

Üç boyutlu yazıcı, bilgisayar destekli tasarım ve robotik eklem protez uygulamaları

Three-dimensional printer, computer assisted design and robotic joint prosthesis applications

Can Eser¹, Kayahan Karaytuğ^{1,2}, Göksel Dikmen^{1,2}

¹Acıbadem Mehmet Ali Aydınlar Üniversitesi, Ortopedi ve Travmatoloji Ana Bilim Dalı, İstanbul

²Acıbadem Mehmet Ali Aydınlar Üniversitesi, Ortopedi ve Travmatoloji Ana Bilim Dalı, Acıbadem Maslak Hastanesi, Uluslararası Eklem Cerrahi Merkezi, İstanbul

Kalça ve diz artroplastisi, modern ortopedinin en sık uygulanan ve en başarılı cerrahi girişimleri arasında yer almakta olup yaşanan nüfus ve osteoartrit prevalansındaki artış bu girişimlere yönelik talebi giderek yükseltmektedir. Bu doğrultuda daha hassas, öngörülebilir ve hastaya özgü cerrahi yaklaşımlara olan ilgi artmış; üç boyutlu (3B) yazıcı, bilgisayar destekli tasarım (BDT) ve robotik destekli artroplasti uygulamaları modern artroplasti pratiğinde öne çıkan teknolojiler hâline gelmiştir. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi, hastaya özgü anatomik modellerin ve kesi kılavuzlarının üretilmesi yoluyla ameliyat öncesi planlamayı kolaylaştırmakta ve özellikle standart enstrümantasyonun yetersiz kaldığı olgularda intraoperatif rezeksiyon doğruluğuna katkı sağlamaktadır. Bilgisayar destekli tasarım; hastaya özgü 3B kemik modeli üzerinde implant boyutlandırma, komponent dizilimi, anatomiye uygun konumlandırma ve bacak dizilimi restorasyonunun sanal olarak planlanmasına olanak tanımaktadır. Robotik destekli sistemler ise ameliyat içi mekanik kısıtlama ve dokusal geri bildirim mekanizmalarıyla komponent pozisyonlamasında doğruluğu artırmakta; özellikle düşük vaka hacmine sahip ve erken kariyer dönemindeki cerrahların sonuçlarını iyileştirmektedir. Mevcut kanıtların büyük çoğunluğunun kısa ve orta vadeli olması ile maliyet, üretim süresi ve standardizasyon eksikliği gibi sınırlılıklar bu teknolojilerin yaygın kullanımının önündeki başlıca engellerdir. Bu derlemede 3B yazıcı, BDT ve robotik destekli artroplasti uygulamalarının güncel kullanım alanları, klinik sonuçları, sınırlılıkları ve gelecek perspektifleri güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir.

Anahtar sözcükler: üç boyutlu yazıcı; bilgisayar destekli tasarım; robotik destekli cerrahi; total diz artroplastisi; total kalça artroplastisi; hastaya özgü enstrümantasyon

Hip and knee arthroplasty is among the most frequently performed and successful surgical procedures in modern orthopedics, and the aging population and the increase in the prevalence of osteoarthritis are increasing the demand for these interventions. In this direction, interest in more sensitive, predictable and patient-specific surgical approaches has increased; three-dimensional (3D) printing, computer-assisted design (CAD) and robotic-assisted arthroplasty surgery (RAS) applications have become prominent technologies in modern arthroplasty practice. 3D printer technology facilitates preoperative planning through the production of patient-specific anatomical models and incision guides and contributes to intraoperative resection accuracy, especially in cases where standard instrumentation is insufficient. CAD; It allows virtual planning of implant sizing, component alignment, anatomical positioning and leg alignment restoration on a patient-specific three-dimensional bone model. Robotic-assisted systems, on the other hand, increase accuracy in component positioning with intraoperative mechanical restraint and haptic feedback mechanisms; It improves the results of surgeons with low case volume and early careers. Most of the available evidence is short- and mid-term, and limitations such as cost, production time, and lack of standardization are the main barriers to the widespread use of these technologies. In this review, the current usage areas, clinical outcomes, limitations and future perspectives of 3D printer, CAD and RAS applications are evaluated in the light of current literature.

Key words: three-dimensional printer; computer-assisted design; robotic assisted surgery; total knee arthroplasty; total hip arthroplasty; patient-specific instrumentation

İletişim / Contact: Prof. Dr. Göksel Dikmen • E-posta / E-mail: drgokseldikmen@gmail.com

ORCID ID: Can Eser, 0000-0003-3239-3665 • Kayahan Karaytuğ, 0000-0001-8980-4133 • Göksel Dikmen, 0000-0001-6891-3488

Geliş / Received: 2 Haziran 2026 • **Revizyon / Revised:** 25 Haziran 2026 • **Kabul / Accepted:** 25 Haziran 2026

GİRİŞ

Kalça ve diz artroplastisi, modern ortopedide en sık uygulanan ve en başarılı cerrahi girişimler arasında yer almakta olup ileri evre dejeneratif eklem hastalığı bulunan hastalarda ağrının azaltılması, fonksiyonel kapasitenin artırılması ve yaşam kalitesinin iyileştirilmesinde etkili sonuçlar sağlamaktadır.^[1] Yaşlanan nüfus ve osteoartrit prevalansındaki artış, kalça ve diz artroplastisine yönelik talebin giderek artmasına neden olmaktadır.^[2] Bu da artroplastisi pratiğinde daha hassas, öngörülebilir ve hastaya özgü yaklaşımlara olan artan ilgiyi beraberinde getirmiştir.

Bu gereksinimler doğrultusunda üç boyutlu (3B) yazıcı, bilgisayar destekli tasarım (BDT) ve robotik eklem protez uygulamaları, modern artroplastide öne çıkan başlıklar hâline gelmiştir.^[3-5] Cerrah deneyimine ve standart enstrümantasyona dayanan geleneksel yaklaşımların aksine, bu teknolojiler ameliyat öncesi planlamadan ameliyat içi navigasyona; gerçek zamanlı geri bildirimden hasta spesifik cerrahi kılavuzların üretimine kadar uzanan geniş bir yelpazede artroplastisi cerrahisini desteklemektedir.^[6,7]

Bu derlemede kalça ve diz artroplastisinde 3B yazıcı, BDT ve robotik eklem protez uygulamalarının güncel kullanım alanları ele alınmış; söz konusu teknolojilerin artroplastisi pratiğindeki yeri, olası avantajları, sınırlılıkları ve gelecekteki gelişim alanları güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir. Amacımız, bu teknolojilere ilişkin mevcut kanıtları bütüncül bir bakış açısıyla sentezlemek ve artroplastisi cerrahisine yönelik klinik yansımalarını tartışmaktır.

