

DERLEME

İmplant Cerrahisinde Rehberlerin Rolü ve 3D Baskı Teknolojilerinin Etkisi

The Role of Guides in Implant Surgery and the Impact of 3D Printing Technologies

Dt. Talha Enes TUTAL

Ege Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi,
Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, İzmir
ORCID ID: 0009-0000-7427-2402

Prof. Dr. Övül KÜMBÜLOĞLU

Ege Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi,
Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, İzmir
ORCID ID: 0000-0002-4041-7308

Geliş tarihi: 12.03.2025

Kabul tarihi: 01.10.2025

doi: 10.5505/yeditepe.2026.24381

Yazışma adresi:

Dt. Talha Enes TUTAL

Adres: Ege Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi,
Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi
Kampüsü, 35040 Bornova/İzmir

Tel: 0232 311 28 77

E-posta: talhaenestatal@gmail.com

ÖZET

Diş hekimliğinde implant tedavisi, kısmen veya tamamen dişsiz bölgelerin tedavisinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu tedavi yöntemi, hastaların ağız sağlığını geri kazanmalarına ve daha fonksiyonel bir diş yapısına sahip olmalarına yardımcı olmaktadır. İmplantların başarılı bir şekilde yerleştirilmesi; doğru konumlandırma, aç ve derinlik gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu süreçte cerrahi rehberler, implantların doğru yerleştirilmesini sağlayarak tedavinin genel başarısını artırmaktadır. Bu derleme; statik, dinamik ve robotik cerrahi rehberlerin implant cerrahisindeki rolünü ve 3D baskı teknolojilerinin bu rehberlerin üretimindeki etkisini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Statik rehberler; önceden planlanmış bir yol izleyerek yüksek doğruluk sağlarken dinamik rehberler ameliyat sırasında gerçek zamanlı geri bildirim sunarak cerraha esneklik kazandırır. Robotik rehberler ise insan hatasını en aza indirerek milimetrik hassasiyetle implant yerleştirme imkanı sunar. 3D baskı teknolojileri, cerrahi rehberlerin üretiminde devrim yaratmış ve implant cerrahisinin doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Bu teknolojiler özellikle SLA, DLP ve FDM gibi yöntemlerle; cerrahi rehberlerin doğruluğunu, dayanıklılığını ve kalitesini artırmaktadır. Sonuç olarak, cerrahi rehberler ve 3D baskı teknolojileri, implant cerrahisinin başarısını artırarak hem estetik hem de fonksiyonel sonuçların iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu ilerlemeler, hastaların yaşam kalitesini önemli ölçüde artırmakta ve diş hekimliği pratiğinde yeni ufuklar açmaktadır

Anahtar Kelimeler: implant cerrahisi, rehber, cerrahi rehber, robotik cerrahi, 3D baskı

ABSTRACT

Implant treatment in dentistry is a widely used method for rehabilitating partially or completely edentulous areas. This treatment approach assists patients in restoring their oral health and achieving a more functional dental structure. The successful placement of implants relies on numerous factors including accurate positioning, angle and depth. During this process surgical guides play a crucial role in ensuring the correct placement of implants, thereby enhancing the overall success of the treatment. This review comprehensively examines the roles of static, dynamic and robotic surgical guides in implant surgery as well as the impact of 3D printing technologies on the production of these guides. Static guides provide high precision by following a pre-planned pathway while dynamic guides offer real-time feedback during surgery, allowing for greater flexibility for the surgeon. Robotic guides minimize human error, enabling millimeter-level accuracy in implant placement. Furthermore, 3D printing technologies have revolutionized the production of surgical guides by significantly improving the accuracy, durability and quality of these tools. Methods such as SLA, DLP and FDM have been particularly influential in this regard. In conclusion, surgical guides and

3D printing technologies contribute to enhancing the success of implant surgery, leading to improvements in both aesthetic and functional outcomes. These advancements are expected to significantly enhance the quality of life for patients and open new horizons in dental practice.

Keywords: Implant surgery, Guide, Surgical guide, Robotic surgery, 3D printing

GİRİŞ

İmplant, diş hekimliğinde kısmen veya tam dişsiz böl- gelerin tedavisinde kullanılan yöntemlerden biridir.¹ Diş kayıplarının giderilmesinde estetik, fonksiyonel ve biyo- lojik avantajlar sağlayan implantlar; hastalara doğal diş- lerine en yakın çözümü sunar. Ancak implantların başarılı olabilmeleri için doğru konumda yerleştirilmesi gerekir. İmplantların yanlış açıda veya derinlikte yerleştirilmesi fonksiyonel sorunlara yol açabileceği gibi uzun vadede peri-implantitis ve implant kaybı gibi komplikasyonlara sebep olabilir.^{2,3} Bu nedenle implantın yerleştirme işlemlerinde dikkatli planlama ve doğru cerrahi uygulama büyük önem taşır.

