

Spinal Cerrahide İntraoperatif Ultrasonografi

Gönül Güvenç¹

Özet

Teknolojik ilerlemelerin bir sonucu olarak intraoperatif ultrasonografi (IOUS), omuriliği içeren birçok operasyonda giderek daha fazla gereksinim hâline gelmiştir. IOUS, cerrahın ameliyat sırasında omurilik, dural kese ve omuriliğin ventral yüzeyindeki lezyonları kolaylıkla saptamasına ve değerlendirmesine olanak tanır. İntramedüller ve ekstrapedüller tümörler, vasküler malformasyonlar, hematomlar, apseler, kistler, sirinksler, disk hernileri ve osteofitler ultrason rehberliğinde güvenle tespit edilip cerrahi olarak yönetilebilir. IOUS ayrıca dejeneratif servikal spinal stenoz ve travmaya bağlı spinal kord basılarında dekompresyonun yeterliliğinin değerlendirilmesine; Chiari tip 1 malformasyonunda servikomedüller bileşke dekompresyonu sırasında BOS akımının izlenmesine; minimal invaziv kateter ve şant yerleştirilmesine olanak sağlar. Son yıllarda 3B, renkli Doppler, kontrastlı ultrasonografi, preoperatif MR görüntüleriyle füzyon, navigasyonlu ultrason ve elastografi gibi ultrason modalitelerinin intraoperatif kullanımıyla ilgili umut verici sonuçlar bildirilmektedir. Nöronavigasyon sistemleri ile intraoperatif MR/BT'nin ortaya çıkmasına karşın, IOUS gerçek zamanlı görüntüleme sağlaması, maliyet etkinliği ve erişilebilirliği sayesinde önemli bir seçenek olmaya devam etmektedir. Bu yazı, spinal cerrahide IOUS kullanımının klinik uygulamalarını ve metodolojisini gözden geçirmeyi amaçlamaktadır.

1. Giriş

1980'li yılların başlarında Chandler ve arkadaşları nöroşirürjide intraoperatif ultrasonografi (IOUS) kullanımına öncülük ettiler (1). 1982'de Dohrmann ve Rubin spinal kord siringomyeli , kist ve tümörlerde IOUS kullanımı ile ilgili ilk raporlarını sundular. Dura açılmadan önce, cerrahın intradural alanı keşfedildiğinin ve 7,5 MHz'lik bir dönüştürücü ile santral

1 Doç. Dr., Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Anabilim Dalı, Muğla/ Türkiye, drgonul35@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9382-8610

kanal ve rootletler dahil olmak üzere normal omuriliğin görüntülenebildiğini hatta bazı vakalarda ön ve arka spinal arterlerin bile görüntülenebildiğini bildirdiler. Siringomyelide sıvı dolu boşlukların görülebilir, drene edilebilir ve şantlanabilir, kist ve tümörlerin boşaltılabilir olduğunu raporladılar (2). Masuzawa ve arkadaşlarının raporları bu çalışmayı destekler nitelikteydi. Her iki çalışma grubu, spinal cerrahide IOUS kullanımına öncülük etmişlerdir (3). 1990'ların başlarında, Epstein ve arkadaşları, intraoperatif sonografinin spinal kord neoplazmlarının, rezeksiyonunda daha iyi yönlendirerek, postoperatif nörolojik fonksiyonun iyileştirildiğini, radikal rezeksiyona izin verdiğini bildirdiler. Ayrıca myelotomi alanının en iyi şekilde belirlenmesine izin verdiğini belirtmektedirler (4). Spinal cerrahide, daha yeni ve son teknoloji navigasyon ve intraoperatif MR gibi görüntüleme yöntemlerine rağmen, IOUS diğer tekniklere göre maliyet verimlilik, kullanım kolaylığı gibi avantajlarıyla kullanılmaya, ek olarak yumuşak doku ve patolojilerinin gerçek zamanlı görselleştirilmesinde tek yöntem olmaya devam etmektedir (5,6).

