



## Derleme

Geliş Tarihi: 25.03.2022  
Kabul Tarihi: 19.04.2022

# Robotik Omurga Cerrahisi

## Robotic Spinal Surgery

Halil İbrahim SÜNER<sup>1</sup>, Daniel Oñate MARTÍNEZ-OLASCOAGA<sup>2</sup>, Jose Luis PÉREZ GONZÁLEZ<sup>2</sup>,  
Rafael Luque PÉREZ<sup>2</sup>, Angela CARRASCOSA-GRANADA<sup>2</sup>, Ignacio DOMÍNGUEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Başkent Üniversitesi Tıp Fakültesi, Adana Dr. Turgut Noyan Uygulama ve Araştırma Merkezi, Nöroşirürji Bölümü, Adana, Türkiye  
<sup>2</sup>Spinal Surgery Unit, Hospital Clínico San Carlos, Madrid, Spain

**Yazışma adresi:** Halil İbrahim SÜNER ✉ h.ibrahimsuner@hotmail.com

## ÖZ

Gelişen teknoloji her geçen gün bilimde ve tıpta etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde ameliyatlarda kullanılan robotik teknolojiler, navigasyon sistemleri sayesinde cerrahlara yardımcı olmaktadır. Son dönemde omurga cerrahisinde adından söz ettiren robot yardımlı pediküler vida yerleştirme, düşük komplikasyon ve revizyon oranları ile umut vaat ediyor. İlk kez 2003 yılında duyulan ve şimdiye kadar birçok kez güncellenen robotik omurga cerrahisi, günümüzde bazı merkezlerde aktif olarak uygulanmaktadır. Her ne kadar çok başarılı olsa da robotik omurga cerrahisi, her cerrahi teknik ve teknoloji gibi bir öğrenme eğrisine ve maliyet analizine ihtiyaç duyar. Bu teknolojinin minimal invaziv bir prosedür olması nedeniyle hasta memnuniyeti oldukça yüksek olup komplikasyon ve revizyon oranlarının düşük olması nedeniyle de gelecekte omurga cerrahisi kliniklerinde tercih edilmesi olasıdır.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Robotik omurga cerrahisi, Navigasyon, Minimal invaziv cerrahi

## ABSTRACT




Technological developments are currently being used effectively in science and medicine. Today, robotic technologies used in surgeries support surgeons with their navigation systems. Robot-assisted pedicular screw placement, which has made a name for itself in spine surgery recently, looks promising with its low complication and revision rates. Robotic spine surgery, which first appeared in 2003 and has been updated many times so far, is currently actively practiced in some centers. Although it is very successful, robotic spine surgery needs a learning curve and cost analysis like every other surgical technique and technology. Patient satisfaction is very high due to this technology as it is a minimally invasive procedure. It could be preferred in spine surgery clinics in the future because of the low complication and revision rates.

**KEYWORDS:** Robotic spine surgery, Navigation, Minimally invasive surgery

## ■ GİRİŞ

Günümüzde, bilim ve teknolojiye hızla gelişmeler, küreselleşme nedeniyle tüm dünyada neredeyse aynı zaman dilimlerinde insanoğlunun hizmetine sunulmaktadır. Bundan, tıbbın her alanı olduğu gibi beyin cerrahisi ve omurga cerrahisi de payını almaktadır. Geliştirilen bilgisayar programları ve yapay zekâ, özellikle tanı ve tedavide her gün

kendine yer buluyor. Robotik cerrahi, 30 yılı aşkın bir süre önceki başlangıcından bu yana cerrahi bilimler arasında önemli bir popülerlik kazanmıştır. Nöroşirürjide robot kullanımı ilk kez 1985 yılında biyopsi kanüllerini tutmak ve manipüle etmek için bir endüstriyel robot (Programmable Universal Machine for Assembly [PUMA]; Advanced Research Robotics, Oxford, CT) kullanan Kwok ve ark tarafından bildirilmiştir (14). Geleneksel olarak, beyin cerrahisi navigasyonu, preoperatif görüntülere

Halil İbrahim SÜNER  : 0000-0002-5957-8611  
Daniel Oñate MARTÍNEZ-OLASCOAGA  : 0000-0002-8875-4936  
Jose Luis PÉREZ GONZÁLEZ  : 0000-0002-3228-0487

Rafael Luque PÉREZ  : 0000-0001-8658-2600  
Angela CARRASCOSA-GRANADA  : 0000-0003-2231-8346  
Ignacio DOMÍNGUEZ  : 0000-0003-4596-0008

