencies in patients with anterior cruciate ligament reconstruction. *PLoS One*. 2019;14:e0206024.
46. Wu D, Xiang Y, Wu X, Yu T, Huang X, Zou Y, Liu Z, et al. Artificial intelligence tutoring problem-based learning in ophthalmology clerkship. *Ann Transl Med*, 2020;8:700.
47. Yang YY, Shulruf B. Expert-led and artificial intelligence (AI) system-assisted tutoring course increase confidence of Chinese medical interns on suturing and ligature skills: prospective pilot study. *J Educ Eval Health Prof*. 2019;16:7.
48. Mirchi N, Bissonnette V, Yilmaz R, Ledwos N, Winkler-Schwartz A, Del Maestro RF. The Virtual Operative Assistant: An explainable artificial intelligence tool for simulation-based training in surgery and medicine. *PLoS One*, 2020;15:e229596.
49. St Mart JP, Goh EL, Liew I, Shah Z, Sinha J. Artificial intelligence in orthopaedics surgery: transforming technological innovation in patient care and surgical training. *Postgrad Med J*. 2023;99:687-94.
50. Bohl MA, McBryan S, Pais D, Chang SW, Turner JD, Nakaji P, et al. The Living Spine Model: A Biomimetic Surgical Training and Education Tool. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*. 2020;19:98-106.
51. Bertin H, Huon JF, Praud M, Fauvel F, Salagnac JM, Perrin JP et al. Bilateral sagittal split osteotomy training on mandibular 3-dimensional printed models for maxillofacial surgical residents. *Br J Oral Maxillofac Surg*. 2020;58:953-8.
52. Lum ZC. Can Artificial Intelligence Pass the American Board of Orthopaedic Surgery Examination? Orthopaedic Residents Versus ChatGPT. *Clin Orthop Relat Res*. 2023;481:1623-30.
53. Cuthbert R, Simpson AI. Artificial intelligence in orthopaedics: can chat generative pre-trained transformer (ChatGPT) pass Sect. 1 of the Fellowship of the Royal College of Surgeons (Trauma & Orthopaedics) examination? *Postgrad Med J*. 2023;99:1110-4.
54. Massey PA, Montgomery C, Zhang AS. Comparison of ChatGPT-3.5, ChatGPT-4, and Orthopaedic Resident performance on Orthopaedic Assessment examinations. *J Am Acad Orthop Surg*. 2023;31:1173-9.
55. Chen CJ, Bilolikar VK, VanNest D, Raphael J, Shaffer G. Artificial intelligence in orthopaedic education: A comparative analysis of ChatGPT and Bing AI's Orthopaedic In-Training Examination performance. *Medicine Advances*. 2024;2:284-90.
56. Gupta N, Khatri K, Malik Y, Lakhani A, Kanwal A, Aggarwal S et al. Exploring prospects, hurdles, and road ahead for generative artificial intelligence in orthopedic education and training. *BMC Med Educ*. 2024;24:1544.
57. Jayakumar P, Moore MG, Furlough KA, Uhler LM, Andrawis JP, Koenig KM et al. Comparison of an Artificial Intelligence-Enabled Patient Decision Aid vs Educational Material on Decision Quality, Shared Decision-Making, Patient Experience, and Functional Outcomes in Adults With Knee Osteoarthritis: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Netw Open*. 2021;4:e2037107.
58. Vaishya R, Dhall S, Vaish A. Artificial Intelligence (AI): A Potential Game Changer in Regenerative Orthopedics-A Scoping Review. *Indian J Orthop*. 2024;58:1362-74.
59. Meng Y, Yang Y, Hu M, Zhang Z, Zhou X. Artificial intelligence-based radiomics in bone tumors: Technical advances and clinical application. *Semin Cancer Biol*. 2023;95:75-87.
60. Feng L, Liu Z, Li C, Li Z, Lou X, Shao L et al. Development and validation of a radiopathomics model to predict pathological complete response to neoadjuvant chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer: a multicentre observational study. *Lancet Digit Health*. 2022;4:e8-e17.
61. Yu Y, He Z, Ouyang J, Tan Y, Chen Y, Gu Y et al. Magnetic resonance imaging radiomics predicts preoperative axillary lymph node metastasis to support surgical decisions and is associated with tumor microenvironment in invasive breast cancer: A machine learning, multicenter study. *EBioMedicine*. 2021;69:103460.