

Ersin Hacıyakupoglu<sup>1</sup> , Evren Yüvrük<sup>2</sup> <sup>1</sup>Heinrich-Braun- Klinikum Zwickau, Beyin, Omurilik ve Sinir Cerrahisi, Karl- Keil-Strasse 35, Zwickau, Almanya<sup>2</sup>VM Medical Park Maltepe Hastanesi, Beyin, Omurilik ve Sinir Cerrahisi, İstanbul, Türkiye

✉ ersin.haciyakupoglu@hbk-zwickau.de; haciyakupoglu@gmail.com

Derleme / Review

Geliş tarihi: 12.12.2023

Kabul tarihi: 09.01.2024

# AR-VR Navigasyon ve Robotik Cerrahinin Spinal Cerrahi Klinik Pratiğinde ve Eğitim Aşamasında Kullanımı

## AR-VR Navigation and Robotic Surgery Use in Spinal Surgery Clinical Practice and Training

### ÖZ

Omurga cerrahisi eğitiminin en temel yapıtaşı pratiktir. Bu pratik çoğu zaman anatomi laboratuvarlarında kimi zaman da hayvan deneyleri ile oluşturulmakta, klasik olarak da gör ve uygula ile şekillenmektedir. Son çeyrekte teknolojinin ve yapay zekânın gelişmesi ile artık bu zor eğitimin algoritması da değişmeye başlamıştır.

Hem cerrahi asistanlık eğitimi, hem de asistanlık sonrası eğitim döneminde omurga cerrahisi ile ilgilenen hekimlerin yasadıkları en büyük sorunlar; komplikasyon ve komplikasyonların yönetimidir. İşte bu bağlamda teknoloji bize yardımcı olmayı başaracak çözüm önerileri sunmakta, bu da hem hasta hem hekim açısından konforu artırmakta, riskleri azaltmaktadır.

Omurga cerrahisinde kullanılabilecek yardımcı teknolojik eşlikçiler başta spinal navigasyon, robotik sistemler, artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) olarak sınıflandırılabilir. Bu teknolojik destekli ameliyathane ekipmanları bir cerrahin ihtiyaç duyduğu ayrıntılı bilgiye ulaşma, bilgi ve verileri analiz etme, odaklanma, yer gösterme, komplikasyonların önüne geçilmesi gibi birçok konuda artık omurga cerrahisinde kullanılmaya başlamıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Artırılmış gerçeklik, Navigasyon, Omurga cerrahisi, Robotik cerrahi, Sanal gerçeklik

### ABSTRACT

The basic of spine surgery training is practice. This practice is often created in anatomy laboratories and sometimes through animal experiments, and mostly it is by see and apply. With the development of technology and artificial intelligence in the last quarter, the algorithm of this difficult training has begun to change.

The biggest problems faced by physicians interested in spine surgery, both during and after surgical residency training are; Complications and management of complications. In this context, technology offers solutions that will help us, which increases comfort and reduces risks for both the patient and the physician.

Assistive technological companions that can be used in spine surgery can be classified as spinal navigation, robotic systems, augmented reality (AR) and virtual reality (VR). These technologically supported operating room equipment have now begun to be used in spine surgery in many areas such as accessing the detailed information a surgeon needs, analyzing information and data, focusing, locating, and preventing complications.

**Keywords:** Augmented reality, Navigation, Spine surgery, Robotic surgery, Virtual reality

### GİRİŞ

Spinal cerrahide en önemli teknolojik gelişme mikroskopun ameliyatlarda kullanılmaya başlanmasıdır. Spinal cerrahi hem makro hem de mikro cerrahiye içinde barındıran, majör omurga hastalıklarından, intradural tümörlere kadar geniş bir alanı içermesi nedeniyle hem eğitim hem de uygulama pratiği oldukça zor ve uzun zaman almaktadır.

Spinal enstrümantasyon alanındaki gelişmeler, üretilen implantlar ile birçok deformitenin düzeltilmesine, omurga koruyucu cerrahiler yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu ameliyatlarda bu sistemlerin güvenli kullanılması en önemli alt başlıklardan birini oluşturmaktadır. Artan omurga cerrahisi ile de hem cerrahiye hem de implanta bağlı komplikasyonların ortaya çıkması kaçınılmaz hâle gelmiştir (4,11,22).