Ivanov ve arkadaşları, MR teknolojisinde gelişmelerle birlikte spinal tümörler, nörolojik defsite neden olan büyük tümörlerden, MR ile erken veya tamamen insidental saptanan küçük tümörlere evrildiğini, ameliyat esnasında tümör yerini belirleyebilmenin giderek daha önemli hale geldiğini belirtmektedirler. Yazarlara göre, doppler teknikleri, tümör veya vasküler lezyonlardaki besleyici arterleri ve komşu vasküler yapıları göstermede faydalıdır. Kontrastlı ultrasonografi, akış dinamiklerinin değerlendirilmesinde, tümör ile normal doku sınırının belirlenmesinde ve rezidü tümörü tespit etmede faydalıdır. Kontrastlı ultrasonun navigasyonla birleştirilmesi, lezyonların üç boyutlu lokalize edilmesine olanak sağlar (7). Prada ve arkadaşları son yıllarda tanımlanan farklı IOUS modalitelerini (B modu, ameliyat öncesi elde edilen MRI ile füzyon görüntüleme, doppler, kontrastlı ultrasonografi (CEUS) ve elastosonografi gibi), spinal menenjiom cerrahisinde kullanmışlar ve intraoperatif uygulamaları görselleştirmişlerdir (8). Bu yazıda spinal cerrahide, intramedüller tümör ve diğer lezyonların cerrahilerinin yanı sıra dejeneratif spinal kord basısı ve travmatik basıya bağlı dekompresyon cerrahisi ve chiari malformasyonu dekompresyon cerrahisinde intraoperatif ultrason kullanımı ile ilgili literatür gözden geçirilecektir.

2. İntraoperatif Ultrasonografi Görüntülemede Normal Spinal Kord

Sosna ve arkadaşları, normal spinal kordun IOUS görüntülemede, "Yüzeyel dura, iç yüzünde aneşik BOS bulunan ekojenik bir halka gibi görünür. Dural tabaka içinde, omurilik homojen düşük seviyeli ekolar

gösterir ve omuriliğin yüzeyinde parlak ekojenik bir çizgiyle çevredeki BOS mesafesinden ayrılır. Omuriliğin santral kanalı , ekojenik bir yapı olarak tanımlanır. Santral kanalın merkezi konumu, omurilik içi patoloji varlığının faydalı bir göstergesi olarak hizmet eder , çevredeki sinir yolları ekojendir ve özellikle konuş medüllaris seviyesinde belirginleşir, uzun ekseninde parlak doğrusal yankılar olarak görünür” şeklinde olduğu belirtilmektedir (9). Klinik çalışmalarda, omuriliğin normal BOS boşluklarının açık olup olmadığına, santral kanalın açık ve orta hatta olup olmadığına ve spinal kordun normal pozisyonunda olup olmadığına ve anormal doku ekojenitesinin tanınması ve sınırlarının belirlenmesine odaklanılmıştır.

3. Spinal Cerrahide İntraoperatif Ultrasonografi Kullanım Alanları

3.1. Spinal kord tümörü cerrahisi

Omurilik lezyonlarının sonografik görünümü, yerleşim yerine göre değişebilir olmasına rağmen , belirli görüntüleme bulguları iyi bir şekilde tanımlanmıştır. Literatüre göre, intramedüller tümöral lezyonun solid ve kistik bölümleri bulunabilir. Tümöral lezyona, sirinks kavitesi eşlik edebilir. Kistler septa içerebilir. Tümöral lezyon omuriliğin herhangi seviyesinde bulunabilir (10). İntramedüller tümörler, solid olduklarında, kordun içinde artmış ve bazen homojen olmayan ekojeniteye sahip alanlar olarak görünür. Gliomlar, metastatik tümörler hiperekoik olarak görünür. Ependimom, astrositom ve dermoid tümörler kalsifiye alanlar içerebilir. Filum terminale kökenli tümörlerin görüntülenmesi, patolojik dokuyu ayırt etmek açısından daha zor olabilir (11). Fokal kord genişlemesi ve santral kanal tıkanıklığı, neoplazmin intraoperatif tanınmasında değerli ipuçları verir. Ekstramedüller lezyonlar genellikle spinal korda göre hiperekoiktir ve sıklıkla sinir kökleri dahil olmak üzere bitişik yapılar yer değiştirir (12,13). Ivanov ve arkadaşları, IOUS’de aksiyel kesitlerin, en iyi şekilde posterior orta hattı, distal ve özellikle ependimomlarda sınırını çevreleyen kistleri ve dentat ligamanın tutunduğu yerleri gösterdiğini, sagittal görüntülerin tümörün kraniokaudal yayılımını belirlediğini, bu nedenle myelotominin uzunluğunu yönlendirdiğini bildirmektedirler. Ayrıca kordun posterior sulkusunun , ultrasonun renk modunun iyileştirildiğinde daha iyi teyit edildiğini , sulkusda seyreden orta hat vasküler yapılarının yüksek frekans ayarıyla (10-12 MHz) görüntülenebildiğini, bu yöntemin özellikle tümörün kaudal ve kranial uçlarında ve infiltre olmuş bölgeleri belirlemede faydalı olduğunu belirttiler (7). Keleş ve arkadaşları, spinal kord tümörünün boyutuna göre yapılan hemilaminoplastinin yeterli olup olmadığının, pamukoid kılavuzlu IOUS tekniği ile belirlenebileceğini, lezyonun seviyesi belirlendikten sonra

posterior median sulkus veya seçilmiş durumlarda posterior lateral veya dorsal kök giriş bölgeleri kullanılarak tümöre ulaşılabilineceğini belirtmektedirler (14).