ÜÇ BOYUTLU YAZICI

Temel Kavramlar

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi, dijital bir tasarım dosyasından katman katman malzeme eklenerek fiziksel nesne üretilmesi esasına dayanır. Ortopedik uygulamalarda 3B yazıcı ile üretilen hastaya özgü cerrahi kesi kılavuzları ve anatomik modeller, hastanın ameliyat öncesi görüntüleme verilerinden [bilgisayarlı tomografi (BT) veya manyetik rezonans görüntüleme (MRG)] elde edilen 3B kemik modelleri kullanılarak tasarlanmaktadır.^[8] Üç boyutlu yazıcı teknolojisinin artroplastisi pratiğindeki başlıca klinik katkıları; ameliyat öncesi planlamayı kolaylaştıran anatomik modellerin üretilmesi, hasta spesifik cerrahi kılavuzlar aracılığıyla ameliyat içi rezeksiyon doğruluğunun artırılması ve standart enstrümantasyonun yetersiz kaldığı karmaşık vakalarda cerraha yapısal rehberlik sağlanması olarak özetlenebilir.^[9] Artroplastisi dışında eklem koruyucu cerrahide ve yüksek tibial osteotomi (YTO) gibi girişimler-

de de 3B yazıcı teknolojisiyle üretilen hasta spesifik osteotomi kılavuzlarının, koronal ve sagittal planda planlanan düzeltmenin yüksek doğrulukla uygulanmasını sağladığı gösterilmiştir.^[10]

Total Diz Artroplastisinde Hastaya Özgü Kesi Kılavuzları

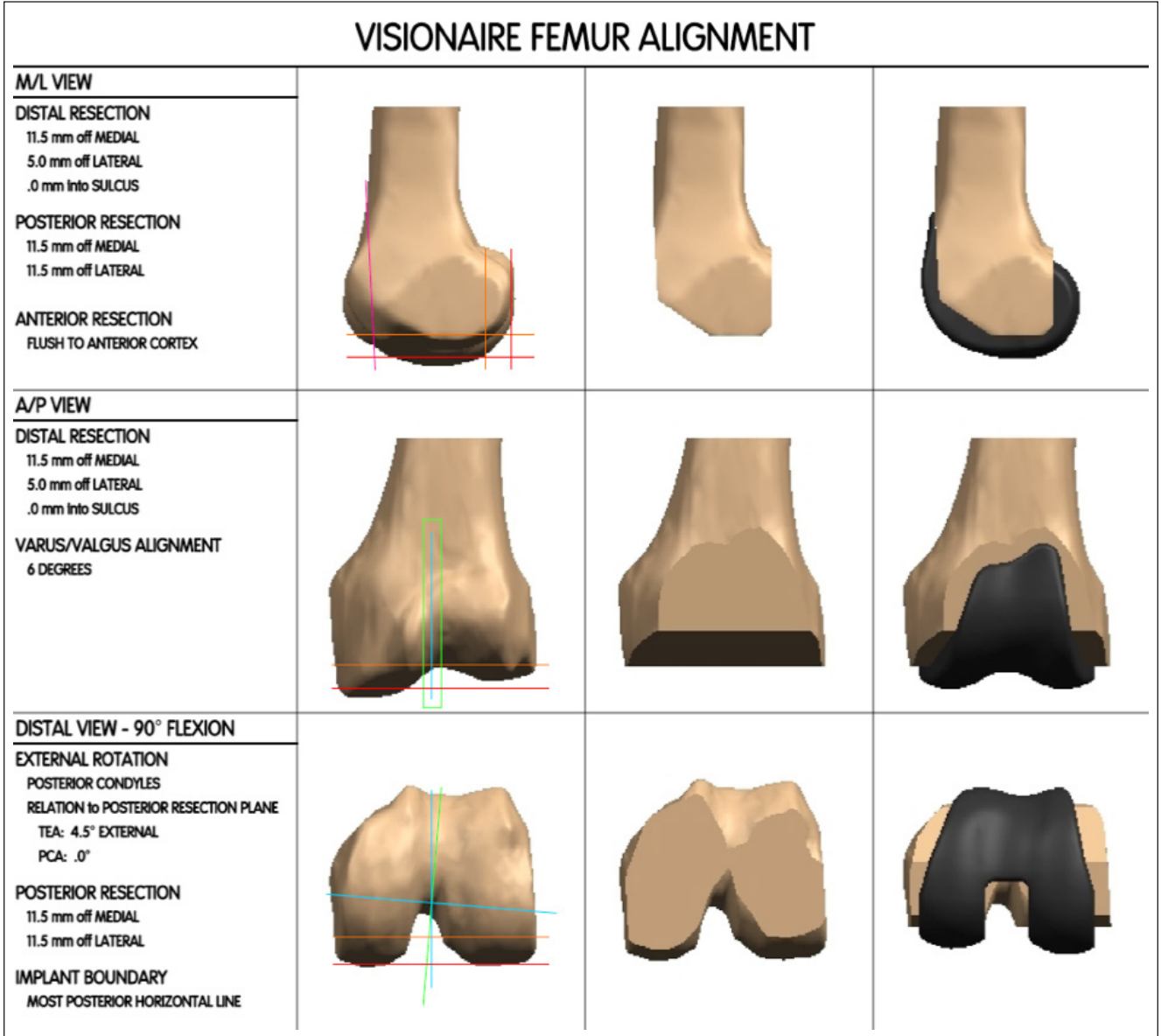
Hastaya özgü enstrümantasyon (HÖE), ameliyat öncesi görüntüleme verileri kullanılarak hastanın kemik anatomisine göre tasarlanan ve 3B yazıcı teknolojisi ile üretilen kesi kılavuzlarıdır.^[9] Bu yöntem; standart dışı anatomiye sahip olgularda, intramedüller rod kullanımını engelleyen implantı bulunan hastalarda ve medüller kanala girişin riskli olduğu veya medüller kanala girişin uygun olmadığı durumlarda özellikle kullanılabilir.^[11] Hastaya özgü enstrümantasyon, geleneksel yaklaşımın aksine intramedüller veya ekstramedüller referans aletlerine ihtiyaç duyulmadan, her hastanın anatomik özelliklerine birebir uyacak biçimde tasarlanmış kılavuzlarla, cerrahın ameliyat öncesi planını intraoperatif ortama aktarmasına olanak tanımaktadır.

Üretim süreci

Hastaya özgü kesi kılavuzlarının üretimi aşağıdaki basamakları içermektedir:

1. Görüntüleme: Hastadan ortoröntgenografi ve BT veya MRG (üretici firmaya özgü protokol doğrultusunda) görüntüleri elde edilir.
2. Veri transferi: Görüntüleme verileri dijital ortamda üretici firmaya aktarılır.
3. Üç boyutlu kemik modeli oluşturulması: Aktarılan görüntüler üzerinden hastaya özgü 3B kemik modeli rekonstrükte edilir.
4. Ameliyat öncesi planlama: Mekanik dizilim referans noktaları belirlenir; cerrahın tercihleri doğrultusunda implant boyutu ve yerleşimi 3B model üzerinde planlanır (Şekil 1,2).
5. Cerrah onayı: Hazırlanan planlama cerraha sunulur; cerrah planı onaylar veya gerekli düzenlemeleri yaparak revize eder.
6. Üretim ve sevkiyat: Onaylanan plan doğrultusunda 3B yazıcı ile hastaya özel kesi kılavuzları üretilir. Steril paketlenmiş olarak hastaneye ulaştırılır ve operasyonda kullanılır (Şekil 3).

Bu süreç genelde dört-altı hafta sürmekte olup elektif cerrahi planlamasında bu zaman aralığının dikkate alınması gerekmektedir.