Artık modern ameliyathanelerde introperatif BT, MR, 3 Boyutlu görüntüleme sistemleri- Anjio yapabilen sistemler, nöronavigasyon, elektrofizyoloji vb. teknolojik aletler kullanılmaktadır. Bunların sonucunda komplikasyonlar azalmakta, ameliyat süreleri kısaltılmakta, lezyona doğru, en kısa ve minimal invaziv yaklaşım sağlanabilmektedir (19).

Bu sistemlere günümüzde yapay zekânın da eklenmesi çalışmalarını hızla devam ettirmektedir. Bu sayede cerrahi öncesi komplikasyonlar öngörülüp, gerekirse hastaya özel implantlar üretilip kullanılabilir. Yapay zekâ, bizim öngöremediğimiz olası komplikasyonları hesaplayıp bizleri bu konuda uyararak önlem almamızı sağlayacak, cerrahiye daha güvenli kılacaktır.

Yaygın kullanılan bu implantların orantısız olarak hiç de azımsanamayacak oranlarda komplikasyonları olduğu akıldan çıkarılmamalıdır. Bunların başında planlanma dışında gelişen vidanın yönünün trase dışına çıkması, buna sekonder sinir kökü, dura ve vasküler yaralanmalar maalesef oluşabilmektedir. Vida malpozisyonlarının oranı literatürde yaklaşık %6-8'dir (8,10). Unutulmaması gereken diğer bir gerçekte bu oranların birçok farklı klinik sonuçlarda yaklaşık beş kata kadar çıktığı gözlenmektedir olup bu da çok can sıkıcı sonuçları beraberinde getirmektedir.

Sıklıkla ameliyathanelerimizde olan C-kollu skopi ile bu komplikasyonlar azaltılmaya çalışılsa da üç boyutlu görüntüleme kadar başarılı sonuçlara neden olmamaktadır. Bazı kliniklerde kullanılan 3 boyutlu görüntülemeler ile bu risk azaltılabilir, ancak yüksek radyasyon ve konfor anlamında bazı olumsuzlukları gündeme getirmektedir (8,16).

### Sanal Gerçeklik (VR)

Cerrahi asistanlık eğitiminden, uzman bir cerrahi işleme kadar geniş bir pratik yelpazede VR ile cerrahın daha fazla ayrıntıyı görmesine olanak sağlayan bu 3 boyutlu temsilin üst üste bindirilmesini içeren bu yöntem son derece etkili bir tamamlayıcı olduğunu kanıtlamıştır. Bu sistem hem ameliyat öncesi plan hem de ameliyatın gerçeğe yakın performansına yardımcı olmak için kullanılmaya başlanmıştır. Cerrahi patoloji ve sahayı, çevre dokuları tasarımıyla aynen oluşturarak, gerçekmiş gibi ameliyatı bizzat yapmak, hataları, komplikasyonları ve ameliyat sonuçlarını tam olarak görmek ve bu konuda tecrübe kazanma amaçlanmıştır.

Sanal gerçeklik ile sanalda bir 3 boyutlu gözlük ve el aparatları kullanılarak gerçek zamanlı konum verileri ile üst üste bindirilip yapay olarak bütünleştirilen bir sistem olarak çalışmaktadır.

Otonom sürüş ve benzeri son yıllarda geliştirilen yapay zekâ tabanlı birçok buluş belki de omurga cerrahisi gibi zor ve yüksek hassasiyet içeren konularda da hekimlerin büyük yardımcısı olacağından hiç şüphe yoktur.

VR ile ilgili eksikler ise daha emekleme döneminde olduğu düşünülürse, yapılacak yeni araştırmalar, zaman, görüntü ve network uzantılarının genişletilmesi, bu sistemlerin yaygınlaşması ve eğitimcilerin bu eğitimde yeterli pratik yapmalarıdır.

### Artırılmış Gerçeklik (AR)

Artırılmış gerçeklik, bilgisayar tarafından oluşturulan herhangi bir görüntüyü gerçek dünya görüntülerinin üzerine büyütülerek veya üst üste eklenerek konulup sunulan bir teknolojidir.

Sanal gerçeklik ile birlikte kullanıldığı zaman müthiş bir teknolojik alt yapı hazırlamakta ve cerraha görüntülerin üst üste konularak kendi ameliyat ya da çalışma ortamını sağlamaktadır.

Son yıllarda artan bu teknoloji ile cerrah, yapacağı ameliyat için ihtiyaç duyduğu tüm bilgi, görüntü ve videolara 3 boyutlu olarak bu arayüzler yardımıyla ulaşıp görüntüleyebilmektedir (17).

