

Dirsek cerrahisinde güncel gelişmeler ve geleceğe yönelik eğilimler

Current developments and future trends in elbow surgery

Ali Okan Gazeloğlu¹, Hakkı Çağdaş Basat²

¹Sincan Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Ortopedi ve Travmatoloji Kliniği, Ankara

²Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi, Ortopedi ve Travmatoloji Ana Bilim Dalı, Kırşehir

Bu derleme, dirsek cerrahisinde minimal invaziv yaklaşımların evrimini, güncel teknolojik gelişmeleri ve gelecekteki tedavi standartlarını analiz etmeyi amaçlamaktadır. Dirsek eklemi-nin karmaşık anatomisi çerçevesinde; gelişmiş görüntüleme yöntemleri, üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojileri, navigasyon sistemleri, robotik cerrahi ve yapay zekâ entegrasyonuna odak-lanan literatür verileri sentezlenmiştir. Dört boyutlu bilgisayarlı tomografi (4D-BT) ve foton sayan bilgisayarlı tomografi gibi teknolojiler mekanik çarpışmaların ve kırıkda hasarlarının saptanmasında tanıl keskinliği artırmıştır. Üç boyutlu baskı ve kişiselleştirilmiş implantlar, kompleks deformitelerin tedavisin-de cerrahi hassasiyeti optimize etmektedir. Artırılmış gerçeklik ve navigasyon sistemleri, iyatrojenik nörovasküler hasar riskini azaltarak güvenli sınırları genişletmektedir. Robotik asistanlık ve yapay zekâ (YZ) uygulamaları, cerrahi iş akışını dijitalleştirirken, giyilebilir sensörler rehabilitasyon sürecini kişiselleş-tirmektedir. Dirsek cerrahisi, geleneksel açık yöntemlerden teknoloji odaklı, veriye dayalı ve hasta odaklı minimal invaziv bir disipline evrilmektedir. Yüksek maliyet ve dik öğrenme eğri-sine rağmen, bu teknolojilerin entegrasyonu cerrahi başarıyı ve hasta güvenliğini artırmada yeni bir standart belirlemektedir.

Ahtar sözcükler: dirsek artroskopisi; navigasyon; üç boyutlu yazıcı; yapay zekâ; minimal invaziv cerrahi

This review aims to analyze the evolution of minimally invasive approaches in elbow surgery, current technological advancements, and future treatment standards. Literature data focusing on advanced imaging methods, Three dimensional (3D) printing technologies, navigation systems, robotic surgery, and artificial intelligence integration were synthesized within the framework of the complex anatomy of the elbow joint. Technologies such as four-dimensional computed tomography (4D CT) and photon-counting computed tomography have increased diagnostic precision in detecting mechanical impingements and cartilage damage. 3D printing and patient-specific instruments optimize surgical accuracy in the treatment of complex deformities. Augmented reality and navigation systems expand safe limits by reducing the risk of iatrogenic neurovascular injury. Robotic assistance and artificial intelligence (AI) applications digitalize the surgical workflow, while wearable sensors personalize the rehabilitation process. Elbow surgery is evolving from traditional open methods to a technology-driven, data-led, and patient-centered minimally invasive discipline. Despite high costs and steep learning curves, the integration of these technologies sets a new standard for enhancing surgical success and patient safety.

Key words: elbow arthroscopy; navigation; three-dimensional printing; artificial intelligence; minimally invasive surgery

ANATOMİ VE TARİHSEL ARKA PLAN

Dirsek eklemi, üç farklı artikülasyonun dar bir kapsül içinde birleştiği karmaşık yapısı nedeniyle cerrahi enstrü-man manipülasyonunu kısıtlamaktadır. Eklemi stabilize eden lateral ulnar kollateral ligaman ve medial kollateral ligaman gibi bağ komplekslerinin kapsülle yakın komşuluğu, artroskopik gevşetme sırasında iyatrojenik hasar riskini artırırken troklear fossadaki “bare spot” gibi varyasyonlar tanıl yanlılılara yol açabilmektedir. Majör

nörovasküler yapıların artroskopik portallere çok yakın olması bu prosedürü riskli kılmakta, bu nedenle yapıları portallerden uzaklaştırmak için kapsüler distansiyonun etkin kullanımı hayati önem taşımaktadır. Özellikle rad-yal ve ulnar sinirlerin seyri, cerrahi sırasında kalıcı nörolo-jik hasar tehdidi oluşturarak cerrahın anatomi üzerindeki mutlak hakimiyetini zorunlu kılmaktadır. Sonuç olarak, dirseğin dar ve dinamik güvenli sınırları, cerrahi başarı ve hasta güvenliği için her aşamada titiz bir anatomik farkındalık gerektirmektedir.^[1-3]