Cerrahi rehberler, implantın doğru açıda, doğru derinlik- te ve doğru konumda yerleştirilmesine yardımcı olarak bu başarı oranını artırır.^{1,4} İmplant cerrahisinde kullanılan rehberler; cerrahin ameliyat sırasında hataya düşmesini engelleyerek hastaya daha başarılı bir tedavi sağlar.⁵ Özellikle karmaşık vakalarda cerrahi rehberler, cerrahin iş yükünü hafifletirken tedavi sürecinin doğruluğunu artırır ve hasta memnuniyetini sağlar. Bunun yanı sıra cerrahi rehberler diş etlerinin konturunu ve implantın doğal bir görünüm sunmasını sağlayarak yalnızca fonksiyonel de- ğil estetik açıdan da başarılı sonuçlar alınmasına katkıda bulunur.⁶

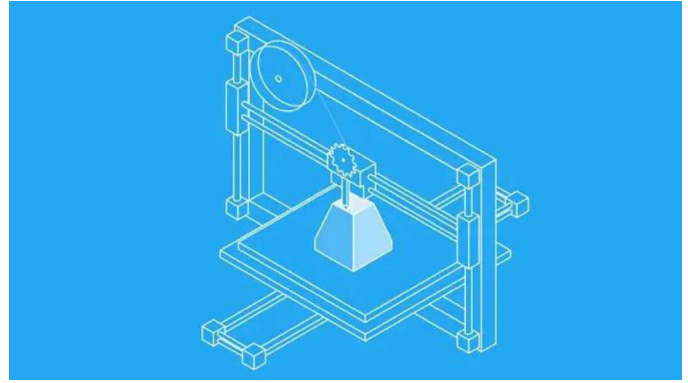
Cerrahi rehberler teknolojik gelişmelere paralel olarak farklı türlerde geliştirilmiştir. Statik rehberler; implantın yerleştirileceği konumu ameliyat öncesi dijital olarak plan- lar ve ameliyat sırasında sabit bir yol izler.⁷ Dinamik reh- berler ise ameliyat sırasında gerçek zamanlı geri bildirim sağlayarak cerrahin implantın konumunu ameliyat anında ayarlamasına olanak sağlar.⁵ Ayrıca son dönemde robo- tik rehberler de kullanılmaya başlanmış olup bu rehberler ameliyat sırasında insan hatasını en aza indirerek implant yerleştirme doğruluğunu artırmaktadır.⁸ Bunun yanı sıra rehberler destek alınan doku türüne göre de sınıflandı- rılabilir. Diş destekli (tooth-supported), mukoza destekli (mucosa-supported) ve kemik destekli (bone-supported) rehberler gibi sınıflandırmalar; cerrahinin türüne ve hasta- nın anatomik özelliklerine göre tercih edilebilmektedir.^{9, 2} Günümüzde dijital diş hekimliğinde, hastaya özel çözümler sunulurken dijital teknolojiler ve üretim yöntemleri büyük bir önem taşımaktadır. Son yıllarda 3D baskı tek- nolojilerindeki gelişmeler, cerrahi rehberlerin üretiminde

de devrim yaratmış ve implant yerleştirme doğruluğunu artıran bir yöntem olarak karşımıza çıkmıştır.

3D Baskı Teknolojileri ve İmplant Cerrahisinde Cerrahi Rehber Üretimi

Diş hekimliğinde 3D baskı teknolojilerinin kullanımı, imp- lant cerrahisinde kullanılan cerrahi rehberlerin üretiminde de önemli bir devrim yaratmıştır. Farklı baskı teknolojileri, cerrahi rehberlerin doğruluğunu, dayanıklılığını ve genel kalitesini doğrudan etkileyen faktörlerdir.