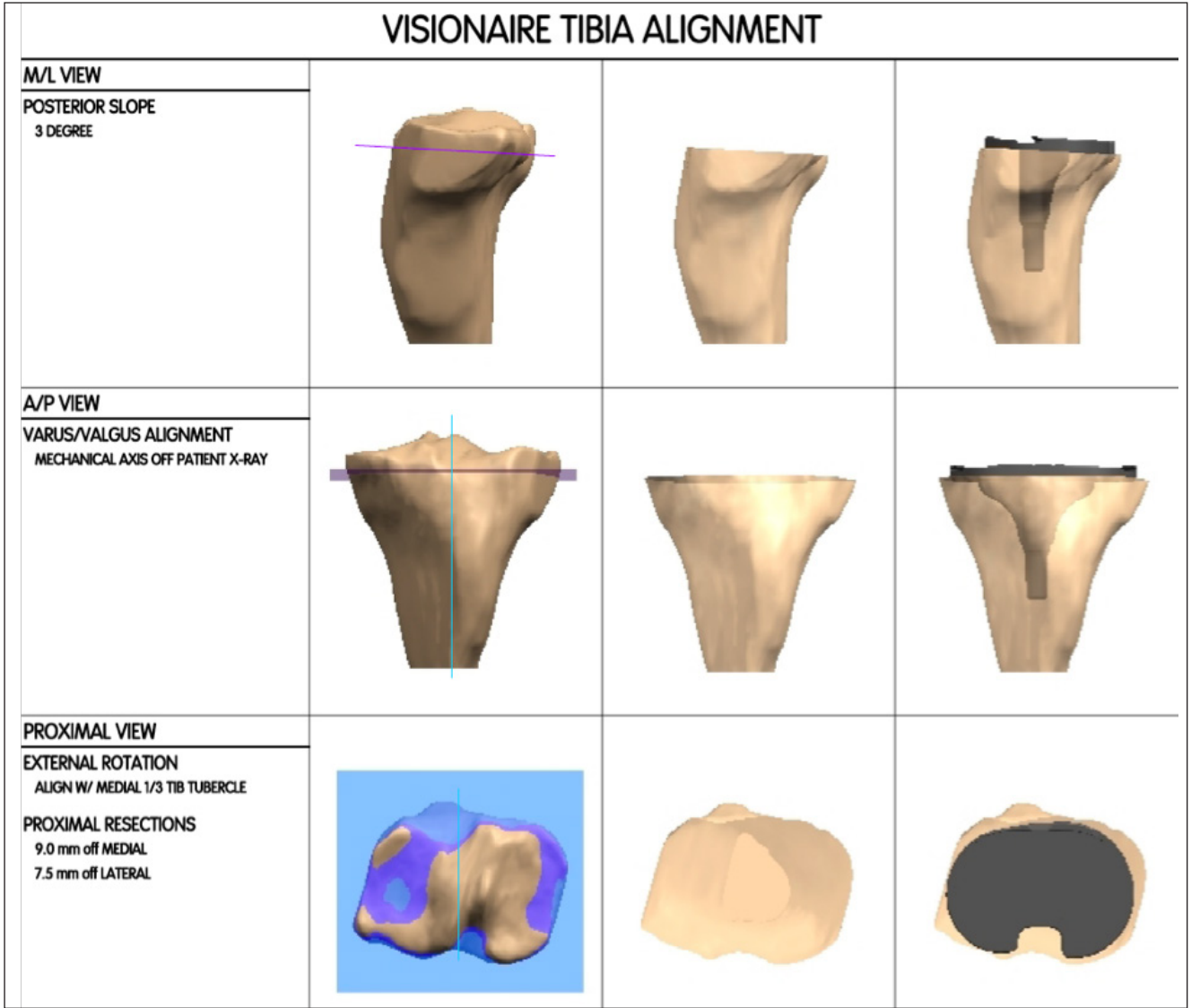
Şekil 1. Hastaya özgü femoral kesi bloğunun ameliyat öncesi dijital planlaması (Visionaire, Smith & Nephew). Mediolateral (M/L), anteroposterior (A/P) ve distal görünümde distal, posterior ve anterior rezeksiyon miktarları ile rotasyonel hizalama [transepikondiler eksen (TEA) ve posterior kondiler eksen (PCA) referans alınarak] 3B femur modeli üzerinde planlanmaktadır.

Klinik sonuçlar ve sınırlılıklar

Mevcut kanıtlar 3B yazıcı ile üretilen HÖE'lerin total diz artroplastisinde planlanan rezeksiyonun ameliyat içi uygulanmasına katkı sağladığını desteklemekle birlikte verilerin büyük çoğunluğu kısa ve orta vadeli niteliktedir.^[11] Hastaya özgü enstrümantasyonunun standart enstrümantasyona kıyasla mekanik hizalanmayı tutarlı biçimde iyileştirdiğini gösteren kanıtlar sınırlı kalmaktadır; sistematik derlemeler ve karşılaştırmalı çalışmalar, ameliyat sonrası ekstremite aksı ve komponent hizalanması açısından belirgin bir üstünlük ortaya koymamıştır.^[12] Buna karşın bazı sistematik derlemeler,

HÖE kullanımının özellikle femoral komponent rotasyon hizalanmasında cerrahi sınırlar dışına kaçma oranlarını azaltabileceğini bildirmektedir.^[13]

Operatif verimlilik açısından değerlendirildiğinde HÖE'nin, standart enstrümantasyona kıyasla kullanılan alet seti sayısını ve ameliyathane süresini anlamlı ölçüde azalttığı gösterilmiştir.^[14] Ayrıca Oxford unikondiler diz artroplastisinde 3B yazıcı teknolojisi ile üretilen femoral pozisyonlama kılavuzlarının, özellikle femoral mekanik-anatomik açısı <5° veya >7° olan olgularda, komponent hizalanmasını iyileştirdiği randomize kontrollü bir çalışmada gösterilmiştir.^[15]



Şekil 2. Hastaya özgü tibial kesi blokunun ameliyat öncesi dijital planlaması (Visionaire, Smith & Nephew). Mediolateral (M/L), anteroposterior (A/P) ve proksimal görünümde posterior eğim, varus/valgus dizilimi ve proksimal rezeksiyon miktarları, hastanın BT/MRG görüntülerinden elde edilen 3B kemik modeli üzerinde milimetrik hassasiyetle belirlenmektedir.

Yöntemin başlıca sınırlılıkları arasında; ek görüntüleme ve üretim maliyetleri, zaman alıcı ameliyat öncesi planlama süreci ve mevcut verilerin çoğunlukla kısa dönem sonuçlara dayanması yer almaktadır. Bununla birlikte HÖE'nin, uzun dönem implant sağkalımına olası katkısı ve hangi hasta alt gruplarında belirgin yarar sağladığı sorusu araştırılmaya devam etmektedir.^[11]

BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM

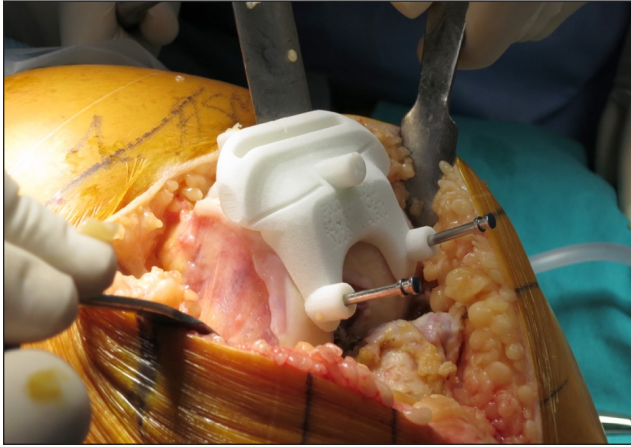
Temel Kavramlar

Bilgisayar destekli tasarım (BDT); hastaya özgü anatomik verilerin 3B olarak modellenmesini, implant boyutunu ve yerleşiminin dijital ortamda ameliyat öncesi plan-

lanmasını ve cerrahi simülasyonların gerçekleştirilmesini sağlayan teknolojileri kapsamaktadır. Artroplasti pratiğinde BDT; implant seçimi, ameliyat öncesi planlama ve cerrahi doğruluğun artırılması amacıyla kullanılmaktadır.^[16]