İletişim / Contact: Prof. Dr. Hakkı Çağdaş Basat • E-posta / E-mail: cagdasbasat@gmail.com

ORCID ID: Ali Okan Gazeloğlu, 0000-0002-9296-8179 • Hakkı Çağdaş Basat, 0000-0003-3301-2529

Geliş / Received: 18 Mart 2026 • **Revizyon / Revised:** 9 Nisan 2026 • **Kabul / Accepted:** 11 Nisan 2026

Minimal invaziv dirsek cerrahisi, 1931'de Burman'ın dirsek eklemi artroskopiyeye uygun bulmayan karamsar görüşleriyle başlamış ancak 1970'li yıllarda Watanabe ve ark. tarafından gerçekleştirilen başarılı klinik uygulamalarla bu paradigma yıkılmıştır. 1980'li yıllarda teknik ve enstrümantasyonun standardizasyonu ile tanışılardan süreçten terapötik evreye geçen disiplin, özellikle serbest cisim eksizyonu ve sinovektomi gibi işlemlerde klinik etkinliğini kanıtlayarak modern ortopedik cerrahideki yerini almıştır.^[4] Dirsek artroskopisi; teknolojik ilerlemelerle dirsek sertliği, lateral epikondilit ve serbest cisim temizliği gibi patolojilerde minimal invaziv bir standart hâline gelerek daha az ağrı, düşük enfeksiyon riski ve hızlı iyileşme avantajları sunmaktadır. Karmaşık anatomiye bağlı sinir yaralanma riskleri ve dik öğrenme eğrisi temel engeller olsa da, gelecekte robotik cerrahi ve üç boyutlu (3B) simülasyonların entegrasyonu bu zorlukların aşılması ve yöntemin kompleks travma vakalarında daha baskın hâle gelmesi beklenmektedir.^[5,6]

GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNDEKİ GELİŞMELER

Manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve bilgisayarlı tomografi (BT) gibi gelişmiş görüntüleme yöntemlerinin kullanılmaya başlanması, dirsek eklemi karmaşık anatomisinin daha ayrıntılı değerlendirilmesini sağlamıştır. Cozen testi ve kavrama gücü ölçümü gibi geleneksel muayene yöntemleri lateral epikondilit teşhisinde yüksek duyarlılık sunarak hastalığı dışlamak için yararlı olsa da sonoelastografi ve MRG gibi ileri görüntüleme teknolojileri, doku sertliği ve spesifik anatomik lezyonlar hakkında objektif veriler sunarak, özellikle ayırıcı tanı ve cerrahi planlama süreçlerinde muayeneyi tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.^[7] Beyzbol oyuncuları üzerinde yapılan bir çalışmada, MRG arthrografi ve dinamik USG'nin birlikte kullanımının ulnar kollateral ligaman yaralanması teşhisinde neredeyse %100 doğruluk sağladığı gösterilmiştir.^[8] Distal biceps tendonu net değerlendirmek için kullanılan FABS (*flexed, abducted, supinated*-bükülü, yana açık, supinasyon) (biceps) ve Ulnar kollateral ligaman için FEVER (*flexed elbow valgus external rotation*, dirsek fleksiyon, valgus, eksternal rotasyon) gibi güncel spesifik çekim pozisyonları, geleneksel yöntemlere kıyasla lezyonları daha net görünür kılabilir. Geleneksel BT sadece statik anatomik veriler sunarken, dört boyutlu bilgisayarlı tomografi (4D-BT) teknolojisi dirsek hareket kısıtlılıklarının arkasındaki mekanik çarpışmaları gerçek zamanlı olarak saptayarak, tedaviyi yumuşak doku yapışıklığı ile kemiksel engel ayırımında çok daha kesin bir noktaya taşımaktadır.^[9] Bilgisayarlı tomografi arthrografi (BTA), özellikle kırık bütünlüğü ve mikro-instabilite değerlendirmesinde sunduğu yüksek uzamsal çözünürlük, MRG'nin yetersiz kaldığı durumlarda problem çözücü bir tanı aracıdır. Foton sayan BT teknolojisi düşük

