



Sanal ve artırılmış gerçekliğin ortopedi ve travmatolojide uygulama alanları

Applications of virtual and augmented reality in orthopedics and traumatology

Tolga Kurtuluş Çapın

TED Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara

Sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklikteki son teknolojik gelişmeler, bu çözümleri ortopedi ve travmatoloji uygulamalarında kullanmayı mümkün kılmıştır. Sanal gerçeklik, cerrahların operasyonel teknikleri uygulamalarına ve prosedür becerilerini geliştirmelerine olanak tanımaktadır. Sanal gerçeklik teknolojileri tıp araştırmalarında, ağrı yönetimi, rehabilitasyon ve travmatik beyin yaralanması gibi çeşitli alanlarda ve klinik uygulamalarda kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve kullanılmıştır. Öte yandan, artırılmış gerçeklik sistemleri, kullanıcının çevresinden kopmadan sanal ortamın gerçek ortam üzerine bindirildiği çözümler sunar. Ortopedik cerrahide klinik artırılmış gerçeklik (*augmented reality*, AR) uygulamalarını sunan son çalışmalar, omurga, osteotomi, artroplasti, travma ve onkoloji alanlarında kategorize edilmiştir. Bu derlemenin amacı, sanal gerçekliği ve artırılmış gerçekliği tanımlamak, bu teknolojilerin ortopedi ve travmatoloji alanındaki kullanım alanlarını özetlemek ve güncel örnekler sunmaktır.

Anahtar sözcükler: sanal gerçeklik; artırılmış gerçeklik; yapay zekâ; makine öğrenmesi

Recent technological developments in virtual reality and augmented reality have made it possible to use these solutions in orthopedics and traumatology applications. Virtual reality enables surgeons to practice operational techniques and enhance procedural skills. Virtual reality technologies have been extensively researched and utilized in various areas of medical research, including pain management, rehabilitation, and traumatic brain injury, as well as in clinical applications. On the other hand, augmented reality systems offer solutions where the virtual environment is superimposed onto the real environment without detaching the users from their surroundings. Recent studies presenting clinical AR applications in orthopedic surgery have been categorized in areas such as spine, osteotomy, arthroplasty, trauma, and oncology. The purposes of this review are to define virtual and augmented reality, summarize the areas of application of these technologies in orthopedics and traumatology, and provide current examples.

Key words: virtual reality; augmented reality; artificial intelligence; machine learning

Üç boyutlu (*three dimensional*, 3D) bilgisayar grafiği teknolojilerinin tıp araştırma alanlarında kullanımı 1970'lerden bu yana giderek daha fazla öne çıkmaktadır.

Bu kapsamda en çok kullanılan uygulamalar, bilgisayarlı tomografi (BT) veya manyetik rezonans görüntüleme (MRG) gibi 3D medikal görüntüleme sistemlerine odaklanmıştır ve teşhis sürecinin geliştirilmesi, karmaşık cerrahilerin uygulanması veya cerrahiden sonraki iyileşme süresinin kısaltılması konularında birçok fayda sağlamıştır.^[1] Son zamanlarda yaşanan teknolojik gelişmeler sonucunda, sanal gerçeklik (*virtual reality*, VR) ve artırılmış gerçeklik (*augmented reality*,

AR) ile yapay zekâ (*artificial intelligence*, AI) teknolojileri, bu bağlamı daha da ileri taşımayı, daha hızlı ve güvenli tedavilerin gerçekleştirilmesine olanak tanımayı vadetmektedir.^[2]

Bu derlemenin amacı, sanal ve artırılmış gerçekliğin tanımını yapmak, bu teknolojilerin AI ile ortopedi ve travmatoloji konularında kullanım alanlarını özetlemek ve güncel örnekler sunmaktır.