Bu heyecan verici tasarım ile muhtemel önümüzdeki 10 yılda birçok asistan eğitimi, ameliyat prosedürleri hatta ameliyatlarda bu sistemle şekillenecektir.

### Spinal Navigasyon Sistemleri

Birçok omurga ameliyatında biplan görüntülemeye ihtiyaç duyulması ve sürekli floroskopi cihazının ön-arka ve yan pozisyona alınması, cerrahi süreyi uzatmakta, maruz kalınan radyasyon miktarını önemli ölçüde artırmaktadır (20).

1990'lı yıllardan itibaren navigasyon sistemleri ile ilgilenen kliniklerde öncelikle ultrason bazlı, kablo ile bir bilgisayara bağlı aletler ile ilk navigasyon çalışmaları yapılmıştır. Bunları intraoperatif BT ve diğer üç boyutlu görüntüleme sistemleri ve yeni navigasyon sistemlerinin gelişmesi izlemiştir (Şekil 1).

Spinal navigasyon sisteminde, ileri görüntüleme sistemlerinin kullanılması hem kullanımı kolaylaştırır hem de hata olasılığını azaltır. İlk geliştirilen sistemlerde referans nokta belirlenmesi gerekliliği, görüntüleme işlemlerinin uzun sürmesi ve tek çekimde az mesafeyi görüntüleyebilmesi ve bu görüntülerin eşleştirilip, navigasyon sistemine yüklenmesi gibi işlemlerin süresinin uzunluğu yeni sistemlere göre dezavantajlar oluşturmaktaydı.

Hibrit ameliyathaneler; yeni geliştirilen sistem ve teknolojik altyapısı daha yüksek yazılımlar ve skopi veya bilgisayarlı tomografi kullanılarak iki boyutlu ya da üç boyutlu görüntüler elde edilip, gerçek zamanlı üç boyutlu hasta anatomisi üzerinde çalışılabilir hâle getirilmiştir.

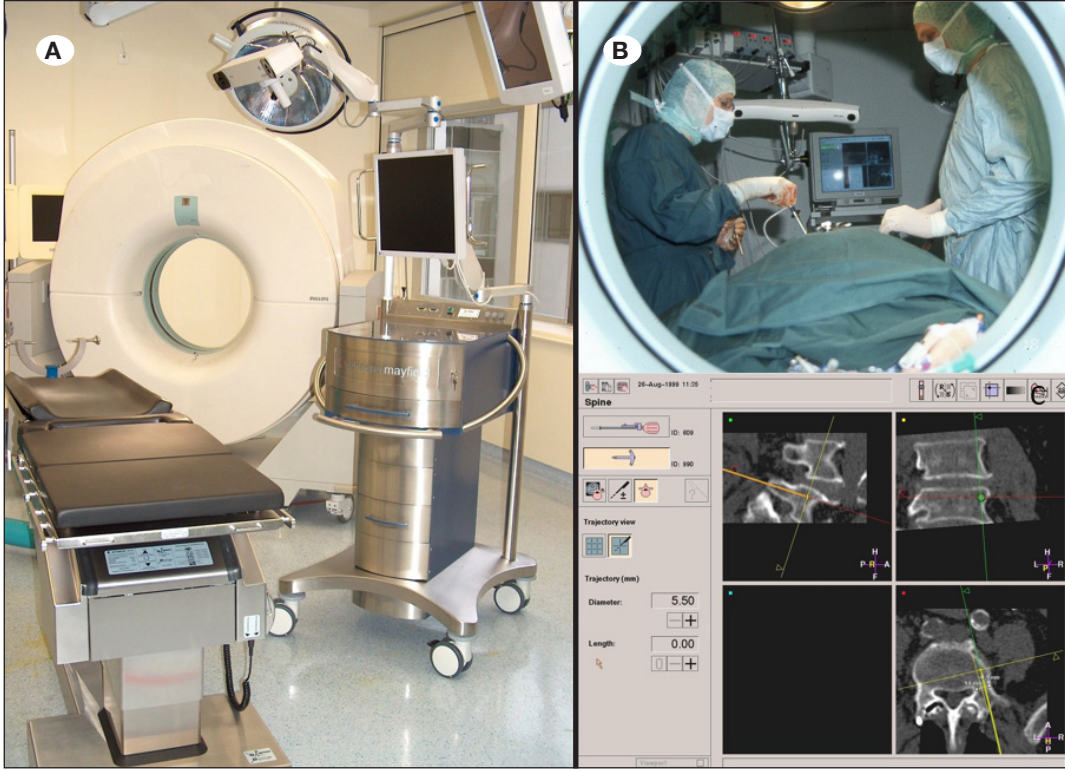
Artık birçok sistemde referans nokta tanımlanmasına ihtiyaç kalmamış, cerrahi öncesi hastaya sabitlenen bir Traker ile dakikalar içinde çekilebilen 3 boyutlu görüntülerin navigasyon sistemine yüklenmesi ve hemen ardından navigasyon yardımı ile cerrahinin gerçekleşmesi mümkün olmuştur. Aynı zamanda ilk yıllarda oldukça pahalı olan bu sistemler günümüzde gelişen, yeni ve birçok firmanın sunduğu intraoperatif 3 boyutlu görüntüleme sistemler ve navigasyon sistemlerinin fiyatları aradan geçen zamanda daha makul fiyat aralıklarına inmiş, bu da kullanımı artıran bir diğer neden olmuştur.