Cerrahi rehberlerin üretiminde en yaygın kullanılan 3D baskı teknolojileri; Stereolithography (SLA), Digital Light Processing (DLP), inkjet ve türevi olan PolyJet®'tir. Bunun- la birlikte, Selective Laser Sintering (SLS), 3-Dimensional Printing (3DP) ve Fused Deposition Modeling (FDM) (Şe- kil 1) gibi diğer teknolojiler de mevcuttur. Bu teknolojiler ve kullanılan malzemeler Tablo 1'de detaylı olarak gös- terilmiştir. Bu teknolojilerle seramik, zirkonya gibi çeşitli malzemeler kullanılabilse de dental uygulamalar için en yaygın kullanılan malzemeler plastikler, rezin veya plastik bazlı polimer malzemelerdir.¹⁰



Şekil 1. FDM teknolojisiyle üretim yapan bir yazıcı düzenek örneği

Seramikten 3 boyutlu üretim şu anda oldukça sınırlıdır çünkü bu üretim ince seramik tozunun bir bağlayıcı mad- de ile birleştirilmesi ile gerçekleşmektedir. Gereken sera- mik tozu da geleneksel seramik restorasyon süreçlerinde olduğu gibi seramik bloklardan öğütme yöntemiyle elde edilmektedir. Bu yüzden geleneksel yöntemler kullanıl- maya devam etmektedir.

Tablo 1. Diş hekimliğinde 3D baskıda kullanılan üretim teknolojileri¹¹

Baskı Teknolojisi	Mevcut Malzemeler
Polyjet baskı	Fotopolimerler
Multi-jet baskı	Plastikler, seramikler ve metaller
Fused Deposition Modelling (FDM)	ABS, polipropilen, polikarbonatlar, polyesterler
Selective Laser Sintering (SLS)	Plastikler, seramikler ve metaller
Selective Laser Melting (SLM)	Metaller
SLA / DLP	Fotopolimerler, plastikler ve seramikler

Zirkonyanın 3 boyutlu üretiminde ise eklemeli üretim ile (Additive Manufacturing (AM)) üretilen zirkonya kullanılmaktadır. Eklemeli üretimle üretilen zirkonyanın hassasi-

yeti ve biyouyumluluğu; konvansiyonel yöntemlerle üretilen zirkonya ile oldukça yakındır. Fakat eklemeli üretim ile üretilen zirkonyanın mekanik özellikleri konvansiyonel yöntemlerle üretilen zirkonyaya göre daha düşüktür. Son yıllarda çalışmalar ile mekanik özellikler artırılmasına karşın fazla gözeneklerin varlığı ve tabaka hataları gibi sorunlar hala devam etmektedir. Ayrıca eklemeli üretim ile üretilen zirkonyanın estetik özelliklerini geliştirmek için renk geçişi sağlayan yeni baskı teknikleri ve ekipmanlar gerekmektedir. Bu gelişmelerin ileride sağlanması ile birlikte gelecekte; eklemeli üretimle üretilen zirkonyanın diş hekimliğinde daha yaygın klinik kullanımı mümkün olacaktır.¹²

Chen ve ark.¹³ yaptıkları çalışmada; Co-Cr cerrahi rehberler üretmek için Direct Metal Printing (DMP) teknolojisini de kullanmışlardır. Ancak bu teknoloji; kullanımının daha karmaşık olması ve genel maliyetlerin (yazıcı cihazı ve sarf malzemeleri dahil) rezin yazıcılara göre daha yüksek olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır.

SLA teknolojisi, ışıkla sertleşen bir polimer reçinenin katman katman işlenmesiyle çalışan bir teknolojidir. Yüksek çözünürlük ve detay sunması sayesinde, özellikle karmaşık modellerin üretimi için güvenilir bir yöntemi olarak tercih edilmektedir. En eski ve yaygın olarak benimsenen SLA tekniğinde sıvı fotopolimer reçine katmanlarını sırayla sertleştirmek için ultraviyole (UV) tarama lazeri kullanılır. Her katman x-y yönünde katılaştırılır ve yapı platformu reçine ile yeniden kaplanmak ve sertleştirilmek üzere z yönünde kademeli olarak düşer. Her yeni katmanın fotopolimerizasyonu, onu bir önceki katmana bağlayarak iyi mukavemete sahip modeller elde edilmesini sağlar. SLA teknolojisinin doğruluk ve hassasiyet açısından üstün olduğu araştırmalarla ortaya konulmuştur.¹⁰

DLP teknolojisi, SLA'ya benzer bir prensibe dayalı çalışmasına rağmen, daha hızlı üretim sağlaması ile öne çıkar. Daha hızlı sonuçlar vermesi, büyük ölçekli üretimlerde avantaj sağlamaktadır. DLP, ışığa duyarlı sıvı reçineleri polimerize etmek için geleneksel bir ışık kaynağı kullanır. Bununla birlikte, SLA'dan farklı olarak, her x-y katmanı, seçici olarak maskelenmiş bir ışık kaynağı kullanılarak bir kerede ışığa maruz bırakılır ve bu da daha kısa üretim süresine neden olur.¹⁴

