

Akıllı implantlar, sensör entegrasyonu ve uzaktan izlem

Smart implants, sensor integration and remote monitoring

Yalkın Çamurcu

VM Medical Park Bursa Hastanesi, Ortopedi ve Travmatoloji Kliniği, Bursa

Akıllı implantlar; ortopedik implantların içine veya implantla bütünleşmiş sensörler aracılığıyla biyomekanik ve fonksiyonel parametreleri ölçebilen, veriyi kablosuz olarak dış ortama aktarabilen yeni nesil tıbbi cihazlardır. Bu sistemler, yük aktarımı ve temas kuvvetleri gibi mekanik büyüklüklerin yanı sıra hareket paternleri, aktivite düzeyi ve bazı tasarımlarda sıcaklık gibi fizyolojik göstergelerin sürekli veya periyodik izlenmesine olanak sağlar. Klinik açıdan temel hedef; rehabilitasyonun kişiselleştirilmesi, anormal yüklenme paternlerinin erken saptanması, implant-kemik ara yüzeyindeki stabilite değişimlerinin izlenmesi ve potansiyel gevşeme riskinin klinik ve radyolojik bulgular ortaya çıkmadan önce fark edilmesidir. Akıllı implantlar ve uzaktan izlem sistemleri, hasta takibini yalnızca poliklinik kontrollerine bağlı olmaktan çıkarıp günlük yaşam verileriyle desteklemektedir. Bu derlemede akıllı implantların biyomekanik gerekçesi, sensör entegrasyon stratejileri, kablosuz güç ve veri aktarım çözümleri, erken gevşeme takibi yaklaşımları ve bu teknolojilerin dijital ortopedi ekosistemi içindeki yeri güncel literatür temelinde ele alınmaktadır.

Anahtar sözcükler: protez ve implantlar; telemetri; kablosuz teknoloji; biyomekanik stres; protez gevşemesi; uzaktan hasta izlem

Smart implants are next-generation orthopaedic devices that incorporate embedded sensors within the implant body or its modular components and enable wireless data transmission to external receivers. These systems can quantify biomechanical variables such as load transfer and contact forces, and also capture functional metrics including motion patterns and activity levels; selected designs further allow monitoring of physiological surrogates such as temperature. Clinically, the primary aim is to personalise rehabilitation, detect abnormal loading patterns early, and monitor changes at the bone-implant interface to identify potential instability or early loosening before overt clinical symptoms and radiographic findings emerge. When coupled with remote patient monitoring infrastructures, smart implants extend assessment beyond episodic clinic visits by adding real-world daily-life data, thereby strengthening the measurable, data-driven framework of digital orthopaedics. This review discusses the biomechanical rationale, sensor integration strategies, wireless powering and data transfer solutions, early loosening surveillance approaches, and the role of smart implants in the broader digital orthopaedics ecosystem based on contemporary literature.

Key words: prostheses and implants; telemetry; wireless technology; biomechanical stress; prosthesis loosening; remote patient monitoring

AKILLI İMPLANT KAVRAMI VE KLİNİK İHTİYAÇ

Ortopedik implantlar geleneksel olarak pasif yapılar; cerrahi sonrası yük aktarımı ve implant-kemik ara yüzey davranışı, klinik muayene ve görüntülemeyle dolaylı biçimde değerlendirilir. Bu yaklaşımda sorun, komplikasyonların (özellikle aseptik gevşemenin) sıklıkla geç dönemde radyolojik olarak belirginleşip fark edilmesidir. Akıllı implant yaklaşımı; implantın kendi mekanik durumunu ölçerek klinisyene veri sağlamasını hedefler ve böylece takipte daha erken, daha objektif ve hastaya özgü karar verme şansını oluşturur.^[1,2]

Ledet ve ark., akıllı implant kavramını; yalnızca mekanik destek sağlayan yapılardan, çevresindeki biyomekanik ortamı algılayabilen ve bu bilgileri sürekli ya da periyodik olarak klinisyene iletebilen sistemlere geçiş olarak tanımlamışlardır.^[1] Bu yaklaşımın temel amacı, implant performansının yalnızca sonuca dayalı olarak değil, süreç içerisinde objektif parametrelerle izlenebilmesidir. Kellers ve ark. ise akıllı implantları, sensör teknolojisi, kablosuz iletişim ve veri analitiğinin birleştiği dijital ortopedi ekosisteminin merkezinde konumlandırmış; özellikle total eklem artroplastisi sonrası yük aktarımı, aktivite düzeyi ve fonksiyonel iyileşmenin gerçek zamanlı ölçümünün klinik karar süreçlerini dönüştürebileceğini vurgulamıştır.^[2]