İmplant Tasarımı

Bilgisayar destekli tasarım yazılımları; parametrik modelleme, sonlu eleman analizi ve topoloji optimizasyonu teknikleri aracılığıyla implant geometrisinin mekanik yük dağılımına göre özelleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşımlar, farklı biyomalzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yoluyla biyomekanik açıdan daha uygun implant tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.^[17]



Şekil 3. Hastaya özgü femoral kesi bloğunun ameliyat içi uygulaması. Kesi bloğu yalnızca o hastanın femur anatomisine tam oturacak biçimde 3B yazıcı ile üretildiğinden, intramedüller rod kullanımına gerek kalmaksızın doğru kesi açıları elde edilebilmektedir.

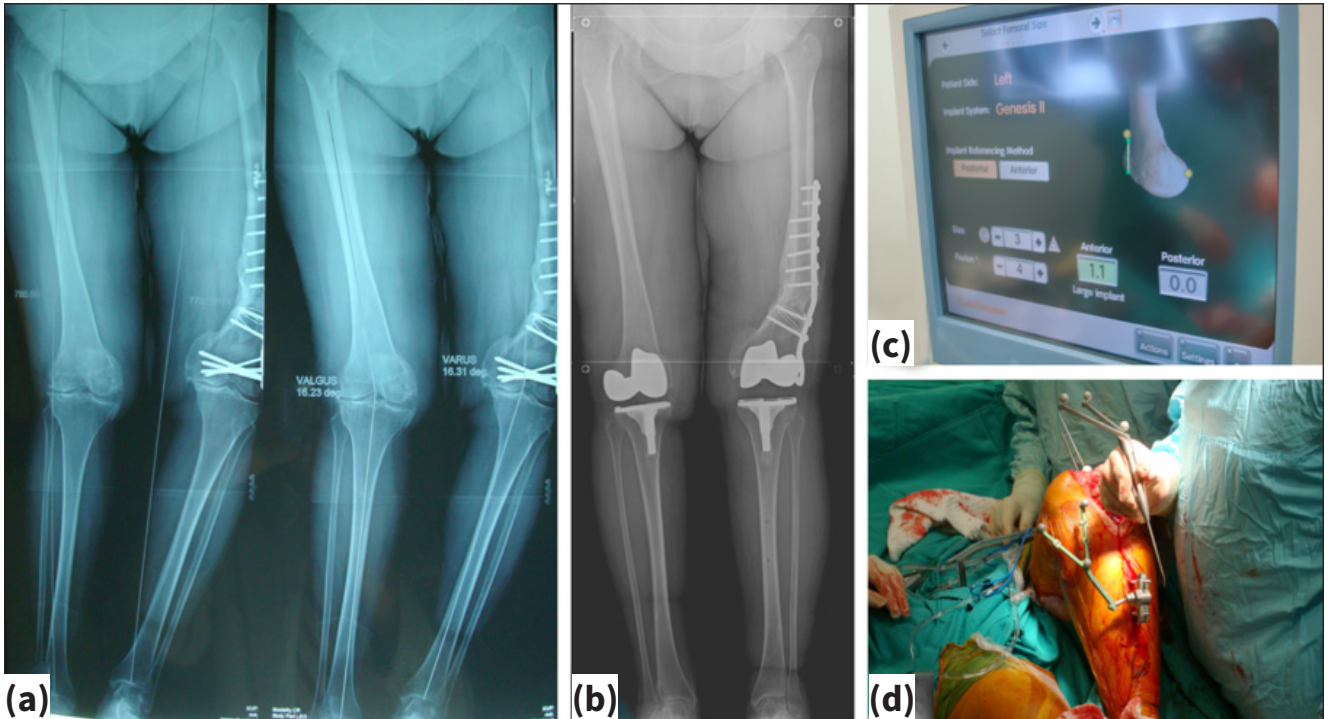
Cerrahi Planlama ve Komponent Konumlandırma

Bilgisayar destekli tasarım tabanlı ameliyat öncesi planlama, hastaya özgü 3B kemik modeli üzerinde implant boyutu ve yerleşiminin sanal olarak belirlenmesini sağlayan çok aşamalı bir süreçtir:

1. Görüntüleme: Ortoröntgenografi ile birlikte BT veya MRG görüntüleri elde edilir.

2. Üç boyutlu model oluşturma: Görüntüler segmentasyon yazılımıyla hastaya özgü kemik modeline dönüştürülür.
3. Anatomik referansların tanımlanması: Mekanik aks, eklem çizgisi ve rotasyonel referans noktaları (transepikondiler aks, posterior kondiler aks vb.) belirlenir.
4. İmplant boyutlandırma ve simülasyon: Komponentlerin boyutu, rotasyonu ve rezeksiyon seviyeleri sanal olarak ayarlanır; hedef dizilim stratejisi (mekanik, anatomik, kinematik veya fonksiyonel) doğrultusunda gap dengesi öngörülerek optimize edilir.
5. Cerrah onayı ve aktarım: Onaylanan plan cerrahi referans olarak kullanılır ya da hastaya özgü kesi kılavuzlarının veya robotik sistemin planına aktarılır.

Bu yaklaşım, özellikle standart aletlerin yetersiz kaldığı ileri deformiteli total diz protezi olgularında mekanik aksın restore edilmesine katkı sağlamaktadır (Şekil 4). Total kalça artroplastisinde ise BDT yazılımları; 2B radyografilerin 3B asetabular kap konumlandırmasına dönüştürülmesine olanak tanımakta ve hem oturur hem de ayakta durur pozisyonlar arasındaki pelvik eğim değişkenliğini hesaba katmaktadır; böylece fonksiyonel 3B planlama, kap pozisyonunun her iki postüre göre optimize edilmesini hedeflemektedir.^[18]



Şekil 4.a-d. Bilateral ileri deformiteli bir olguda BDT ile planlanan total diz artroplastisi. Ameliyat öncesi ortoröntgenografi; sağ dizde 16.23° valgus, sol dizde 16.31° varus deformitesi izlenmektedir (a). Ameliyat sonrası ortoröntgenografi; mekanik aks ve komponent dizilimi her iki ekstremitede restore edilmiştir (b). İntraoperatif BDT yazılım ekranı; hastaya özgü 3B model üzerinde komponent boyutlandırması ve pozisyon ayarlamasının gerçek zamanlı olarak değerlendirilmesi (c). İntraoperatif görünüm; BDT planlaması doğrultusunda komponent yerleştirme aşaması (d).