SANAL VE ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK

Sanal gerçeklik kullanıcının tamamen yapay ve bilgisayar tarafından oluşturulan bir ortama dâhil edildiği

İletişim / Contact: Prof. Müh. Dr. Tolga Kurtuluş Çapın • E-posta / E-mail: tolga.capin@tedu.edu.tr

ORCID iD: Tolga Kurtuluş Çapın, 0000-0002-7843-6336

Geliş / Received: 19 Kasım 2023 • **Revizyon / Revised:** 30 Kasım 2023, 16 Aralık 2023 • **Kabul / Accepted:** 20 Aralık 2023

bir teknolojidir. Sanal gerçeklik deneyimleri genel olarak kullanıcının gerçek ortamı ile bağıni koparan, yapay bir ortam içinde hareket etmeyi sağlayabilen özel donanımlar ile sağlanır. Bu amaçla en çok tercih edilen donanımlar sanal gerçeklik gözlükleridir. Sanal gerçeklik deneyimini geliştirmek için, elle çalıştırılan kontrol cihazları da etkileşim için kullanılabilir. Sanal gerçekliğin etkileşimi sadece görsel yönleriyle sınırlı olmayıp, bilgisayarla ses ve diğer duysal uyarıcılarla etkileşime geçmek de mümkündür.

Sanal gerçeklik sistemleri, günümüzde cerrahi asistanlarının eğitiminde, stajyerlerin yapay bir ortamda operasyonel teknikleri uygulamalarına ve prosedür becerilerini geliştirmelerine olanak tanımaktadır. Ayrıca, VR teknolojileri hastaya özel olarak ameliyat öncesi işlemlerin simülasyonlarını denemek için de kullanım olanağı sağlamaktadır. Son zamanlarda geliştirilen yeni nesil VR başlıkları, örneğin *Apple Vision Pro*, *Oculus Quest*, ayrı bir bağlı bilgisayar gerektirmeden, üzerinde küçük ama kuvvetli bir bilgisayar bulunan ve yüksek hızda stereoskopik görüntü sağlayan cihazlardır.

Öte yandan, AR sistemleri kullanıcının bulunduğu ortamdaki kopmadan, gerçek ortamla sanal ortamın üst üste bindirildiği çözümler sunmaktadır. Örneğin, ameliyat öncesi radyolojik görüntülerden BT ve MRG ile üretilen üç boyutlu sanal modelin gerçek dünyada hastanın görüntüsüyle birleştirilmesiyle oluşturulan 3D görüntü üreten çözümler sunmak mümkündür. Dolayısıyla AR sistemleri, kullanıcının hem gerçek dünyayla hem de gerçek ortama eklenen dijital içerikle etkileşime girmesine olanak tanır. Artırılmış gerçeklik cihazlarındaki sensör ve kameralar kullanıcının ortamdaki bakış noktasını takip ederek, üç boyutlu sanal görüntüyü doğru bakış açısından görmesine ve gerçek dünyayla sanal görüntünün üst üste binmesine olanak tanımaktadır. Artırılmış gerçeklik teknolojisinin uygulaması, örneğin cerrahın sanal anatomik modeli başa takılı bir AR gözlüğü aracılığıyla görüş alanında görmesine odaklanır, bu da alternatif bir ekran kullanımına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Piyasada bulunan AR başlıkları, örneğin *Xreal Air* veya *Microsoft HoloLens* gibi ürünler, dijital 3D içeriği kullanıcının gözünün önündeki küçük bir ekranda gerçek zamanlı olarak gösterebilmektedir. Bunun dışında, monitör ve projektör tabanlı çözümler de AR

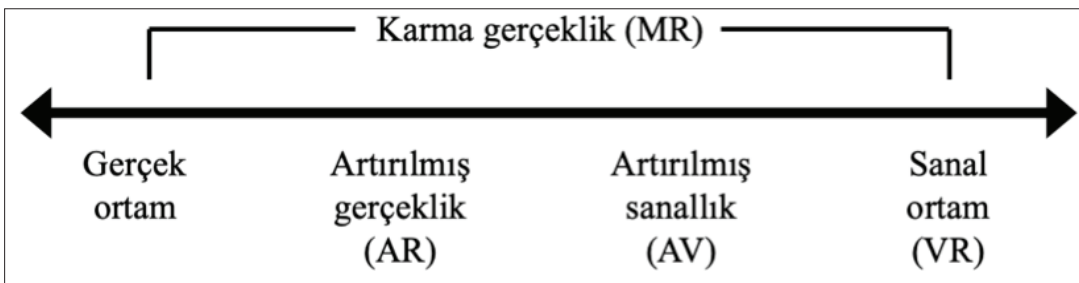
uygulamalarında kullanılmaktadır. Örneğin ortama kurulu bir projektör, sanal görüntüleri gerçek nesnelere üzerinde yansıtma için kullanılabilir.

Sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojileri, bazı farklılıklarla birlikte temelde oldukça benzerdir. Milgram ve ark.'nın, gerçeklik-sanallık sürekliliği (*reality-virtuality continuum*) adını verdikleri kavram, sanal ve gerçek dünyalar arasındaki farklı yelpazedeki uygulamaları sınıflamak için kullanılmaktadır (Şekil 1).^[3] Sanal gerçekliğin temel amacı, özellikle görsel algıyı aldatarak kullanıcıyı fiziksel bir mekanda varmış gibi hissettirmektir. Öte yandan artırılmış gerçeklik, gerçek dünyanın bilgisayar tarafından üretilen bilgilerle zenginleştirilmiş bir görselleştirilmesidir. Bu bağlamda, sanal gerçeklik kullanıcıyı tamamen sentetik bir dünyayla soyutlarken, artırılmış gerçeklik bilgiyi gerçek nesnelere üzerine gerçek zamanlı olarak yerleştirir.

SANAL GERÇEKLIK

Sanal gerçeklik teknolojileri tıp araştırmalarında, ağrı yönetimi, rehabilitasyon ve travmatik beyin yaralanması gibi çeşitli alanlarda ve klinik uygulamalarda kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve kullanılmıştır. Sanal gerçeklik, özellikle ortopedi ve travmatoloji alanındaki hekimler tarafından ameliyat öncesi planlama ve eğitimde yaygın bir şekilde kullanılacak yetkinliğe gelmiştir. Günümüzde, cerrahi eğitimde VR'nin kullanım alanları arasında artroskopik simülasyonlar, tamamen immersif (kullanıcıyı içine alan) cerrahi simülasyonlar, kemik delme haptik simülasyonları ve rekonstrüksiyon simülasyonları bulunmaktadır.^[4,5]

Sanal gerçeklik teknolojisi ameliyat öncesi planlama ve eğitim için kullanımında, ameliyat öncesi aşamada tıbbi görüntüleme amacıyla kullanılmaktadır. Çoğu zaman BT veya MRG yoluyla elde edilen tıbbi görüntüleme verileri, genellikle paralel dilimler yığını (aynı zamanda hacimsel görüntüler olarak da bilinir) olarak verilen 3D sonuçlar sağlar. Günümüzde tıbbi verileri yorumlama, genellikle elde edilen modeli incelemek ve temizlemek için çeşitli parametrelerin ayarlanabildiği bilgisayar programları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1. Milgram ve ark.'nin gerçeklik-sanallık sürekliliği (*reality-virtuality continuum*) adını verdikleri kavram, sanal ve gerçek dünyalar arasındaki farklı yelpazedeki uygulamaları sınıflamak için kullanılmaktadır.



Şekil 2. Hastaya özel tıbbi görüntülerin sanal gerçeklik bağlamında etkileşimli olarak incelenebildiği *Medicalholodeck*[®] yazılımının ekran görüntüsü (*Medicalholodeck*, Zürih, İsviçre).

Sanal gerçeklik tabanlı sistemler, eğitim amaçlı olarak insan anatomisini keşfetmek için kullanılmaktadır, örneğin kullanıcı tamamen sanal bir ortamda tıbbi bir modelle etkileşime geçebilir. Şekil 2’de *Medicalholodeck* adlı yazılımın kullanımından bir ekran görüntüsü gösterilmektedir.^[6]

Bunun yanında VR uygulamalarında sıklıkla haptik cihazlar da kullanılmaktadır. Örneğin, 3D Systems firmasının geliştirdiği *The Touch haptics* cihazı (Şekil 3), ortopedi ve travmatolojide cerrahi tekniklerin simülasyonu için kullanılmıştır.^[7,8]



Şekil 3. 3D Systems tarafından geliştirilen *The Touch haptics* cihazı, kullanıcıların ellerine kuvvet geri bildirimini uygulayan, sanal nesnelere hissetmelerine olanak tanıyan ve kullanıcılar ekrandaki 3D nesnelere yönetirken gerçekçi dokunma hisleri üreten motorlu bir cihazdır (Kaynak: 3D Systems).