PolyJet® baskı, katman katman ilerleyen bir teknolojiye dayanmaktadır. Süreç, yapı platformuna seçici olarak malzeme damlacıklarının yerleştirilmesi ve bu damlacıkların bir ışık kaynağı tarafından anında katılaştırılmasıyla katmanların oluşturulmasını sağlar.¹⁵ Bu teknolojinin başlıca avantajları; iyi baskı çözünürlüğü ve plastikler, reçineler, elastomerler gibi geniş bir malzeme yelpazesini aynı anda basabilmesi ve renkli parçalar üretebilme olanağıdır. Bu yöntemin dezavantajları ise cihazın yüksek maliyetli olması ve reçine bazlı malzemelerin zamanla kararsız hale gelmesi bulunur.¹⁶

3D baskı teknolojisinden bağımsız olarak eklemeli tüm üretim süreçleri çeşitli hatalara yatkındır. Bu hatalar; baskı yönü, her katmanın büzülmesi, destek yapıların çıkarılması, işlem sonrası ışıkla sertleştirme ve diğer kimyasal veya fiziksel değişikliklerden kaynaklanabilir.

3D üretilen cerrahi rehberler ile ilgili yapılan bir çalışmada, küçük boyutlu cerrahi rehberlerin büyük boyutlu rehberlere göre daha yüksek doğruluk sağladığı tespit edilmiştir. Çalışmada; kullanılan 3D yazıcı teknolojilerinden bağımsız olarak küçük boyutlu rehberler daha hassas sonuçlar verirken SLA ve DLP teknolojileri doğruluk ve hassasiyet açısından benzer sonuçlar göstermiştir. Buna karşılık, FDM teknolojisinin daha düşük doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir.¹⁷

İmplant cerrahisinde kullanılan cerrahi rehberlerin üretiminde 3D baskı teknolojileri önemli bir yer tutmaktadır. Bu teknolojilerin seçimi cerrahi vakaların karmaşıklığı ve klinik gereksinimlere göre yapılmalıdır.¹⁸

Statik Cerrahi Rehberler

Statik cerrahi rehberler, implant yerleştirilmeden önce dijital olarak planlanan ve sabit bir yol izleyen rehberlerdir. Bu rehberler; implantın açısı, derinliği ve konumunun doğru bir şekilde belirlenmesine yardımcı olur ve cerrahın önceden belirlenmiş bir planı takip etmesini sağlar.² Hekim hastadan alınan panoramik röntgen ve CBCT (Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi) verileri ile implantın yerleşimini bilgisayar ortamında planlar ve üç boyutlu yazıcılara üretilen rehberler kullanılarak bu plan uygulanır. (Şekil 2) Statik rehberlerin en büyük avantajı implant yerleştirme sırasında yüksek doğruluk sağlamalarıdır.¹⁹ Ancak bu rehberlerin en büyük dezavantajı ameliyat sırasında değişiklik yapılmasına olanak tanımamalarıdır.²⁰ Dolayısıyla ameliyat sırasında karşılaşılabilecek olan anatomik zorluklar veya diğer faktörler sebebiyle cerrahın planı değiştirmesi gerektiğinde statik rehberler yetersiz kalabilir.^{5,20} Bu dezavantajına rağmen statik rehberlerin başarılı sonuçlar sunduğu görülmektedir.²¹



Şekil 2. Statik bir cerrahi rehber örneği

Dinamik Cerrahi Rehberler

Dinamik cerrahi rehberler ameliyat boyunca cerrahın implantın konum, açı ve derinlik açısından en doğru şekilde yerleştirilmesini sağlar.⁴ Ameliyat sırasında değiştirilebilir ve ayarlanabilme özelliği; özellikle karmaşık anatomik yapılar veya öngörülemez cerrahi durumlar söz konusu olduğunda büyük bir avantaj sağlamaktadır.³

Dinamik cerrahi rehberler, üç boyutlu navigasyon sistemlerine dayalı olarak çalışır ve cerraha implantın konumunu dijital bir ekran üzerinde sürekli olarak gösterir.²² Bu rehberler implantın doğru yerleştirilmesi ile ilgili olarak yüksek başarı oranı sunmaktadır. Dinamik cerrahi rehberler uzun vadede protezlerin stabilitesi ve dayanıklılığı açısından oldukça başarılı sonuçlar göstermektedir.^{23,2}

