



# Minimal İnvaziv Spinal Cerrahi

## Minimally Invasive Spinal Surgery

Mehmet Yiğit AKGÜN<sup>1,2</sup>, Oğuz BARAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Koç Üniversitesi Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniği, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Koç Üniversitesi Hastanesi, Omurga Merkezi, İstanbul, Türkiye

**Yazışma adresi:** Mehmet Yiğit AKGÜN ✉ myigitakgun@gmail.com

### ÖZ

İdeal olarak, minimal invaziv spinal cerrahi (MSC), geleneksel bir açık prosedüre göre çevre dokuların daha az manipülasyonu ile birlikte aynı amaç ve hedeflere ulaşmaya izin vermektedir. Ayrıca, iyileşme sürelerinin kısalması ve sağladığı kozmetik faydalar nedeni ile minimal invaziv teknikler, hastalar tarafından daha fazla tercih edilmektedir. Minimal invaziv cerrahinin tarihini gözden geçirmek, omurga cerrahisindeki ilerlemeleri anlamamıza yardımcı olur. Endikasyonların artması ile omurgada tüm bölgelerde mevcut teknikler kullanılabilir. Minimal invaziv omurga cerrahisi lazerler, endoskopi ve görüntü yönlendirme sistemlerindeki gelişmelerden etkilenmiş ve ilerlemesini bu yönde gerçekleştirmiştir. MSC klinik olarak önemli ilerleme kaydetmeye devam etse de, prosedürlerin, ekonomik etkisi ve öğrenme eğrileri göz önünde bulundurulmalı ve cerrahların bu prosedürleri armamentaryumlarına almaktan kaçınmaması gerekmektedir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Omurga, Minimal invaziv, Cerrahi

### ABSTRACT

Ideally, minimally invasive surgery (MIS) allows less extensive manipulation of surrounding tissues than a conventional open procedure while accomplishing the same goals and objectives at the target structure. In addition, patients prefer minimally invasive techniques because such techniques reduce recovery times and provide cosmetic benefits. Reviewing the history of minimally invasive surgery helps us understand the advances in spine surgery. Minimally invasive spine surgery has been influenced by advances in lasers, endoscopy, and image guidance systems. Although MISS has continued to make significant progress clinically, consideration must also be given to its economic impact and the learning curve surgeons experience in adding these procedures to their armamentarium.

**KEYWORDS:** Spine, Minimally invasive, Surgery

### ■ MINİMAL İNVAZİV SPİNAL CERRAHİ

**S**on birkaç dekatta, spinal cerrahi pratiği önemli teknik ve teknolojik ilerlemelerden geçmiştir. Minimal invaziv spinal cerrahi (MSC) ile, yumuşak doku manipülasyonunda azalma, kanama oranlarında azalma, daha düşük cerrahi alan enfeksiyon oranları, daha iyi kozmetik sonuçlar ve erken ambulasyon sayesinde işe dönüş zamanlarında azalma sağlanmıştır (46).

Narain ve ark. yapmış olduğu prospektif çalışmada hastaların MSC ile açık cerrahiye ilişkin görüşleri değerlendirilmiştir. Dikkate alınması gereken en önemli 3 faktörün 1) uzun vadeli sonuçlar, 2) cerrah tavsiyeleri ve 3) komplikasyon riski olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, hastaların %80'i, ileri bir tarihte omurga ameliyatı olma ihtiyacı ortaya çıktığı takdirde MSC'yi tercih edeceklerini bildirmişlerdir (31).

MSC'nin sayısız formundan 3 tekniği ayrı olarak değerlendirmek gerekmektedir: 1) mini-açık/perkütan, 2) tübüler ve 3)

endoskopik (38). Her birinin kendi avantajları ve dezavantajları olmasına rağmen, tüm yöntemler gelişmeye ve endikasyonlarını genişletmeye devam etmektedir (46).

## ■ SERVİKAL OMURGA

MSC teknikleri torasik ve lomber omurgada daha fazla çalışılmış olsa da sınırlı vizüalizasyon, azalan manevra kabiliyeti ve spinal kord yaralanması riskleri, servikal omurgada MSC'nin artan kullanımını sınırlamıştır. Tüm zorluklara rağmen, belirli dejeneratif hastalıklar da bazı yaklaşımlar ile, üst ve subaksiyel servikal omurgayı içeren minimal invaziv yaklaşımlar yaygın olarak kullanılabilmiştir.

### Kraniovertebral Bileşke ve Üst Servikal Omurga

Kraniovertebral bileşke (KVB) ve üst servikal omurgada (C1/C2) minimal invaziv teknikler, lokal anatominin ve cerrahi müdahalenin morbiditesini artırabilecek herhangi bir varyantın tam olarak anlaşılmasını gerektirmektedir. Sınırlı sayıda anatomik landmarklar ve sınırlı vizüalizasyon nedeniyle, KVB ve üst servikal omurgada navigasyon ile pre/intraoperatif görüntülemelerinin kullanılması; vida yerleşimini/derinliğini doğru yapabilmek ve ilgili vasküler/nöral yapıların yaralanmasından kaçınmak için önemlidir (7). Yu ve ark. anormal transvers foramina, C1 hipoplazisi ve/veya vertebral arter pozisyonundaki değişiklikler dahil olmak üzere karmaşık KVB malformasyonları olan 23 hastada intraoperatif bilgisayarlı tomografi (BT) ile entegre nöronavigasyon sisteminin kullanımını araştırmış ve 3 aylık ön deneyimlerinde, vasküler veya nöral komplikasyon görülmemiş, ancak 2 malpoze vidanın pedikülü perfore ettiği saptanmıştır (57).

Odontoid anomaliler sıklıkla servikomedüller veya üst servikal spinal kord kompresyonuna yol açabilir. Endoskopik cerrahideki gelişmelerle bağlantılı olarak, minimal invaziv cerrahi yönetim, KVB ve üst servikal omurgaya endoskopik transservikal yaklaşım, endoskopik transoral yaklaşım ve endoskopik endonazal yaklaşım dahil olmak üzere 3 ana yaklaşıma odaklanmıştır. Endoskopik transservikal yaklaşım, alt klivusun altındaki patolojilerin tedavisinde başarılı bir şekilde kullanılmışken, transoral/endonazal yaklaşımla ise klivusun üstündeki patolojiler için uygun olduğu gösterilmiştir (41). Bununla birlikte, son çalışmalar endoskopik transoral yaklaşımın yüksek enfeksiyon oranları ve velofaringeal disfonksiyon ile ilişkili olduğunu göstermiştir (12). Alternatif olarak, odontoidektomi için endoskopik transnazal yaklaşımın ardından uygulanacak posterior oksipitoservikal füzyon, kafatabanındaki kemik elementlerin ve odontoidin neden olduğu anterior nöral elementlerin kompresyonunu azaltmak için etkili bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ayrıca, Seker ve ark. endonazal yaklaşımın KVB'ye giden en kısa rota olduğunu göstermişlerdir. Endonazal yaklaşımın optimum klival açılımı sağladığı ve transoral yaklaşım ile de C1 ve odontoid proçese daha doğrudan erişim sağlandığı konusunda fikir birliği oluşmuştur (45). Böylelikle, endoskopik tekniklerin ilerlemesi ile, daha iyi aydınlatma ve daha geniş operasyon sahası görünümüleri ile derin anatomik noktaların erişilmesi de kolaylaşmıştır.