Şekil 4. Tıbbi mankenleri sanal gerçeklikle birleştirerek artroskopileri eğitmek için *VirtaMed ArthroS*® (*VirtaMed*, Zürih, İsviçre) VR simülatörünün artroskopi eğitimi için ekran görüntüsü.

Yakın zamanda birçok firma, tıbbi mankenleri sanal gerçeklikle birleştirerek artroskopi eğitimi için simülörler geliştirmiştir. Örneğin, *VirtaMed ArthroS* (*VirtaMed*, Zürih, İsviçre) ve *Swemac TraumaVision* (*Swemac*, Linköping, İsveç) çözümleri şu anda bu alanda popüler olanlardır ve bu çözümlerin kullanımı farklı araştırma makalelerinde doğrulanmıştır (Şekil 4).^[4,9,10]

ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK

Sanal gerçeklik teknolojisi genellikle ameliyat öncesi planlama ve eğitim için kullanılırken, AR teknolojisi ameliyathane içindeki iş akışını ve gerekli hassasiyeti destekleme kapasitesine sahip olması ve gerçek ortamla bağlantıyı kesmemesi nedeniyle ameliyat ortamında daha çok kullanılmaktadır. Artırılmış gerçeklik teknolojisinin, cerraha hastanın bireysel anatomisini, iyonlaştırıcı radyasyon kullanmadan, dijital görüntüler ve ameliyat öncesi planlama bilgilerini birleştirerek üst üste bindirme

imkânı sunma potansiyeline sahip olduğu farklı araştırmalarda kanıtlanmıştır.^[11] Bu tür uygulamalarda BT veya MRG'den elde edilen ameliyat öncesi görüntüleme verileri, hastanın bedeninde doğru uzaysal hizalamada görüntülenen insizyonların veya delme noktalarının konumu gibi diğer görsel verilerle entegre edilebilir. Artırılmış gerçeklik teknolojisi için önemli bir nitelik, kameranın takip ettiği referans işaretleyicileri kullanarak grafikleri gerçek dünya yüzeylerine yansıtılabilmesidir. Önceki AR teknolojileri, düşük çözünürlük, düşük işlemci gücü ve steril ortamlarda AR donanımının uyumsuzluğu gibi sorunlar nedeniyle sınırlamalarla karşılaşmış olsa da AR teknolojilerindeki son gelişmeler, bu çözümleri ameliyat anında veri görselleştirmesi için uygun hâle getirmiştir.

Bugün mevcut olan AR yeteneklerine sahip teknolojiler çeşitlidir, bunlar arasında tabletler ve akıllı telefonlar gibi elde taşınabilir cihazlardan, başa takılı ekranlar (*head-mounted display*, HMD) gibi çeşitli seçenekler

bulunmaktadır. Ortopedi ve travmatoloji alanındaki cerrahide büyük potansiyele sahip olan bu AR görüntüleme cihazları, üç kategoriye ayrılabilir. İlk kategori, bilgisayar işlemci birimini içeren (kendisi aynı zamanda bir bilgisayar olan) kablosuz başlıklardan oluşur, örneğin *Microsoft HoloLens*, *XReal Air*. İkinci kategori, dış bir bilgisayar kaynağına bağlı olan bağlı bir cihazı içerir.^[11] Bağlı cihazın avantajı, tüm işlemci gücünün dışarıda olmasıdır, bu da daha büyük işleme kapasitelerine ve daha az mekânsal kısıtlamaya olanak tanır. Bununla birlikte, bağlantı kablolu ve harici bilgisayarla başlık arasındaki uyumsuzluk, ameliyathane iş akışında zorluklara yol açabilir. Bu tür cihazlar daha önce yaygın olarak kullanılsa da günümüzde yerlerini ilk türdeki, cihaz üzerinde işlemci bulunan gözlüklere vermektedir. Bu bağlamda her iki AR cihaz kategorisindeki gözlükler de yaygın olarak optik şeffaf ekran (*optic see-through*, OST) kullanır (Şekil 5), bu da kullanıcının artırılmış grafikleri yansıma özellikleri olan bir mercekle aracılığıyla görmesine olanak tanır. Bilgisayar görüntülerini gerçek hastayla doğru bir şekilde hizalamak, kameranın takip edebileceği bir dizi veya görüntü işaretçisi (*fiducial*) kullanılarak gerçekleştirilir.