ve ilgili anatomik yapıların birbirine ve kayıt için kullanılan referans belirteçlerine göre aynı pozisyonda kaldığı varsayımına dayanmaktadır. İlk beyin cerrahisi robotları da, robotik konumlandırmayı belirlemek için ameliyat öncesi görüntülere ihtiyaç duyuyorlardı. Ancak ameliyat sırasında doku deformasyonu ve kayması, hasta ile ameliyat öncesi görüntü hacimleri arasındaki uzamsal ilişkiyi bozarak lokalizasyon hatalarına neden olabilir. Bu sorunlara karşı en iyi yaklaşım intraoperatif görüntüleme teknikleri gibi görünmektedir. Bu nedenle, intraoperatif değişiklikleri ve rezidüel tümörü kompanse etmek ve navigasyon kaydını güncellemek için 3 boyutlu ultrason, bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans inceleme (MRI) kullanılmaya başlandı (18). Gerçek zamanlı, görüntü kılavuzlu bir sistem ihtiyacını karşılamak için Minerva geliştirildi (Lozan Üniversitesi, Lozan, İsviçre). Bu sistem, bir BT tarayıcısının içine yerleştirilmiş robotik bir koldan oluşuyordu. Böylece bu sistem, cerrahların operasyonu gerçek zamanlı olarak izlemesine ve gerektiğinde yörengede uygun ayarlamalar yapmasına izin veriyordu. (4). Kısa süre sonra manyetik rezonans (MR) uyumlu robotik sistemlerin tasarımı ve yapımı başladı ve 2005 yılına kadar 159 tip cerrahi robot prototipi geliştirildi (22). Beyin ameliyatlarında kullanılan navigasyon ve robotik sistemler gelişirken, 2003 yılında Shoham ve ark., cerrahlara ameliyat sırasında yardımcı olacak bir robotik omurga cerrahisi sistemi hakkında bir çalışma yayınladı (25). Bunu, 2004 yılında Mazor SpineAssist isimli, pedikül vidalarının navigasyon sayesinde yerleştirmeye yarayan bir robotun FDA onayını alarak spinal cerrahide adının duyulması izledi. Bu robot, spinal enstrümantasyonun doğruluğunu artırmaya adanmış ilk robotik sistemiydi. İlk vakalarla ilgili spesifik sorunlar; intraoperatif anatomi ve preoperatif BT arasında hatalı füzyon, vida giriş noktalarında ve ardından kanülasyon yönlerinde kaymalara neden olan aşırı sıyırma kuvvetleri ve robotik kolun çalışma penceresini aşan vida planlarını içeriyordu (2). İlk robotlar hantal olsa da, robot teknolojisinin omurga cerrahisinde kalıcı bir yeri olacağı çok açık hâle geldi. Omurga cerrahisinde bu yeni dönem, minimal invaziv spinal cerrahinin (MİSC) popülerleşmesinin henüz yeni başladığı bir zamandı. Sonraki dönemlerde MİSC tekniklerinde (lateral lomber interbody füzyon, oblik lomber interbody füzyonu, endoskopik omurga cerrahisi) ve robotik tekniklerde hızlı bir gelişme görüldü (27).

İlk robotik sistemin piyasaya sürülmesinden sonra, cerrahiye yardımcı olan navigasyon sistemleri olarak FDA onayı alan birçok robotik teknoloji geliştirildi. Mevcut endüstri liderleri arasında Renaissance ve X-Stealth Edition gibi Mazor ürünleri (Mazor Robotics, Caesarea, Israel), ExcelsiusGPS (Globus Medical, Audobon, PA), ROSA Spine (MedTech, Montpellier, Fransa) bulunmaktadır (Şekil 1). Ayrıca robotik uygulamalar, vertebra içi agumentasyon ve servikal enstrümantasyona yardımcı olmak için, bazen kullanım alanı genişletilmiştir (27).

Teknolojinin ilerlemesi, tıpta ve özellikle cerrahide yeni çözümler sunması; gelişen dünyada beklenen bir durumdur. Robot teknolojisinin alt yapısı ve kullanım kolaylığı/zorluğu, hekimlerin buna adaptasyonu, maliyet analizi; bu teknolojiye erişimi ve faydalanımı etkileyen faktörlerdir. Türkiye’de henüz yer edinmeyen ancak uygun koşullarda (ekonomi, yetişen hekim sayısındaki artış) doktor ve hastayla buluşacağına inandığımız, robot yardımcı omurga cerrahisindeki kendi tecrübemiz ve literatür bilgilerini derledik.

## ■ ROBOT TEKNOLOJİSİ VE SPİNAL CERRAHİ

Pedikül vidasının yerleştirilmesi için orijinal olarak kullanılan geleneksel serbest el tekniği, nörolojik komplikasyonlara yol açabilecek yüksek yanlış yerleştirme riski ile ilişkili olduğundan, o zamandan beri yaralanmayı en aza indirmek ve başarıyı en üst düzeye çıkarmak için navigasyon kılavuzlu yaklaşımlar geliştirilmiştir. Ayrıca, geleneksel açık omurga cerrahisi, birçok omurga patolojisi için yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmaya devam etse de diğer cerrahi branşlarda olduğu gibi, omurga patolojilerinin çözümleri için de son yıllarda minimal invaziv cerrahi yöntemler yaygınlaşmaya başladı. Cerrahi sonuçları iyileştirmenin bir yolu olarak navigasyonlu robot teknolojilerinin MİSC’ye entegrasyonu, MİSC tekniklerinin evriminin önemli bir parçası olmuştur. Geliştirilmiş intraoperatif navigasyon, şu anda piyasada bulunan birkaç omurga robotunun geliştirilmesine yol açtı. Bununla birlikte, bu robotların ilk denemelerinde; yazılım çökmeleri, intraoperatif floroskopik görüntülerin preoperatif 3 boyutlu görüntüleme ile senkronize edilmesindeki hatalar, robotik kolun yönünün değiştirilmesiyle sonuçlanan ve doğruluğun azalmasına neden olan problemler ve intraoperatif kullanıcı arayüzleriyle ilgili problemler gibi birçok zorluk yaşandı. Bu süre zarfında robotik yardım kullanılarak gerçekleştirilen omurga prosedürlerinin %50’sinden fazlasında teknik veya klinik hatalar görülmüştür (2). Bu zorluklar göz önüne alındığında, bu platform yaygın olarak benimsenmedi. Ancak bu teknolojinin geliştirilmesi ile başta yaşanan sorunlar en aza indirildi ve günümüzdeki başarılı robotik cerrahi cihazlar üretildi. Başlangıçta yaşanan sorunlar giderilince ortaya çıkan bu tasarımlar ile birçok cerrahi prosedür gerçekleştirildi. Bundan sonra, robotik yardım, doğruluğunun cerrahi başarıyı belirlediği pedikül vidası yerleştirme sonuçlarını büyük ölçüde iyileştirmiştir (27). Perdomo-Pantoja ve ark. tarafından yapılan analizde, navigasyon kılavuzlu pedikül vida yerleştirme tekniklerinin geleneksel tekniğe kıyasla daha yüksek doğruluk oranları gösterdiğini ve BT tabanlı navigasyonun diğer navigasyon yaklaşımları arasında en iyi doğruluk oranlarını gösterdiğini bildirmiştir (21). Bu yüzden günümüzde kullanılan navigasyon-



Şekil 1: Günümüzde omurga cerrahisinde en çok kullanılan robotik teknolojilerin genel görünümü.

lu robotik cerrahi prosedürlerde BT kılavuzluğundan faydalanılmaktadır.