radyasyonla kemik/kırık detaylandırmasında yeni bir dönem başlatırken, metal artefaktlarını azaltma yeteneği sayesinde cerrahi sonrası takipte MRG'ye karşı üstünlük sağlamaktadır. İnvaziv doğasına rağmen BTA, kompleks kırık patolojilerinde ve ameliyat sonrası vakalarda en yüksek doğruluğu sunan güncel yöntemlerden biri olmayı sürdürmektedir.^[10] Koronoid morfometrisinde geleneksel radyolojik ölçümlerin yerini alan BT tabanlı üç boyutlu (3D) ölçüm ve kantitatif analiz tekniklerinin (sublime tüberkülün referans alınması gibi), kırık boyutunun dirsek stabilitesi üzerindeki etkisini milimetrik hassasiyetle saptayarak cerrahi başarı oranını artırarak güncel bir standart hâline gelmektedir.^[11] Manyetik rezonans görüntüleme arthrografi bağ yırtıklarını saptamadaki yüksek duyarlılığı (%97), hastanın semptomlarını hareket sırasında yakalayan dinamik ultrasonografi ve floroskopik değerlendirmelerin fonksiyonel instabiliteyi kanıtlamada sağladığı yenilikçi avantajlar statik MRG'ye kıyasla çok daha kapsamlı bir tanısal imkân sunmaktadır.^[12] Görüntüleme yöntemlerindeki ilerleme, daha doğru tanı konmasına ve tedavi planlarının kişiye özel olarak oluşturulmasına olanak tanımıştır.

MINİMAL İNVAZİV CERRAHİDEKİ GELİŞMELER

Minimal invaziv bir yaklaşım olan dirsek artroskopisi; geniş insizyon ihtiyacını ortadan kaldırarak cerrahi travmayı minimize etmekte, %3,7 gibi düşük komplikasyon oranları ve daha hızlı fonksiyonel kazanımlar sayesinde özellikle adolesan hastalarda %86'ya varan yüksek spora dönüş oranları sağlamaktadır. Eklem içi yapıları detaylı görüntüleme avantajıyla osteofit temizliği ve kapsüller gevşetmede yüksek hassasiyet sunan bu teknik, açık cerrahiye oranla daha az ağrı, düşük enfeksiyon riski ve üstün estetik sonuçlar sağlayarak erken rehabilitasyon sürecini destekleyen modern bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.^[13-15] Dirsek artroskopisi; radius başı, koronoid ve kapitellum kırıklarında yumuşak doku hasarını azaltıp üstün eklem içi görüş sağlayarak, eşlik eden bağ yaralanmalarının eş zamanlı tedavisine ve açık cerrahiye oranla daha efektif bir redüksiyon başarısına imkân tanımaktadır. Bu yöntemin en büyük engeli olan yaklaşık 230 prosedürlük dik öğrenme eğrisi; kadavra eğitimleri, simülasyonlar ve radyolojik planlama entegrasyonu ile kısaltılabilmektedir. Uzmanlaşıldığında ise kanüllü başsız vidalar gibi minimal invaziv tekniklerin kullanımıyla cerrahi travmayı minimize eden, doku koruyucu ve yüksek başarı oranlı modern bir standart sunmaktadır.^[16]

ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİ VE SİMÜLASYONUN ROLÜ

Üç boyutlu baskı teknolojisi, kompleks dirsek sertliği vakalarında cerrahlara ameliyat öncesinde kemik rezeksiyonu provası yapma imkânı tanıyarak, gerçek anatomiyle yüksek uyumlu modeller üzerinden hata payını minimize

etmektedir. Ameliyat sırasında cerraha anlık referans sağlayan bu modeller, operasyon süresini optimize edip hastanın hareket açıklığında anlamlı artış sağlayarak klinik başarıyı artırmaktadır. Gelecekte, yazılım tabanlı simülasyonlar ve fiziksel 3B modellerin entegrasyonu, özellikle kompleks kemik patolojilerinde rezeksiyonlarının çok daha hassas belirlendiği yeni bir standart cerrahi planlama dönemine geçilmesi öngörülmektedir.^[17] Üç boyutlu yazıcı teknoloji, karmaşık anatomik modeller üzerinden cerrahi prova ve dokusal geri bildirim imkânı sunarak geleneksel kadavra eğitimine modern bir alternatif oluşturmaktadır. Ortopedi ve travmatoloji asistan öğrencileri üzerinde yapılan başka bir çalışmada da fiziksel 3B modellerin, karmaşık dirsek ve omuz kırıklarında cerrahi karar verme sürecini %45 oranında değiştirecek kadar güçlü bir eğitim ve planlama aracı olduğu gösterilmiştir.^[18] Klinik alanda, geleneksel yöntemlere göre daha hafif, hava alabilen ve hastaya tam uyum sağlayan kişiselleştirilmiş rehabilitasyon cihazlarıyla atelerin düşük maliyetli üretimine olanak tanımaktadır. Yüksek maliyetler ve düzenleyici standartlar gibi mevcut kısıtlamalara rağmen, gelecekte kırık ve kemik onarımında canlı hücrelerin kullanıldığı “biyo-basım” teknolojilerinin ana akım hâline gelmesi öngörülmektedir.^[19]