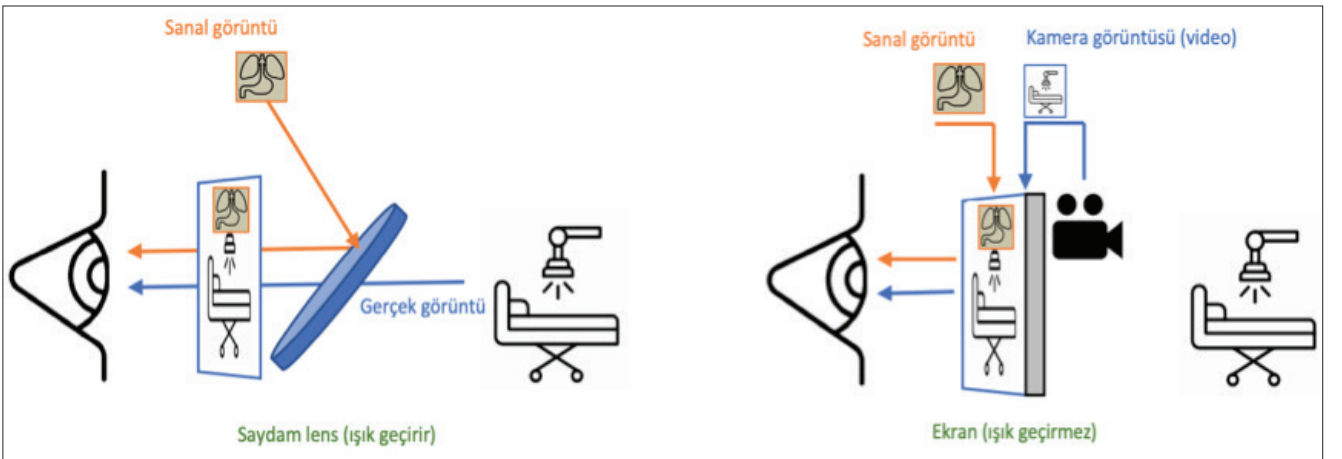
Üçüncü ve son kategoriye dâhil olan AR cihazları, video şeffaf (*video see-through*, VST) ekranlar olarak adlandırılır. Daha çok VR uygulamalar için kullanılan bu cihazlar, cihaz üzerindeki kameraları sayesinde AR uygulamalarında da kullanılabilir. META tarafından geliştirilen *Oculus Quest 2 Pro* ve *Apple Vision Pro* cihazları bu türdeki örneklerdir.

Sanal gerçeklikten farklı olarak, AR uygulamalarında kayıt ve takip işlemleri doğru bir şekilde gerçekleştirilmelidir.^[12] Kayıt (*registration*) terimi, bilgisayar tarafından üretilen görüntünün (örneğin; MRG görüntüsü), gerçek dünyadaki nesnelere ile 3D olarak hizalanması ve