İletişim / Contact: Prof. Dr. Yalkın Çamurcu • **E-posta / E-mail:** yalkin.camurcu@gmail.com

ORCID ID: Yalkın Çamurcu, 0000-0002-3900-5162

Geliş / Received: 4 Mayıs 2026 • **Revizyon / Revised:** 23 Haziran 2026 • **Kabul / Accepted:** 24 Haziran 2026

ORTOPEDİ VE TRAVMATOLOJİDE TELEMETRİK SİSTEMLER

Telemetri, vücut içine yerleştirilen bir implantta oluşan mekanik veya fizyolojik sinyallerin kablo kullanılmadan ölçülmesi ve bu bilgilerin elektronik olarak harici bir alıcıya aktarılması esasına dayanan bir teknolojidir. Ortopedi de telemetrik sistemler; implant içerisine entegre edilmiş sensörler, sinyal işleme devreleri ve kablosuz iletişim modülleri aracılığıyla eklem üzerine etki eden kuvvetler, momentler, mikro hareketler veya bazı tasarımlarda sıcaklık gibi parametreleri in vivo olarak ölçebilmektedir.^[3]

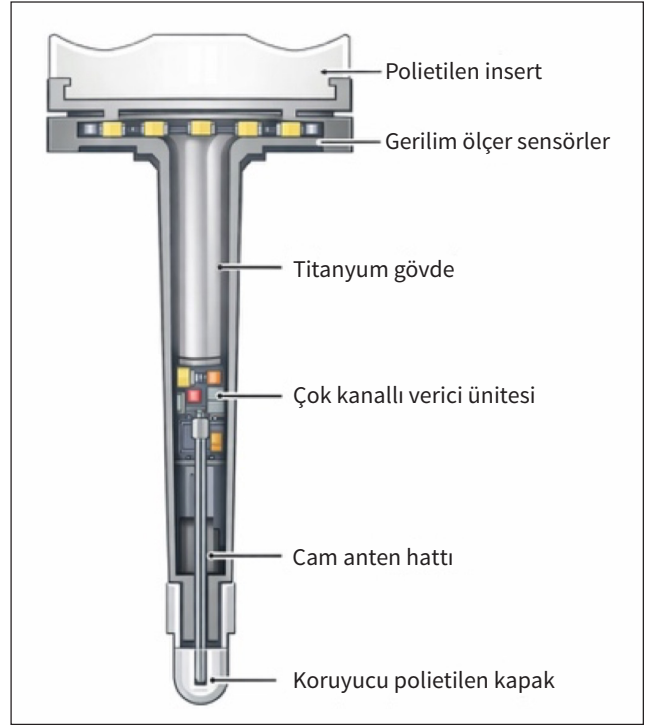
Telemetrinin en önemli katkısı, implant biyomekaniğinin yalnızca teorik modeller veya laboratuvar simülasyonları ile değil insan vücudunda gerçek yaşam koşullarında nasıl gerçekleştiğinin doğrudan gösterilebilmesidir. Bu sayede günlük aktiviteler sırasında proteze ne kadar yük bindiği, bu yükün hangi yönlerde yoğunlaştığı ve farklı aktivitelerin eklem biyomekaniğini nasıl etkilediği objektif olarak ortaya konmaktadır.^[3]

Elde edilen bu veriler, implant tasarımının geliştirilmesi, aşınma ve dayanım testlerinin fizyolojik sınırlara uygun hâle getirilmesi ve rehabilitasyon süreçlerinin daha güvenli şekilde planlanması açısından temel bir referans oluşturmaktadır. Ayrıca telemetri, gelecekte klinik kullanıma daha yaygın biçimde girmesi hâlinde, her hastanın protezinin bireysel kullanım profiline göre izlenmesine ve potansiyel sorunların erken dönemde fark edilmesine olanak sağlayacaktır.