Biyomekanik Similasyon ve Dijital İkiz

Sonlu elemanlar analizi (SEA) implant tasarımının stres dağılımını ve dayanıklılığını sanal ortamda değerlendiren prelinik tasarım optimizasyonuna olanak tanımakta; kinematik modelleme ise eklem hareket açıklığı ve fleksiyon-ekstansiyon dinamiklerini simüle ederek fonksiyonel performansın öngörülmesinde kullanılmaktadır.^[19] Dijital ikiz tabanlı sanal eklem simülatörleri ise total diz artroplastisinde farklı komponent hizalanma senaryolarının kinematik ve bağ mekanikleri üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.^[20]

Klinik Sonuçlar ve Sınırlılıklar

Bilgisayar destekli tasarım tabanlı fonksiyonel 3B planlama yaklaşımları, spinopelvik parametreleri dikkate alarak asetabular komponent konumlandırmasının hastaya özgü biçimde optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşımlar, klasik *Lewinnek* güvenli bölgesinde yer aldığı düşünülen bazı olgularda kap pozisyonunun yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermiş; postür-spesifik planlamanın sıkışma ve dislokasyon risklerini azaltabileceği öne sürülmüştür.^[21] Bacak uzunluğu açısından ise ameliyat sonrası farkın, olguların büyük çoğunluğunda, 5 milimetre (mm)'nin altında kaldığı bildirilmiştir.^[22] Bununla birlikte, mevcut veriler büyük ölçüde kısa ve orta dönem sonuçlara dayanmaktadır; uzun dönem implant sağkalımı ve hasta bildirimli sonuçlar üzerindeki etkileri henüz yeterince ortaya konulamamıştır. Başlıca sınırlılıklar arasında; görüntüleme kalitesine bağımlılık, segmentasyon hataları, yazılımlar arası standardizasyon eksikliği ve statik modellerin yumuşak doku dengesini yeterince yansıtamaması yer almaktadır. Buna karşın, BDT'nin HÖE ve robotik sistemlerle entegrasyonunun klinik fayda potansiyelini artırabileceği düşünülmektedir.^[23]

ROBOTİK EKLEM PROTEZİ

Temel Kavramlar ve Sistem Sınıflandırması

Robotik destekli artroplasti sistemleri, ameliyat içi mekanik kısıtlama ile dokusal geri bildirimini bir araya getirerek cerrahın komponent pozisyonunu önceden tanımlanmış güvenli sınırlar içinde korumasına olanak sağlamaktadır.^[24] Aktif sistemler kesi işlemini tamamen otomatik olarak gerçekleştirirken yarı aktif sistemler planlanan rezeksiyon alanı dışına çıktığında direnç veya dokusal geri bildirim uygular; pasif sistemler ise yalnızca navigasyon ve görsel rehberlik sağlamaktadır.^[5] Bu teknolojiler, komponent pozisyonlamasında doğruluğu artırarak dizilim sapmalarının azaltılmasına katkı sunmaktadır.^[25]

Robotik Destekli Cerrahinin Uygulama Aşamaları

Robotik destekli artroplasti genel olarak beş aşamadan oluşmaktadır:


1. Ameliyat öncesi planlama
2. Anatomik kayıt
3. Kemik rezeksiyonunun gerçekleştirilmesi
4. İntraoperatif doğrulama
5. Veri kaydı

Ameliyat öncesi BT görüntülerinden elde edilen 3B kemik modeli üzerinde implant boyutu, komponent pozisyonu ve alt ekstremitte dizilimi planlanır; hedef rezeksiyon sınırları ile komponent açıları belirlenir. Cerrahi başlangıcında anatomik referans noktaları kaydedilerek ameliyat öncesi plan intraoperatif koordinat sistemiyle eşleştirilir. Rezeksiyon sırasında robotik kol ve dokusal geri bildirim mekanizmaları kemik kesilerinin yalnızca önceden tanımlanmış sınırlar içinde gerçekleştirilmesini sağlar; plandan sapma durumunda sistem cerrahı uyarmakta veya dokusal direnç oluşturmaktadır. Her rezeksiyon aşamasının ardından komponent pozisyonu ve dizilim parametreleri gerçek zamanlı olarak doğrulanır ve gerektiğinde plan güncellenebilir. Tüm ameliyat içi veriler kaydedilerek ameliyat sonrası değerlendirme ve uzun dönem takip süreçlerinde kullanılabilir hâle getirilir.^[5]


Görüntülemesiz bir yarı aktif platform olan CORI Robotik Sistemi (*Smith & Nephew*), total diz artroplastisinde yukarıda özetlenen beş genel aşamayı 27 adımlık ayrıntılı bir cerrahi iş akışına dönüştürmektedir (Şekil 5). Sistemin sunduğu ameliyat içi yazılım arayüzü; implant boyutlandırma, 3B komponent pozisyonlama ve fleksiyon arka boyunca medial-lateral bağ dengesi analizinin gerçek zamanlı yapılmasına olanak tanımaktadır (Şekil 6).

Mevcut Platformlar ve Klinik Kullanım

Robotik destekli artroplasti hem kalça hem de diz artroplastisi prosedürlerinde giderek yaygınlaşmaktadır. Günümüzde klinik kullanımda yer alan sistemler kontrol mekanizmasına göre; aktif, yarı aktif ve pasif sistemler olarak; görüntüleme yöntemine göre ise BT tabanlı ve görüntülemesiz sistemler şeklinde sınıflandırılmaktadır.^[5] Bu sistemler arasında en kapsamlı şekilde araştırılmış platformlardan biri olan Mako robotik kol sistemi (Stryker) hem total kalça hem de total diz artroplastisinde geniş bir literatüre sahiptir ve geleneksel tekniklere kıyasla komponent pozisyonlaması ile mekanik dizilim doğruluğunda belirgin iyileşmeler sağladığı bildirilmiştir.^[26] ROSA Knee sistemi (Zimmer Biomet) gibi diğer yarı aktif robotik platformların da komponent pozisyonlaması ve mekanik dizilim doğruluğu



CORI Robotik Sistem Basamakları



Intraoperatif Hazırlık

- Cerrahin, hemşirenin ve konsolun pozisyonlandırılması
- Kalibrasyon, enstrümantasyon kurulumu, cerrahi açılım ve pin yerleştirilmesi

Görüntülemesiz Kaydetme

- Kontrol noktalarının tayini
- Malleol noktaları ve diz merkezi
- Kalça merkezi ve preop mekanik dizilim
- Fleksiyon hareket açıklığı
- Femurun serbest haritalanması
- Tibianın serbest haritalanması
- Opsiyonel; femoral / tibial rotasyonel aks tayini

Planlama

- İmplant planlaması ve yerleşimi
- Başlangıç büyüklüğü ve yerleşimi
- Rotasyon/translasyon/fleksiyon planlaması
- Gap değerlendirmesi
- Gap değerlendirmesinin kontrolü
- Gap değerlendirme grafinin anlaşılması
- İmplant planı ile birlikte gap değerlendirmesi

Kemik Kesileri/Şekillendirilmesi

- Femurun kesim seçimi
- Tibianın kesim seçimi
- Kontrol noktalarının kontrolü
- Tibia ve femur kemik modellerinin şekillendirilmesi
- Hepsininin küçük dairesel testere ile kesimi
- Distal rezeksiyon ve AP kesici bloklar (femur)
- Kemik kesimi ve ikiz çıkıntılı kesici blok (tibia)
- Kemik kesimlerinin gözlemlenmesi

İmplant Denemesi ve Postop Değerlendirme

- Postop temel değerlendirme
- Postop stres altında GAP değerlendirmesi
- Vaka Özeti

5 Bölüm / 27 basamak

Şekil 5. CORI Robotik Sistemi (Smith & Nephew) ile total diz artroplastisi cerrahi iş akışı. Görüntülemesiz yarı aktif sistem, beş ana bölüm ve toplam 27 basamaktan oluşmaktadır.