Cerrahi robotlar, farklı “yardım” seviyelerine sahip üç kategoriye ayrılabilir. İlk tip, cerrahın makinenin her hareketini kontrol ettiği uzaktan kumanda istasyonuna sahip tele-cerrahi sistemlerdir (örneğin Da Vinci Surgical System (Intuitive Surgical, Inc.)). İkinci tip robotlar, cerrahın yakın gözetimi altında ve onun önceden programlandığı robotun kendisi tarafından otonom olarak gerçekleştirilen eylemlerle kontrollü sistemlerdir. Ve son olarak, mevcut üçüncü tip cerrahi robotlar, hem cerrahın hem de robotun aynı anda hareketleri kontrol ettiği ortak tip, paylaşımlı kontrol modelleridir (8).

## ■ CERRAHİ TEKNİK

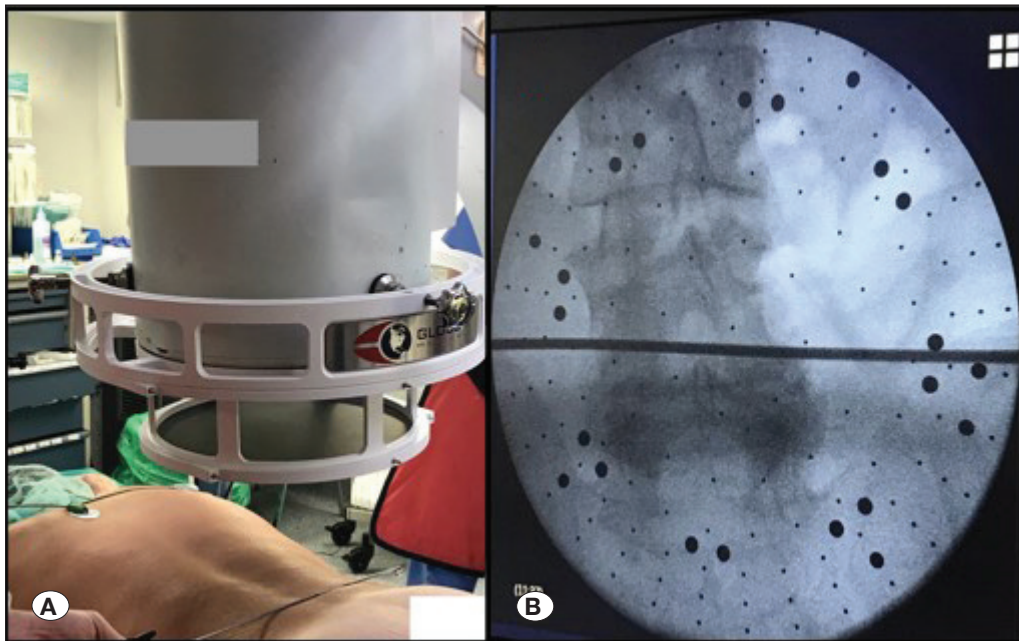
Açık cerrahi ya da MİSC (perkütan) ile vida konumlandırılan robotik cerrahi sistemleri mevcut olup bu bölümde, gelişmiş versiyon olan MİSC tekniği ile pedikül vidası yerleştiren robotik sistemler anlatılacaktır. Robotik spinal cerrahi sistemleri, navigasyonla planlama için, preoperatif BT (POBT) veya intraoperatif BT (İOBT) kullanırlar. Hasta, radyolüsent bir ameliyat masasına prone pozisyonda yatırılır. POBT kullanan robotik sistemde, POBT ve İOBT verilerini hedef spinal segmentlerle birleştirmek için özel bir çerçeve eki olan standart bir floroskop kullanılır ve operasyon alanı belirlenir (Şekil 2). Uygun saha temizliği ile hasta hazırlanır ve standart ve geniş bir şekilde örtülür. Posterior superior iliak çıkıntısının üzerinde küçük bir insizyon yapılır. Bir pim, buradan iliak kemiğe gömülür (Şekil 3). Daha sonra iliak pime dinamik bir referans tabanı eklenir. Bir sonraki adım, sistemin, POBT mi yoksa İOBT mi kullanılacağına bağlıdır. İOBT kullanan robotik sistem için de iliak pime bir İOBT kayıt çerçevesi de eklenmiştir. Çerçeve, BT çekiminden sonra kaldırılır (6).

Daha sonra planlama yazılımı ve ekranı kullanılarak her bir pedikül vidasının optimal yörüngesi, boyutu ve uzunluğu belirlenir (Şekil 4). Robot daha sonra örtülür ve cerrahi alana yerleştirilir. MİSC prosedür için robot kol ve uç tüp, kesi yerlerini belirlemek için vida planlarına göre cilt üzerinde konumlandırılır. Paramedian kesi yerlerinin lokalizasyonundan sonra bir kesi yapılır ve alttaki fasya koter ile uzunlamasına açılır. Uzun uç tüpün açıklığı, aletlerin rahat geçişine izin verir. Girilen aletlerin her biri (matkap, kılavuz tel ve tornavida) robot uç tüpünden geçirilir. Navigasyonlu matkap, uygun yörüngeyi sabit bir şekilde koruyarak uç tüpe ile yerleştirilir. Bu sırada planlama ekranından, cerrah, pedikülden geçerken matkabı gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve gidilecek mesafeyi ona göre ayarlar (Şekil 5). Pedikül vida yolu delindikten sonra, navigasyonlu bir tornavida kullanılır ve ardından uygun vida yerleştirilir (Şekil 6) (6). Rod ve vida plaklarının yerleştirilmesi, MİSC yöntemi olan perkütan enstrümantasyondaki gibidir.