## Subaksiyel Servikal Omurga

Posterior servikal foraminotomi (PSF) için minimal invaziv teknikler ilk olarak 2000'li yılların başında tanımlanmış ve araştırma konusu olmaya devam etmiştir. Açık ve perkütan PSF'nin perioperatif sonuçlarını karşılaştıran çalışmalar incelendiğinde, perkütan PSF'nin kan kaybını, yatan hasta analjezik kullanımını, hastanede kalış süresini ve ameliyat sürelerini azalttığı bildirilmiştir (9). Minimal invaziv PSF (MI-PSF) ve açık cerrahinin klinik sonuçları karşılaştırılabilir olduğundan, minimal invaziv cerrahiden sonra hastanede kalış sürelerinin azalmasının cerrahi planlamada önemli bir faktör olduğu bildirilmiştir. Sahai ve ark. tarafından yakın zamanda yapılan bir metaanalizde miyelopati olmayan tek taraflı servikal radikülopatili hastalarda anterior servikal diskektomi ve füzyon ile MI-PSF'nin yararlılığı araştırılmıştır. MI-PSF kohortunda, anterior servikal diskektomi ve füzyon kohortuna kıyasla visual analog skala (VAS)- kol skorlarında daha iyi sonuçlar elde edilirken; VAS-boyun, Boyun Yetersizliği İndeksi (NDI) skorları ve komplikasyon oranları ise benzer olarak saptanmıştır (43).

Perkütan posterior faset eklem kafesi implantasyonu, servikal radikülopati semptomları olan seçilmiş hastalarda, faset eklem füzyonu dahil edilmiş veya edilmemiş standart posterior laminoforaminotomiye alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Kafesin faset eklemlerine minimal invaziv olarak bilateral yerleştirilmesi, foraminal alanı artırır, geleneksel lateral kitle vidası fiksasyonuna kıyasla stabilite sağlar ve hasta semptomlarını hafifletir. Siemionow ve ark. tek seviyede servikal perkütan faset kafesi implantasyonu yapılan 43 hastada foraminal alanın 6. ayda önemli ölçüde arttığını bildirmişlerdir (47). Son zamanlarda, DTRAX posterior servikal kafes minimal invaziv sistemin biyomekanik etkilerini geleneksel lateral kitle vidalı fiksasyon yaklaşımıyla karşılaştıran çalışmalar, dinamik radyografilerde azalmış segmental hareket açıklığı ile değerlendirmiş ve her iki tekniğin de karşılaştırılabilir stabilite sunduğunu öne sürmüştür.

Faset kafesi yerleştirme, servikal radikülopatili hastalar için iyi bir seçenektir ve posterior servikal füzyonlara kıyasla postoperatif fonksiyonel durumda iyileşme ve perioperatif morbiditede azalma sağlar. Ancak, faset kırıkları (%1.7) ve implant migrasyonu (%0,8) dahil olmak üzere düşük de olsa bildirilen komplikasyon oranları akılda tutulmalıdır (27).

## ■ TORAKAL OMURGA

MSC'ye artan talep ve tekniklerin görece toplam düşük maliyeti, torasik omurga cerrahisinde de perkütan pedikül vidası yerleştirmeyi çekici bir seçenek hâline getirmiştir. Pedikül boyutlarının daha küçük olması nedeniyle torasik omurgada preoperatif anatomik değerlendirme özellikle önemlidir. Lomber omurga ile karşılaştırıldığında, torasik omurgadaki perkütan yerleştirilmiş vidanın malpozisyonu, spinal kord yaralanması ve büyük damar yaralanması için daha büyük bir potansiyele sahiptir; bu nedenle, görüntü kılavuzlu teknikler çok önemlidir (33).

Üç boyutlu (3D) O-kol navigasyonunun hem torasik hem de lomber omurgalarda en düşük perkütan pedikül vida malpozisyon oranına (%1.2) sahip olduğu literatürde

bildirilmiştir. 3D C-kol navigasyonunda bu oran %7.3 iken, iki boyutlu floroskopi kılavuzluğunda navigasyonda ise bu oran %5,2 saptanmıştır (48).

Geçtiğimiz birkaç yıl içinde, MSC teknikleri torasik spinal stenozun tedavisi için de gelişmiştir. Bu yöntemlerden biri de perkütan endoskopik torasik diskektomidir (PETD). 2010 yılında Choi ve ark. endoskopi ve foraminoplasti kombinasyonunu kullanan ilk PETD tekniğini tanıtmışlardır. Ancak endoskopun sınırlı manevra kabiliyeti ve endikasyonun torasik yumuşak disk hernileri ile sınırlı olması, prosedürün kısıtlayıcıları olarak ortaya çıkmıştır (6). Diğer bir PETD tekniği olan oblik paraspinal yaklaşım Cho ve ark. tarafından 2012 yılında, intervertebral foramenlere ulaşmak ve migre/kalsifiye diskleri çıkarmak için tübüler ekartörler ve 3D navigasyonun kullanıldığı bir sistemdir (5). 2019 yılında Xiaobing ve ark. intervertebral disk boşluğuna doğrudan ulaşım avantajı sağlayan, operasyon ve floroskopi sürelerini etkin bir şekilde azaltan transforaminal bir yaklaşım kullanarak başka bir PETD erişim yöntemini tanıttı. PETD, cerrahın hassas nöral/vasküler yapılar etrafındaki diseksiyondan kaçınmasına olanak tanır, nöral elemanlardaki retraksiyonu azaltır ve daha fazla anatomik aşinalık sağlar. Ayrıca PETD genel anestezi kullanılmadan da yapılabilir (55). Bununla birlikte, PETD ile ilgili çoğu çalışma olgu serisidir ve karşılaştırmalı çalışmalar azdır bu nedenle, sonuçlarını değerlendirmek ve uygulanabilir bir cerrahi alternatif olarak değerlendirmek için daha yüksek kaliteli çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Torasik disk hernisinin tedavisine yönelik yaklaşımların yüksek morbiditesi ve karmaşıklığı, lateral transtorasik yaklaşımın (LTTA) geliştirilmesine de yol açmıştır. LTTA, konvansiyonel açık anterior yaklaşıma bağlı pulmoner komplikasyonları ve konvansiyonel açık posterior yaklaşımda görülen tekal kese mobilizasyonuna sekonder nörolojik komplikasyonları en aza indirmek için bir alternatif olarak önerilmiştir. LTTA uygulanan 69 hastada yakın zamanda yapılan bir çalışmada, dural kese yırtıklarının en sık görülen tek komplikasyon (5 hasta) olduğu bildirilmiştir. Ciddi nörolojik komplikasyon görülmemiş ve az sayıda pulmoner komplikasyon olduğu bildirilmiştir. Ayrıca; hastaların %91'inde miyelopatik semptomların düzeldiği saptanmıştır (32).