açısından benzer avantajlar sağladığı bildirilmektedir.^[27] El tipi görüntülemesiz robotik platformlar olan NAVIO/CORI (Smith & Nephew); ameliyat öncesi görüntülemeye ihtiyaç duymamaları, ameliyat içi planlama olanağı sunmaları ve unikondiler diz artroplastisindeki erken klinik sonuçlarıyla dikkat çekmektedir.^[28] Günümüzde klinik kullanımda yer alan başlıca robotik destekli ve navigasyon sistemleri ile temel özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.^[5,29,30]

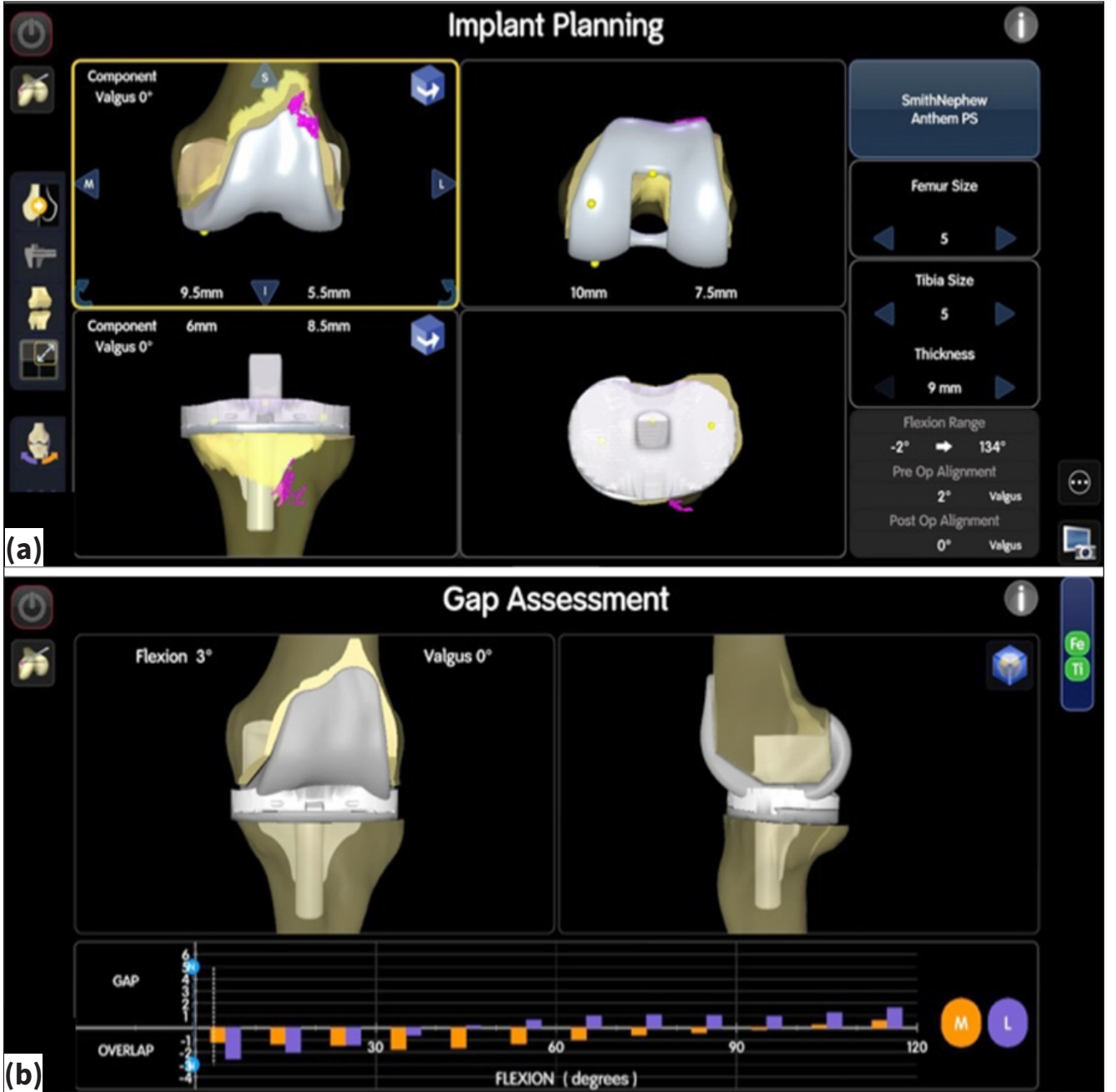
Doğruluk, Dizilim ve Karşılaştırmalı Sonuçlar

Robotik destekli artroplastisi, komponent konumlandırma ve dizilimde geleneksel tekniklere kıyasla tutarlı biçimde üstün doğruluk sergilemiştir.^[25] Literatürde 1160 hastayı içeren retrospektif bir kohort çalışmasında Mako robotik destekli total diz artroplastisinin, cerrahın el dominansına

bağlı hizalanma farklılıklarını azalttığı ve her iki tarafta benzer doğruluk düzeyi sağladığı bildirilmiştir.^[31] Aşamalı bilateral uygulamalarda robotik destekli total diz artroplastisinin, manuel teknikle karşılaştırıldığında daha düşük ameliyat sonrası ağrı, daha hızlı bağımsız ambulasyon ve daha hızlı erken fonksiyonel iyileşme ile ilişkili olduğu bildirilmektedir.^[32] Bununla birlikte, cerrahi hassasiyetteki artış literatürde tutarlı biçimde gösterilmiş olsa da klinik ve ekonomik sonuçlara ilişkin uzun dönem verilerin hâlâ sınırlı olduğuna dikkat çekilmektedir.^[33] Maliyet, robotik teknolojinin yaygınlaşmasının önündeki en önemli engellerden biri olmaya devam etmektedir.^[34]

Fonksiyonel Sonuçlar ve Cerrah Deneyimine Etkisi

Robotik destekli total diz artroplastisinin, kinematik dizilim gibi bireyselleştirilmiş dizilim yaklaşımlarının



Şekil 6.a,b. CORI Robotik Sistemi'nin ameliyat içi planlama arayüzü. İmplant planlama ekranında femoral ve tibial komponent boyutu, kalınlığı, varus/valgus dizilimi ve ameliyat öncesi/sonrası dizilim değerleri görüntülenmektedir **(a)**. Gap değerlendirme ekranı; üst kısımda implant pozisyonunun koronal ve sagittal görünümü, alt kısımda fleksiyon açısına (0°–120°) göre medial (turuncu) ve lateral (mor) kompartman gap/overlap analizini gösteren grafik yer almaktadır **(b)**. Negatif değerler komponentlerin temasını (sıklık), pozitif değerler ise gap mesafesini (gevşeklik) ifade etmektedir. Örnekte medial kompartmanda 0°–120° arası boyunca, lateral kompartmanda ise özellikle 0°–60° arasında belirgin sıklık izlenmekte; lateral kompartman 60° üzerinde nötr aralığa yaklaşmaktadır.

uygulanmasını kolaylaştırdığı bildirilmektedir.^[35] Robotik destekli total kalça artroplastisinin, özellikle erken kariyer dönemindeki cerrahlarda ameliyat sonrası dislokasyon riskini deneyimli cerrahlarla karşılaştırılabilir düzeye düşürdüğü gösterilmiştir.^[36] Benzer şekilde, düşük vaka

hacmine sahip cerrahların robotik destek ile gerçekleştirdiği unikonkondiler diz artroplastisinde hizalanma doğruluğunun arttığı ve erken revizyon oranlarının azaldığı gösterilmiştir.^[37]