## ■ EN YAYGIN KULLANILAN ROBOT TİPLERİ

**Mazor (Medtronic Navigation, Louisville, CO, ABD; Medtronic Spine, Memphis, TN, ABD)**

İlk nesil Mazor robotu SpineAssist, 2004 yılında FDA onayı aldı ve dünya çapında en yaygın kullanılan sistemlerden biri olmaya devam ediyor. Çalışma esası, vida yönlerinin planlanmasına izin vermek için POBT/İOBT görüntülemelerine dayanır. SpineAssist ayrıca İOBT görüntülemenin aksine ameliyat POBT ile ameliyat sırasındaki floroskopinin eşleştirilmesine izin verir. İkinci nesil Mazor robotu olan Rönesans, 2011 yılında ticari olarak piyasaya sürüldü. Rönesans, SpineAssist'ten daha küçük ve daha hafiftir. Hem SpineAssist hem de Renaissance Mazor robotları için kılavuz tellerin üzerine pedikül vidalarının yerleştirilmesi gerekir. Mazor'un üçüncü nesil omurga robotu olan Mazor X, 2016'da piyasaya sürüldü ve yükseltmeler, artık



**Şekil 2:** Özel eki olan floroskopi ile preoperatif ameliyat sahasının görüntülenmesi (A) sonrası planlama ekranında floroskopi görüntüleri (B) BT ile birleştirilmektedir.



**Şekil 3:** Robot navigasyon sisteminin, hastanın anlık omurga anatomisini ve pozisyonunu tanımasını sağlayan özel pimlerin ve dinamik referans tabanının iliak kemiklere yerleştirilmesi.

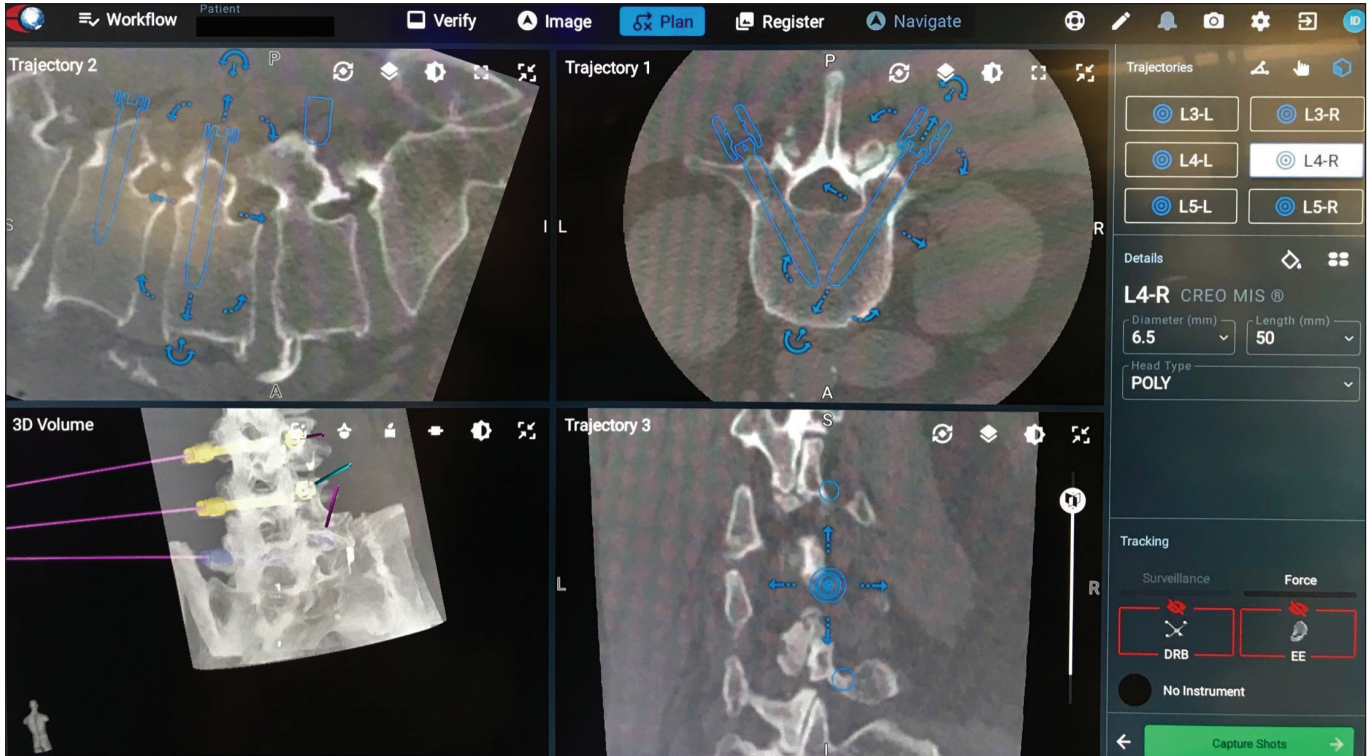
hastaya monte edilmiş bir pim gerektirmeyen (birinci ve ikinci nesil Mazor robotlarında görüldüğü gibi) tam otomatik bir robotik kol içermektedir. Ayrıca bir optik kamera sayesinde, ameliyathane ortamının gerçek zamanlı hacimsel değerlendirmesine izin vererek mekân içindeki yerini kendi kendine tespit eder ve ameliyat sırasında çarpışmayı önler. Mazor Robotics'in Medtronic tarafından satın alınması, Medtronic StealthStation navigasyon teknolojisinin entegrasyonu ve en yeni nesil Mazor robotu olan Mazor X Stealth Edition'ın 2019 sürümüyle sonuçlandı. Mazor X Stealth Edition, tamamen bağımsız navigasyon yeteneği ve gerçek zamanlı enstrümantasyon konum geri bildirimini sağlamaktadır (1).