Torakoskopi, basit torasik sempatektomilerden daha karmaşık dekompresyon ve füzyonlara kadar çok çeşitli farklı prosedürleri gerçekleştirme yeteneği sağlayarak MSC'nin ön saflarına yerleşmiştir. 1900'lerde tanıtılmalarından bu yana, video ve minimal invaziv teknolojilerdeki ilerlemeler, cerrahların torasik omurgaya daha az komplikasyon oranları ile erişebilmesini sağlamıştır. Torakoskopi sırasında, hastaya pozisyon verilmeden önce, hastalığın lateralitesine bağlı olarak sağ veya sol akciğeri seçici olarak söndürmek için çift lümenli bir kateter yerleştirilir. Genellikle, üst torasik/orta torasik seviyelere erişmek (ve kalp/büyük damarlardan kaçınmak) için sağ taraflı yaklaşım kullanılırken, alt torasik seviyelere erişmek için sol taraflı yaklaşım kullanılır (8). Video yardımlı göğüs cerrahisi sayesinde, cerrahi alanı görselleştirme ve daha küçük insizyonlar kullanma imkânı artmış, kaburga retraksiyonu/rezeksiyonu azalmış ve sonuç olarak postoperatif ağrı da azalma imkânı sağlanmıştır. Prosedür büyük ölçüde başarılı olmuştur.

Wait ve ark. herniye disklerin torakoskopik rezeksiyonu ile ilgili retrospektif bir çalışma yürütmüş ve 2,4 yıllık takipte miyelopati, radikülopati ve sırt ağrısı semptomlarının sırasıyla hastaların %91.1, %97.6 ve %86.5'inde düzeldiğini göstermiştir. Ayrıca, hastaların %97.4'ü gerekirse tekrar ameliyat olmaya istekli olduklarını bildirmişlerdir (53). Ray ve ark. T10 ve L2 arasında burst fraktörü olan hastalarda torakoskopik korpektomi ve füzyon kullanımını değerlendirdi (42). Hastaların %90'ında radyografik olarak füzyon geliştiğini göstermiş ve hastaların %91'inde kifotik deformitelerinin düzeltildiğini bildirmişlerdir. Torakoskopi etkili bir teknik olmasına rağmen, cerrahlar bir hastayı bu MSC yaklaşımı için değerlendirirken, yöntemin öğrenme eğrisini ve kontrendikasyonlarını (adezyonlar ve tek akciğer ventilasyonu ile artan komplikasyon riski) dikkate almaları gerekmektedir.

## ■ LOMBER OMURGA

MSC ilk olarak 1990'larda tanımlandığından beri, lomber omurganın dejeneratif hastalıklarının tedavisinde uygulanmaya devam etmiştir. Birkaç minimal invaziv nonfüzyon ve füzyon lomber prosedür çok başarılı bir şekilde tanımlanmıştır.

### Minimal İnvaziv Dekompresyon

Lomber spinal stenoz, yaşlı popülasyonda en sık görülen spinal hastalıktır ve insidansının önümüzdeki 5 yıl içinde %59'a kadar artması beklenmektedir (11). Geleneksel yaklaşımlar ile, bilateral laminektomiler, medial fasetektomileri ve foraminotomiler uygulanmasına rağmen, tübüler ekartörlerin ve endoskopik minimal invaziv tekniklerin ortaya çıkması ile dekompresyon cerrahisi uygulanır hâle gelmiş ve ek olarak perioperatif komplikasyonlarda (örn. kan kaybı ve enfeksiyonlar) belirgin azalmalar elde edilmiştir. Uniportal endoskopi, biportal endoskopi ve mikrocerrahi arasında yakın zamanda yapılan karşılaştırmalı çalışmada, 3 minimal invaziv seçeneğin hepsinin perioperatif klinik sonuçlarda iyileşmelere yol açtığı gösterilmiştir. Ek olarak, her 3 tekniğin tümünde önemli postoperatif dural genişleme (nöral dekompresyonun) sağlanmış, ancak tek portlu endoskopi kohortundaki ortalama genişleme biportal endoskopi ve mikrocerrahi kohortuyla karşılaştırıldığında daha düşük saptanmıştır (16). Williams tarafından mikroskobik diskektominin tanıtılmasından bu yana, daha küçük cerrahi enstrümantasyon, minimal kas ekartasyonu ve dura/sinir köklerinin daha minimal manipülasyonu mümkün kılınmıştır (54). Tübüler mikrodiskektominin avantajları arasında, ameliyat sonrası opioid kullanımının azalması, işe daha hızlı dönüş ve sağlık maliyetlerinin azalması dahil olmak üzere çeşitli faydaları sayılabilmektedir. Ancak, dural yırtıkların ve nöks vakaların oranlarında artış olduğunu ve postoperatif dönemde hastaların bel ve bacak ağrılarındaki azalmanın kısıtlı olduğunu bildiren ve karşıt görüşü savunan yayınlar da mevcuttur (34).

Perkütan endoskopik transforaminal diskektomi ile perkütan endoskopik interlaminar diskektomi karşılaştıran bir meta-analizde Chen ve ark. iki grup arasında benzer klinik sonuçlar gösterdi; bununla birlikte, perkütan endoskopik interlaminar diskektomide, perkütan endoskopik transforaminal diskektomi ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha düşük floroskopi ve ameliyat süreleri olduğu bildirilmiştir (4).

## Minimal İnvaziv Füzyon

Minimal invaziv lomber füzyon, interbody cihazlarda ve endoskopik görüntülemeledeki son gelişmeler eşliğinde MSC'de devrim yaratmıştır. Minimal invaziv transforaminal lomber interbody füzyonu (MI-TLIF) obez ve yaşlı olanlar dahil çoğu hasta için etkili bir seçenektir. Son birkaç on yılda, MI-TLIF'ler, foraminal yüksekliği restore etme ve segmental dizilimi yeniden sağlama konusundaki yüz güldürücü sonuçları nedeni ile giderek artan sıklıkla kullanılmıştır (21). Kullanılan en yaygın interbody kafesler titanyum veya polietereketondan yapılır. Titanyum kafesler anında stabilite sağlamalarına ve kompresif kuvvetleri önemli derecede tolere etmelerine rağmen, polietereketon kafesler, zaman içinde füzyonu takip amaçlı direkt grafilerde kortikal kemiğe benzer bir elastisite modülü ve radyölüzens olması avantajına sahiptir (10). İnterbody kafeslerin malzemeleri ve şekillerindeki gelişmeler sürmeye devam etmektedir. Karbon fiber, tantalum ve seramik gibi malzemelerin tümü, yük aktarımı ve artrodez oranları açısından umut verici sonuçlar göstermiştir. Muz şeklindeki veya eğik kafesler, yüksek füzyon oranları (artan temas yüzey alanı nedeniyle) ve lordotik eğriliği düzeltmeleri ve kolay yerleştirilme avantajları ile minimal invaziv yaklaşımlar arasında popüler hâle gelmiştir. Ayrıca, expandable kafeslerin kullanımı ile, hastaya göre ayarlanabilen distraksiyon sayesinde, yerleştirme sırasında daha az travmatik endplate hasarına yol açmıştır. Çoğu çalışma, statik ve expandable kafesler arasında benzer sonuçlar olduğunu bildirmiştir. Endoskopun kullanımı ile, MI-TLIF; yumuşak doku distraksiyonunu azaltılarak ve ameliyat sonrası hızlı iyileşme sağlanarak yerleştirilmeye başlanmıştır (22).