3.2. Dejeneratif servikal spinal dar kanal dekompresyon cerrahisi

Servikal dejeneratif spinal dar kanalda, bir ve iki seviyeli dar kanal için tek başına laminektomi önerilmektedir. İki seviyeden fazla dar kanal için, dekompresyonla birlikte, omurga aksını düzeltmeye yönelik ek enstrümantasyon yerleştirme önerilmektedir. MR kontrollü çalışmalarda, dekompresyon cerrahisi ile spinal kordu çevreleyen subaraknoid boşluğun tek başına görünümünün düzelmesinin, klinik iyileşmeyi sağlamak için yeterli kabul edilmiştir (15). İntraoperatif ultrason, hem spinal kord tümörü cerrahisinde hem de omurganın dejeneratif hastalıkları için yapılan cerrahilerde, omurilik ve çevresindeki BOS mesafesini en iyi şekilde görüntülemeye doğrudanmıştır. Servikal spinal dar kanal dışında IOUS'un torakal seviye cerrahilerinde de kullanıldığı belirtilmektedir. Kordun bu seviyelerde morbidite risklerine açık olması nedeniyle operasyonun güvenliğinin, gerçek zamanlı IOUS kullanımı ile önemli ölçüde artırılabilirliği belirtilmektedir (16,17,18). Biczok ve arkadaşları, 29 hastada servikal dar kanal dekompresyonu cerrahisinde IOUS'nu kullandılar. Dekompresyon yeterliliğinin kontrolünde, 4-10 MHz mod ayarlı prob ile aksiyel ve sagittal yönde değerlendirme yaptıklarını, ultrasonda omuriliğin etrafında serbest subaraknoid alan sağlanana kadar dekompresyona devam ettiklerini belirtmektedirler (19). Kawakami ve arkadaşları, servikal miyelopati 49 hastada omuriliği değerlendirmek için ioUS kullandılar. İntraoperatif ultrasonografinin, dura ve omuriliğin kalp atış hızıyla hareketlerini, yoğunluk ve modda değişkenlikler gösterdiğini, omurilik hareketinin sadece anterior spinal arter pulsasyonu ile değil başka faktörlerden de etkilenebileceğini, kompresyon varlığında dural pulsasyonların takip etmek için ultrasonun oldukça faydalı olduğunu bildirdiler (20). Kimura ve arkadaşları, dura materin pulsasyonel hareketlerinin, omurilik subaraknoid aralıkta dış kompresyon olmadan serbestleştiği işareti olduğu yorumlanmış olmakla birlikte, pulsasyonun restorasyonu ile yeterli dekompresyon arasındaki ilişkinin henüz kanıtlanmadığını belirterek, IOUS görüntülerinin kantitatif analizi temelinde, omurilik dekompresyonu derecesi ile omurilik ve dura mater pulsasyonları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. 85 hastada servikal laminoplasti uyguladılar. Omurilik dekompresyon durumunu sınıflandırdılar; Tip 1 (temas yok, omuriliğin ventral tarafında subaraknoid boşluk korunmuş), Tip 2 (temas ve ayrılma, omurilik servikal omurganın ön elemanı ile hem temas gösterdiği hem de ayrıldığı) ve Tip 3 (temas

var, omurilik servikal omurganın ön elemanı ile sürekli temas gösterdiği). Omurilik ve dura dinamiklerini, otomatik video takibi yazılımı kullanılarak analiz ettiklerini belirttiler. Omurilik pulsasyon genliğinin ile motor fonksiyon iyileşmesiyle orta düzeyde korele olduğunu bildirdiler (21).

Matsumaya ve arkadaşları, dekompresyon sonrasında omurilik genişlemesini, anında ve kademeli genişleme olarak iki aşamada olduğunu tanımladılar. IOUS ve BT’de omurilik kesitsel alanı ile klinik iyileşmeyi karşılaştırdılar. Siddetli kompresyon ve zayıf iyileşme grubunun, şiddetli kompresyon iyi klinik iyileşme grubuna göre omurilikde önemli ölçüde daha küçük kesitsel alana sahip olduğunu bildirdiler (22). Mihara ise laminoplastide, IOUS ile yaptıkları omuriliğin ventralindeki boşluğun restorasyon desenlerine dayanan sınıflandırma sistemlerinin ,servikal dar kanallı myelopatide nörolojik iyileşmeyi öngörmede pratik olduğunu belirttiler (23). Schar ve arkadaşları, laminektomi sonrası her vakada omurilik ve sinir köklerinin mükemmel yüksek çözünürlüklü IOUS görüntülerinin elde edilebildiğini, IOUS’un tüm olgularda fokal rezidüel kompresyonun genişletilmiş dekompresyonu, omuriliğin önde yerleşmiş yapılardan arkaya kaymasının doğrulanması ve simetrik ve ritmik omurilik pulsasyonlarının görselleştirilmesinin, yeterli dekompresyonun doğrulanması olarak tanımladılar (24).