#### **ExcelsiusGPS (Globus Medical, Inc., Audubon, PA, ABD)**

ExcelsiusGPS, 2017 yılında piyasaya sürüldü. Kılavuz teller olmadan gerçek zamanlı alet takibi ve pedikül vidası yerleştirmeye izin veren tam entegre navigasyon platformuna sahip ilk omurga robotu olarak biliniyor. Robot, ameliyat masasının aksine zemine monte bir baz istasyonuna sabitlenmiştir. Navigasyon platformu, çoklu intraoperatif 2 ve 3 boyutlu görüntüleme modaliteleriyle uyumludur. Bu sistem de, en yeni nesil Mazor robotlarına benzer şekilde bir POBT taramasını intraoperatif floroskopik görüntüleme ile birleştirebilir. Bağımsız navigasyon özelliği, Mazor X Stealth Edition'a benzer şekilde üreticiye özel enstrümanların yerleştirilmesine izin verir ve modüler robotik kolu, robota ek enstrümanların monte edilmesini sağlar (1)

#### **Rosa (Zimmer Biomet, Varşova, IN, ABD)**

Rosa, 2016 yılında FDA tarafından onaylanan, vida yönlerini planlamak için ameliyat öncesi veya ameliyat sırasında BT görüntüleme kullanan ve kılavuz teller üzerinden vida



**Şekil 4:** Robot üzerindeki planlama ekranında, pedikül vidalarının yön ve uzunluklarının ayarlanması.

yerleştirmeye izin veren tam otomatik bir robotik kola sahip bağımsız bir robotik sistemdir. Rosa-one olarak bilinen yeni bir yükseltme, 2019'da FDA onayı aldı ve Mazor X Stealth Edition ve Globus ExcelsiusGPS'e benzer, üreticiye özel



**Şekil 5:** Cerrahin, planlama ekranındaki anlık navigasyon görüntülerine bakarak, robot kolu vasıtasıyla, navigasyon alıcılı tornavida ile pediküler vida yerleştirmesi.

enstrümanlara uyumlu tam entegre bir navigasyon sistemine sahiptir. ROSA platformu, omurga, kraniyal ve diz artroplastisi prosedürlerinde navigasyon ve enstrümantasyona izin verir. Bu benzersiz yetenek, bu cihazı, omurgaya özel robotik platformların ötesinde ihtiyaçları olan hastaneler veya ayakta cerrahi merkezleri için potansiyel olarak daha çekici bir seçenek hâline getiriyor (1).

### ■ VIDA YERLEŞTİRMEDE DOĞRULUK

Omurga cerrahisinde robotik teknolojinin klinik sonuçlarını inceleyen çalışmaların, çalışma tasarımı nedeniyle yorumlanması zordur. Mevcut literatürün çoğu, geleneksel açık cerrahi teknikleri, robot yardımlı MISC ile karşılaştırır. Bu nedenle, daha düşük komplikasyon oranlarına, daha kısa yatış süresine, daha az postoperatif analjezik tüketimine ve daha hızlı iyileşmeye katkıda bulunanın, tekniğin robotik bileşeni mi yoksa MISC'nin daha az invaziv yönü mü olduğu açık değildir (11,13).

Bilindiği gibi, literatürde, pedikül vidası yerleştirmede geleneksel serbest el tekniğinin, düşük ve kabul edilebilir komplikasyon oranları ile güvenli ve sağlam bir yöntem olduğunu bildiren birçok yayın vardır. Bununla birlikte, asemptomatik postoperatif hastada yanlış yerleştirilmiş pedikül vidasının klinik önemi hâlâ belirsizliğini korumaktadır. Mevcut kanıtlar, her yanlış yerleştirilmiş pedikül vidasının komplikasyonlara veya revizyon cerrahisine yol açmadığını göstermiştir (24). Vida yanlış yerleşiminde 'yüksek olasılıkla' nörolojik komplikasyon görülmeyebilir. Bunun nedeni normal spinal anatominin spinal kanalda vida yanlış yerleşimi hatası için bir bariyer sağlayan epidural bir "yastık" (perinöral yumuşak dokular) içermesi olabilir.

Ancak oranları kabul edilebilir olsa da komplikasyon ve revizyonlar, cerrahlar tarafından sevilmeyen ve hastalara zararlı olabilecek durumlardır. Örneğin, %9,5 oranında vida malpozisyonu ve hastaların %3'ünde revizyon cerrahisi gereksinimi



**Şekil 6:** Robot yardımlı MISC ile yerleştirilen pedikül vidalarının intraoperatif görünümü.

bildirilmiştir ve bunlar nispeten düşük oranlardır (3). Başka araştırmacılar da, pedikül vidası yerleştirmede kullanılan geleneksel tekniklerin, pedikül vidasının yanlış yerleştirilmesinde %3 ile %55 arasında değişen oranlar bulmuşlardır (17). Bu karşın, geleneksel teknikle pedikül vidası yerleştirmede; literatürde %65 ile %94 oranlarında başarı bildirilmiştir (13). Ayrıca, geleneksel teknikle yapılan pedikül vidası yerleştirme ameliyatlarında; enfeksiyon, nörolojik defisit, yara revizyonu ve kanama da dahil olmak üzere komplikasyon insidansının %1 ile %54 arasında olduğu bildirilmiştir (15). Peng ve ark., geleneksel ve robot yardımcı pedikül vidası yerleştirme tekniklerinin birbirleriyle karşılaştırıldığı 6 metaanalizi değerlendirmiş ve farklı sonuçlarla karşılaşmıştır (20); bir çalışma, robot yardımcı tekniğin, vida malpozisyonunun neden olduğu postoperatif revizyonların insidansını en aza indirebileceği sonucuna varmıştır (26). Başka bir çalışma, robot yardımcı tekniğin, geleneksel tekniğe göre daha üstün olduğunu bildirmiştir (7). İki çalışma, robot destekli ve geleneksel tekniklerinin vida yerleştirme için eşdeğer bir doğruluk oranına sahip olduğunu savunmuştur (9,16). Başka bir çalışma ise robot yardımcı tekniğin, pedikül vidası yerleştirme doğruluk oranında geleneksel serbest el tekniğinin yerini alamadığı sonucuna varmıştır (30). Bir çalışmada da, robot yardımcı tekniğin, geleneksel tekniğe göre pedikül vidası yerleştirmede daha yüksek doğruluk oranına sahip olduğu rapor edilmiştir (11).