Lomber omurgaya anterior yaklaşımın morbiditesini önemli ölçüde azaltan minimal invaziv bir prosedür olan transpsoas yolu kullanılarak gerçekleştirilen lateral lomber interbody füzyon (LLIF) tekniğidir. Bu teknikte tübüler ekartörler ile psoas boyunca künt diseksiyon kullanılarak lomber omurganın lateral tarafına erişim sağlanabilmektedir. Çalışmalar yüksek füzyon oranları, iyi sagittal dizilim ve yüz güldürücü postoperatif klinik sonuçlar bildirmiştir (44). Bununla birlikte, bu prosedürü kullanan cerrahlar, yaklaşımda hassas damar ağını (aort/inferior vena kavadan segmental dallar ve anterior omurgayı boyunca uzanan herhangi bir büyük damar) görselleştirmeye yardımcı olmak için ameliyat öncesi ileri görüntülemeye (BT ve/veya manyetik rezonans görüntüleme) ihtiyaç duyarlar. Ek olarak, alt lomber disk hernilerinin cerrahi planlaması esnasında (L4-L5 ve L5-S1) yüksek ilyak krest gibi cerrahiye etkileyebilecek anatomik yapılar değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, oblik lateral interbody füzyonunun aksine, psoas diseksiyonu ve ekartörlerin yerleştirilmesi sırasında lomber pleksusun minimum düzeyde etkilenmesini sağlamak için nöromonitörizasyon kullanmak gerekmektedir. LLIF'in ayrıca kendine has yaklaşımına sekonder komplikasyonlar da görülmektedir. Ameliyat sonrası kalça fleksiyonu zayıflığı en önemli örneğidir ve postoperatif 2 hafta içinde çoğu hastada tam düzelme sağlanmaktadır (15).

Lomber omurgaya lateral yaklaşımın popülaritesi, nöroforaminal stenoz, derece 1/2 spondilolistezis, instabilite saptanan spinal stenoz ve yetişkin dejeneratif skolyoz dahil olmak üzere

çeşitli endikasyonlara uyarlandığı için artmaktadır. İlk olarak 2006 yılında Özgür ve ark. tarafından açıklanan bu prosedür, sagittal dizilimi düzeltmesi ve dekompresyon sağlaması ayrıca peritoneal/büyük damar yaralanması riskini azaltması nedeniyle kullanım sıklığı artmıştır. Lateral transpsoas yaklaşımının kullanımı ile, nonlordotik ve lordotik kafes boyutları kullanılarak, intervertebral disk yüksekliği geri kazanılabilmekte, sagittal dizilim düzeltilmekte ve füzyon oranları iyileştirilmektedir (35). Ayrıca, TLIF, oblik lomber interbody füzyon, ekstrem lateral interbody füzyonu (XLIF) ve posterolateral füzyon prosedürleri arasındaki hareket aralığını (ROM) ve stres dirençlerini karşılaştıran yakın tarihli bir biyomekanik analizde, oblik lomber interbody füzyon ve XLIF'in kortikal ve süngerimsi kemikte daha az stres tepe noktası indüklediği gösterilmiştir (24).

Anterior lateral prosedürlerin de revizyon cerrahilerinde faydalı olduğu, bakir lateral dokunun kullanımı ile, üst lomber omurgaya kolay erişime izin verdiği gösterilmiştir. Çalışmalar, özellikle Roussouly tip 2 sagittal dizilimi olan hastalarda (sakral eğimi <35 olan hipolordotik lomber omurga), tek başına bir prosedür olarak anterior lateral yaklaşım kullanıldığında çok iyi klinik sonuçlar alındığı gösterilmiştir (2).

Anterior lomber interbody füzyon (ALIF), Capener tarafından tarihsel tanımının ardından yakın zamanda görece iyileştirmelere tabi tutulmuştur. Tek bir anahtar deliği şeklinde perinavel insizyon ile, mikroskop altında mini açık yaklaşım ile, lomber omurganın lokal ve bölgesel lordozunun restorasyonu ile L3-L4 ila L5-S1 seviyelerinin yeterli şekilde ortaya konulmasına izin vermektedir. Vasküler yaralanma riski bulunmakta, ancak klasik açık ALIF için bildirilen oranlara benzer olduğu gösterilmiştir (1). Bununla birlikte, bu tür bir yaklaşım için öğrenme eğrisi zorlu olmaya devam etmekte ve diseksiyon sırasında karşılaşılan tüm kritik vasküler ve anatomik yapıların detaylı bilinmesi gerekmektedir. ALIF prosedürleriyle ilişkili komplikasyonlar, anatominin farklı olması (femoral sinir, hipogastrik pleksus ve iliak arter/damar) nedeniyle posterior yaklaşımlardan farklıdır. Ayrıca, çalışmalarda ALIF prosedürleriyle ilişkili vasküler yaralanmaların %2-24, retrograd ejakülasyonun %5-45, yara enfeksiyonlarının %1-2 ve paralitik ileusun %0,3-25 arasında oranlarda görüldüğü bildirilmiştir (28).

## ■ DEFORMİTE

MSC'nin erişkin spinal deformitesi için kullanımıyla ilgili olarak yayınlanan çalışmalarda önemli postoperatif gelişmeler, fonksiyonel sonuçlar ve koronal deformite restorasyonu bildirmiştir. Phillips ve ark. tarafından yapılan çok merkezli prospektif bir çalışmada anterolateral prosedür uygulanan dejeneratif skolyozlu hastalarda en fazla Cobb açısı düzelmesinin bilaterale pedikül vida fiksasyonu uygulanan hastalarda gözlemlendiği bildirilmiştir. Ayrıca, hastaların lomber lordozlarında da önemli bir düzelme saptandığını gözlemişlerdir. Ek olarak, MSC deformite teknikleri arasında LLIF, hibrit ve sirkumferensiyel tekniklerin, sagittal dizilime ve yaşam kalitesi üzerine etkilerini araştıran yayınlar da bildirilmiştir (40).

LLIF ve perkütan segmental enstrümantasyonun kombinasyonu ile skolyozlu hastalarda oldukça yüz güldürücü sonuçlar elde edilmiştir. Benzer şekilde, Park ve ark. erişkin spinal

deformitesi olan hastalarda cerrahi seçenekler olarak 2 minimal invaziv tekniğin (hibrit ve sirkumferensiyal) kullanılabilirliğini karşılaştırdı. Hibrit cerrahinin lomber lordozun düzeltilmesi, SVA'nın azalması ve lomber lordoz-pelvik insidans uyumsuzluğunun azalması ile ilişkili olduğunu göstermiş, klinik veya radyografik sonuçlar açısından iki grup arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır (37).

Birinci nesil lomber deformite MSC teknikleri (özellikle TLIF ve LLIF prosedürleri), sagittal dizilimi yeterince düzeltmeleri konusunda soru işaretleri barındırdıkları için, ileri derece dizilim bozukluğu olan durumlarda kullanımları önemli ölçüde azalmıştır. Daha yeni lomber MSC teknikleri ve cihazları, önemli ölçüde sagittal dizilimde düzelme sağlamış ve yüz güldürücü klinik sonuçlara elde edilmiştir. Bu teknikler arasında olan anterior kolon yeniden hizalama (ACR), anulus ve anterior longitudinal ligamanın serbestleştirilmesini içermektedir. Turner ve ark. tarafından yapılan çok merkezli bir çalışmada, spinal deformitesi olan ve ACR uygulanan hastalar, tek başına LLIF ile karşılaştırıldığında segmental lordozda 4 kat daha fazla iyileşme sağlamıştır. Ayrıca, posterior osteotomi ile kombine ACR'li hastalarda, posterior osteotomisi olmayanlara kıyasla son takipte lomber lordoz derecesinde önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır (52).