3.3. Servikal spinal kord travması dekompresyon cerrahisi

Crutchfield’in 1954’te “Omuriliği dekompresyon etmenin ve korumanın en basit, en güvenli ve en etkili yolu omurganın normal hizasını yeniden sağlamaktır” (25) diye yazmasından bu yana ilk klinik çalışmalar, spinal kord travmatik hasarında, cerrahi dekompresyonun, kan akışının ve uyarılmış potansiyellerin düzeltilmesi yoluyla ikincil omurilik hasarının azaltılabileceğini göstermiştir (26,27). Travmada servikal spinal kord basısında, ameliyat zamanlamasına çok fazla dikkat çekilmiş olsa da, cerrahi dekompresyonun tekniği ve doğrulanması yeterince çalışılmamıştır (28). Uzun yıllar boyunca, dekompresyonun standart, iç fiksasyonla anatomik hizalanmanın yeniden sağlanması olduğu izlenimini edinildi. Ancak, yakın tarihli bir çalışma, 184 tam motor kayıplı hastanın MR’nda yeterli dekompresyonun tek önemli öngörücüsünün laminektomi olduğunu göstermiştir (29). Omurilik dekompresyonunun değerlendirilmesinde her ne kadar MR , IOUS’a kıyasla üstün çözünürlük ve değerlendirme sağlasa da gerçek zamanlı değildir. IOUS, omurilik yaralanmalarında 1980’lerin başından beri kullanılmaktadır (30). Erken çalışmalarda, omuriliğin ve spinal kanalın görünümünü tanımlanmış, travmatik ve diğer omurga bozukluklarında IOUS’in faydası bildirilmiştir (31). Mirvis ve Geisler, servikal omurilik yaralanması olan 29 hastada IOUS

bulgularını bildirdi. Lezyonları 0'dan 4'e kadar bir ölçekte ekokojeniteye göre derecelendirdiler ve ASIA motor skoruyla bir korelasyon bildirdiler (32). İntraoperatif ultrasonografi ile dekompresyon değerlendirmesinde, tüm laminektomi yatağı boyunca omuriliğin hem dorsal hem de ventral tarafında subaraknoid boşluğun görselleşmesi durumunda "yeterli" olarak değerlendirilmektedir(33).

3.4. Chiari Tip 1 malformasyonu dekompresyon cerrahisi

Chiari Tip I malformasyonunun (CMI) cerrahi tedavisi standartlaştırılmamıştır. Mevcut cerrahi teknikler arasında en yaygın olarak uygulananı, suboksipital kraniektomi, C1 laminektomi ve duraplastiden oluşan posterior fossa dekompresyonudur (34). Kemik dekompresyonunun boyutu ve serebellar tonsillerin küçültülmesi veya rezeksiyonu konusunda tartışmalar halen devam etmektedir. Foramen magnum düzeyinde, servikomedüller bileşkenin dekompresyonunun değerlendirilmesinde, BOS akımını ölçmek, BOS dolaşımını görmek ve vasküler yapıları değerlendirmede IOUS'in renkli doppler özelliği gerçek zamanlı bilgi sağlar. Milhorat ve arkadaşları, Renkli Doppler Ultrasonografi teknolojisiyle, BOS akışının görüntülenmesinin teknik zorluklar yarattığını belirterek bunun sebeplerinin; kanın aksine, BOS'un , hücre ve protein içeriğinin çok düşük olması (bunun ultrason dalgalarının yansımaları sınırlandırdığı), damarlar yerine düzensiz boşluklar ağı üzerinden homojen olmayan akışla düşük hızlı dolaşım olması ve önemli ölçüde ileri geri hareket bileşeni olması söylemektedirler. Bu sorunu çözmek için, Doppler hassasiyetini en üst düzeye çıkarabilen yüksek performanslı ekipman kullanmak gerektiğini bildirdiler (35) . Renkli doppler ultrasonların kan akışını ölçmek için tasarlanmasından dolayı, bu ameliyatlarda BOS akışına göre uyarlanması gerekmektedir. Veri toplama ve yorumlama bu ultrason özelliği için özel eğitim gerektirmektedir.