Tablo 1. Kalça ve diz artroplastisinde kullanılan başlıca robotik destekli ve navigasyon sistemlerinin özellikleri

Sistem	Üretici	Sistem tipi	Görüntüleme	Klinik kullanım
TSolution One (eski ROBODOC)	THINK Surgical	Aktif (otonom freze)	BT tabanlı	TKA, TDA
Mako	Stryker	Yarı aktif (robotik kol)	BT tabanlı	TKA, TDA, UDA
ROSA Knee	Zimmer Biomet	Yarı aktif (robotik kol)	Görüntülemesiz/ radyografik planlama destekli	TKA, TDA
VELYS	DePuy Synthes (J&J)	Yarı aktif (robotik kol)	Görüntülemesiz	TDA
NAVIO / CORI	Smith & Nephew	Yarı aktif (el tipi)	Görüntülemesiz	TDA, UDA
OrthoPilot; BrainLab Knee3	B. Braun (Aesculap); BrainLab	Pasif (navigasyon rehberliği)	Görüntülemesiz	TKA, TDA

TKA: Total kalça artroplastisi, TDA: Total diz artroplastisi, UDA: Unikondiler diz artroplastisi, BT: Bilgisayarlı tomografi.

GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmalarının, BDT tabanlı ameliyat öncesi planlama sürecini otomatize ederek implant boyutu öngörüsünde bulunabildiği ve cerrah-spesifik plan üretiminde hatayı azaltabildiği gösterilmiştir.^[38] Artırılmış ve karma gerçeklik tabanlı navigasyon sistemleri ise ameliyat öncesi planın doğrudan cerrahın görüş alanına yansıtılmasına olanak tanıyarak yüksek maliyetli robotik platformlara alternatif bir hassasiyet sağlama vaadi taşımaktadır.^[39] Hastaya özgü dijital ikiz modellerinin intraoperatif sensör verileri ve ameliyat sonrası giyilebilir cihaz ölçümleri ile sürekli güncellenmesi; implant aşınması, biyomekanik denge ve fonksiyonel iyileşmenin gerçek zamanlı izlenmesini olanaklı kılabılır.^[23] Bu teknolojilerin yaygınlaşmasında yazılımlar arası standardizasyon, maliyet-etkinlik ve düzenleyici onay süreçleri belirleyici olacak; uzun dönem implant sağkalımı ve hasta bildirimli sonuçlar üzerindeki etkilerini değerlendirecek geniş çaplı prospektif çalışmalara olan ihtiyaç sürecektir.

SONUÇ

Üç boyutlu yazıcı, BDT ve robotik destekli artroplastik teknolojileri, modern kalça ve diz artroplastisinde geleneksel yaklaşımlara kıyasla daha hassas, öngörülebilir ve hastaya özgü cerrahi olanağı sunmaktadır. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen hastaya özgü kesi kılavuzları, özellikle standart enstrümantasyonun yetersiz kaldığı olgularda ameliyat öncesi planın intraoperatif ortama aktarılmasını kolaylaştırmakta; BDT tabanlı planlama, 3B kemik modeli üzerinden komponent boyutlandırma, dizilim ve bacak uzunluğu restorasyonunda öngörülebilirliği artırmaktadır. Robotik destekli sistemler ise dokusal geri bildirim ve ameliyat içi doğrulama mekanizmaları ile komponent pozisyonlamasında belirgin doğruluk sağlamakta; özellikle düşük vaka hacmine sahip ve erken kariyer dönemindeki cerrahların sonuçlarını deneyimli cerrahlarla karşılaştırıla-

bilir düzeye taşımaktadır. Bununla birlikte mevcut kanıtların büyük çoğunluğu kısa ve orta vadeli olup bu teknolojilerin; uzun dönem implant sağkalımı, hasta bildirimli sonuçları ve maliyet-etkinlik üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi için geniş çaplı prospektif çalışmalara ihtiyaç sürmektedir. Önümüzdeki dönemde bu üç teknolojinin yapay zekâ, artırılmış gerçeklik ve dijital ikiz uygulamaları ile entegre edilerek bütüncül bir dijital cerrahi ekosistemine evrilmesi; artroplastik pratiğinin standardizasyonu ve kişiselleştirilmesi açısından belirleyici bir rol oynayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Neuprez A, Neuprez AH, Kaux JF, Kurth W, Daniel C, Thirion T, et al. Total joint replacement improves pain, functional quality of life, and health utilities in patients with late-stage knee and hip osteoarthritis for up to 5 years. *Clin Rheumatol* 2020;39(3):861-71. Epub 2019 Nov 13. PMID: 31720892. [Crossref](#)
2. Kurtz S, Ong K, Lau E, Mowat F, Halpern M. Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. *J Bone Joint Surg Am* 2007;89(4):780-5. [Crossref](#)
3. Thiruchandran G, Dean O, Alim D, Crawford A, Salim O. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: A review of current and future applications. *J Orthop* 2025;59:22-6. [Crossref](#)
4. Wong KC, Kumta SM, Leung KS, Ng EKW, Lee KS. Integration of CAD/CAM planning into computer assisted orthopaedic surgery. *Comput Aided Surg* 2010;15(4-6):65-74. [Crossref](#)
5. Jacofsky DJ, Allen M. Robotics in Arthroplasty: A Comprehensive Review. *J Arthroplasty* 2016;31(10):2353-63. [Crossref](#)
6. Deep K, Shankar S, Mahendra A, Computer assisted navigation in total knee and hip arthroplasty. *SICOT J* 2017;3:50. [Crossref](#)
7. Hafez MA, Moholkar K, Patient-specific instruments: Advantages and pitfalls. *SICOT J* 2017;3:66. [Crossref](#)
8. Wixted CM, Peterson JR, Kadakia RJ, Adams SB. Three-dimensional Printing in Orthopaedic Surgery: Current Applications and Future Developments. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev* 2021;5(4):e20.00230-11. [Crossref](#)