Total Diz Artroplastisinde Telemetrik Sistemler

Total diz artroplastisinde yapay prostetik ekleme aktarılan tibiofemoral kuvvetler; polietilen aşınması, implantta stres oluşumu ve kemiğe stres transferi gibi fiziksel mekanizmalarla yakından ilişkilidir. Bu nedenle doğrudan kuvvet ölçümü, uzun süredir biyomekanik araştırmaların temel hedeflerinden biri olmuştur.

D'Lima ve ark., eklem içine yerleştirilebilen telemetrik bir sistem geliştirerek tibial komponent üzerinden geçen kompresif kuvvetlerin in vivo olarak ölçülebileceğini göstermiştir.^[4] Tanımlanan sistemde kuvvet sensörleri tibial komponente entegre edilmiş, sinyal işleme devresi ve kablosuz veri iletim modülü implant içerisine yerleştirilmiş ve harici bir alıcıya veri aktarımı sağlanmıştır (Şekil 1).^[4] Araştırmacılar, elde edilen doğrudan ölçümlerin kas-iskelet modeli tabanlı tahminlerle karşılaştırıldığında belirgin farklılıklar gösterebildiğini, özellikle günlük aktiviteler sırasında ekleme binen gerçek kuvvetlerin geniş bir dağılım sergilediğini bildirmişlerdir.^[4] Bu bulgu, yalnızca teorik modellere dayalı laboratuvar ortamındaki yük hesaplamalarının klinik gerçekliği tam olarak yansıtama-



Şekil 1. Sensör entegreli telemetrik tibial komponentin şematik kesit görünümü. Polietilen insert altında konumlandırılmış gerilim ölçer sensörler aracılığıyla tibiofemoral yüklerin ölçümü, titanyum gövde içerisinde yer alan çok kanallı verici ünitesi ile sinyallerin işlenmesi ve cam anten hattı üzerinden kablosuz veri aktarımı gösterilmektedir. D'Lima ve ark.'nın implant edilebilir telemetrik diz protezi tasarımından uyarlanmıştır.^[4]

yabileceğini ve implant tasarımıyla preklitik testlerin in vivo ölçümlere dayalı referanslarla desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.^[4] Bu çalışmalar, akıllı implant teknolojilerinin temel motivasyonlarından birinin, eklem protezlerinde gerçek yaşam koşullarında oluşan yüklerin doğrudan ve güvenilir biçimde ölçülmesi olduğunu açıkça göstermektedir.

Diz protezi üzerine etki eden yükler yalnızca tek yönde oluşan basma kuvvetlerinden ibaret değildir. Günlük yaşam aktiviteleri sırasında diz eklemi; öne arkaya, sağa sola ve yukarı aşağı yönlerde farklı kuvvetlere maruz kalır. Bunun yanında bu kuvvetlerin oluşturduğu döndürücü etkiler (momentler) de implant stabilitesi ve polietilen aşınması açısından büyük önem taşır. Heinlein ve ark., yaygın olarak kullanılan bir total diz artroplasti sistemiyle uyumlu olacak şekilde bu karmaşık yüklenmeyi değerlendirebilmek amacıyla altı farklı bileşeni eş zamanlı ölçebilen bir sensör altyapısı geliştirmiştir.^[5]

Araştırmacılar, sistemin kalibrasyon sonrasında ölçümlerinde düşük hata oranları elde edildiğini ve bu sayede implant üzerindeki karmaşık yük paternlerini güvenilir biçimde kaydedilebildiğini bildirmiştir.^[5]

Aynı araştırma grubunun klinik takip çalışmalarında ise düz yürüme ve merdiven çıkma-inme gibi aktiviteler sırasında bu altı bileşenin her birinin farklı büyüklüklerde değiştiği ve hastalar arasında belirgin farklılıklar gösterdiği ortaya konmuştur.^[6] Bu bulgular, diz protezi biyomekaniğinin yalnızca “ne kadar yük biniyor?” sorusuyla değil, aynı zamanda “yük hangi yönde ve hangi döndürücü etkilerle uygulanıyor?” sorusuyla da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bergmann ve ark., diz implantlarından elde edilen telemetrik verilerle; düz yürüme, merdiven çıkma-inme, oturup-kalkma ve çömelme gibi aktiviteler sırasında diz protezine etki eden kuvvet ve momentleri ayrıntılı biçimde tanımlamış ve bu ölçümlerden hareketle standardize yük veri setleri oluşturmuştur.^[7] Bu veri setleri, diz implantlarının mekanik dayanım testlerinde ve aşınma simülasyonlarında kullanılacak fizyolojik yük paternlerini tanımlamaktadır.