Chiari malformasyonu dekompresyon cerrahisinde, renkli doppler ultrason kullanımı için varsayımlar ortaya atılmıştır. Bunlardan birincisi, serebellar sıkışma alanının, sıkışmış veya kapanmış subaraknoid boşlukların alanına uymasıydı. Bu varsayımı destekleyen nöroradyolojik kanıtlar, subaraknoid boşluğun silinmesinin serebellar yer değiştirmenin en erken belirtilerinden biri olduğunu göstermektedir. Bir başka varsayım da, yeniden yapılandırılan retroserebellar boşluğun ideal hacminin 8 ila 10 cm³ aralığında olması gerektiği idi. Ancak servikomedüller birleşim yerinde normal BOS akış hızları hakkında hiçbir varsayımda bulunulamazdı (36). Milhorat ve arkadaşlarının çalışmasında; "ölçümler, servikomedüller bileşke dekompresyonundan önce ve sonra elde edilmiştir. Yeterli dekompresyonu olan, dördüncü ventrikülden servikal kord posterioruna doğru kısıtlanmamış ve pulsatil bir BOS akışının

görülebilir kanıtı olan ve yeterli bir duraplasti yapılan hastalarda, optimal bir BOS akış hızına ulaşıldığı varsayılmıştır. Dekompresyon sonrası ortalama tepe hızları, dekompresyon öncesi 0 ila 0,8 cm/s'ye kıyasla 3 ila 5 cm/s arasında değişmekteydi. Dekompresyon sonrası dalga formu izlerindeki bu bulguların varlığı, elde edilen akış hızlarının fizyolojik bir aralıkta olduğunu düşündürmektedir. Postoperatif cine-faz kontrastlı MR, çoğu hastada foramen magnumun önden ve arkadan kısıtlanmamış BOS akışının varlığını doğruladı" şeklinde bildirdiler (37). Brock ve arkadaşları, 49 hastada, belirleyici bir parametre olarak ultrasonografi ile intraoperatif BOS akış ölçümünün etkinliğini değerlendirdiler. 49 hastadan 36'sında (%73) BOS akışı >3 cm/saniye buldular ve bu hastalara duraplasti yapmadılar. Başlangıç akışı <3 cm/s olan 13 hastada (%27), duraplasti ile birlikte dural açıklık yaptılar (38). Mc Girt ve arkadaşları, duraplasti yapılmadan sadece kraniotomi yada kraniektomi ile yeterince tedavi edilebilecek CM-I hastalarının seçiminde, intraoperatif ultrasonografinin etkili olup olmadığını belirlemek için cerrahi deneyimlerini değerlendirdiler. Onlara göre "Orta ila şiddetli tonsiller CM-I bağlamında, tonsillerin ventral ve dorsalindeki subaraknoid boşlukların dekompresyonunu gösteren intraoperatif ultrasonografi, yalnızca kemik dekompresyonunun yeterli olduğu hastaları etkili bir şekilde seçmeyeabilir. Duraplasti, intraoperatif ultrasonografi bulgularından bağımsız olarak C-1 laminasının altına uzanan tonsiller herniasyon vakalarında endike olabilir. Daha belirgin tonsiller herniasyonu olan hastalarda duraplastiyi yönlendirmek için ameliyat sırasında daha objektif serebrospinal sıvı akışı veya hacimsel ölçümler gerekebilir" olarak değerlendirilmiştir (39). Chiari Tip 1 malformasyonlu hastaların foramen magnum dekompresyonu cerrahisinde duranın açılıp açılmayacağı yönünde çalışmalardan bir diğerinde, duranın açılmasının rutin olarak gerekli olmadığı, intraoperatif ultrasonografiden elde edilen bulguları kullanan hasta merkezli bir cerrahi yaklaşımın olumlu sonuçlar vereceği belirtilmektedir (40).

4. Sonuç

İntraoperatif ultrasonografi, nöronavigasyon sistemlerinin ve intraoperatif MR/BT'nin ortaya çıkması nedeniyle, genel nöroşirürjide en az kullanılan yöntem olmasına rağmen, en erişilebilir seçenek olmaya devam etmektedir. Spinal cerrahide, dural açıklığın ve myelotomi yerinin belirlenmesinde, intramedüller tümörlerin rezeksiyon miktarının belirlenmesinde, küçük lezyonların doğru konumlandırılmasında özellikle faydalı bir rehberdir. Vasküler lezyonların, perilezyoner vasküleritenin değerlendirilmesinde ve ayrıca Chiari malformasyonu, servikal spinal dar kanal ve travmatik servikal spinal kord dekompresyonu cerrahisinde, spinal kord çevreleyen subaraknoid

mesafenin açıklığının değerlendirilmesinde, etkin bir görüntüleme aracıdır. Gerçek zamanlı görüntüleme, kolay erişilebilirlik, tekrarlanabilirlik, nispeten düşük maliyet, hızlı öğrenme eğrisi en önemli avantajlarıdır. Spinal cerrahide, potansiyel kanama gibi komplikasyonları erken tanımaya ve tedavi etmeye olanak tanır.