İMLANT TEKNOLOJİSİ VE CERRAHİ ALETLERDEKİ YENİLİKLER

Üç boyutlu baskı teknolojisi, hastaya spesifik implant ve cerrahi alet gelişimini beraberinde getirmiştir. Hastaya özgü enstrümanlar, dijital planlamanın kemik kesisi ve vida yerleşimine birebir aktarılmasını sağlayarak cerrahi hassasiyeti artırmakta ve geleneksel iki boyutlu yöntemlerle çözülemeyen çok düzlemli kompleks deformitelerin eş zamanlı düzeltilmesine olanak tanımaktadır. Bu teknoloji, kubitus varus ve radius başı dislokasyonu gibi zorlayıcı vakalarda başarılı klinik sonuçlar sunarken, doğru pozisyonlamayı kolaylaştırarak ameliyat süresini ve radyasyon maruziyetini azaltmaktadır. Sistemin en büyük kısıtlamaları yüksek maliyet ve uzun lojistik hazırlık süreciyken dijital modellerin yumuşak doku gerginliklerini tam simüle edememesi, kemik odaklı planlamanın nihai sonucunu etkileyebilecek kritik bir faktör olarak vurgulanmaktadır.^[20,21] Başka bir çalışmada, 3B baskı teknolojisi aracılığıyla kişiselleştirilmiş implantlar, cerrahi kılavuzlar ve fiziksel modellerle geniş yumuşak doku ve kemik defekti olan distal humerus kırıkları tedavisinde dirsek artroplastisine alternatif başarılı sonuçlar alınabileceği belirtilmiştir.^[22]

NAVİGASYON SİSTEMLERİ VE ARTIRILMIŞ GERÇEKLIK ARAÇLARI

Ortopedik navigasyonun evrimi, cerrahi başarıyı cerrahın öznel deneyimine dayalı göz kararı yöntemler-

den kurtararak objektif ve veri odaklı bir hassasiyet dönemine taşımıştır. Bu gelişim süreci; statik BT planlamalarından gerçek zamanlı floroskopi rehberliğine ve nihayetinde radyasyonsuz çalışan modern görüntüsüz tekniklere uzanan üç temel teknolojik nesli kapsamaktadır. Navigasyon sistemlerinin sağladığı bu dijital disiplin, implant yerleşimi ve kemik dizilimindeki insan hatasını minimize ederek operasyonel sonuçları istatistiksel olarak daha güvenilir ve kusursuz hâle getirmektedir.^[23] Bilgisayarlı tomografi tabanlı navigasyon sistemleri, dirsek artroskopisinde hata payını 1,13 milimetre (mm)'ye indirerek ve planlanan bölgenin %85'inde tam isabet sağlayarak cerraha milimetrik bir kesinlik sunmaktadır. Bu teknoloji, özellikle görüşün kısıtlı ve nörovasküler riskin yüksek olduğu alanlarda cerraha “X-ray vizyonu (röntgen benzeri görselleştirme)” kazandırarak kemik debridmanını tahmine dayalı olmaktan çıkarıp güvenilir bir standarda taşımaktadır.^[24] Zhang ve ark. çalışmalarında, cerrah deneyiminden bağımsız çalışan görüntüsüz bir kinematik navigasyon yöntemiyle dirsek rotasyon merkezini milimetrik hassasiyetle belirleyerek yanlış yerleşime bağlı eklem sertliği riskinin minimize edildiğini ve cerrahi doğruluğu en üst düzeye çıkarıldığını göstermiştir.^[25]

Artırılmış gerçeklik teknolojisi, dirsek artroskopisinde eklem içindeki dar ve riskli anatomik alanlarda cerraha dijital navigasyon desteği sunarak portal yerleşimini optimize etmekte ve enstrümanların kör noktalarda güvenli ilerletilmesini sağlamaktadır (Şekil 1). Sistem, tümör sınırlarını ve komşu nörovasküler yapıları gerçek



Şekil 1. Artırılmış gerçeklik teknolojinin cerrahide kullanımı (Gemini-3 Pro, 2025).