Benzer biçimde Charité-Julius Wolff Enstitüsü tarafından geliştirilen çok kanallı implant içi telemetri sistemleri ile kalça protezlerinde hem kuvvet hem de bazı tasarımlarda sıcaklık ölçümleri yapılabilmüş, elde edilen veriler uzun dönem takiplerle rapor edilmiştir.^[8] Bu çalışmalar, implant üzerine etki eden yüklerin hastalar arasında ve hatta aynı hastada farklı aktiviteler arasında belirgin değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Bu alandaki bir diğer önemli gelişme, *OrthoLoad* veri tabanının oluşturulmasıdır. *OrthoLoad* platformu; kalça, diz, omuz ve spinal implantlardan elde edilen *in vivo* yük ölçümlerini açık erişimli olarak sunarak, araştırmacıların ve implant tasarımcılarının bu verileri karşılaştırmalı analizlerde ve model doğrulamada kullanmasına olanak sağlamaktadır.^[9]

Bu telemetri temelli çalışmaların ortak sonucu, implant biyomekaniğinin yalnızca teorik modellere dayalı olarak değil, doğrudan insan vücudundan elde edilen ölçümlerle anlaşılmasının mümkün olduğudur.^[7-9]

ORTOPEDİ VE TRAVMATOLOJİDE SENSÖR SİSTEMLERİ

Akıllı implantlarda sensör entegrasyonu, implanttan elde edilmesi hedeflenen klinik bilgiye göre şekillenir. Temel amaç, implantın maruz kaldığı mekanik ortamı ve hastanın fonksiyonel kullanımını objektif olarak ölçebilecek sensörlerin, implantın yapısal bütünlüğünü bozmayacak biçimde sistem içerisine entegre edilmesidir. Literatürde en sık hedeflenen büyüklükler yük/kuvvet ve momentler, temas basıncı ve kuvvet dağılımı, kinematik parametreler ve sıcaklık olarak öne çıkmaktadır.

Akıllı implantlarda sensör entegrasyonu, klasik ortopedik implant tasarımına mikroelektronik ve biyosensör teknolojilerinin eklenmesini içerir. Bu süreçte temel hedef, klinik açıdan anlamlı verileri üretebilecek sensörlerin implantın mekanik dayanımını, biyo-uyumluluğunu ve uzun dönem güvenliğini etkilemeden sistem içerisine yerleştirilmesidir.^[1,2] Bu nedenle sensör seçimi ve yerleşimi, yalnızca ölçüm ihtiyacına değil, aynı zamanda implant geometrisi, yük taşıyan bölgeler ve sterilizasyon koşullarına göre planlanır.^[2,3]

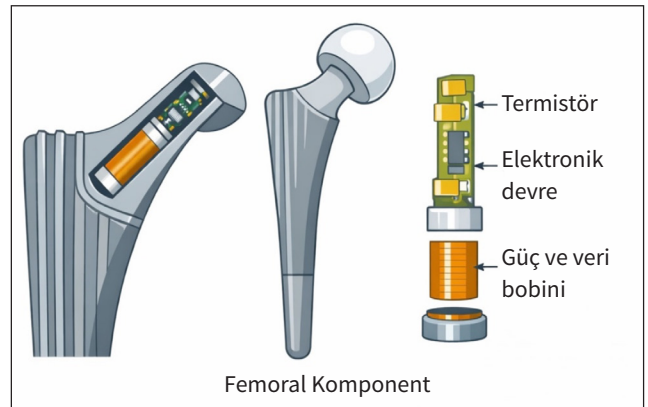
Sensörler çoğunlukla implantın yük taşıyan metal komponentleri içerisine açılan mikro boşluklara veya modüler parçalara entegre edilir. Böylece hem kemik-implant ara yüzeyine yakın bölgelerden bilgi alınabilir hem de elektronik bileşenler dış ortamdan izole edilmiş olur.^[3,5] Bu yaklaşım, uzun dönem stabilite ve sinyal güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Şekil 2).