Than ve ark, minimal invaziv cerrahinin amacının, pelvik insidans lomber lordoz uyumsuzluğunun 10 derece ve SVA'nın 5 mm düzeltilmesi olduğunu bildirmişlerdir (49). Ayrıca Mummaneni ve ark. spinal deformitesi olan hastalarda MSC tekniklerini değerlendirirken karar verme sürecine yardımcı olacak güncellenmiş bir algoritma önermişlerdir (30);

Sınıf I: Küçük sagittal düzlem deformitesi ve belirgin radiküler ağrısı olan hastalar. Tedavi, lokal füzyonlu veya füzyonsuz minimal invaziv dekompresyondan oluşur.

Sınıf II: Normal pelvik parametreleri olan ve sabit deformitesi olmayan, sınıf I hastalara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek koronal Cobb açısı (>20) olan hastalar. Tedavi minimal invaziv çok seviyeli dekompresyon ve interbody füzyon tekniklerinden oluşur.

Sınıf III: Sabit spinal deformitesi olup (artmış SVA, pelvik tilt ve lomber lordoz-pelvik insidans uyumsuzluğu dahil), <10 seviye etkilenme veya 5 seviye füzyonu olan hastalar. Tedavi hibrit açık yaklaşımlar, ACR ile sirkumferensiyal MSC, mini-açık posterior substraksiyon osteotomisi veya expandable kafes teknolojisi ile TLIF'den oluşur.

Sınıf IV: Belirgin deformitesi olan, revizyon ihtiyacı olan veya 5 veya daha fazla seviye (L5-S1 dahil) füzyonu olan hastalar. Bu hastalar için MSC önerilmemektedir ve bu nedenle açık spinal deformite cerrahisi önerilmektedir.

## ■ ONKOLOJİK CERRAHİ

Primer maligniteler için nispeten nadir bir yerleşim olmasına rağmen, omurga, en büyük oranı meme ve akciğerlerden kaynaklanan metastatik hastalık için yaygın bir bölgedir. Ameliyat öncesi cerrahi planlama sürecinin bir parçası olarak, tümör tipi, metastaz varlığı/derecesi, belirti ve semptomlar, adjuvan tedavinin uygunluğu ve yer gibi çeşitli faktörler göz

önünde bulundurulmalıdır. Literatür, metastatik meme, prostat ve akciğer kanserli hastaların %5 ila %40'ında maligniteye sekonder spinal kord kompresyonu ile, vakaların %10 ila %20' sinde operasyonun gerekli olduğunu bildirilmektedir (36).

Minimal invaziv müdahaleler, BT kılavuzluğunda biyopsilerden vertebral augmentasyona ve pedikül vidası fiksasyonu ile cerrahi dekompresyona kadar değişebilir. MSC'nin spinal onkolojideki bir diğer avantajı, geleneksel açık yaklaşımlara kıyasla komplikasyon, lokal nüks ve yara enfeksiyonu riskini azaltarak morbidite oranlarında görülen azalmadır. Torasik omurga tümörlerine yönelik geleneksel yaklaşımlar, hemotoraks, pulmoner kontüzyonlar ve kronik ağrı dahil olmak üzere ciddi komplikasyonları olan anterior tabanlı veya posterior tabanlı teknikleri içermiştir. Mini açık transpediküler korpektomi ve XLIF gibi minimal invaziv prosedürler, kapsamlı invaziv cerrahi yaklaşımları tolere edemeyecek olan spinal tümörlü hastalarda, ilgili bu komplikasyonları azaltmaya yardımcı olmuştur. Örneğin, ekstrakaviter transpediküler korpektomi ve anterior kafes yerleşimi ile 360 derecelik bir dekompresyon elde etmek için mini açık bir insizyon kullanılmaktadır. Bu bulguları sağlamlaştırmak ve geleneksel açık yaklaşımlara göre MSC faydalarının gerçek doğasını aydınlatmak için daha büyük olgu serilerine ve prospektif çalışmalara ihtiyaç olduğu bildirilmiştir (56,58).

Son çalışmalar, metastatik hastalıkta ve omurganın primer multipl miyelomunda vertebroplasti ve kifoplastinin kullanıldığı olgularda umut verici sonuçlar olduğunu bildirmişlerdir. Markmiller tarafından yapılan çalışmada, metastaz veya multipl miyelom nedeni ile kifoplasti uygulanan hastalarda postoperatif 6. ve 12. aylarda VAS skoru, ODI ve Karnofsky Performans durumunda önemli iyileşmeler bildirilmiştir. Bu olumlu sonuçlara rağmen, sement kaçağı endişe verici bir komplikasyon olmaya devam etmektedir ve hastaların üçte birinde bu komplikasyon bildirilmiştir. Ayrıca, posterior elemanlara tümör yayılımı, perkütan pedikül vidası fiksasyonu yoluyla ek stabilizasyon gerektirebilmektedir (26).

Geniş tümör eksizyonu veya rekonstrüksiyonu olmaksızın tümör ile spinal kord arasındaki mesafenin artırılmasının hedeflendiği "seperasyon cerrahisi" başka bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Stereotaktik radyocerrahi ile seperasyon cerrahisi uygulanmış hastalarda 1 yıllık progresyon oranlarının %9-9,5 olduğu bildirilmiştir (29). Teknolojideki ilerlemeler, multidisipliner yönetim ile, omurganın metastatik ve primer tümörlerinin tedavisi için minimal invaziv tekniklerin başarılı bir şekilde kullanılması sağlanmıştır.

## ■ TRAVMA

Omurgadaki travmatik yaralanmalar genellikle künt travmaların sonucunda görülmekte ve son raporlar ile Amerika Birleşik Devletleri'nde yılda >160.000 omurga fraktürünün meydana geldiğini tahmin etmektedir (17). Omurga travmasının yönetimi, nörolojik hasarın alevlenmesini önlemeyi, omurgayı stabilize etmeyi ve omurga deformitesini düzeltmeyi amaçlar. MSC teknikleri, cerrahi müdahale gerektiren tüm travmatik spinal kord yaralanmaları için uygun olmasa da spinal kord yaralanmasının eşlik ettiği/etmediği bazı stabil olmayan fraktürlerin,

fleksiyon-distraksiyon/ekstansiyon-distraksiyon yaralanmalarının ve sakral fraktürlerin tedavisi için umut verici sonuçlar bildirilmiştir (18). Spinal travmada, paraspinal kas sistemi ile ilişkili vasküler/nöral yapılara verilen hasarı en aza indirmek amacıyla perkütan pedikül vidası fiksasyonu on yıldan fazla bir süredir kullanılmaktadır. Torakolomber burst fraktürleri nedeni ile tedavi edilen ve perkütan pedikül vida fiksasyonu yapılan hastalarda, açık vida-rod fiksasyonu ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha az kan kaybı, daha kısa ameliyat süresi, daha az postoperatif ağrı ve daha iyi fonksiyonel iyileşme olduğu gösterilmiştir. Bu olumlu sonuçlara rağmen, malpoze vidalar, nörolojik kötüleşme ve vertebra gövdesinin ön yüzünün etkilenmesi gibi komplikasyonlar hâlâ gözlenmektedir (20).

Mini-açık lateral transpoas yaklaşımları, torakolomber travmalarda sıkça kullanılmıştır. Ön kolon dizilimini düzeltmede etkili olması ve geleneksel anterior yaklaşımla ilişkili riskler olmadan yeterli dekompresyon sağlanabilmesi önemli avantajları arasında gösterilmektedir.