Kaynaklar

1. Chandler WF, Knake JE. Intraoperative use of ultrasound in neurosurgery. *Clin Neurosurg.* 1983;31:550-63. doi: 10.1093/neurosurgery/31.cn_suppl_1.550. PMID: 6388948.
2. Dohrmann GJ, Rubin JM. Intraoperative ultrasound imaging of the spinal cord: syringomyelia, cysts, and tumors--a preliminary report. *Surg Neurol.* 1982 Dec;18(6):395-9. doi: 10.1016/0090-3019(82)90169-0. PMID: 7163957.
3. Masuzawa H, Kamitani H, Sato J, Inoya H, Hachiya J, Sakai F. [Intraoperative application of sector scanning electronic ultrasound in neurosurgery (author's transl)]. *Neurol Med Chir (Tokyo).* 1981 Mar;21(3):277-85. Japanese. doi: 10.2176/nmc.21.277. PMID: 6166883.
4. Epstein FJ, Farmer JP, Schneider SJ. Intraoperative ultrasonography: an important surgical adjunct for intramedullary tumors. *J Neurosurg.* 1991 May;74(5):729-33. doi: 10.3171/jns.1991.74.5.0729. PMID: 2013773.
5. Chua MMJ, Vasudeva VS, Lu Y. Intraoperative Ultrasound in Spinal Surgery. *J Vis Exp.* 2022 Aug 17;(186). doi: 10.3791/58080. PMID: 36062998.
6. Vasudeva VS, Abd-El-Barr M, Pompeu YA, Karhade A, Groff MW, Lu Y. Use of Intraoperative Ultrasound During Spinal Surgery. *Global Spine J.* 2017 Oct;7(7):648-656. doi: 10.1177/2192568217700100. Epub 2017 May 31. PMID: 28989844; PMCID: PMC5624373.
7. Ivanov M, Budu A, Sims-Williams H, Pocata I. Using Intraoperative Ultrasonography for Spinal Cord Tumor Surgery. *World Neurosurg.* 2017 Jan;97:104-111. doi: 10.1016/j.wneu.2016.09.097. Epub 2016 Oct 3. PMID: 27713065.
8. Prada F, Del Bene M, Moiraghi A, Casali C, Legnani FG, Saladino A, Perin A, Vetrano IG, Mattei L, Richetta C, Saini M, DiMeco F. From Grey Scale B-Mode to Elastasonography: Multimodal Ultrasound Imaging in Meningioma Surgery-Pictorial Essay and Literature Review. *Biomed Res Int.* 2015;2015:925729. doi: 10.1155/2015/925729. Epub 2015 May 25. PMID: 26101779; PMCID: PMC4458537.
9. Sosna J, Barth MM, Kruskal JB, Kane RA. Intraoperative sonography for neurosurgery. *J Ultrasound Med.* 2005 Dec;24(12):1671-82. doi: 10.7863/jum.2005.24.12.1671. PMID: 16301724.
10. Maiuri F, Iaconetta G, Gallicchio B, Stella L. Intraoperative sonography for spinal tumors. Correlations with MR findings and surgery. *J Neurosurg Sci.* 2000 Sep;44(3):115-22. PMID: 11126444.
11. Friedman JA, Wetjen NM, Atkinson JL. Utility of intraoperative ultrasound for tumors of the cauda equina. *Spine (Phila Pa 1976).* 2003 Feb 1;28(3):288-