zamanlı olarak görselleştirerek, sağlıklı dokuyu korurken tümörün tam rezeksiyonuna (temiz cerrahi sınır) olarak tanımaktadır.^[26] Torino Üniversitesinde yapılan bir tez çalışmasında, modern dirsek cerrahisinde iyatrojenik sinir hasarı ve radyasyon maruziyeti risklerini minimize etmeyi hedeflenerek HoloLens 2 ile kızılötesi derinlik kameralarını entegre eden modüler bir artırılmış gerçeklik navigasyon ekosistemi sunulmuştur. Kirschner (K) yerleştirme sürelerini optimize ederken hedefleme hassasiyetini milimetrik düzeye ulaştıran bu teknoloji, cerrahi debridman ve fiksasyon prosedürlerini geleneksel “tahmine dayalı” yaklaşımlardan kurtararak veri odaklı ve yüksek kesinlikli bir güvenlik standardına taşımaktadır.^[27] Deneyimli uzmanların, artırılmış gerçeklik teknolojisiyle farklı bir konumdaki ameliyata uzaktan bağlanarak gerçek zamanlı rehberlik edebilmesi bu teknolojinin en önemli faydalarından biridir.^[28]

ROBOTİK DESTEKLİ CERRAHİ

Ortopedik robotlar 1980’lerden bu yana aktif, yarı aktif ve pasif sistemler olarak sınıflanabilecek tarihsel bir dönüşüm geçirmiştir (Şekil 2). Cerrahi hassasiyet, haptik geri bildirim ve navigasyon desteğiyle büyük gelişme göstermiştir. Diz ve kalça cerrahisindeki yaygın kullanımın aksine dirsek ekleminin dar anatomisi ve nörovasküler riskleri, robotik uygulamaların bu bölgede daha spesifik ve kontrollü gelişmesini zorunlu kılmıştır.^[23] Günümüzde dirsek cerrahisindeki teknolojik odak noktası, cerraha otonom kamera kontrolü sunan robotik asis-



Şekil 2. Robot destekli cerrahi ile cerrahi hassasiyette ilerleme (Gemini-3 Pro, 2025).

tanlar ve cerrahi hassasiyet sağlayan gelişmiş navigasyon sistemleri aracılığıyla operasyonel güvenliği maksimize etmektedir.^[23] Bilgisayar destekli ortopedik cerrahi yayınları 2002-2021 yılları arasında iki katından fazla artış göstermiştir.^[29] Li ve ark.'nın yaptıkları çalışmada dirsek artroskopisinde cerrahın bir elini serbest bırakarak çift el cerrahisi yapmasına olanak tanıyan, akıllı empedans kontrolü ve doğrusal olmayan bozucu gözlemci ile donatılmış bir yardımcı robotik kol sistemi kullanılmıştır. Sistemin temel yeniliği, cerrahın yönlendirmelerine esnek bir şekilde uyum sağlarken, alet ağırlığı veya beklenmedik fiziksel temas gibi dış etkenleri otomatik olarak telafi ederek kamerayı milimetrik hassasiyette sabit tutabilmesidir. Robotik asistanlık sayesinde geleneksel manuel kamera kontrolünün fiziksel yükünü cerrahın üzerinden alınmasının operasyonel verimliliği ve güvenliği artırabileceği vurgulanmaktadır.^[30] Wee ve ark.'nın çalışması, robotik cerrahi konsolun, cerraha laparoskopik ve açık cerrahiye kıyasla daha nötr bir vücut duruşu sağlayarak boyun ve gövde üzerindeki fiziksel stresi anlamlı derecede azalttığını göstermektedir. Bulgular özellikle cerrahın boyun, omuz ve üst ekstremitte kas aktivitesinin düştüğünü gösteren elektromiyografi verileri ve düşen ağrı skorlarıyla desteklenmektedir. Bununla birlikte, uzun süreli oturmaya bağlı statik duruş ve dokunsal geri bildirim eksikliği temel kısıtlılık olarak vurgulanmaktadır.^[31]