Nörolojik defisiti olan torakolomber burst fraktürü olan ve mini açık lateral korpektomi yapılan hastalarda ayrıca, stabil olmayan lomber burst fraktürü olan mini açık lateral transpoas yaklaşımı uygulanan hastalarda yüz güldürücü sonuçlar elde edilmiştir (51). MSC teknik ve teknolojisindeki son gelişmeler, bu yaklaşımların travma vakalarının tedavisinde daha fazla uygulanmasına yol açmıştır.

## ■ MSC'DA ZORLUKLAR

MSC tekniklerinin uygulanma sürecindeki önemli konu, geleneksel olarak açık prosedürleri rahatça uygulayan cerrahların katetmeleri gereken bir dik öğrenme eğrisinin olmasıdır. MSC, cerrahi alanın sınırlı vizüalizasyonu, ameliyatın dar bir koridordan gerçekleştirilmesi ve yüksek düzeyde el becerisi ihtiyacının yanı sıra prosedürle ilgili araç ve teknolojiye aşina olma durumu şeklinde yeni zorluklar getirmektedir (13). Öğrenme Eğrisi; eğrinin ilk kısmının düz olduğu (minimal başlangıç gelişimi), ardından dik bir artışın (maksimum büyüme ve yeterlilik) ve ardından platonun (her ilave vaka ile minimum büyüme) olduğu S-şekilli bir eğriye dayanır. MSC'nin servikal omurgadaki öğrenme eğrisi ile ilgili literatür sınırlı olmasına rağmen, çalışmalar platoya ulaşmak için 15 ila 72 lomber MSC vakasına ihtiyaç olduğunu bildirmiştir (23). İyileştirme oranı aynı zamanda eğitim deneyimi, mentorluk, belirli enstrümantasyonun mevcudiyeti, gelişmiş görüntüleme teknolojisi, uygulama yılları ve vaka karmaşıklığı gibi çok sayıda başka faktöre de bağlıdır.

Öğrenme eğrisindeki gelişme, 3D anatomi bilgisinden kaynaklanmaktadır. Gerçek zamanlı navigasyonun kullanılması, cerrahların somut olarak hissedemeyecekleri veya fiziksel olarak göremeyecekleri anatominin ameliyat alanında görselleştirilmesine yardımcı olarak daha iyi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Jiang ve ark. tarafından ALIF uygulanan hastalarda; navigasyon kullanımının, operasyon süreleri veya füzyon oranlarında anlamlı bir fark göstermediğini bildirmişlerdir. Bu süreçte gelişmeler, 1) doğrudan ve ilişkisel anatominin daha iyi anlaşılması, 2) ameliyat öncesi/ ameliyat sırasında navigasyon yardımı, 3) kadavra modelleri/gerçek vakalar kul-

lanılarak prosedürlere aşinalık ve 4) uygun mentörlük yoluyla yapılabilmektedir (19).

Maliyet/etkinlik konusunda yapılan çalışmada ise; MSC, açık TLIF ve PLIF prosedürleriyle 45 meta-analiz çalışması ile değerlendirilmiş ve iki yaklaşım arasında klinik sonuçlar açısından anlamlı bir fark olmadığı bildirilmiştir. Maliyet analizine sahip olan 9 çalışmada ise, MSC uygulanan hastalarda açık prosedürlere kıyasla bakım dönemi maliyetlerinin önemli ölçüde azaldığı gösterilmiştir (14).

Minimal invaziv prosedürlerdeki artış, anatomik landmarkların tespitine yardımcı olmak için floroskopi kullanımının bir sonucu olarak artan radyasyon maruziyetine de yol açmıştır. MTLIF prosedürleri uygulanan hastaların, açık TLIF prosedürleri uygulanan hastalardan daha fazla radyasyona maruz kaldıkları bildirilmiştir. Benzer şekilde, cerrahi personel için artan radyasyon maruziyeti de bildirilmiştir. Mariscalco ve ark. minimal invaziv ve açık lomber mikrodiskektomi vakalarını karşılaştırmış; tiroid/göz, göğüs ve dominant elde cerrahi personelin radyasyon maruziyetinin önemli ölçüde arttığını bildirmişlerdir (25). BT-navigasyon sistemlerinin dahil edilmesi ile, radyasyon maruziyetinin azaldığı ve hasta anatomisinin detaylı olarak görüntülenebildiği bildirilmiştir.

## ■ MSC GELİŞMELER ve GELECEK

MSC, özellikle intraoperatif görüntüleme alanında yeni gelişmeler ışığında olgunlaşmıştır. 2D floroskopi kullanılarak MSC'nin sınırlı vizüalizasyonunu ortadan kaldırmaktadır. Navigasyon tekniklerindeki son gelişmeler ışığında cerrahi sonuçlar yüz güldürücü olmaya başlamıştır. Özellikle, 3D görüntü kılavuzlu navigasyon sistemlerinin (preoperatif BT taramalarına veya intraoperatif görüntülemeye dayalı), MSC'ta yardımcı enstrümanlar olarak belirtilmiştir.

İzosentrik C-kol ve O-kol gibi intraoperatif görüntüleme üniteleri, modern navigasyon sistemleriyle entegre olmakta ve gerçek zamanlı intraoperatif görüntülemeye izin vererek 3D görüntüleme sağlamaktadırlar. 2D floroskopi ile 3D navigasyonu karşılaştıran bir meta-analiz, pedikül vidası kırılma oranlarının 3D grubunda 2D grubuna göre %99 oranında azaldığını bulmuştur (3).

Gerçek dünyadaki çevrenin ve içindekilerin, bilgisayar tarafından üretilen; ses, görüntü ve grafik ile zenginleştirilerek meydana getirilen canlı veya dolaylı fiziksel görünümü olan artırılmış gerçeklik, MSC'de kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle büyük ölçekli tıbbi teknoloji şirketleri, cerrahi prosedürlerin doğruluğunu ve verimliliğini artırmak amacıyla cerrahların görüntüleri aktif cerrahi alana yansıtması için giyilebilir, baş üstü teknolojisi Augmedics XVision Spine'ı piyasaya sürdü. Pedikül vidası fiksasyonunda, artırılmış gerçeklik ile %94-97 arası oranlarda doğruluk sağlandığı bildirilmiştir (39).

3D printing, karmaşık biyomodellerin ve hastaya özel cihazların geliştirilmesiyle MSC'nin genişlemesini sağlamıştır. Hasta anatomisinin ve cerrahi planlamanın preoperatif değerlendirmesini sağlamanın yanı sıra, biyomodeller, artan komplikasyon oranlarının veya uzayan hastanede kalış sürelerinin düşürülmesinde etkili olduğu belirtilmektedir (50).

## ■ SONUÇ

MSC, geleneksel açık yaklaşımların, uygulanabilir ve etkili bir alternatiftir; ancak bu tekniklerin kullanımı cerrahin uzmanlığına ve hastanın klinik tablosuna bağlıdır. Maliyet etkin olması, son teknolojik ve teknik gelişmelerin oldukça fazla olması ve uygulanabildiği endikasyonların genişlemesi ile her geçen yıl popülaritesinde artış görülmektedir.