Dinamik rehberlerin bir diğer önemli avantajı ise implant cerrahisinin başarısının cerrahın tecrübesine olan bağlılığını azaltması; daha az deneyimli cerrahlar için bile yüksek doğruluk ve güvenlik sunmasıdır.³ Dinamik rehberlerin kullanımı implant yerleştirme sürecinde hata riskini en aza indirirken, ameliyatın genel güvenliğini artırır.⁵ Ayrıca, dinamik rehberler implant cerrahisinin süresini kısaltabilir çünkü ameliyat sırasında planlama ve ayarlamalar daha hızlı bir şekilde yapılabilir. Dinamik rehberler yalnızca cerrahi doğruluğu değil aynı zamanda estetik ve fonksiyonel sonuçları da iyileştirir. Ayrıca implantın çevresindeki yumuşak dokuya zarar verme riskini azaltır; bu da daha hızlı bir iyileşme süreci sağlar ve komplikasyon riskini düşürür.

Statik ve Dinamik Cerrahi Rehberlerin Karşılaştırılması

Statik ve dinamik cerrahi rehberler; implant cerrahisinde kullanılan iki temel teknoloji olup, her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Statik rehberler, önceden dijital olarak planlanmış bir yol izleyerek cerrahın sabit bir doğrultuda çalışmasını sağlar. Bu yöntem ameliyat sırasında esneklik sağlamasa da implantların planlanan şekilde doğru açı ve derinlikte yerleştirilmesini garanti etmektedir. Bununla birlikte ameliyat sırasında ortaya çıkan anatomik zorluklara anlık olarak uyum sağlama yeteneği olmadığı için planlamada yapılan hatalar cerrahi operasyon sırasında düzeltilemez.^{3,5}

Dinamik cerrahi rehberler ise ameliyat sırasında cerraha gerçek zamanlı geri bildirim sağlayarak implantın yerleştirilmesi sırasında karşılaştığı beklenmedik zorluklara anında uyum sağlamasına olanak tanır; hekime operasyon sırasında daha fazla kontrol ve serbestlik sağlar. Dinamik rehberler implant başarısının; cerrahın tecrübesine olan bağlılığı da azaltarak daha güvenli ve başarılı sonuçlar elde edilmesine yardımcı olur. Ancak dinamik rehberlerin daha ileri teknoloji gerektirmesi ve maliyetinin statik rehberlere göre daha yüksek olması kullanımını sınırlamaktadır.⁵

Robotik Cerrahi Rehberler

Robotik cerrahi rehberler; implant yerleştirilmesi sırasında cerraha otomatik ve hassas bir kontrol sunan en yeni teknolojilerden biridir. Robotik rehberler, ameliyat boyunca insan hatasını en aza indirirken implantın doğru pozisyonda yerleştirilmesini sağlar.⁵ Bu sistemler operasyon sırasında hekimin müdahalesini minimize ederek cerrahi operasyonun önceden yapılmış olan planlamaya olan doğruluğunu artırır ve komplikasyon riskini düşürür.⁸

Robotik cerrahi rehberlerin bir diğer avantajı ise implantın doğru açı ve derinlikte yerleştirilmesini sürekli olarak izleyen geri bildirim mekanizmalarıdır. Bu rehberler implantın çevresindeki kemik ve yumuşak dokulara zarar verme riskini en aza indirir; ameliyat sonrası iyileşme süreci hızlanır ve komplikasyonlar azalır.

Bahrami ve ark.²⁴ 2024 yılında yayınladıkları bir derlemede robotik cerrahi çözümlerini üç gruba ayırmıştır: hastanın ağız boşluğuna otonom olarak girip çıkabilen, cerrahi alanı hazırlayan ve implantı yerleştiren aktif robotlar; operasyon sırasında robot kolunun operatör tarafından yönlendirilmesini gerektiren pasif robotlar ve implantın yerleştirilmesini otonom olarak gerçekleştirebilen ancak giriş-çıkış sırasında operatör rehberliği gerektiren yarı aktif robotlar. Bu üç grup arasında doğruluğu ve etkinliği karşılaştıran çalışmalarda aktif robotların pasif robotlara göre üstün doğruluk sağladığı ve operasyon süresini önemli ölçüde kısalttığı tespit edilmiştir. Fakat karmaşık anatomik yapılar veya öngörülemez cerrahi durumlar söz konusu olduğunda tam otomasyonun yani aktif robotların kullanımının mümkün olmadığı belirtilmiştir.²⁵ Ayrıca aktif robotlarda hizalama problemleri gibi çeşitli problemlerin de yaşandığı göz önünde bulundurularak şu an için tüm robotik cerrahi çözümlerin dış hekimleri kontrolünde kullanılması tavsiye edilmektedir.