Navigasyon sistemleri; zorluk yaşanan kalsik pedikül vidalarının yerleştirilmesi, zorluk çekilen C1- C2 transartiküler veya perkütan translaminar faset vidalarının gönderilmesi, disk artroplastileri, perkütan enstrümantasyonların ve ileri deformite cerrahilerin daha güvenli bir şekilde uygulanabilmesine imkân sağlamaktadır (Şekil 2).

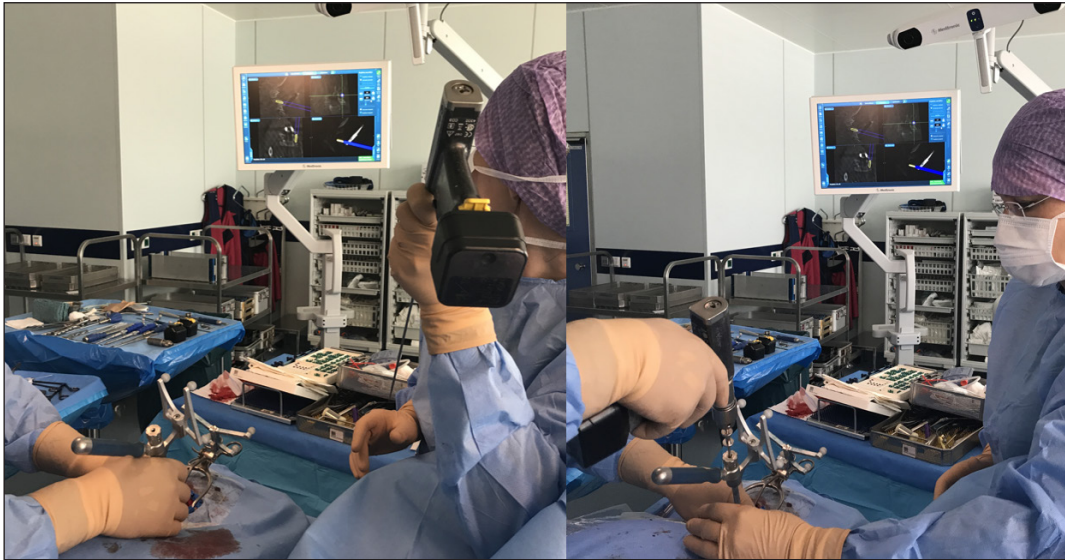
### Robotik Cerrahi

Son 20 yılda giderek gelişen ve spinal cerrahide günlük kullanıma girmeye başlayan bir diğer teknoloji de Robotik Cerrahidir. Bu sistemleri daha çok "robotik asistan sistemler" olarak adlandırmak daha doğru olacaktır (20).

Robotik asistan cerrahi ile insan faktörü ile ilintili hata olasılığının azaltılması, daha küçük insizyonlarla operasyonların



**Şekil 1:** A) 1990'ların sonunda Friedrich-Schiller-Üniversitesi (Jena/Almanya)'da kullanılan introperatif BT. B) Friedrich-Schiller-Üniversitesi (Jena/Almanya) nöroşirürji kliniğinde kablolu aletler ve optik navigasyonla yapılan bir cerrahi. C) Navigasyonun ekran görüntüsü.