entegrasyonunu ifade eder. İzleme işlemi ise nesnenin hareket ettiğinde doğru konumda kalmasını ve kullanıcı pozisyonuna, aynı zamanda cerrahi aletleri algılamasına, yönlendirmesine ve üç boyutlu uzayda hareketine uyum sağlamasını sağlar. İzleme, AR sisteminin görselleştirmeyi veya cerrahi aleti orijinal kayıttan referans almasını gerektirir. Bunun adına poz rekonstrüksiyonu denir. Kayıt ve hareketin düşük doğruluğu, görüntüleme ve alet hareketlerinin etkin bir şekilde takip edilememesine neden olabilir. Bu nedenle uygulamalarda farklı yöntemler kullanılmaktadır, örneğin kamera destekli c-kollu skopi (*c-arm*) kaydı, işaretçi tabanlı kayıt ve yüzey kaydır. Kamera destekli *c-arm* çözümlerinde, sistem elde edilen *x-ray* görüntülerini 3D koordinat sisteminde kullanıcının AR gözlüğündeki görüntülerle eşleştirmeye dayanır.^[13] İşaretçi tabanlı kayıt, genellikle ilgi alanının anatomik bölgesinin 3D modeli ile ilişkilendirilen bir 3D koordinat sisteminde işaretçi pozisyonlarının kaydedilmesine dayanır.^[14] Doğruluğu, işaretçilerin tam konumlandırılmasına bağlıdır.

Artırılmış gerçeklik gözlükleri, ayrıca AR cihazının mekanda konum takibini gerektirir. Bu kapsamda, iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Cihazın kendisi, entegre sensörler aracılığıyla mekânsal konumunu belirleyebiliyorsa, içeriden-dışa takip (*inside-out tracking*) kullanır. Öte yandan, dışarıdan-içeri takip, AR cihazının konumunu algılamak ve takip etmek için harici bir kamera sistemini kullanır. Dışarıdan-içeri takip sistemlerinin iki temel dezavantajı vardır. Ortamda ek donanım gerektirmesi ve kameranın önüne geçebilecek diğer objeler nedeniyle oklüzyon sorunu.

Çoğu ticari AR cihazı, başlangıçta eğlence ve oyun alanında geliştirilmiş olsa da 2019 yılında cerrahi kullanım için tasarlanmış ilk AR gözlük cihazı olan *Xvision*



Şekil 5. Optik şeffaf (OST) ekran ile video şeffaf (VST) ekranın karşılaştırma grafiği.

Sol: Artırılmış gerçeklik optik şeffaf cihazları, bilgisayar tarafından üretilen grafikleri şeffaf bir mercekle üzerine yansıtarak kullanıcının çevresel gerçek dünya yüzeylerini doğrudan görmesine ve bunlara artırılmış katmanlar eklemesine olanak tanır.

Sağ: Video şeffaf ekranlar, kullanıcıya çevresel gerçek dünya görüntüsünü bilgisayar tarafından üretilen grafiklerle birleştirerek sunar.

(Augmedics, Arlington Heights IL, Amerika Birleşik Devletleri), Food and Drug Administration (FDA) tarafından omurga cerrahisi navigasyonu için onaylanan ilk cihaz olmuştur; 2020'nin başlarından itibaren Microsoft HoloLens, İsviçre'de Swissmedic tarafından omurga cerrahisi navigasyonu için kullanılmak üzere onaylanmıştır.^[15]

ARTIRILMIŞ GERÇEKLİĞİN KLİNİK UYGULAMALARI

Son dönemde, ortopedi ve travmatoloji alanındaki cerrahide AR teknolojisinin klinik uygulamalarını raporlayan araştırmalar gittikçe artan oranda yayımlanmaktadır. Konuyla ilgili son yayınlar, özellikle hastanın ve personelin radyasyon maruziyeti, operasyon odasındaki işlem süresi ve cerrahi uygulamanın doğruluğunun geliştirilmesi gibi teknolojinin potansiyel faydalarını değerlendirmektedir.^[12] Son birkaç yılda yayımlanmış derlemeler, ortopedik cerrahi alanında AR teknolojisinin mevcut durumunu ve son araştırmalarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Ortopedik cerrahide klinik AR uygulamalarını sunan son çalışmalar, omurga, osteotomi, artroplastik, travma ve onkoloji alanlarında kategorize edilmiştir.^[12]