Li ve ark., geleneksel ve robot yardımcı pedikül vidası yerleştirme tekniklerinin birbirleriyle karşılaştırıldığı 23 çalışmayı değerlendirmiştir (15). Çalışmalarında robot yardımcı teknikle pedikül vidası yerleştirilen 1247 hasta (5042 pedikül vidası) ve geleneksel teknikle pedikül vidası yerleştirilen 1273 hasta (4830 pedikül vidası) değerlendirilmiş, bu yeni teknoloji ile ameliyat edilen hastaların perioperatif sonuçları, radyasyona maruz kalma, ameliyat süresi, hastanede kalış süresi, komplikasyon oranları ve revizyon oranları gibi parametreler ölçülmüştür. Bu metaanaliz ve derlemede sadece bazı robot sistemleri yer almıştır. Buna göre; robot yardımcı teknikle ameliyat edilen hastalarda, daha az komplikasyon, daha düşük revizyon oranları ve daha kısa hastanede kalış süreleri gözlenmiştir. Alt grup analizlerine bakıldığında, Mazor robotun kullanılmasının floroskopi süresini kısaltabileceği, Tianji robotun kullanılmasının ise radyasyon maruziyetini azaltabileceği görülmüştür. Lomber bölgedeki robot yardımcı ameliyatların daha düşük radyasyon dozuna neden olduğu ancak daha fazla ameliyat süresine sahip olduğu, tüm dejeneratif omurga hastalıklarında ise bu tekniğin, hastanede kalış süresini azalttığı ancak daha fazla ameliyat süresine gereksinim duyduğu bulunmuştur.

## ■ OPERASYON SÜRESİ

Şüphesiz ki ameliyat süresi; her cerrahi bölüm için çok önemlidir. Vaccaro ve ark., uzman omurga cerrahlarının yer aldığı, robot yardımcı pedikül vidası yerleştirmenin doğruluğunu ve süresini gösteren bir kadavra çalışması gerçekleştirmiştir (28). Dört pedikül vidasının yerleştirilmesi için gereken süre; geleneksel MISC’de; 36 dakika, robot yardımcı teknikte; 32.6 dakika (robotun kurulumu için gereken 18.3 dakikayı da içeriyor) olarak hesaplanmıştır. Her pedikül vidasının cerrah tarafından MISC ile yerleştirilmesi için ortalama sürenin 7,6 dakika olduğu, bu sürenin kurulum süresinden bağımsız olarak robot

yardımlı sistemle 3,6 dakika sürdüğü gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada, robotik kolda sıfır hata, floroskopi altında yapılan geleneksel MISC yönteminde ise %17,5’lik bir hata oranı (40 vidanın 7’sinde) görülmüştür. Her geçen gün teknolojinin sürekli olarak geliştiği düşünüldüğünde, bu sayıların da daha iyi olacağı düşünülebilir.

## ■ RADYASYON MARUZİYETİ

Ameliyat sırasında cerraha ve hastaya radyasyon maruziyeti oldukça önemli bir konudur. Aşırı miktarda radyasyon malignite riskini artırabileceği bilinmektedir. Ameliyat sırasında radyasyona maruz kalmanın sınırlandırılması gerektiği kesindir. Buna karşılık, robot yardımcı cerrahide kümülatif radyasyon dozu önemli ölçüde daha azdır. Robot yardımcı teknik kullanılarak intraoperatif floroskopiye olan bağımlılığı azaltmak mümkündür, çünkü cerrah 3 boyutlu görüntüleme sırasında ameliyathaneyi terk eder ve C-kol ameliyat öncesi plandan sonra çıkarılarak cerrahın radyasyona maruz kalması sınırlandırılır. Geleneksel serbest el tekniği ile karşılaştırıldığında, robot yardımcı cerrahi önemli ölçüde daha kısa radyasyona maruz kalma süresi ile ilişkilendirildi. Hyun ve ark., geleneksel cerrahide vida başına floroskopi süresinin robot yardımcı cerrahiye göre yaklaşık dört kat olduğunu bildirdi (11). Roser ve ark., geleneksel cerrahide radyasyona maruz kalma süresinin robot yardımcı cerrahiye göre yaklaşık iki kat olduğunu buldular (23).

## ■ ÖĞRENME EĞRİSİ

Bununla birlikte, robot yardımcı teknik, öğrenme eğrisine ve geleneksel serbest el tekniğinden daha uzun intraoperatif hazırlık aşamasına ihtiyaç duyar. Sekiz çalışmanın değerlendirildiği ve öğrenme sürecini analiz edildiği bir çalışmada; bu çalışmaların tamamında, vida başına süre ve radyasyon maruziyet süresinde, kayda değer bir azalma görülmüştür (12). Başka bir çalışmada, cerrahların robotik cerrahiye kullanmaya başlamasıyla vida doğruluğunda erken ve sonraki vakalarda; %83.7’den %90.8’e iyileşme izlenmiştir (5). Aynı zamanda sürede de; seviye başına 13.5 dakikadan, 10,6 dakikaya bir düşüş olduğu hesaplanmıştır. Bu nedenle, robot destekli cerrahi de dahil olmak üzere herhangi bir yeni teknoloji ile tecrübe kazandıkça, ameliyat süresi de muhtemelen kısalacaktır.