Cerrahi Rehberlerin Estetik ve Fonksiyonel Sonuçlara Etkisi

Cerrahi rehberler implant yerleştirilmesinde yalnızca cerrahi doğruluğu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda protezlerin estetik ve fonksiyonel başarısını da etkiler. Statik, dinamik ve robotik rehberlerin implant yerleşiminde bulunduğu hassasiyet; protezlerin hastanın doğal dişlerine en yakın görünüm ve işlevsellikte olmasına önemli katkılar sağlar. Estetik açıdan özellikle ön bölgede implantın doğru açıda ve derinlikte yerleştirilmesi büyük önem taşır. Statik rehberler, önceden dijital olarak planlanmış bir yol izlediği için implantın estetik bölgede çevre dişlerle yerleştirilmesini sağlar. Bununla birlikte, anatomik farklılıkların ameliyat sırasında ortaya çıkması durumunda statik rehberlerin esnekliği sınırlıdır.²

Dinamik cerrahi rehberler, ameliyat sırasında cerraha gerçek zamanlı geri bildirim sağlayarak, implantın konumunu sürekli olarak optimize eder. Bu, özellikle estetik açıdan hassas olan bölgelerde büyük bir avantaj sunar. Dinamik

rehberler ayrıca yumuşak dokuya zarar verme riskini azaltarak daha doğal bir diş eti konturu elde edilmesine katkı sağlar. Bu da protezin estetik görünümünü ve çevre dokularla uyumunu artırır.²²

Fonksiyonel açıdan cerrahi rehberler; implant yerleştirme doğruluğu, protezlerin çiğneme ve konuşma gibi temel fonksiyonlarını doğrudan etkiler. Özellikle arka bölgelerde implantların doğru konumlandırılması çiğneme kuvvetlerinin eşit dağılımını ve protezin uzun vadede stabilitesini sağlar.²¹ Yapılan diğer çalışmalarda da dinamik rehberlerin, cerrahın ameliyat sırasında implantı en uygun pozisyona yerleştirmesine olanak tanıdığı ve bunun protezin işlevselliğini artırdığı belirtilmektedir.²² Robotik rehberler ise milimetrik hassasiyetle implant yerleştirerek hem estetik hem de fonksiyonel sonuçlarda en yüksek başarıyı sunar. Robotik rehberlerin implantın çevresindeki kemik ve yumuşak dokulara zarar verme riskini en aza indirdiği ve protezin hem fonksiyonel hem de estetik açıdan üstün sonuçlar elde edilmesine katkı sağladığı belirtilmektedir.^{20,26}

SONUÇ

Cerrahi rehberler, dijital diş hekimliğinin sunduğu en önemli katkılardan biri olarak implant cerrahisinin güvenilirliğini ve öngörülebilirliğini büyük ölçüde artırmıştır. Statik, dinamik ve robotik rehberler farklı klinik koşullara hitap eden özellikleriyle, implantın en uygun pozisyonda yerleştirilmesini sağlayarak tedavi başarısını yükseltmektedir. Bu teknolojiler sayesinde yalnızca cerrahi doğruluk değil, uzun dönem protetik sonuçlar da önemli ölçüde iyileşmiştir.

Statik rehberler, önceden planlanmış cerrahi yolun sadık bir şekilde uygulanmasını mümkün kılarak yüksek doğruluk sağlamaktadır. Bununla birlikte esneklikten yoksun olmaları, intraoperatif değişiklik gerektiren durumlarda sınırlayıcı olabilmektedir. Dinamik rehberler, bu açığı kapatarak cerraha ameliyat sırasında gerçek zamanlı yönlendirme ve ayarlama imkânı sunar. Robotik rehberler ise en ileri teknoloji olarak, insan hatasını en aza indirip milimetrik düzeyde hassasiyet sağlamalarıyla dikkat çekmektedir. Böylece her rehber türü, belirli hasta grupları ve cerrahi senaryolar için avantajlı hale gelmektedir.