- Omurga cerrahisi alanında pedikül vida navigasyonu, omurga çubuğu bükme uygulamalarında Microsoft HoloLens, Augmedics Xvision AR cihazları kullanarak, konvansiyonel bükme işlemine kıyasla çubuğun bükülüp yerleştirilmesine harcanan toplam zamanın azaldığı, vida uygulamasında pozisyonun daha az hatayla tamamlandığı raporlanmıştır.^[12]
- Gerçek hasta ve kadavralar üzerinde yapılan kalça ve diz artroplastisi uygulamalarında AR tekniği, floroskopik aletlere kıyasla hedef eğimini ve anteverسیونu elde etme konusunda önemli ölçüde daha doğru sonuç vermiştir.^[16] Bu uygulamalar ekran olarak daha çok monitör üzerinde gerçekleşmiş olup yakın zamanda HoloLens cihazları da kullanılmıştır.
- Travma uygulamalarında AR teknolojileri, farklı türlerde osteosentez cerrahisi ve AR navigasyon ile pelvik plak bükme sırasında floroskopik görselleştirme için kullanılmıştır.^[17]
- Osteotomi uygulamalarında AR gözlüğü ve monitör görselleştirmesi kullanarak, pedikül çıkarma osteotomileri için navigasyon görevlerinin başarıyla tamamlandığı raporlanmıştır.^[18]

SONUÇ

Sanal ve AR teknolojisi gelişmekte olan bir alandır ve ortopedik cerrahideki uygulamaları, cerrahi planlama ve uygulamada yeni fırsatlar sunarak giderek artan bir ilgiyle karşılanmaktadır.^[19,20] Bu teknolojilerin ilk aşama-

da kavramsal uygunluk araştırmalarından, klinik öncesi sonuçların günlük pratiğe çevrilmesi süreci başlamıştır.^[21]

Ancak, hâlen teknolojinin anlaşılmasına yönelik yeni araştırmalara ihtiyaç vardır. Örneğin, bugüne kadar AR gözlükleri ve HMD'lerin konsantrasyonumuz, algı ve bilişsel yük üzerindeki etkisi hâlâ tam olarak anlaşılamaştır. Başa takılı ekranlar aracılığıyla iletilen algısal tecrübe, birçok cerrah için yeni bir deneyim olacaktır. Bilgi yüklenmesini önlemek ve iyi tasarlanmış kullanıcı arayüzleri sağlamak, bu teknolojiyi günlük klinik uygulamada sorunsuz bir şekilde entegre etmek için gereklidir. Son kullanım ve benimseme için AR'nin cerrahi iş akışına tamamen entegre edilmesi gerekmektedir.

Bu teknolojinin önemli kısıtlamalarını ve geliştirmelemlerini temsil eden sağlam ve doğru kayıt ve takip süreçlerinin eksikliği, AR sistemlerinin ameliyathane ortamında uygulanmasına izin vermek için gereklidir. Burada, doğruluk eksiklikleri, navigasyonu güvenilir hâle getirebilecek yanlış yerleştirilmiş sanal modellere yol açabilir. Optik işaretçilere dayalı diğer bilgisayar destekli navigasyon yaklaşımlarından bilinen hatalı navigasyon, hatalı bilgi sağlama sorununa işaret eder. Farklı yeni inovasyonlar ortaya çıkmaktadır; ancak hâlen yeni teknolojilere ihtiyaç vardır ve bunlar geliştirilmektedir.

İdeal AR sistemi otomatik olarak çalışmalı ve sadece cerrahi navigasyona değil, aynı zamanda hata tespitine de izin vermelidir.^[22] Bu amaçla, AI ve makine öğrenmesi çözümlerine ihtiyaç artmaktadır. Görüntü işleme ve bilgisayarla görü algoritmaları, bu kapsamda ileriye dönük umut verici çözümler sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Gross MH. 1998. Computer graphics in medicine: From visualization to surgery simulation. *Acm Siggraph Computer Graphics* 1998;32(1):53-6. [Crossref](#)
2. Ghaednia H, Fourman MS, Lans A, Detels K, Dijkstra H, Lloyd S, et al. Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials. *Spine J* 2021;21(10):1617-25. [Crossref](#)
3. Milgram P, Takemura H, Utsumi A, Kishino F. Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telemannipulator and telepresence technologies*, SPIE 1995;2351:282-92. [Crossref](#)
4. Yari SS, Jandhyala CK, Sharareh B, Athiviraham A, Shybut TB. Efficacy of a virtual arthroscopic simulator for orthopaedic surgery residents by year in training. *Orthop J Sports Med* 2018;6(11):2325967118810176. [Crossref](#)
5. Syamlan A, Fathurachman Denis K, Vander Poorten E, Pramujati B, Tjahjowidodo T. Haptic/virtual reality orthopedic surgical simulators: A literature review. *Virtual Reality* 2022;26(4):1795-825. [Crossref](#)