Yük ve Gerinim Algılayan Sensörler

Akıllı implantlarda en sık kullanılan sensör grubu gerinim (*strain*) sensörleridir. Bu sensörler, implant üzerinde oluşan mikroskobik deformasyonları elektriksel sinyallere dönüştürerek implantın maruz kaldığı yüklenmeyi dolaylı olarak hesaplamaya olanak sağlar.^[3,4] Çoklu sensörlerin farklı yönlerde yerleştirilmesi sayesinde yalnızca basma kuvvetleri değil, aynı zamanda kayma kuvvetleri ve döndürücü etkiler de belirlenebilir.^[5,6]

Basınç ve Temas Algılayan Sensörler

Bazı tasarımlarda sensörler doğrudan eklem temas yüzeyine yakın bölgelere yerleştirilerek, eklem içi temas



Şekil 2. Sensör ve telemetri modülü entegre edilmiş akıllı kalça protezinin şematik gösterimi. Femoral stem içerisinde konumlandırılmış elektronik devre, termistör ve güç/veri bobininden oluşan modül aracılığıyla implant içi sıcaklık ve mekanik duruma ilişkin verilerin kablolu olarak ölçülmesi ve iletilmesi prensibi gösterilmektedir. Şema, literatürde tanımlanan telemetrik kalça implantı tasarımlarından esinlenilerek oluşturulmuştur.

basıncı ve kuvvet dağılımı hakkında bilgi elde edilmesi hedeflenir. Bu tür sensörler, yüklerin eklem yüzeyine homojen mi yoksa belirli bölgelerde yoğunlaşarak mı aktarıldığını gösterebilir.^[2,7] Bu bilgi, komponent hizalanması ve yumuşak doku dengesi açısından dolaylı geri bildirim sağlar.

Hareket Algılayan Sensörler

İvme ölçer ve jiroskop gibi sensörler, implantın ve ekstremitenin uzaydaki hareketini tanımlamak için kullanılır. Bu sensörler sayesinde eklem hareket açıklığı, adım sayısı, aktivite düzeyi ve hareket paternleri gibi fonksiyonel parametreler hesaplanabilir.^[2,10] Böylece akıllı implant yalnızca mekanik bir yapı olmaktan çıkarak, hastanın fonksiyonel performansını yansıtan bir izlem aracına dönüşür.

Sıcaklık Algılayan Sensörler

Sıcaklık sensörleri, implant yüzeyinde sürtünmeye bağlı ısınma veya enflamatuvar süreçlere eşlik edebilen sıcaklık değişimlerini izlemek amacıyla kullanılabilir. Telemetrik sistemlerle implant içi sıcaklığın güvenli biçimde ölçülebildiği gösterilmiştir.^[8] Bu ölçümler, malzeme çiftlerinin sürtünme davranışı ve implant çevresi biyolojik yanıtlar hakkında dolaylı bilgi sağlayabilir.^[8,11]

Sensör Teknolojisinde Karşılaşılan Zorluklar

Sensör entegrasyonunda en önemli mühendislik zorlukları; güç kaynağı ihtiyacının karşılanması, elektronik bileşenlerin sıvı geçirmez şekilde paketlenmesi, uzun dönem dayanıklılık ve kablosuz sinyal iletiminde kararlılığın sağlanmasıdır.^[1-3,12] Bu nedenle güncel tasarımlarda düşük güç tüketimli devreler, indüktif güçleme sistemleri ve hermetik kaplama teknolojileri kullanılmaktadır.^[3,12]

Erken Gevşeme Takibi ve Mikromobilite Analizi

Aseptik gevşeme, total eklem artroplastisi sonrası revizyon cerrahisinin en sık nedenlerinden biridir ve uzun dönem başarısızlığın temel belirleyicisidir.^[13] Klinik pratikte gevşeme çoğunlukla ağrı, fonksiyon kaybı ve radyografik bulgular ortaya çıktıktan sonra tanınmaktadır. Ancak gevşeme, implant-kemik ara yüzeyinde başlayan ve zaman içerisinde ilerleyen biyomekanik ve biyolojik bir süreçtir.