- 90; discussion 291. doi: 10.1097/01.BRS.0000042271.75392.E4. PMID: 12567033.
12. Mimatsu K, Kawakami N, Kato F, Saito H, Sato K. Intraoperative ultrasonography of extramedullary spinal tumours. *Neuroradiology* 1992; 34:440–443.
13. Mirvis SE, Geisler FH. Intraoperative sonography of cervical spinal cord injury: results in 30 patients. *AJR Am J Roentgenol.* 1990 Sep;155(3):603-9. doi: 10.2214/ajr.155.3.2117362. PMID: 2117362.
14. Keleş A, Türe U. Cottonoid-guided intraoperative ultrasonography in neurosurgery: a proof-of-concept single surgeon case series. *Neurosurg Rev.* 2022 Jun;45(3):2289-2303. doi: 10.1007/s10143-021-01727-7. Epub 2022 Feb 3. PMID: 35112223.
15. Hatta Y, Shiraishi T, Hase H, Yato Y, Ueda S, Mikami Y, Harada T, Ikeda T, Kubo T. Is posterior spinal cord shifting by extensive posterior decompression clinically significant for multisegmental cervical spondylotic myelopathy? *Spine (Phila Pa 1976).* 2005 Nov 1;30(21):2414-9. doi: 10.1097/01.brs.0000184751.80857.3e. PMID: 16261118.
16. Nishimura Y, Thani NB, Tochigi S, Ahn H, Ginsberg HJ. Thoracic discectomy by posterior pedicle-sparing, transfacet approach with real-time intraoperative ultrasonography: Clinical article. *J Neurosurg Spine.* 2014 Oct;21(4):568-76. doi: 10.3171/2014.6.SPINE13682. Epub 2014 Jul 18. PMID: 25036220.
17. Tan LA, Lopes DK, Fontes RB. Ultrasound-guided posterolateral approach for midline calcified thoracic disc herniation. *J Korean Neurosurg Soc.* 2014 Jun;55(6):383-6. doi: 10.3340/jkns.2014.55.6.383. Epub 2014 Jun 30. PMID: 25237439; PMCID: PMC4166339.
18. Wessell A, Mushlin H, Fleming C, Lewis E, Sansur C. Thoracic Discectomy Through a Unilateral Transpedicular or Costotransversectomy Approach With Intraoperative Ultrasound Guidance. *Oper Neurosurg.* 2019 Sep 1;17(3):332-337. doi: 10.1093/ons/opy348. PMID: 30476309.
19. Biczok A, Fuetsch M, Siller S, Patzig M, Tonn JC, Zausinger S. Intraoperative ultrasonography in laminectomy for degenerative cervical spondylotic myelopathy: a clinical and radiological evaluation. *Acta Neurochir (Wien).* 2022 Jul;164(7):1873-1881. doi: 10.1007/s00701-022-05232-8. Epub 2022 May 10. PMID: 35536511; PMCID: PMC9233640.
20. Kawakami N, Mimatsu K, Kato F, Sato K, Matsuyama Y. Intraoperative ultrasonographic evaluation of the spinal cord in cervical myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976).* 1994 Jan 1;19(1):34-41. doi: 10.1097/00007632-199401000-00007. PMID: 8153801.
21. Kimura A, Seichi A, Inoue H, Endo T, Sato M, Higashi T, Hoshino Y. Ultrasonographic quantification of spinal cord and dural pulsations during

- cervical laminoplasty in patients with compressive myelopathy. *Eur Spine J*. 2012 Dec;21(12):2450-5. doi: 10.1007/s00586-012-2430-9. Epub 2012 Jul 21. PMID: 22820915; PMCID: PMC3508211.
22. Matsuyama Y, Kawakami N, Mimatsu K. Spinal cord expansion after decompression in cervical myelopathy. Investigation by computed tomography myelography and ultrasonography. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1995 Aug 1;20(15):1657-63. doi: 10.1097/00007632-199508000-00002. PMID: 7482013.
 23. Mihara H, Kondo S, Takeguchi H, Kohno M, Hachiya M. Spinal cord morphology and dynamics during cervical laminoplasty: evaluation with intraoperative sonography. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007 Oct 1;32(21):2306-9. doi: 10.1097/BRS.0b013e318155784d. PMID: 17906570.
 24. Schär RT, Wilson JR, Ginsberg HJ. Intraoperative Ultrasound-Guided Posterior Cervical Laminectomy for Degenerative Cervical Myelopathy. *World Neurosurg*. 2019 Jan;121:62-70. doi: 10.1016/j.wneu.2018.09.217. Epub 2018 Oct 9. PMID: 30312813.
 25. CRUTCHFIELD WG. Skeletal traction in treatment of injuries to the cervical spine. *J Am Med Assoc*. 1954 May 1;155(1):29-32. doi: 10.1001/jama.1954.03690190035010. PMID: 13151883.
 26. Aki T, Toya S. Experimental study on changes of the spinal-evoked potential and circulatory dynamics following spinal cord compression and decompression. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1984 Nov-Dec;9(8):800-9. doi: 10.1097/00007632-198411000-00006. PMID: 6528294.
 27. Vlajić I. Microangiographic observations of morphological vessel changes after experimental spinal cord trauma. *Adv Neurol*. 1978;20:451-60. PMID: 676909.
 28. Badhiwala JH, Wilson JR, Witiw CD, Harrop JS, Vaccaro AR, Aarabi B, Grossman RG, Geisler FH, Fehlings MG. The influence of timing of surgical decompression for acute spinal cord injury: a pooled analysis of individual patient data. *Lancet Neurol*. 2021 Feb;20(2):117-126. doi: 10.1016/S1474-4422(20)30406-3. Epub 2020 Dec 21. PMID: 33357514.
 29. Aarabi B, Olexa J, Chryssikos T, Galvagno SM, Hersh DS, Wessell A, Sansur C, Schwartzbauer G, Crandall K, Shanmuganathan K, Simard JM, Mushlin H, Kole M, Le E, Pratt N, Cannarsa G, Lomangino CD, Scarborough M, Aresco C, Curry B. Extent of Spinal Cord Decompression in Motor Complete (American Spinal Injury Association Impairment Scale Grades A and B) Traumatic Spinal Cord Injury Patients: Post-Operative Magnetic Resonance Imaging Analysis of Standard Operative Approaches. *J Neurotrauma*. 2019 Mar 19;36(6):862-876. doi: 10.1089/neu.2018.5834. Epub 2018 Oct 9. PMID: 30215287; PMCID: PMC6484360.
 30. Ganau M, Syrmos N, Martin AR, Jiang F, Fehlings MG. Intraoperative ultrasound in spine surgery: history, current applications, future develop-