6. Medical Holodeck. Erişim adresi: <https://www.medicalholodeck.com/en/> Erişim tarihi: 2023.
7. Wang M, Li D, Shang X, Wang J. A review of computer-assisted orthopaedic surgery systems. *Int J Med Robot* 2020;16(5):1-28. **Crossref**
8. The Touch™ Haptic Device. 3D Systems, 2019. Erişim adresi: <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch>.
9. Tofte JN, Westerlind BO, Martin KD, Guetschow BL, Uribe-Echevarria B, Rungprai C, et al. Knee, shoulder, and fundamentals of arthroscopic surgery training: Validation of a virtual arthroscopy simulator. *Arthroscopy* 2017;33(3):641-646.e3. **Crossref**
10. Sugand K, Akhtar K, Khatri C, Cobb J, Gupte C. Training effect of a virtual reality haptics-enabled dynamic hip screw simulator. *Acta Orthop* 2015;86(6):695-701. **Crossref**
11. Microsoft. What is mixed reality? 2018. Erişim adresi: https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mixed_reality.
12. Casari FA, Navab N, Hruba LA, Kriechling P, Nakamura R, Tori R, et al. Augmented reality in orthopedic surgery is emerging from proof of concept towards clinical studies: A literature review explaining the technology and current state of the art. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2021;14(2):192-203. **Crossref**
13. Navab N, Heining SM, Traub J. Camera augmented mobile C-arm (CAMC): Calibration, accuracy study, and clinical applications. *IEEE Trans Med Imaging* 2010;29:1412-23. **Crossref**
14. Vávra P, Roman J, Zonc̃a P, Ihnát P, Nemeč M, Kumar J, et al. Recent development of augmented reality in surgery: a review. *J Healthc Eng* 2017:4574172. **Crossref**
15. Molina CA, Theodore N, Ahmed AK, Westbroek EM, Mirovsky Y, Harel R, et al. Augmented reality-assisted pedicle screw insertion: a cadaveric proof-of-concept study. *J Neurosurg Spine* 2019:1-8. **Crossref**
16. Alexander C, Loeb AE, Fotouhi J, Navab N, Armand M, Khanuja HS. Augmented reality for acetabular component placement in direct anterior total hip arthroplasty. *J Arthroplast* 2020;35(6):1636-1641.e3. **Crossref**
17. von der Heide AM, Fallavollita P, Wang L, Sandner P, Navab N, Weidert S, et al. Camera-augmented mobile C-arm (CamC): A feasibility study of augmented reality imaging in the operating room. *Int J Med Robot* 2018;14(2). **Crossref**
18. Elmi-Terander A, Skulason H, Soderman M, Racadio J, Homan R, Babic D, et al. Surgical navigation technology based on augmented reality and integrated 3D intraoperative imaging: A spine cadaveric feasibility and accuracy study. *Spine* 2016;41(21):E1303-e11. **Crossref**
19. Chytas D, Malahias MA, Nikolaou VS. Augmented reality in orthopedics: Current state and future directions. *Front Surg* 2019;6:38. **Crossref**
20. Verhey JT, Haglin JM, Verhey EM, Hartigan DE. Virtual, augmented, and mixed reality applications in orthopedic surgery. *Int J Med Robot* 2020;16(2):e2067. **Crossref**
21. Lex JR, Koucheiki R, Toor J, Backstein DJ. Clinical applications of augmented reality in orthopaedic surgery: A comprehensive narrative review. *Int Orthop* 2023;47(2):375-91. **Crossref**
22. Negrillo-Cárdenas J, Jiménez-Pérez JR, Feito FR. The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation. *Comput Methods Programs Biomed* 2020;191:105407. **Crossref**