**Şekil 2:** Navigasyon eşliğinde yapılan bir C1-C2 (Posterior- Harms) ameliyatının intraoperatif görüntüsü. (Heinrich- Braun-Klinikum Zwickau/Almanya).

yapılabilmesi, hassas ve elaquent alanlara girişimlerde kolaylık sağlanması amacıyla geliştirilmiştir (20).

Genel cerrahi ve kadın doğum gibi hekimlerin kullandığı artık spinal cerrahların da günlük pratiğine giren Laparoskopik ve endoskopik sistemlerdeki gelişmeler, robotik cerrahinin geliştirilebilmesini hızlandırmıştır (12,21). Spinal cerrahi açısından ise navigasyon ve görüntüleme sistemleri robotik sistemlerin gelişmesinde önemli bir faktördür.

Robotik cerrahinin klinik kullanımı, 1985'de Kwoh ve arkadaşlarının geliştirdiği PUMA 560 robotla başlar ve bu robot beyin cerrahisinde biyopsi almak amacıyla üretilmiş olup sonrasında prostat rezeksiyonunda kullanılmaya başlanmış, ve en sonunda ismi PROBOT adıyla prostat cerrahisine özel hâle gelmiştir (7,13).

DaVinci robotik platform 2001 yılında FDA tarafından onaylanmış olup, hastaya yerleştirilen 5 ve 8 mm'lik endoskopik

trokar sistemleri ile ve üç farklı robotik kol ve bunu kontrol eden, cerrahın kullandığı kollar ve üç boyutlu görüntülemeye sahip ekrandan oluşmaktadır.

Günümüzde Da Vinci robotik sistemi birçok ürolojik ve jinekolojik cerrahi başta olmak üzere, KBB ve nöroşirürji alanlarında kullanılabilir (5,6,14). İlk spinal robotik girişimler; kraniyoservikal bileşke ve ALIF (Anterior Lumbar interbody füzyon cerrahisi) için bu robot ile uygulanmıştır (3).

İlk robotik omurga cerrahisi uygulamaları; çoğunlukla torakolomber segmente pediküler vida yerleştirmede kullanılmış olup, özellikle transoral girişim gerektiren vakalarda (15) da robotik sistemden faydalanılmıştır.

İlk Omurga spesifik robot ise Mazor Spine Assist'dir ve 2004 yılında FDA onayı almıştır (2). Günümüzde Medtronic firmasına ait olan bu sistemin şu anda 4. jenerasyonu kullanılmaktadır ve aradan geçen yaklaşık 20 yılda ciddi bir ilerleme kaydedilmiştir. Bunun yanında birçok farklı marka spinal cerrahi için robotlar üretmiş ve robot kullanımı son 10 yılda yaklaşık %169 artmıştır (Tablo I).

Tablodan da anlaşılacağı gibi özellikle 2016 yılı sonrasında robotik sistemlerin sayısı artmış ve var olan sistemler de gelişim göstermiştir.

Yeni nesil spinal robotların omurga spesifik yazılımları, entegre navigasyon sistemleri rutin olarak kullanılmaya başlanmış olup, bunların bir kısmı entegre görüntüleme yöntemleri ekleyerek sistemlerini geliştirmiştir.

İlk nesil spinal robotlarda kullanılan K-teli ile sabitleme sonrası tek hat üzerinde hareket eden sistemlerin yerini, çok eklemlili kolları ile birçok açıdan en doğru vida yerleştirilmesine olanak sağlamış, gelişen yazılımları ile önceki nesillere göre oldukça hızlı hâle gelmişlerdir.

İlk nesilde sadece preoperatif filmler üzerinde planlanıp, intraoperatif skopi ile füzyonun ardından yapılan cerrahi hâlen mümkün olsa da yeni nesil ameliyathane (Hibrit vs) ve görüntüleme sistemleri ile hastanın anlık 3 boyutlu görüntülerinin robotik/navigasyon sistemine yüklenmesi ile gerçek zamanlı entümantasyon mümkün olmaktadır (Şekil 3).



**Şekil 3:** Entegre- anjio çekilebilen bir 3D Skopi, Robotik sistem ve Karbon ameliyat masasının entegre olduğu Hibrid ameliyathane (Heinrich-Braun-Klinikum Zwickau/ Almanya).

Günümüzde kullanılan robotik sistemler eğer uygun kullanılırsa %100'e yakın vida doğruluk oranına ulaşabilmektedir (24).