## ■ MALİYET

Yalnızca Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD), 2001 ve 2010 yılları arasında, tahmini toplam maliyeti 287 milyar dolar olan yaklaşık 3,6 milyon spinal füzyon gerçekleştirildi (10). Bununla birlikte, robotik omurga cerrahisi sistemlerinin önemli ek maliyetleri vardır. Bu nedenle bu teknolojinin maliyet etkisi dikkate alınmalıdır. Örneğin; ABD’deki donanım ve kurulum maliyetleri dahil olmak üzere bir robotik sisteminin liste fiyatı, vaka başına yaklaşık 1500 dolar olan tek kullanımlık malzemeler ve implantlar hariç, şu anda 550.000 dolardır (8). Sadece bu marka robotik sistemden 2018 yılında dünya çapında 40 ülkede 250 merkezde bulunduğu bildirilmiştir (29). Elbette, diğer markalar da düşünüldüğünde, bu sayı daha da fazladır. Menger ve ark.’ın robotik teknolojinin maliyet-etkililiğini araştırdığı çalışmasında; robotik cerrahinin, revizyon cerrahisi oranı, ameliyat sonrası enfeksiyon oranı,

hastanede kalış ve ameliyat süresi ile ölçülen maliyete olumlu etki eden ve tasarruf sağlayan bir teknoloji olduğu sonucuna varılmıştır (19). Bu çalışmada, 1 yıllık bir süre boyunca robot teknolojisinin, 557 elektif omurga ameliyatı gerçekleştiren bir hastanede, 608.546 dolarlık bir tasarruf sağladığı sonucuna varılmıştır. Robotik omurga cerrahisi sistemleri, geleneksel omurga cerrahisi tekniklerine göre daha pahalı olmasına rağmen, ameliyat sonrası komplikasyon oranı daha azdır ve bu da toplam hastanede yatış maliyetini düşürür.

## ■ SONUÇ

Enstrümanların kullanıldığı omurga cerrahi girişimleri, herkesçe güvenle ve en az riskle uygulanmasının arzulandığı önemli prosedürlerdir. Omurga cerrahisi, özellikle pedikül vidası yerleştirirken, dar anatomik yapılarda, ince motor becerilerini kullanmak durumundadır. Bu tip ameliyatlarda efor ve hassasiyet gerektiren prosedürler olup, yorgunluk ve dikkat dağınıklığı nedeniyle olumsuz sonuçlanabilir. Dolayısıyla komplikasyonlar görülebilir ve revizyon ihtiyacı doğabilir. Hasta sağlığını etkileyen, morbiditeyle sonuçlanabilen ve maliyeti artıran bu durumlara karşı, gelişen teknolojiye faydalanmak başarıyı olumlu yönde etkileyebilir. Spinal robotik teknolojiler, cerrahlara yardım etmenin dışında, enstrüman yerleştirmedeki yüksek doğruluk oranları sayesinde, istenmeyen komplikasyon ve revizyon ameliyatlarının önüne geçebilir. Elbette bunun, başta olumsuz olsa da uzun vadede ekonomik avantaj sağlayacağı, cerrah ve hastaya konforlu ve güvenli bir tedavi ortamı sunacağı muhtemeldir.

## ■ TEŞEKKÜR

Bu derleme, 2021 yılında AO Spine tarafından desteklenen ve Hospital Clinico San Carlos, Madrid, İspanya'da minimal invaziv omurga cerrahisi ve robotik omurga cerrahisi fellowship programından edinilen bilgi ve deneyimlerden faydalanılarak yazılmıştır. Desteklerinden ötürü, AOSpine ve Hospital Clinico San Carlos Nöroşirürji ve Ortopedik Cerrahi Bölümlerine teşekkür ederiz.

## ■ ACKNOWLEDGMENT

This review was written by using the knowledge and experience gained from the Minimally Invasive Spine Surgery and Robotic Spine Surgery fellowship program supported by AO Spine at Hospital Clinico San Carlos, Madrid, Spain in 2021. We thank AOSpine and Hospital Clinico San Carlos Neurosurgery and Orthopedic Surgery Departments for their support.