DeneySEL çalışmalar, implant-kemik ara yüzeyinde mikro hareketlerin osseointegrasyonu olumsuz etkilediğini, kemik-implant temasının azalmasına ve fibroz doku oluşumuna zemin hazırladığını göstermiştir.^[14] Özellikle 50-150 mikrometre (μm) üzerindeki mikromobilitenin,

stabil kemik entegrasyonu yerine fibroz ara yüzey gelişimi ile ilişkili olduğu bildirilmiştir.^[14,15]

Akıllı implant sistemleri, implant üzerine etki eden yük paternlerindeki zamanla ortaya çıkan değişiklikleri, artan asimetriyi veya anormal moment profillerini saptayarak stabilitedeki bozulmayı dolaylı olarak gösterebilir. İn vivo telemetrik ölçümlerle, gevşeme gelişen implantlarda yük dağılımının zaman içerisinde değiştiği ve belirli bölgelerde stres konsantrasyonunun arttığı gösterilmiştir.^[6,7]

Uzunlamasına (*longitudinal*) veri kaydı, her hastaya özgü bazal mekanik profilin oluşturulmasına olanak sağlar. Bu bazal profilden anlamlı sapmaların ortaya çıkması, henüz klinik belirti oluşmadan önce potansiyel gevşeme riskine işaret edebilir.^[2,5] Bu yaklaşım, klasik takipte mümkün olmayan bir erken uyarı sistemi sunmaktadır.

Ayrıca mikromobiliteye eşlik eden sürtünme artışı ve lokal biyolojik yanıtlar, sıcaklık gibi fizyolojik parametrelerde de değişikliklere yol açabilir. Telemetrik sıcaklık ölçümü yapılan kalça implantı çalışmalarında, artan mekanik sürtünmenin implant çevresinde ölçülebilir sıcaklık artışlarına neden olabildiği bildirilmiştir.^[8] Bu bulgu, mekanik ve biyolojik süreçlerin birlikte izlenebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak akıllı implantlar ve sensör entegre sistemler, gevşemeyi yalnızca geç dönemde tanınan bir komplikasyon olmaktan çıkararak, erken saptanabilir ve potansiyel olarak önlenilebilir bir süreç hâline dönüştürmeyi hedeflemektedir.

Kablosuz Veri Aktarımı ve Uzaktan İzlem

Akıllı implant sistemlerinin klinik değeri, yalnızca sensörlerle veri üretebilme kapasitesine değil, bu verilerin güvenilir ve sürdürülebilir biçimde dış ortama aktarılabilmesine de bağlıdır. Bu nedenle kablosuz veri iletimi ve güç yönetimi, akıllı implant tasarımının temel bileşenleri arasında yer almaktadır.

Güncel sistemlerde veri iletimi için çoğunlukla düşük enerjili radyo frekansı tabanlı iletişim, yakın alan iletişimi ve *bluetooth low energy* benzeri protokoller kullanılmaktadır.^[12] Bu teknolojiler, düşük güç tüketimi ile yeterli bant genişliği sağlayarak implant içi sensörlerden elde edilen bilgilerin harici alıcılara aktarılmasına olanak tanır.

Kablosuz implant sistemlerinde bir diğer kritik konu güç kaynağıdır. Batarya tabanlı sistemlerin sınırlı ömrü nedeniyle, birçok tasarımda indüktif eşleşme yoluyla kablosuz güç aktarımı veya enerji hasadı (*energy harvesting*) yaklaşımları tercih edilmektedir.^[16] Bu yöntemler, implantın uzun dönem çalışabilirliğini artırmayı hedefler.

Sensörlerden elde edilen veriler, harici alıcılar aracılığıyla mobil cihazlara veya bulut tabanlı platformlara iletilebilir. Böylece klinisyenler hastanın yüklenme paternlerini, aktivite düzeyini ve fonksiyonel parametrelerini uzaktan izleyebilir.^[2,17]

Uzaktan izlem altyapıları, klasik poliklinik kontrollerine dayalı takip modelinin ötesine geçerek, hastanın günlük yaşamındaki gerçek performansını yansıtan sürekli veri akışı sağlar. Bu yaklaşım sayesinde:

- Rehabilitasyon ve iyileşme süreci objektif olarak izlenebilir.
- Anormal yüklenme paternleri erken dönemde saptanabilir.
- Riskli hastalar öncelikli olarak belirlenebilir.

Telemetri ve uzaktan izlem kombinasyonu, ortopedide reaktif takip anlayışından proaktif izlem anlayışına geçişi desteklemektedir.^[17] Bu yaklaşımda amaç, komplikasyonların klinik olarak ortaya çıkmasını beklemek yerine, implanttan elde edilen doğrudan veriler aracılığıyla risk göstergelerini erken dönemde saptamak ve koruyucu müdahaleleri zamanında uygulamaktır. Böylece takip süreci yalnızca semptomlara dayalı olmaktan çıkarak, sürekli veri akışıyla desteklenen öngörücü bir modele dönüşmektedir.