9. Kumar P, Vatsya P, Rajnish RK, Hooda A, Dhillon MS. Application of 3D Printing in Hip and Knee Arthroplasty: A Narrative Review. *Indian J Orthop* 2021;55(Suppl 1):14-26. [Crossref](#)
10. Munier M, Donnez M, Ollivier M, Flecher X, Chabrand P, Argenason JN, et al. Can three-dimensional patient-specific cutting guides be used to achieve optimal correction for high tibial osteotomy? Pilot study. *Orthop Traumatol Surg Res* 2017;103(2):245-50. [Crossref](#)
11. Keskinis A, Paraskevopoulos K, Diamantidis DE, Ververidis A, Fiska A, Tilkeridis K. The Role of 3D-Printed Patient-Specific Instrumentation in Total Knee Arthroplasty: A Literature Review. *Cureus* 2023;15(8):e43321. [Crossref](#)
12. Sassoon A, Nam D, Nunley R, Barrack R. Systematic review of patient-specific instrumentation in total knee arthroplasty: New but not improved. *Clin Orthop Relat Res* 2015;473(1):151-8. [Crossref](#)
13. Mannan A, Smith TO. Favourable rotational alignment outcomes in PSI knee arthroplasty: A Level 1 systematic review and meta-analysis. *Knee* 2016;23(2):186-90. [Crossref](#)
14. Beyer F, Lützner C, Stalp M, Köster G, Lützner J. Does the use of patient-specific instrumentation improve resource use in the operating room and outcome after total knee arthroplasty?—A multicenter study. *PLoS One* 2022;17(11):e0277464. [Crossref](#)
15. Feng H, Feng M, Cheng J, Wang W, An S, Tao H, et al. Effectiveness of 3D-printed femoral positioning guides in Oxford Unicompartmental Knee Arthroplasty: A randomized controlled trial with femoral mechanical-anatomical angle subgroup analysis. *Orthop Traumatol Surg Res* 2026;104620. [Crossref](#)
16. Cheng K, Zhu H, Peng Y, Yan H, Wen X, Cheng Z, et al. To further incorporate computer-aided designs to improve preoperative planning in total hip arthroplasty: A cohort study. *Front Surg* 2024;11:1345261. [Crossref](#)
17. Wu N, Li S, Zhang B, Wang C, Chen B, Han Q, et al. The advances of topology optimization techniques in orthopedic implants: A review. *Med Biol Eng Comput* 2021;59(9):1673-89. [Crossref](#)
18. Loppini M, Pisano A, Ruggeri R, Rocca AD, Grappiolo G. Pelvic tilt and functional acetabular position after total hip arthroplasty: An EOS 2D/3D radiographic study. *Hip Int* 2023; 33(3):365-70. [Crossref](#)
19. Zhang ZH, Qi YS, Wei BG, Bao HRC, Xu YS. Application strategy of finite element analysis in artificial knee arthroplasty. *Front Bioeng Biotechnol* 2023;11:1127289. [Crossref](#)
20. Montgomery LR, Willing R, Lanting B. Virtual Joint Motion Simulator Accurately Predicts Effects of Femoral Component Malalignment during TKA. *Bioengineering (Basel)* 2023;10(5). [Crossref](#)
21. Iorio R, Viglietta E, Corsetti F, Gugliotta Y, Massafra C, Polverari D, et al. Lewinnek zone not “the be-all and end-all” functional planning for acetabular component positioning in total hip arthroplasty. *Arthroplasty* 2025;7(1):2. [Crossref](#)
22. Wong JRY, Gibson M, Aquilina J, Parmar D, Subramarian P, Jaiswal P. Pre-Operative Digital Templating Aids Restoration of Leg-Length Discrepancy and Femoral Offset in Patients Undergoing Total Hip Arthroplasty for Primary Osteoarthritis. *Cureus* 2022;14(3):e22766. [Crossref](#)
23. Berhouet J, Samargandi R. Emerging Innovations in Preoperative Planning and Motion Analysis in Orthopedic Surgery. *Diagnostics (Basel)* 2024;14(13). [Crossref](#)
24. Kayani B, Konan S, Tahmassebi J, Pietrzak JRT, Haddad FS. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with improved early functional recovery and reduced time to hospital discharge compared with conventional jig-based total knee arthroplasty: A prospective cohort study. *Bone Joint J* 2018;100-b(7):930-7. [Crossref](#)
25. Zhang J, Ndou WS, Ng N, Gaston P, Simpson PM, Macpherson GJ, et al. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with improved accuracy and patient reported outcomes: A systematic review and meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2022;30(8):2677-95. [Crossref](#)
26. Nam CH, Lee SC, Kim JH, Ahn HS, Baek JH. Robot-assisted total knee arthroplasty improves mechanical alignment and accuracy of component positioning compared to the conventional technique. *J Exp Orthop* 2022;9(1):108. [Crossref](#)
27. Zaidi F, Goplen CM, Bolam SM, Monk AP. Accuracy and Outcomes of a Novel Cut-Block Positioning Robotic-Arm Assisted System for Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Arthroplast Today* 2024;29:101451. [Crossref](#)
28. Battenberg AK, Netravali NA, Lonner JH. A novel handheld robotic-assisted system for unicompartmental knee arthroplasty: Surgical technique and early survivorship. *J Robot Surg* 2020;14(1):55-60. [Crossref](#)
29. Siddiqi A, Horan T, Molloy RM, Bloomfield MR, Patel PD, Piuze NS. A clinical review of robotic navigation in total knee arthroplasty: Historical systems to modern design. *EFORT Open Rev* 2021;6(4):252-69. [Crossref](#)
30. Chen J, Chua HYJ, Lim JTE, Tay DKJ, Tan MH, Liow MHL. VELYS robotic-assisted total knee replacement leads to improved mobility, reduction in hospitalisation, surgical duration, and better psychological outcomes: A propensity score matched analysis. *Arthroplasty* 2025;7(1):55. [Crossref](#)
31. Wu M, Chen J, Wang Y, Jiang L, Chen S, Wang C. Mako robot-assisted total knee arthroplasty mitigates the impact of surgeon handedness. *J Robot Surg* 2026;20(1):471. [Crossref](#)
32. Mulpur P, Masilamani ABS, Prakash M, Annareddy A, Hippalgaonkar K, Reddy AVG. Comparison of patient reported outcomes after robotic versus manual total knee arthroplasty in the same patient undergoing staged bilateral knee arthroplasty. *J Orthop* 2022;34:111-5. [Crossref](#)
33. Mancino F, Cacciola G, Malahias MA, Filippis RD, Marco DD, Matteo VD, et al. What are the benefits of robotic-assisted total knee arthroplasty over conventional manual total knee arthroplasty? A systematic review of comparative studies. *Orthop Rev (Pavia)* 2020;12(Suppl 1):8657. [Crossref](#)
34. Luyckx T, Monk AP, Müller JH, Saffarini M, Lustig S, Catani F, et al. What are the perceived benefits and barriers to the use of robot-assisted total knee arthroplasty? A survey of members of the European Knee Society. *Int Orthop* 2023;47(2):405-12. [Crossref](#)
35. Morrissey ZS, Barra MF, Guirguis PG, Drinkwater CJ. Transition to Robotic Total Knee Arthroplasty With Kinematic Alignment is Associated With a Short Learning Curve and Similar Acute-Period Functional Recoveries. *Cureus* 2023;15(5):e38872. [Crossref](#)

36. Hollenberg AM, Reddy GB, Sauer MA, Blum E, McCoy LH, Barrack RL, et al. Surgeon Experience Influences Posterior Approach Total Hip Arthroplasty Dislocation Risk, But It is Mitigated by Robotic Assistance. J Arthroplasty 2026. [Crossref](#)
37. Savov P, Tuecking LR, Windhagen H, Calliess T, Ettinger M. Robotics improves alignment accuracy and reduces early revision rates for UKA in the hands of low-volume UKA surgeons. Arch Orthop Trauma Surg 2021;141(12):2139-46. [Crossref](#)
38. Lambrechts A, Speetjens RW, Maes F, Huffel SW. Artificial Intelligence Based Patient-Specific Preoperative Planning Algorithm for Total Knee Arthroplasty. Front Robot AI 2022;9:840282. [Crossref](#)
39. Luigi-Martínez HE, Layuno-Matos JG, Fernández-Vélez NA, Fernández-Soltero R, Señeriz-Ortiz R. Artificial Intelligence and Augmented Reality in Orthopedic Surgery: A Narrative Review of Current Applications and Future Directions. Cureus 2025;17(12):e100177. [Crossref](#)