## ■ KAYNAKLAR

- Alluri RK, Avrumova F, Sivaganesan A, Vaishnav AS, Lebl DR, Qureshi SA: Overview of robotic technology in spine surgery. *HSS J* 17(3):308-316, 2021
- Barzilay Y, Liebergall M, Fridlander A, Knoller N: Miniature robotic guidance for spine surgery—introduction of a novel system and analysis of challenges encountered during the clinical development phase at two spine centres. *Int J Med Robot* 2(2):146-153, 2006
- Borcek AO, Suner HI, Emmez H, Kaymaz M, Aykol S, Pasaoglu A: Accuracy of pedicle screw placement in thoracolumbar spine with conventional open technique. *Turk Neurosurg* 24(3):398-402, 2014
- Burckhardt CW, Flury P, Glauser D: Stereotactic brain surgery. *IEEE Eng Med Biol* 14(3):314-317, 1995
- Devito DP, Kaplan L, Dietl R, Pfeiffer M, Horne D, Silberstein B, Hardenbrook M, Kiriyanthan G, Barzilay Y, Bruskin A, Sackerer D, Alexandrovsky V, Stür C, Burger R, Mæurer J, Donald GD, Schoenmayr R, Friedlander A, Knoller N, Schmieder K, Pechlivanis I, Kim IS, Meyer B, Shoham M: Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot: Retrospective study. *Spine (Phila Pa 1976)* 35(24):2109-2115, 2010
- Elswick CM, Strong MJ, Joseph JR, Saadeh Y, Oppenlander M, Park P: Robotic-assisted spinal surgery: Current generation instrumentation and new applications. *Neurosurg Clin N Am* 31(1):103-110, 2020
- Fan Y, Du JP, Liu JJ, Zhang JN, Qiao HH, Liu SC, Hao DJ: Accuracy of pedicle screw placement comparing robot-assisted technology and the free-hand with fluoroscopy-guided method in spine surgery: An updated meta-analysis. *Medicine (Baltimore)* 97:e10970, 2018
- Fiani, B, Quadri SA, Farooqui M, Cathel A, Berman B, Noel J, Siddiqi J: Impact of robot-assisted spine surgery on health care quality and neurosurgical economics: A systemic review. *Neurosurg Rev* 43:17-25, 2020
- Gao S, Lv Z, Fang H: Robot-assisted and conventional freehand pedicle screw placement: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Eur Spine J* 27:920-930, 2018
- Goz V, Rane A, Abtahi AM, Lawrence BD, Brodke DS, Spiker WR: Geographic variations in the cost of spine surgery. *Spine (Phila Pa 1976)* 1;40(17):1380-1389, 2015
- Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, Kim HJ: Minimally invasive robotic versus open fluoroscopic-guided spinal instrumented fusions: A randomized controlled trial. *Spine (Phila Pa 1976)* 42:353-358, 2017
- Joseph JR, Smith BW, Liu X, Park P: Current applications of robotics in spine surgery: A systematic review of the literature. *Neurosurg Focus* 42(5):E2, 2017
- Keric N, Doenitz C, Haj A, Rachwal-Czyzewicz I, Renovanz M, Wesp DMA, Boor S, Conrad J, Brawanski A, Giese A, Kantelhardt SR: Evaluation of robot-guided minimally invasive implantation of 2067 pedicle screws. *Neurosurg Focus* 42:E11, 2017
- Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S: A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng* 35:153-160, 1988
- Li J, Fang Y, Jin Z, Wang Y, Yu M: The impact of robot-assisted spine surgeries on clinical outcomes: A systemic review and meta-analysis. *Int J Med Robot* 16(6):1-14, 2020
- Liu H, Chen W, Wang Z, Lin J, Meng B, Yang H: Comparison of the accuracy between robot-assisted and conventional freehand pedicle screw placement: A systematic review and meta-analysis. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 11:2273-2281, 2016

17. Mason A, Paulsen R, Babuska JM, Rajpal S, Burneikiene S, Nelson EL, Villavicencio AT: The accuracy of pedicle screw placement using intraoperative image guidance systems. *J Neurosurg Spine* 20(2):196-203, 2014
18. McBeth PB, Louw DF, Rizun PR, Sutherland GR: Robotics in neurosurgery. *Am J Surg* 188(4):68-75, 2004
19. Menger RP, Savardekar AR, Farokhi F, Sin A: A cost-effectiveness analysis of the integration of robotic spine technology in spine surgery. *Neurospine* 15:216-224, 2018
20. Peng YN, Tsai LC, Hsu HC, Kao CH: Accuracy of robot-assisted versus conventional freehand pedicle screw placement in spine surgery: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Ann Transl Med* 8(13):824, 2020
21. Perdomo-Pantoja A, Ishida W, Zygorakis C, Holmes C, Iyer RR, Cottrill E, Theodore N, Witham TF, Lo SL: Accuracy of current techniques for placement of pedicle screws in the spine: A comprehensive systematic review and meta-analysis of 51,161 screws. *World Neurosurg* 126:664-678.e3, 2019
22. Pott PP, Scharf HP, Schwarz ML: Today's state of the art in surgical robotics. *Computer Aided Surgery* 10(2):101-132, 2005
23. Roser F, Tatagiba M, Maier G: Spinal robotics: Current applications and future perspectives. *Neurosurgery* 72:12-18, 2013
24. Schizas C, Michel J, Kosmopoulos V, Theumann N: Computer tomography assessment of pedicle screw insertion in percutaneous posterior transpedicular stabilization. *Eur Spine J* 16:613-617, 2007
25. Shoham M, Burman M, Zehavi E, Joskowicz L, Batkilin E, Kunicher Y: Bone-mounted miniature robot for surgical procedures: Concept and clinical applications. *IEEE Trans Robotics and Automation* 19(5):893-901, 2003
26. Staartjes VE, Klukowska AM, Schröder ML: Pedicle screw revision in robot-guided, navigated, and freehand thoracolumbar instrumentation: A systematic review and meta-analysis. *World Neurosurg* 116:433-443.e8, 2018
27. Wang TY, Park C, Dalton T, Rajkumar S, McCray E, Owolo E, Than KD, Abd-El-Barr MM: Robotic navigation in spine surgery: Where are we now and where are we going? *J Clin Neurosci* 94:298-304, 2021
28. Vaccaro AR, Hussain M, Harris J, Crawford N, Chang V, Passias PG, Samora W, Patel RD, Wadhwa R, D'Agostino S, Panchal RP, Schroerlucke SR, Whitney N, Bucklen B: In vitro analysis of accuracy, dosage, and surgical time required for pedicle screw placement using convention percutaneous screw and robotic-assisted screw techniques. *Spine J* 17(10):S261, 2017
29. Young R: The March of Robotics into the Spine Surgery. (RRY Publications) 2012. Available at: <https://ryortho.com/2012/09/the-march-of-robots-into-the-spine-surgery-suite/>, 2012
30. Yu L, Chen X, Margalit A, Peng H, Qiu G, Qian W: Robot-assisted vs freehand pedicle screw fixation in spine surgery - a systematic review and a meta-analysis of comparative studies. *Int J Med Robot* 14(3):e1892, 2018