DİJİTAL ORTOPEDİ VİZYONU

Dijital ortopedi, ortopedik hastalıkların tanı, tedavi ve takibinde veri temelli, bağlantılı ve hasta-spesifik teknolojilerin bütüncül olarak kullanıldığı yeni bir yaklaşımı ifade etmektedir. Bu yaklaşımın temelinde; sensör teknolojileri, kablosuz iletişim, büyük veri analitiği ve yapay zekâ tabanlı karar destek sistemlerinin entegrasyonu yer almaktadır.^[2,18]

Akıllı implantlar, bu dönüşümün merkezinde konumlanmakta ve robotik cerrahi, bilgisayar destekli cerrahi planlama ve uzaktan izlem sistemleri ile entegre bir ekosistem oluşturmaktadır.^[2] Bu vizyonda cerrahi başarı, yalnızca ameliyatın teknik olarak doğru uygulanmasıyla sınırlı değildir; implantın vücut içindeki performansının uzun dönem boyunca objektif olarak izlenmesi de başarının ayrılmaz bir parçası hâline gelmektedir.

Yapay zekâ ve veri analitiği yöntemleri, çok sayıda hastadan elde edilen telemetrik ve fonksiyonel veriyi analiz ederek belirli komplikasyonlar için risk profilleri oluşturma potansiyeline sahiptir.^[18] Bu sayede gelecekte sistemlerin, belirli bir hastada gevşeme, aşınma veya fonksiyonel bozulma riskinin arttığını klinik belirti oluşmadan önce öngörebilmesi mümkün olabilecektir.

Dijital ortopedi vizyonu aynı zamanda hasta katılımını da güçlendirmektedir. Uzaktan izlem platformları ve mobil uygulamalar aracılığıyla hastalar, kendi rehabilitasyon süreçlerini daha yakından takip edebilmekte ve tedavi sürecinin aktif bir paydaşı hâline gelmektedir.^[2,15] Bu bütüncül yaklaşım, ortopedide standart protokollerden kişiselleştirilmiş tedavi stratejilerine geçişi desteklemekte ve uzun dönem klinik sonuçların iyileştirilmesini hedeflemektedir.

SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Akıllı implantlar, ortopedik cerrahiye yalnızca mekanik rekonstrüksiyon alanı olmaktan çıkarak ölçülebilir biyomekanik performansın izlenebildiği bir disipline dönüşmektedir. İn vivo yük ölçümleri, temas basıncı analizi, µm takibi ve kinematik parametrelerin kaydı sayesinde implant başarısı artık yalnızca radyolojik stabilite veya hasta memnuniyetiyle değil, nicel verilerle de değerlendirilebilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle aseptik gevşeme ve aşınma gibi geç dönem komplikasyonların biyomekanik kökenlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Önümüzdeki dönemde akıllı implant teknolojilerinin daha küçük, daha enerji verimli ve daha uzun ömürlü sistemlere evrilmesi beklenmektedir. Kablosuz güç aktarımı ve enerji hasadı çözümleri sayesinde implantların uzun süreli veri üretmesi mümkün hâle gelebilir. Bununla birlikte, yapay zekâ destekli analiz sistemleri implantlardan elde edilen sürekli veri akışını yorumlayarak kişiye özgü risk profilleri oluşturabilecek ve komplikasyon gelişmeden önce uyarı üretebilecektir. Böylece ortopedik takip, aralıklı klinik kontrollerden sürekli ve öngörücü bir izlem modeline geçecektir.

Ancak bu dönüşüm yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda etik, ekonomik ve yasal boyutları da olan bir süreçtir. Veri güvenliği, hasta mahremiyeti, uzun dönem biyo-uyumluluk ve maliyet-etkinlik gibi konuların dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu zorlukların aşılması hâlinde dijital ortopedi; travma, artroplasti ve omurga cerrahisi dâhil olmak üzere geniş bir alanda standart pratiğin ayrılmaz bir parçası hâline gelebilir. Akıllı implantlar, gelecekte ortopedik tedavinin yalnızca anatomiye değil, fonksiyonel biyomekaniği de sürekli izleyen ve optimize eden bir yapıya kavuşmasını sağlayacak temel araçlardan biri olmaya adaydır.