Ayrıca literatürde, statik cerrahi rehberlerin doğruluğunu destek tipi, üretim yöntemi ve tasarım özelliklerinin (örneğin sabitleme vidaları ve kılıflar) doğrudan etkilediği bildirilmektedir. Özellikle diş destekli rehberlerin in vitro ve in vivo ortamlarda en yüksek doğruluğu sağladığı; mukoza destekli rehberlerin ise en düşük doğruluk değerlerini sunduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, frezleme yöntemiyle üretilen rehberlerin 3D baskı ile üretilenlere kıyasla daha yüksek doğruluk gösterdiği, fakat bu bulgunun daha fazla veriyle desteklenmesi gerektiği vurgulanmaktadır.²⁷

Protetik açıdan değerlendirildiğinde, doğru implant ko-

numlandırmasının yalnızca fonksiyonel değil, aynı zamanda estetik sonuçlar açısından da kritik rol oynadığı açıktır. Rehberler, protezlerin stabilitesini, çiğneme kuvvetlerinin dengeli dağılımını ve özellikle estetik bölgelerde doğal diş eti konturunun korunmasını kolaylaştırarak hasta memnuniyetini artırmaktadır. Ayrıca rehberlerin, cerrahi planlama ile protetik tasarım arasındaki entegrasyonu güçlendirdiği ve multidisipliner yaklaşımları desteklediği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, cerrahi rehberler günümüzde implantolojinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Statik rehberler doğruluk, dinamik rehberler esneklik, robotik rehberler ise ileri düzey otomasyon ve güvenlik sunarak farklı klinik gereksinimlere yanıt vermektedir. Bununla birlikte, dijital planlama ve rehber tasarım süreçlerinde ortaya çıkabilecek küçük hataların birikerek cerrahi doğruluğu etkileyebileceği, bu nedenle tüm aşamaların dikkatle uygulanması gerektiği bildirilmektedir.²⁸ Gelecekte yapay zekâ tabanlı planlama, gelişmiş görüntüleme yöntemleri ve yeni nesil biyouyumlu malzemeler ile bu sistemlerin daha da geliştirilerek implant cerrahisinde standart uygulama haline gelmesi beklenmektedir. Bu açıdan, cerrahi rehberlerin yalnızca mevcut klinik başarıya değil, aynı zamanda diş hekimliğinde dijital dönüşümün hızlanmasına da katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Liu L, Wang X, Guan M, Fan Y, Yang Z, et al. A mixed reality-based navigation method for dental implant navigation method: A pilot study. *Comput Biol Med* 2023; 154:106568. doi: 10.1016/j.compbimed.2023.106568.
2. Gargallo-Albiol J, Barootchi S, Salomó-Coll O, Wang HL. Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review. *Ann Anat* 2019; 225: 1-10. doi: 10.1016/j.aanat.2019.04.005.
3. Chackartchi T, Romanos GE, Parkanyi L, Schwarz F, Sculean A. Reducing errors in guided implant surgery to optimize treatment outcomes. *Periodontol* 2000 2022; 88: 64-72. doi: 10.1111/prd.12411.
4. Stünkel R, Zeller AN, Bohne T, Böhrnsen F, Wedi E, et al. Accuracy of intraoral real-time navigation versus static, CAD/CAM-manufactured pilot drilling guides in dental implant surgery: An in vitro study. *Int J Implant Dent* 2022; 8:41. doi: 10.1186/s40729-022-00430-6.
5. Khaohoen A, Powcharoen W, Sornsuwan T, Chantawaratit P, Thanathornwong B, et al. Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic, and robot-assisted surgery: A systematic review and meta-analysis of clinical trials. *BMC Oral Health* 2024; 24: 359. doi: 10.1186/s12903-024-04033-y.
6. Flügge T, Kramer J, Nelson K, Nahles S, Kern F. Digital implantology: A review of virtual planning software for guided implant surgery. *BMC Oral Health* 2022; 22: 23.

doi: 10.1186/s12903-022-02057-w.

7. Kiatkroekkrai P, Takolpuckdee C, Subbalekha K, Mattheos N, Pimkhaokham A. Accuracy of implant position when placed using static computer-assisted implant surgical guides manufactured with two different optical scanning techniques: A randomized clinical trial. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2020; 49: 377-383. doi: 10.1016/j.ijom.2019.08.019.

8. Zhang S, Cai Q, Chen W, Liu J, Zhou Y, et al. Accuracy of implant placement via dynamic navigation and autonomous robotic computer-assisted implant surgery methods: A retrospective study. *Clin Oral Implants Res* 2024; 35: 220-229. doi: 10.1111/clr.14216.

9. Elliott T, Hamilton A, Griseto N, Gallucci GO. Additively manufactured surgical implant guides: A review. *J Prosthodont* 2022; 31: 38-46. doi: 10.1111/jopr.13476.

10. Azari A, Nikzad S. The evolution of rapid prototyping in dentistry: A review. *Rapid Prototyp J* 2009; 15: 216-225. doi: 10.1108/13552540910961946.