YAPAY ZEKÂNIN DİRSEK CERRAHİSİNDEKİ YERİ

Geleneksel artroskopinin hassasiyet ve kişiselleştirme eksiklerini gidermeyi amaçlayan yapay zekâ ve artırılmış gerçeklik teknolojileri, cerrahi süreçlere dijital bir akıllı güçlendirme sunmaktadır. Ameliyat planlamasında kullanılan yapay zekânın, sanal modelleri gerçek sahneye entegre eden artırılmış gerçeklikle birleşmesi cerrahın derinlik algısını artırarak “1+1>2” şeklinde güçlü bir sinerji yaratmaktadır (Şekil 3).^[32] Omuz ve dirsek cerrahisinde yapay zekâ; klinik sonuç tahminleri, radyolojik görüntü analizi, otomatik segmentasyon ve dokümantasyon yükünü azaltan doğal dil işleme gibi alanlarda güncel olarak kullanılmaktadır. Gelecekte en büyük ilerlemenin robotik cerrahi entegrasyonu ve giyilebilir teknolojilerle desteklenen uzaktan rehabilitasyon süreçlerinde yaşanması beklenmektedir. Ancak sınırlı veri setleri, modellerin karar verme süreçlerindeki şeffaflık eksikliği (kara kutu sorunu), etik kaygılar ve hatalı bilgi üretimi (halüsinasyonlar) teknolojinin yaygınlaşmasının önündeki temel engellerdir. Bu kısıtlamalara rağmen yapay zekâ entegrasyonu, cerrahide geleneksel yöntemlerden artroskopiye geçişe benzer büyük bir teknolojik sıçrama vaat etmektedir.^[33] PubMed veri tabanı kullanılarak 2000-2022 yılları arasının tarandığı bir çalışmada, omuz ve dirsek cerrahisinde yapay zekâ üzerine odaklanan 85 makale analiz edilmiş, araştırmada 2010 yılından itibaren



Şekil 3. Simülasyon desteğiyle ameliyat öncesi cerrahi planlama (Gemini-3 Pro, 2025).

üstel bir artış gösteren yayın sayısının özellikle 2019-2021 yılları arasında en hızlı büyümesini kaydederek yılda 24 yayına ulaştığını ortaya koymuştur.^[34]

KİŞİSELLEŞTİRİLMİŞ REHABİLİTASYON

Spor hekimliğinde veri odaklı ve hasta merkezli bir rehabilitasyon modeline geçişin önemi ve akıllı teknolojilerin klinik pratikteki etkinliği giderek belirginleşmektedir. Gelişmiş sensörlere sahip giyilebilir bir cihaz ve entegre yazılım platformları aracılığıyla dirsek hareketlerinin gerçek zamanlı olarak takip edilebildiği ve eklem hareket açıklığının +/- 3°'lik yüksek bir hassasiyetle ölçülebildiği gösterilmiştir. Bu dijital yaklaşımın hastane ziyaretlerini önemli ölçüde azalttığı ve toplam iyileşme süresini yaklaşık üçte bir oranında kısalttığı vurgulanmaktadır.^[35] Helian ve ark. çalışmalarında, akıllı kontrol algoritmalarıyla yönetilen bir sistemle; pasif, aktif-yardımcı ve dirençli eğitim modları sunarak hastanın eklem hareket açıklığını sürekli kaydeder ve bilimsel veriler ışığında evde bağımsız egzersiz yapma imkânı sunar. Sonuçta sistemin kararlı bir yapıda çalışarak dirsek fonksiyonlarını geri kazandırmada etkili olduğunu ve rehabilitasyon sürecinin verimliliğini artırdığı bulunmuştur.^[36]

SONUÇ

Dirsek eklemi, üst ekstremitte fonksiyonları için kritik bir öneme sahip olmasına rağmen literatürde diğer

eklemlere kıyasla daha az incelenmiş bir alan olup küçük yaralanmaların bile ciddi engellilik yaratabildiği karmaşık bir yapıdır.^[37] Cerrahi deneyimin artması ve teknolojiye gelişmelerle minimal invaziv cerrahinin yükselişi olmuştur ve artarak devam etmektedir. Dirsek artroplastisi cerrahi endikasyon, cinsiyet ve yaştan bağımsız olarak genel bir düşüş eğilimindedir. Romatoid artrit artık geçmişe göre daha nadir bir endikasyon hâline gelmiştir.^[38] Dirsek artroskopisinin tenisçi dirseği, osteoartrit ve spor yaralanmalarında sağladığı yüksek hassasiyet ile hızlı iyileşme avantajları bulunmaktadır. Dirsek eklemine dar yapısı nedeniyle yüksek cerrahi uzmanlık gerektiren bu yöntem, günümüzde açık cerrahinin yerini giderek daha fazla almaktadır. Gelecekte ise yapay zekâ destekli görüntü analizi, robotik navigasyon sistemleri ve biyolojik doku mühendisliği uygulamalarının cerrahi sürece tam entegrasyonu çok daha kişiselleştirilmiş tedavi sonuçları hedeflenmektedir.^[39]