## ■ KAYNAKLAR

- Bassani R, Querenghi AM, Cecchinato R, Morselli C, Casero G, Gavino D, Brock S, Ferlinghetti C: A new "keyhole" approach for multilevel anterior lumbar interbody fusion: The perinavel approach technical note and literature review. *Eur Spine J* 27:1956-1963, 2018
- Bayerl SH, Pohlmann F, Finger T, Franke J, Woitzik J, Vajkoczy P: The sagittal spinal profile type: A principal precondition for surgical decision making in patients with lumbar spinal stenosis. *J Neurosurg Spine* 27:552-559, 2017
- Bourgeois AC, Faulkner AR, Bradley YC, Pasciak AS, Barlow PB, Gash JR, Reid Jr WS: Improved accuracy of minimally invasive transpedicular screw placement in the lumbar spine with 3-dimensional stereotactic image guidance: A comparative meta-analysis. *J Spinal Disord Tech* 28:324-329, 2015
- Chen P, Hu Y, Li Z: Percutaneous endoscopic transforaminal discectomy precedes interlaminar discectomy in the efficacy and safety for lumbar disc herniation. *Biosci Rep* 39:BSR20181866, 2019
- Cho JY, Lee SH, Jang SH, Lee HY: Oblique paraspinous approach for thoracic disc herniations using tubular retractor with robotic holder: A technical note. *Eur Spine J* 21:2620-2625, 2012
- Choi KY, Eun SS, Lee SH, Lee HY: Percutaneous endoscopic thoracic discectomy; transforaminal approach. *Minim Invasive Neurosurg* 53:25-28, 2010
- Chun DH, Yoon DH, Kim KN, Yi S, Shin DA, Ha Y: Biomechanical comparison of four different atlantoaxial posterior fixation constructs in adults. *Spine (Phila Pa 1976)* 43:E891-E897, 2018
- Clark JC, Oppenlander ME, Dickman CA: Thoracoscopy: A minimally invasive approach to the anterior thoracic spine. *Barrow Q* 26:13-19, 2016
- Clark JG, Abdullah KG, Steinmetz MP, Benzel EC, Mroz TE: Minimally invasive versus open cervical foraminotomy: A systematic review. *Glob Spine J* 1:9-14, 2011
- Cuzzocrea F, Ivone A, Jannelli E, Fioruzzi A, Ferranti E, Vanelli R, Benazzo F: PEEK versus metal cages in posterior lumbar interbody fusion: A clinical and radiological comparative study. *Musculoskelet Surg* 103:237-241, 2019
- Deyo RA: Treatment of lumbar spinal stenosis: A balancing act. *Spine J* 10:625-627, 2010
- El-Sayed IH, Wu JC, Ames CP, Balamurali G, Mummaneni PV: Combined transnasal and transoral endoscopic approaches to the craniovertebral junction. *J Craniovertebr Junction Spine* 1:44-48, 2010
- Epstein N: Learning curves for minimally invasive spine surgeries: Are they worth it? *Surg Neurol Int* 8:61, 2017
- Goldstein CL, Macwan K, Sundararajan K, Rampersaud YR: Comparative outcomes of minimally invasive surgery for posterior lumbar fusion: A systematic review. *Clin Orthop Relat Res* 472:1727-1737, 2014
- Grasso G: Avoiding lumbar segmental arteries injury in oblique lateral interbody fusion procedure. *World Neurosurg* 139:57-59, 2020
- Heo DH, Lee DC, Park CK: Comparative analysis of three types of minimally invasive decompressive surgery for lumbar central stenosis: Biportal endoscopy, uniportal endoscopy, and microsurgery. *Neurosurg Focus* 46:E9, 2019
- Holmes JF, Miller PQ, Panacek EA, Lin S, Horne NS, Mower WR: Epidemiology of thoracolumbar spine injury in blunt trauma. *Acad Emerg Med* 8:866-872, 2001
- Jazini E, Weir T, Nwodin E, Tannous O, Saifi C, Caffes N, Costales T, Koh E, Banagan K, Gelb D, Ludwig SC: Outcomes of lumbopelvic fixation in the treatment of complex sacral fractures using minimally invasive surgical techniques. *Spine J* 17:1238-1246, 2017
- Jiang J, Gan F, Tan H, Xie Z, Luo X, Huang G, Li Y, Huang S: Effect of computer navigation-assisted minimally invasive direct lateral interbody fusion in the treatment of patients with lumbar tuberculosis: A retrospective study. *Medicine (Baltimore)* 97:e13484, 2018
- Jiang XZ, Tian W, Liu B, Li Q, Zhang GL, Hu L, Li Z, He D: Comparison of a paraspinous approach with a percutaneous approach in the treatment of thoracolumbar burst fractures with posterior ligamentous complex injury: A prospective randomized controlled trial. *J Int Med Res* 40:1343-1356, 2012
- Kepler CK, Rihn JA, Racdliff KE, Patel AA, Anderson DG, Vaccaro AR, Hilibrand AS, Albert TJ: Restoration of lordosis and disk height after single-level transforaminal lumbar interbody fusion. *Orthop Surg* 4:15-20, 2012
- Kolcun JPG, Brusko GD, Basil GW, Epstein R, Wang MY: Endoscopic transforaminal lumbar interbody fusion without general anesthesia: Operative and clinical outcomes in 100 consecutive patients with a minimum 1-year follow-up. *Neurosurg Focus* 46:E14, 2019
- Liu C, Wang J: Learning curve of minimally invasive surgery oblique lumbar interbody fusion for degenerative lumbar diseases. *World Neurosurg* 120:e88-e93, 2018
- Lu T, Lu Y: Comparison of biomechanical performance among posterolateral fusion and transforaminal, extreme, and oblique lumbar interbody fusion: A finite element analysis. *World Neurosurg* 129:e890-e899, 2019
- Mariscalco MW, Yamashita T, Steinmetz MP, Krishnaney AA, Lieberman IH, Mroz TE: Radiation exposure to the surgeon during open lumbar microdiscectomy and minimally invasive microdiscectomy. *Spine (Phila Pa 1976)* 36:255-260, 2011
- Markmiller M: Percutaneous balloon kyphoplasty of malignant lesions of the spine: A prospective consecutive study in 115 patients. *Eur Spine J* 24:2165-2172, 2015