- ments. *Quant Imaging Med Surg*. 2018 Apr;8(3):261-267. doi: 10.21037/qims.2018.04.02. PMID: 29774179; PMCID: PMC5941206.
31. St Amour TE, Rubin JM, Dohrmann GJ. The central canal of the spinal cord: ultrasonic identification. *Radiology*. 1984 Sep;152(3):767-9. doi: 10.1148/radiology.152.3.6463259. PMID: 6463259.
32. Mirvis SE, Geisler FH. Intraoperative sonography of cervical spinal cord injury: results in 30 patients. *AJR Am J Roentgenol*. 1990;155(3):603-609
33. Tat J, Tat J, Yoon S, Yee AJM, Larouche J. Intraoperative Ultrasound in Spine Decompression Surgery: A Systematic Review. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2022 Jan 15;47(2):E73-E85. doi: 10.1097/BRS.0000000000004111. PMID: 34474449.
34. Klekamp J, Batzdorf U, Samii M, Bothe HW. The surgical treatment of Chiari I malformation. *Acta Neurochir (Wien)*. 1996;138(7):788-801. doi: 10.1007/BF01411256. PMID: 8869706. (1,4,9,15).
35. Milhorat TH, Bolognese PA. Tailored operative technique for Chiari type I malformation using intraoperative color Doppler ultrasonography. *Neurosurgery*. 2003 Oct;53(4):899-905; discussion 905-6. doi: 10.1227/01.neu.0000083591.22113.cb. PMID: 14519223.
36. Grossman RI, Yosem DM: *Neuroradiology: The Requisites*. St. Louis, C.V. Mosby, 1994, pp 149–169.
37. Milhorat TH, Chou MW, Trinidad EM, Kula RW, Mandell M, Wolpert C, Speer MC. Chiari I malformation redefined: clinical and radiographic findings for 364 symptomatic patients. *Neurosurgery*. 1999 May;44(5):1005-17. doi: 10.1097/00006123-199905000-00042. PMID: 10232534.
38. Brock RS, Taricco MA, de Oliveira MF, de Lima Oliveira M, Teixeira MJ, Bor-Seng-Shu E. Intraoperative Ultrasonography for Definition of Less Invasive Surgical Technique in Patients with Chiari Type I Malformation. *World Neurosurg*. 2017 May;101:466-475. doi: 10.1016/j.wneu.2017.02.003. Epub 2017 Feb 10. PMID: 28192262.
39. McGirt MJ, Attenello FJ, Datto G, Gathinji M, Atiba A, Weingart JD, Carson B, Jallo GI. Intraoperative ultrasonography as a guide to patient selection for duraplasty after suboccipital decompression in children with Chiari malformation Type I. *J Neurosurg Pediatr*. 2008 Jul;2(1):52-7. doi: 10.3171/PED/2008/2/7/052. PMID: 18590396.
40. Dherijha MSA, Waqar M, Palin MS, Bukhari S. Foramen magnum decompression in adults with Chiari type I malformation: use of intraoperative ultrasound to guide extent of surgery. *Br J Neurosurg*. 2024 Aug;38(4):853-856. doi: 10.1080/02688697.2021.1981238. Epub 2021 Oct 4. PMID: 34605339.