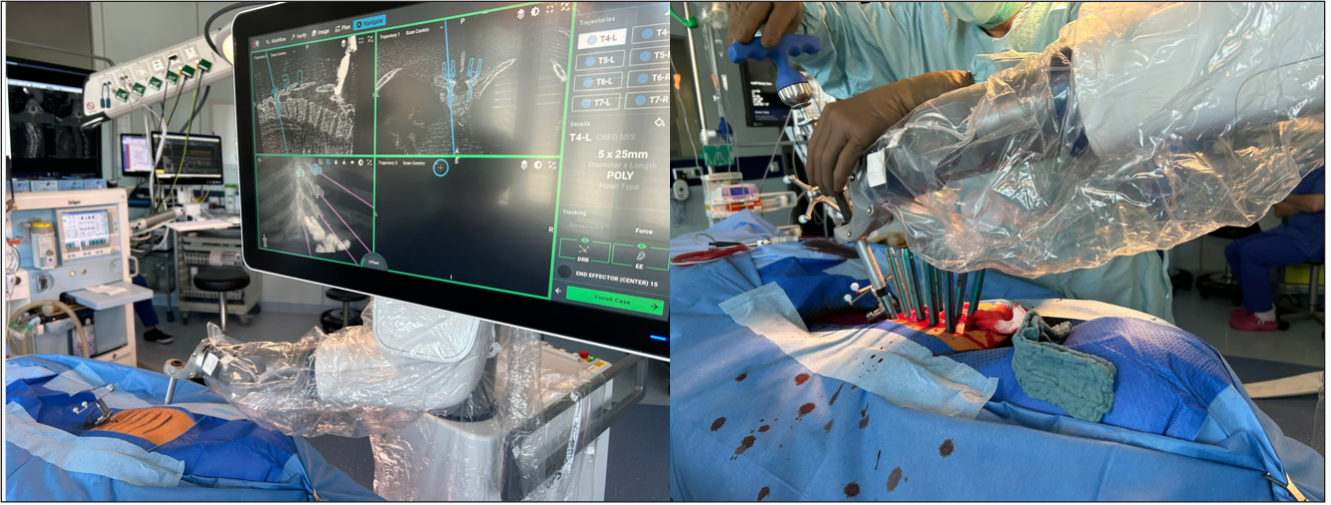
Bu sistemlerin ameliyathane verimini artıracak daha efektif kullanım sağlayacağı ve genel sağlık harcamalarını düşürecekleri öngörülmektedir (23). Minimal invaziv yaklaşım sağlanabilme kolaylığı, komşu eklem tahribatının daha az olması nedeni ile komşu mesafe hastalığının da daha az görüldüğü belirtilmiştir (Şekil 4) (23).

Görüntüleme ve navigasyon sistemlerindeki gelişmelerin ışığında günümüzde kurulumu sisteme göre 1.000.000 USD üzerine çıkabilen robotik sistemlerin kullanılmalarının ve sayılarının arttıkça fiyatlarının da düşeceği tahmin edilmektedir. Günümüzde Amerika Birleşik Devletleri'nde bazı robotik platformların fiyatı 550.000 USD'a kadar düşmüştür. Bu ülkelerde spinal bir ameliyatın yaklaşık 40 ila 80 bin USD arası tuttuğu düşünülürse, bu tip bir sistemin maliyetini çıkartmak için 10-12 olgu yeterli olabilmektedir (9).

Menger ve arkadaşlarının yayımladığı araştırmada bu sistemlerin kullanılmasıyla toplamda yıllık harcamaların 600.000 USD düştüğü belirtilmiştir (18).

**Tablo I:** Günümüzde kullanılan robotlar ve özellikleri

Platform	Üretici Firma, FDA Onayı	Entegre navigasyon	K-tel kullanım gerekliliği	Enstrümanların bağımsız navigasyonu	Omurga spesifik yazılım
Mazor Spine Assist	Mazor Robotics, 2004	Yok	Var	Yok	Var
Mazor Renaissance	Mazor Robotics, 2011	Yok	Var	Yok	Var
Mazor X	Mazor Robotics, 2016	Var	Yok	Yok	Var
Mazor X, Stealth Edition	Medtronic, 2019	Var	Yok	Var	Var
Excelsius GPS	Globusmedical, 2017	Var	Yok	Var	Var
Rosa	Zimmer Biomet robotics, 2016	Yok	Var	Yok	Yok
Rosa One	Zimmer Biomet robotics, 2019	Var	Var	Var	Yok
Tirobot	Tinavi, FDA yok, cin onayı 2016	Var	Var	Yok	Yok
Cirq	Brainlab, 2019	Var	Var	Var	Var



Şekil 4: Robotik sistemle yapılan perkütan posterior stabilizasyon cerrahisi (Heinrich- Braun-Klinikum Zwickau/Almanya).