27. McCormack BM, Eyster E, Chiu J, Siemionow K: Minimally disruptive posterior cervical fusion with DTRAX cervical cage for single level radiculopathy results in 10 patients at 1-year. *Spine Res* 2:1-5, 2016
28. Mobbs RJ, Phan K, Daly D, Rao PJ, Lennox A: Approach-related complications of anterior lumbar interbody fusion: Results of a combined spine and vascular surgical team. *Glob Spine J* 6:147-154, 2016
29. Moulding HD, Elder JB, Locelock DM, Zhang Z, Yamada Y, Bilsky MH: Local disease control after decompressive surgery and adjuvant high-dose single-fraction radiosurgery for spine metastases: Clinical article. *J Neurosurg Spine* 13:87-93, 2010
30. Mummaneni PV, Park P, Shaffrey CI, Wang MY, Uribe JS, Fessler RG, Chou D, Kanter AS, Okonkwo DO, Mundis GM, Eastlack RK, Nunley PD, Anand N, Virk MS, Lenke LG, Than KD, Robinson LC, Fu KM, International Spine Study Group (ISSG): The MISDEF2 algorithm: An updated algorithm for patient selection in minimally invasive deformity surgery. *J Neurosurg Spine* 32:221-228, 2019
31. Narain AS, Hijji F, Duhancioglu G, Brittany E Haws, Khechen B, Manning BT, Colman MW, Singh K: Patient perceptions of minimally invasive versus open spine surgery. *Clin Spine Surg* 31:E184-E192, 2018
32. Oltulu I, Cil H, Ulu MO, Deviren V: Clinical outcomes of symptomatic thoracic disk herniations treated surgically through minimally invasive lateral transthoracic approach. *Neurosurg Rev* 42:885-894, 2019
33. Oppenheimer JH, DeCastro I, McDonnell DE: Minimally invasive spine technology and minimally invasive spine surgery: A historical review. *Neurosurg Focus* 27:E9, 2009
34. Overvest GM, Peul WC, Brand R, Koes BW, Bartels RH, Tan WF, Arts MP, Leiden-The Hague Spine Intervention Prognostic Study Group: Tubular discectomy versus conventional microdiscectomy for the treatment of lumbar disc herniation: Long-term results of a randomised controlled trial. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 88:1008-1016, 2017
35. Ozgur BM, Aryan HE, Pimenta L, Taylor WR: Extreme Lateral Interbody Fusion (XLIF): A novel surgical technique for anterior lumbar interbody fusion. *Spine J* 6:435-443, 2006
36. Quraishi NA, Gokaslan ZL, Boriani S: The surgical management of metastatic epidural compression of the spinal cord. *J Bone Joint Surg B* 92:1054-1060, 2010
37. Park P, Wang MY, Lafage V, Nguyen S, Ziewacz J, Okonkwo DO, Uribe JS, Eastlack RK, Anand N, Haque R, Fessler RG, Kanter AS, Deviren V, La Marca F, Smith JS, Shaffrey CI, Mundis Jr GM, Mummaneni PV, International Spine Study Group: Comparison of two minimally invasive surgery strategies to treat adult spinal deformity. *J Neurosurg Spine* 22:374-380, 2015
38. Patel PD, Canseco JA, Houlihan N, Gabay A, Grasso G, Vaccaro AR: Overview of minimally invasive spine surgery. *World Neurosurg* 142:43-56, 2020
39. Peh S, Chatterjea A, Pfarr J, Schäfer JP, Weuster M, Klüter T, Seekamp A, Lippross S: Accuracy of augmented reality surgical navigation for minimally invasive pedicle screw insertion in the thoracic and lumbar spine with a new tracking device. *Spine J* 20:629-637, 2020
40. Phillips FM, Isaacs RE, Rodgers WB, Khajavi K, Tohmeh AG, Deviren V, Peterson MD, Hyde J, Kurd M: Adult degenerative scoliosis treated with XLIF clinical and radiographical results of a prospective multicenter study with 24-month follow-up. *Spine (Phila Pa 1976)* 38:1853-1861, 2013
41. Ponce-Gómez JA, Oretaga-Porcayo LA, Soriano Baron HE, Sotomayor-González A, Arriada-Mendicoa N, Gómez-Amador JL, Palma-Díaz M, Barges-Coll J: Evolution from microscopic transoral to endoscopic endonasal odontoidectomy. *Neurosurg Focus* 37:E15, 2014
42. Ray WZ, Krisht KM, Dailey AT, Schmidt MH: Clinical outcomes of unstable thoracolumbar junction burst fractures: Combined posterior short-segment correction followed by thoracoscopic corpectomy and fusion. *Acta Neurochir (Wien)* 155(7):1179-1186, 2013
43. Sahai N, Changoor S, Dunn CJ, Sinha K, Hwang KS, Michael Faloon M, Emami A: Minimally invasive posterior cervical foraminotomy as an alternative to anterior cervical discectomy and fusion for unilateral cervical radiculopathy: A systematic review and meta-analysis. *Spine* 44:1731-1739, 2019
44. Salzmann SN, Shue J, Hughes AP: Lateral lumbar interbody fusion outcomes and complications. *Curr Rev Musculoskelet Med* 10:539-546, 2017
45. Seker A, Inoue K, Osawa S, Akakin A, Kilic T, Rhoton Jr AL: Comparison of endoscopic transnasal and transoral approaches to the craniovertebral junction. *World Neurosurg* 74:583-602, 2010
46. Sharif S, Shaikh Y, Peev N: Minimally invasive spinal surgery: How to keep out of trouble. *World Neurosurg* 119:517-526, 2018
47. Siemionow K, Janusz P, Glowka P: Cervical cages placed bilaterally in the facet joints from a posterior approach significantly increase foraminal area. *Eur Spine J* 25:2279-2285, 2016
48. Tajsic T, Patel K, Farmer R, Mannion RJ, Trivedi RA: Spinal navigation for minimally invasive thoracic and lumbosacral spine fixation: Implications for radiation exposure, operative time, and accuracy of pedicle screw placement. *Eur Spine J* 27:1918-1924, 2018
49. Than KD, Park P, Fu KM, Nguyen S, Wang MY, Chou D, Nunley PD, Anand N, Fessler RG, Shaffrey CI, Bess S, Akbarnia BA, Deviren V, Uribe JS, La Marca F, Kanter AS, Okonkwo DO, Mundis Jr. GM, Mummaneni PV, and the International Spine Study Group: Clinical and radiographic parameters associated with best versus worst clinical outcomes in minimally invasive spinal deformity surgery. *J Neurosurg Spine* 25:21-25, 2016
50. Thayaparan GK, Owbridge MG, Thompson RG, D'Urso PS: Designing patient-specific 3D printed devices for posterior atlantoaxial transarticular fixation surgery. *J Clin Neurosci* 56:192-198, 2018
51. Theologis AA, Tabaraee E, Toogood P, Kennedy A, Birk H, McClellan RT, Pekmezci M: Anterior corpectomy via the mini-open, extreme lateral, transpoas approach combined with short-segment posterior fixation for single-level traumatic lumbar burst fractures: Analysis of health-related quality of life outcomes and patient satisfaction. *J Neurosurg Spine* 24:60-68, 2016



52. Turner JD, Akbarnia BA, Eastlack RK, Bagheri R, Nguyen S, Pimenta L, Marco R, Deviren V, Uribe J, Mundis Jr GM: Radiographic outcomes of anterior column realignment for adult sagittal plane deformity: A multicenter analysis. *Eur Spine J* 24:427-432, 2015
53. Wait SD, Fox DJ, Kenny KJ, Dickman CA: Thoracoscopic resection of symptomatic herniated thoracic discs: Clinical results in 121 patients. *Spine (Phila Pa 1976)* 37:35-40, 2012
54. Williams RW: Microlumbar discectomy: A conservative surgical approach to the virgin herniated lumbar disc. *Spine (Phila Pa 1976)* 3:175-182, 1978
55. Xiaobing Z, Xingcheng L, Honggang Z, Xiaoqiang C, Qidong Y, Haijun M, Hejun Y, Bisheng W: "U" route transforaminal percutaneous endoscopic thoracic discectomy as a new treatment for thoracic spinal stenosis. *Int Orthop* 43:825-832, 2019
56. Yang Z, Yang Y, Zhang Y, Chen Y, Shen Y, Han L, Xu D, Sun H: Minimal access versus open spinal surgery in treating painful spine metastasis: A systematic review. *World J Surg Oncol* 13:68, 2015
57. Yu X, Li L, Wang P, Yin Y, Bu B, Zhou D: Intraoperative computed tomography with an integrated navigation system in stabilization surgery for complex craniovertebral junction malformation. *J Spinal Disord Tech* 27:245-252, 2014
58. Zhou RP, Mummaneni PV, Chen KY, Lau D, Cao K, Amara D, Zhang C, Dhall S, Chou D: Outcomes of posterior thoracic corpectomies for metastatic spine tumors: An analysis of 90 patients. *World Neurosurg* 123:e371-e378, 2019