11. Nulty A. A literature review of 3D printing materials in dentistry: Part four. *Clin Dent* 2022; 2: 44-49

12. Su G, Zhang Y, Jin C, Lin W, Huang X, et al. 3D printed zirconia used as dental materials: A critical review. *J Biol Eng* 2023; 17: 78. doi: 10.1186/s13036-023-00396-y.

13. Chen L, Lin WS, Polido WD, Eckert GJ, Morton D, et al. Accuracy, reproducibility, and dimensional stability of additively manufactured surgical templates. *J Prosthet Dent* 2019; 122: 309-314. doi: 10.1016/j.prosdent.2019.02.007.

14. Ligon SC, Liska R, Stampfl J, Gurr M, Mülhaupt R, et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chem Rev* 2017; 117: 10212-10290. doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.

15. Snyder TJ, Andrews M, Weislogel M, Lindeman A, Moeck P, et al. 3D Systems' technology overview and new applications in manufacturing, engineering, science, and education. *3D Print Addit Manuf* 2014; 1: 169-176. doi: 10.1089/3dp.2014.1502.

16. Kim SY, Shin YS, Jung HD, Hwang CJ, Baik HS, et al. Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2018; 153: 144-153. doi: 10.1016/j.ajodo.2017.05.025.

17. Rouzé l'Alzit F, Cade R, Naveau A, Babilotte J, Meglioli M, et al. Accuracy of commercial 3D printers for the fabrication of surgical guides in dental implantology. *J Dent* 2022; 117: 103909. doi: 10.1016/j.jdent.2021.103909

18. Etemad-Shahidi, Y., Qallandar, O. B., Evenden, J., Alifui-Segbaya, F., & Ahmed, K. E. Accuracy of 3-dimensionally printed full-arch dental models: a systematic review. *Journal of clinical medicine* 2020; 9(10), 3357. doi: 10.3390/jcm9103357.

19. Abduo J, Lau D. Effect of manufacturing technique on the accuracy of surgical guides for static computer-aided

implant surgery. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2020; 35: 931-938.

19. Abduo J, Lau D. Effect of manufacturing technique on the accuracy of surgical guides for static computer-aided implant surgery. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2020; 35: 931-938. doi: 10.11607/jomi.8186.

20. Tao B, Feng Y, Fan X, Zhang L, Zhou M, et al. Accuracy of dental implant surgery using dynamic navigation and robotic systems: An in vitro study. *J Dent* 2022; 123: 104170. doi: 10.1016/j.jdent.2022.104170.

21. Romandini M, Ruales-Carrera E, Sadilina S, Hämmerle CHF, Sanz M, et al. Minimal invasiveness at dental implant placement: A systematic review with meta-analyses on flapless fully guided surgery. *Periodontol 2000* 2023; 91: 89-112. doi: 10.1111/prd.12440.

22. Wu BZ, Sun F. A registration-and-fixation approach with handpiece adjustment for dynamic navigation in dental implant surgery. *Heliyon* 2022; 8: e10565. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10565.

23. Afrashtehfar KI, Jurado CA, Moshaverinia A. Dynamic navigation may be used for most implant surgery scenarios due to its satisfactory accuracy. *J Evid Based Dent Pract* 2022; 22: 101797. doi: 10.1016/j.jebdp.2022.101797.

24. Bahrami R, Pourhajibagher M, Nikparto N, Bahador A. Robot-assisted dental implant surgery procedure: A literature review. *J Dent Sci* 2024; 19: 1359-1368. doi: 10.1016/j.jds.2024.03.011.

25. Xu Z, Xiao Y, Zhou L, Lin Y, Su E, et al. Accuracy and efficiency of robotic dental implant surgery with different human-robot interactions: An in vitro study. *J Dent* 2023; 137: 104642. doi: 10.1016/j.jdent.2023.104642.

26. Rawal S. Guided innovations: Robot-assisted dental implant surgery. *J Prosthet Dent* 2022; 127: 673-674. doi: 10.1016/j.prosdent.2022.03.029.

27. Shi Y, Wang J, Ma C, Shen J, Dong X, et al. A systematic review of the accuracy of digital surgical guides for dental implantation. *Int J Implant Dent* 2023; 9: 38. doi: 10.1186/s40729-023-00507-w.

28. Putra RH, Yoda N, Astuti ER, Sasaki K. The accuracy of implant placement with computer-guided surgery in partially edentulous patients and possible influencing factors: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthodont Res* 2022; 66: 29-39. doi: 10.2186/jpr.JPR_D_20_00184.