KAYNAKLAR

1. Martin S, Sanchez E. Anatomy and biomechanics of the elbow joint. *Semin Musculoskelet Radiol* 2013;17(5):429-36. **Crossref**
2. Zimmerman NB. Clinical application of advances in elbow and forearm anatomy and biomechanics. *Hand Clin* 2002;1-19. **Crossref**
3. Rotman D, Bokhari N, Wright A, Watts AC. The posterolateral ligament of the elbow: Anatomy and clinical relevance. *J Shoulder Elbow Surg* 2024;33(3):573-82. **Crossref**
4. Bennett K, Kamineni S. History of elbow arthroscopy. *J Arthrosc Surg Sports Med* 2020;1(1):23-31.
5. Çapkin S, Kılıç Aİ, Şeker F, Akdemir M, Aydın M, Şahin E. Elbow arthroscopy: Where are we today? A bibliometric analysis. *Cyprus J Med Sci* 2024;9(6):424-31. **Crossref**
6. Imhoff AB, Lenich A, editors. *Elbow Arthroscopy and Minimal Invasive Surgery*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2024. **Crossref**
7. Karanasios S, Korakakis V, Moutzouri M, Drakonaki E, Koci K, Pantazopoulou V, et al. Diagnostic accuracy of examination tests for lateral elbow tendinopathy (LET) - A systematic review. *J Hand Ther* 2022;35(4):541-51. **Crossref**
8. Daniels SP, Fritz J. Acute and chronic elbow disorders: MR imaging-ultrasonography correlation. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 2023;31(2):269-84. **Crossref**
9. Wong MT, Wiens C, Kuczynski M, Manske S, Schneider PS. Four-dimensional computed tomography: Musculoskeletal applications. *Can J Surg* 2022;65(3):E388-93. **Crossref**
10. Folco G, Messina C, Gitto S, Fusco S, Serpi F, Zagarella A, et al. CT Arthrography of the elbow: What radiologists should know. *Tomography* 2024;10(3):415-27. **Crossref**
11. Joshi MA, Bains NJJ, Stone AJM, Wells LJ, Phadnis JS. Considerable variation in current coronoid height and fracture measurement techniques: A systematic review. *J Shoulder Elbow Surg* 2024;33(6):1425-34. **Crossref**