## SONUÇ

Navigasyon ve robotik sistemlerin geçmişten bugüne gelişmelerine baktığımızda bu sistemlerin geleceğini tahmin etmek zor değildir. Günümüzde Avrupa ve Amerika'da omurga cerrahisi yapan birçok merkezde spinal navigasyon rutin kullanımdadır. Robotik sistemlerin kullanımı da aynı hızla artmaktadır. Ülkemizde spinal navigasyon kullanan klinik sayısı sürekli artarken, bazı merkezler robotik sistem kurulumu planlamaktadır.

Bu sistemler hiçbir zaman bir cerrahin yerini tutamayacak olsa da, cerrahin konsantrasyonunu daha farklı yönlendirmesine, vida malpozisyonu, revizyon stresine girmeden uygulayacağı cerrahiye odaklanmasına olanak sağlayacaktır (1).

Yapay zekâ gibi teknolojilerin bu sistemlere entegre edilmesi ile cerrahi endikasyon, cerrahi planlama ve komplikasyonları önceden hesap edip önlem alabilmek mümkün olacaktır.

Bir cerrah için en önemli olan doğru; endikasyon ve olası komplikasyonların doğru yönetimidir. Stabilizasyon ve benzeri cerrahilerde anatomi bilgisi ve cerrahi tecrübenin ön plana çıkması bir gerçektir. Asistanlarımızın da bu tip sistemleri tecrübe etmeden önce anatomi bilgilerinin ve spinal cerrahide temel tecrübelerinin olması önemlidir.

Temel bilgileri olan asistanları bu teknolojilerin olduğu merkezlere gözlemci olarak da olsa yönlendirebilirsek onların cerrahi hayatlarının ileriki dönemlerinde muhtemelen karşılıklarına daha çok çıkacak bu teknoloji ile uyumlarını sağlamaya yardımcı olabiliriz. Navigasyon tecrübesi olan cerrahların robotik sistemlere uyum sağlamaları çok daha kolay olacaktır.

Toplantı ve kongrelerde, robotik cerrahi ve spinal navigasyon konuları yurt-ıçi ve dışı özellikle son 5 yılda ciddi oranda artmış ve artmaya da devam etmektedir. Asistanların bu tip toplantılara yönlendirilerek bilgilerinin artırmalarını sağlamanın da önemli olduğunu düşünmekteyiz.

2000 yıllardan sonra hızlanan bu teknolojik ivmenin nereye kadar yükselebileceği elbetteki hayal gücümüzü zorlasa da bu teknoloji yolculuğunda ülkemiz geride kalmamalıdır. El-

ette hiçbir akıllı sistemin bir cerrahin yerini almayacağını düşünmekle birlikte olmazsa olmaz bir ikili olacaklarını da unutmamak gerekir.

Birden fazla eklemli kolu olan ve cerrahin AR yardımı ile perkütan vida yerleştirmesine olanak sağlayan yarı bağımsız robotik sistemler üzerine çalışmalar devam etmektedir (9).

Tüm bu sistemlerin yaygınlaşmasındaki en büyük problemlerin kurulum maliyeti ile eğitim planlamasının ve öğrenmenin zor olacağı düşünülmektedir. Kanaatimizce, bunlar aşılamayacak sorunlar değildir ve dünyadaki önde gelen omurga cerrahisi merkezlerinden bazılarında sahip ülkemizde asistan eğitimi ve sonrası dönemde bu sistemlerin kullanılmasının artması en büyük temennimizdir.