KAYNAKLAR

1. Ledet EH, Liddle B, Kradinova K, Harper S. Smart implants in orthopedic surgery, improving patient outcomes: A review. *Innov Entrep Health* 2018;5:41-51. [Crossref](#)

2. Kelmers E, Szuba A, King SW, Palan J, Freear S, Pandit HG, et al. Smart knee implants: An overview of current technologies and future possibilities. *Indian J Orthop* 2022;57(5):635-42. [Crossref](#)
3. Taylor SJG, Walker PS. A wireless telemetry system for measurement of forces in massive orthopaedic implants in vivo. In: Middleton J, Pande G, Jones ML, editors. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering 2*. Boca Raton: CRC Press; 1999. p. 8.
4. D'Lima DD, Townsend CP, Arms SW, Morris BA, Colwell CW Jr. An implantable telemetry device to measure intra-articular tibial forces. *J Biomech* 2005;38(2):299-304. [Crossref](#)
5. Heinlein B, Graichen F, Bender A, Rohlmann A, Bergmann G. Design, calibration and pre-clinical testing of an instrumented tibial tray. *J Biomech* 2007;40 Suppl 1:S4-10. [Crossref](#)
6. Heinlein B, Kutzner I, Graichen F, Bender A, Rohlmann A, Halder AM, et al. ESB clinical biomechanics award 2008: Complete data of total knee replacement loading for level walking and stair climbing measured in vivo with a follow-up of 6-10 months. *Clin Biomech (Bristol)* 2009;24(4):315-26. [Crossref](#)
7. Bergmann G, Bender A, Graichen F, Dymke J, Rohlmann A, Trepczynski A, et al. Standardized loads acting in knee implants. *PLoS One* 2014;9(1):e86035. [Crossref](#)
8. Bergmann G, Graichen F, Dymke J, Rohlmann A, Duda GN, Damm P. High-tech hip implant for wireless temperature measurements in vivo. *PLoS One* 2012;7(8):e43489. [Crossref](#)
9. Fischer MCM, Eschweiler J, Schick F, Asseln M, Damm P, Radermacher K. Patient-specific musculoskeletal modeling of the hip joint for preoperative planning of total hip arthroplasty: A validation study based on in vivo measurements. *PLoS One* 2018;13(4):e0195376. [Crossref](#)
10. Yocum D, Elashoff B, Verta P, Armock G, Yergler J. Patient reported outcomes do not correlate to functional knee recovery and range of motion in total knee arthroplasty. *J Orthop* 2023;43:36-40. [Crossref](#)
11. Damm P, Bender A, Waldheim V, Winkler T, Duda GN. Surgical cup placement affects the heating up of total joint hip replacements. *Sci Rep* 2021;11(1):15851. [Crossref](#)
12. Nelson BD, Karipott SS, Wang Y, Ong KG. Wireless technologies for implantable devices. *Sensors (Basel)* 2020;20(16):4604. [Crossref](#)
13. Sharkey PF, Hozack WJ, Rothman RH, Shastri S, Jacoby SM. Insall Award paper. Why are total knee arthroplasties failing today? *Clin Orthop Relat Res* 2002;(404):7-13. [Crossref](#)
14. Pilliar RM, Lee JM, Maniopoulos C. Observations on the effect of movement on bone ingrowth into porous-surfaced implants. *Clin Orthop Relat Res* 1986;(208):108-13. [Crossref](#)
15. Kärrholm J, Malchau H, Snorrason F, Herberts P. Micromotion of femoral stems in total hip arthroplasty. A randomized study of cemented, hydroxyapatite-coated, and porous-coated stems with roentgen stereophotogrammetric analysis. *J Bone Joint Surg Am* 1994;76(11):1692-705. [Crossref](#)
16. Kiourti A, Nikita KS. A review of implantable patch antennas for biomedical telemetry: Challenges and solutions [wireless corner]. *IEEE Antennas Propag Mag* 2012;54:210-28. [Crossref](#)
17. Kourtis LC, Regele OB, Wright JM, Jones GB. Digital biomarkers for Alzheimer's disease: The mobile/ wearable devices opportunity. *NPJ Digit Med* 2019;2:9. [Crossref](#)
18. Topol EJ. High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nat Med* 2019;25(1):44-56. [Crossref](#)