12. Quzli AA, Elheet AM, Quzali RA. Posterolateral rotatory instability of the elbow: A practice-focused narrative review. *Cureus* 2025;17(11). [Crossref](#)
13. Koukos C, Chatzivasiladias M, Arrigoni P, Giotis D, Montoya F, Kapetanakis S. Post-traumatic elbow stiffness in adolescents: Open vs. arthroscopic management and comparison with adults. *Orthop Rev (Pavia)* 2025;17:145859. [Crossref](#)
14. Kholinne E, Jeon IH, Kwak JM. The recent surgical treatment of elbow pain. *Ewha Med J* 2023;46(4):e15. [Crossref](#)
15. Ghandour M, AL Salloum D, Jaber MH, Abou Orm G, Ghosn A, Jaber S, et al. A comparative meta-analysis of the efficacy and safety of arthroscopic versus open surgery in patients with lateral epicondylitis. *J Orthop* 2025;59:41-50. [Crossref](#)
16. Caekebeke P, van Riet F, van Riet R. Arthroscopic treatment for elbow trauma: Learning curve and outcomes. *Hand Clin* 2025;41(4):421-31. [Crossref](#)
17. Grunert R, Winkler D, Frank F, Moebius R, Kropla F, Meixensberger J, et al. 3D-printing of the elbow in complex posttraumatic elbow-stiffness for preoperative planning, surgery-simulation and postoperative control. *3D Print Med* 2023;9(1):28. [Crossref](#)
18. Beredjiklian P, Fram B, Core J, Ng JI, Pugliese R, Kwan SA, et al. 3D printed models of periarticular fractures of the shoulder and elbow improve surgical decision making in orthopedic trainees. *Arch Bone Jt Surg* 2025;13(6):337-44.
19. Allam O, Kammién A, Baker R, Adamczyk P, Prsic A. A comprehensive review of the educational, clinical and rehabilitative applications of 3D printing technology in hand surgery. *Plast Aesthet Res* 2024;11(3):44. [Crossref](#)
20. Roth SMI, Weber CD, Hildebrand F, Delbrück H. Strategies for surgical reconstruction of complex elbow deformities based on patient-specific instruments-A case series and narrative review. *Innov Surg Sci* 2026;11(1):15-26. [Crossref](#)
21. Sedigh A, Zohoori M, Ebrahimzadeh MH, Kachooei AR. Cubitus varus corrective osteotomy and graft fashioning using computer simulated bone reconstruction and 3D printed custom-made cutting guides. *Arch Bone Jt Surg* 2021;9(4):467-71.
22. Luenam S, Kosiyatrakul A, Phakdeewisetkul K, Puncreobutr C. The patient-specific implant created with 3D printing technology in treatment of a severe open distal humerus fracture with complete loss of the lateral column. *J Orthop Surg* 2020;28(3):2309499020960251. [Crossref](#)
23. Li T, Badre A, Alambeigi F, Tavakoli M. Robotic systems and navigation techniques in orthopedics: A historical review. *Applied Sciences* 2023;13(17):9768. [Crossref](#)
24. Shiode R, Oka K, Shigi A, Miyamura S, Tanaka H, Mae T, et al. Arthroscopic debridement of elbow osteoarthritis using CT-based computer-aided navigation systems is accurate. *Arthrosc Sports Med Rehabil* 2021;3(6):e1687-96. [Crossref](#)
25. Zhang T, Wang J, Ding H, Zha Y, Wang G, Han W. An image-free method of elbow external fixation surgery based on computer-assisted navigation: A cadaveric study. *Med Phys* 2025;52(7):e17974. [Crossref](#)
26. Calem DB, Lubiowski P, Trenhaile S, Gobbato B, Wong I, Alkhateeb J, et al. Mixed reality applications in upper extremity surgery: The future is now. *EFORT Open Rev* 2024;9(11):1034-46. [Crossref](#)
27. Molinari F, Salvi M, Cali C, Cangelosi A. Image-guided surgery and augmented reality in orthopaedic surgery: A perspective on reducing iatrogenic nerve damage in elbow. *Torino: Politecnico di Torino*; 2023.
28. Oyama S, Iwase H, Yoneda H, Yokota H, Hirata H, Yamamoto M. Insights and trends review: Use of extended reality (xR) in hand surgery. *J Hand Surg Eur* 2025;50(6):762-70. [Crossref](#)
29. Lee CC, Jung KH, Lee KJ, Park KB. A bibliometric analysis of the field of computer-assisted orthopedic surgery during 2002-2021. *Clin Orthop Surg* 2023;15(2):227. [Crossref](#)
30. Li T, Badre A, Taghirad HD, Tavakoli M. Integrating impedance control and nonlinear disturbance observer for robot-assisted arthroscope control in elbow arthroscopic surgery. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*; 2022. p. 11172-9. [Crossref](#)
31. Wee IJY, Kuo LJ, Ngu JCY. A systematic review of the true benefit of robotic surgery: Ergonomics. *Int J Med Robot Comput Assist Surg* 2020;16(4):e2113. [Crossref](#)
32. Chen H. Application progress of artificial intelligence and augmented reality in orthopaedic arthroscopy surgery. *J Orthop Surg Res* 2023;18(1):775. [Crossref](#)
33. Levin JM, Lorentz SG, Hurley ET, Lee J, Throckmorton TW, Garrigues GE, et al. Artificial intelligence in shoulder and elbow surgery: Overview of current and future applications. *J Shoulder Elbow Surg* 2024;33(7):1633-41. [Crossref](#)
34. Gupta P, Marigi EM, Sanchez-Sotelo J. Research on artificial intelligence in shoulder and elbow surgery is increasing. *JSES Int.* 2023;7(1):158-61. [Crossref](#)
35. Alonso-Rollán S, Márquez-Sánchez S, Carrera A, Froes IMS, Blanco JF. Evaluation and refinement of elbow recovery in sports medicine using smart tracking technologies. *ADCAIJ* 2024;13. [Crossref](#)
36. Helian Q, Chang J, He Z, Sun T. A novel robotic-assisted rehabilitation system for elbow fracture: Design and full-cycle rehabilitation strategy. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2025;33:2404-15. [Crossref](#)
37. Lake SP. Emerging trends in elbow injury, pathology and treatment. *Ann Jt* 2021;6:2. [Crossref](#)
38. McKissack H, Karzon AR, Hussain ZB, Worden JA, Heo KY, Cooke HL, et al. Is popularity of total elbow arthroplasty in the United States decreasing? An analysis of trends, demographics, and indications. *JSES Rev Rep Tech* 2024;4(4):797-804. [Crossref](#)
39. Oh JM, Jeon YD. Current and future perspectives in shoulder and elbow arthroscopy: A narrative review. *J Korean Med Assoc* 2025;68(8):487-97. [Crossref](#)