## KAYNAKLAR

1. Bai YS, Niu YF, Chen ZQ, Zhu XD, Gabriel LK, Wong HK, Li M: Comparison of the pedicle screws placement between electronic conductivity device and normal pedicle finder in posterior surgery of scoliosis. J Spinal Disord Tech 6:21-29, 2012
2. Bertelsen A, Melo J, Sanchez E, Borro D: A review of surgical robots for spinal interventions. Int J Med Robot 9(4):407-422, 2013
3. Beutler WJ, Peppelman WC, Dimarco LA: The da Vinci robotic assisted lumbar interbody fusion: Technical development and case report. Spine 38:356-363, 2012
4. Bransford RJ, Bellabarba C, Konodi MA, Chapman J: Risk factors for medical complication after lumbar spine surgery a multivariate analysis of 767 patients. Spine 36(21):1801-1806, 2011
5. Buffolo E, Gerola L: Minimally invasive bypass grafting: A historical perspective. In: Goldstein DJ, Oz MC (eds), Minimally Invasive Cardiac Surgery, 2<sup>nd</sup> ed, NJ, USA: Humana Press, Totowa, 2004:45-51
6. Cosgrove DM, Sabik JF, Navia JL: Minimally invasive valve operations. Ann Thorac Surg 65:1535-1539, 1998
7. Davies B: A review of robotics in surgery. Proc Inst Mech Eng 214:129-140, 2000

8. Devito DP, Kaplan L, Dietl R, Pfeiffer M, Horne D, Silberstein B, Hardenbrook M, Kiriyanthan G, Barzilay Y, Bruskin A, Sackerer D, Alexandrovsky V, Stüer C, Burger R, Maeurer 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* 35:2109-2115, 2010
9. D'Souza M, Gendreau J, Feng A, Kim HL, Ho AL, Veeravagu A: Robotic-assisted spine surgery: history, efficacy, cost, and future trends. *Robot Surg* 7:9-23, 2019
10. Holly LT, Foley KT: Three-dimensional fluoroscopy-guided percutaneous thoracolumbar pedicle screw placement. Technical note. *J Neurosurg* 99:324-329, 2003
11. Kalanithi PS, Patil CG, Boakye M: National complication rates and disposition after posterior lumbar fusion for acquired spondylolisthesis. *Spine* 34(18):1963-1969, 2009
12. Kim VB, Chapman WH, Albrecht RJ, Bailey BM, Young JA, Nifong LW, Chitwood Jr WR: Early experience with telemanipulative robot-assisted laparoscopic cholecystectomy using Da Vinci. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech* 12:34-40, 2002
13. 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* 35:153-161, 1988
14. Lee J, Yun JH, Nam KH, Choi UJ, Chung WY, Soh EY: Perioperative clinical outcomes after robotic thyroidectomy for thyroid carcinoma: A multicenter study. *Surg Endosc* 25:906-912, 2010
15. Lee JY, O'Malley BW Jr, Newman JG, Weinstein GS, Lega B, Diaz J, Grady MS: Transoral robotic surgery of craniocervical junction and atlantoaxial spine: A cadaveric study. *J Neurosurg Spine* 12:13-18, 2010
16. Lieberman IH, Hardenbrook MA, Wang JC, Guyer RD: Assessment of pedicle screw placement accuracy, procedure time, and radiation exposure using a miniature robotic guidance system. *J Spinal disorder Tech* 25:241-248, 2012
17. Liu Y, Lee MG, Kim JS: Spine surgery assisted by augmented reality: Where have we been? *Yonsei Med J* 63(4):305-316, 2022
18. Menger RP, Savardekar AR, Farokhi F, Sin A: A cost-effectiveness analysis of the integration of robotic spine technology in spine surgery. *Neurospine* 15(3):216-224, 2018
19. Navarro Ramirez R, Lang G, Xiaofeng L, Connor B, Janssen I, Jada A, Marjan A, Roger H. Total navigation in spine surgery; a concise guide to eliminate fluoroscopy using a portable intraoperative computed tomography 3-dimensional navigation system. *World Neurosurg* 100:325-335, 2017
20. Onen MR, Naderi S: Robotic systems in spine instrumentation surgery and preoperative imaging systems. *Turkiye Klinikleri J Neurosurg-Special Topics* 7(3):299-305, 2017
21. Schurr MO, Buess GF, Neisius B, Voges U: Robotics and telemanipulation technologies for endoscopic surgery: A review of the ARTEMIS project. *Advanced robotic telemanipulator for minimally invasive surgery. Surg Endosc* 14:375-381, 2000
22. Singer G: Occupation radiation exposure to the surgeon. *J Am Academy Ortop Surg* 13:69-76, 2005
23. 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, 2018
24. Weishang L, Gaoyu L, Wenting C, Lin C: The safety and accuracy of robot-assisted pedicle screw internal fixation for spine disease: a meta-analysis. *Bone Joint Res* 9(10):653-666, 2020