

Derleme

Nörolojik Cerrahilerde İntraoperatif Nöromonitörizasyon; Gelişimi, Yeri ve Sonuçları

Intraoperative Neuromonitoring in Neurological Surgery; Development, Place and Results

Derya KARAOĞLU GÜNDOĞDU¹, Fatih ÇALIŞ²

¹Sincan Dr Nafiz Körez Devlet Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniği, Ankara, Türkiye

²Koç Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

ÖZ

Beyin ve sinir cerrahisinin özellikle kraniyal ve spinal ameliyatları, uğraştıkları alan sebebi ile, yüksek riskli cerrahiler olarak bilinir. Teknoloji ilerledikçe bu riskleri minimize etmek için birçok uygulamaya başvurulmuştur. İntraoperatif görüntüleme (İOG) bunlardan biridir. Ancak İOG cerraha durum hakkında bilgi vermektedir. Oysa süreç hakkında bilgi almak nöral doku hasarının önüne geçmek adına daha önemli ve önceliklidir. Tüm bu ihtiyaçlar doğrultusunda, nörofizyolojideki gelişmeleri takiben intraoperatif nöromonitörizasyon (IONM) kullanımı başlamıştır. Derlemede IONM kullanımı, gelişimi ve sonuçları irdelenecektir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Nörofizyoloji, Nöromonitörizasyon, Uyarılmış potansiyeller

ABSTRACT

Cranial and spinal surgeries are known as high-risk surgeries because of the area they deal with in neurosurgery. As technology has advanced, many applications have been used to minimize these risks. Intraoperative imaging (IOI) is one of these. However, IOI provides information about the situation to the surgeon whereas getting information about the process is more important and has priority in order to prevent damage to the neural tissue. In line with all these needs, and following the developments in neurophysiology; the use of intraoperative neuromonitoring (IONM) has begun. In this article, IONM usage, development, indications and results will be evaluated.

KEYWORDS: Neurophysiology, Neuromonitoring, Evoked potentials

■ GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerin ışığı altında hekimlerin kullandığı tanı ve tedavi araçları her geçen gün artmaktadır. Mikroskobun beyin ve sinir cerrahisi ameliyatlarında yerini alması ile mikroşirürjinin tanımlanması gibi, teknolojiye her yenilik cerrahi uygulamaların ve endikasyonların da yeniden değerlendirilmesine ve yeni tanımların yapılmasına sebep

olmuştur. Son yıllarda elektrofizyolojik incelemelerin ameliyat sırasında nöral fonksiyonları monitörize edebilmesi, intraoperatif nöromonitörizasyon (IONM) kavramını ve bu kavramın beyin ve sinir cerrahisindeki yerini tartışılır kılmaktadır. Bu derlemede İONM kavramına yakından bakmak amaçlanmaktadır; sözkonusu teknolojinin gelişimi, şu anki kullanım alanları, sonuçları ve gelecek beklentileri tartışılacaktır.



Yazışma adresi: Derya KARAOĞLU GÜNDOĞDU

E-posta: derya853@hotmail.com

■ TARİHÇE

Elektrofizyolojik incelemelerin intraoperatif nöromonitörizasyona kadar olan gelişim süreci şu şekildedir; Penfield 1930' lu yıllarda somatosensoryel sistemi monitörleme üzerine çalışmıştır (16), 1950'li yıllarda da direkt stimülasyon uygulanarak epileptik odakların belirlenmesi hedeflenmiş ve başarılı sonuçlar bildirilmiştir, 1960'ların sonunda vestibüler schwannom cerrahisinde fasiyal sinirin İONM' u başarılı bir şekilde yapılmış ve bu uygulama 1980'lerde yaygınlaşmıştır (6,16).

Omurga ve omurilik cerrahisinde ise hastanın operasyon sırasındaki nörolojik muayenesinin değerlendirilmesi öncelikle "uyandırma testi" denilen bir yöntem ile sağlanmıştır. Bu yöntemi, Vazuella ve Stagnara, 1973 yılında, ameliyat esnasında hastanın uyandırılıp muayenesi yapılarak omurilik işlevselliği hakkında bilgi edinilmesi şeklinde tanımlamıştır (21). Ancak hastanın sadece o anlık nörolojik muayenesi hakkında bilgi vermesi, cerrahi süreç esnasında hastanın yeniden uyutulması, bu esnada anestezide bağlı problemlerin ortaya çıkabilmesi bu testin dezavantajları olarak belirtilmiştir (21). Bu dezavantajlardan dolayı cerrahlar başka bir yöntem arayışına girmiştir.

Omurga cerrahisinde İONM'un kullanımı 1970'lerde skolyoz cerrahisinde somatosensoryel uyandırılmış potansiyellerin (SEP) kaydedilmesiyle olmuştur. SEP ile periferik sinirden başlayarak kordun dorsal ve lateral kısımlarına yol alan duyu yolları izlenebilmekte, ancak motor işlevsellik değerlendirilememektedir. Ayrıca SEP verilerinde herhangi bir nörolojik hasarlanma durumunda 4-30 dakikalık bir gecikme olabileceği bildirilmiş ve bu eksikliklerden dolayı motor yolların da izlenmesi gerektiği tespit edilmiştir (13).

Anestezi alanında yaşanan gelişmeler; total IV anestezinin geliştirilmesi ve inhalasyon ajanlarının anestezide yerini alması, zamanla kas gevşeticilere ihtiyacın azalması; motor işlevleri de izlenebilir kılmıştır. Motor uyandırılmış potansiyeller (MEP) omuriliğin ventral kısmında yer alan motor yollar hakkında bilgi vermektedir.

MEP ve SEP bir uyarı ile elde edilen verileri göstermektedir, omuriliğin sürekli olarak gözlenebilmesi için sürekli EMG (free-run EMG) yöntemi de bu incelemelere eklenmiştir. Her üç modaliteyle birlikte duyarlılık ve özgüllük %90-100 düzeylerine çıkmıştır (11).

■ YÖNTEM

Uyarılmış potansiyeller latans ve amplitüdle ifade edilmektedir. Latansta %10'dan fazla gecikme ve amplitüde %50'den fazla düşüş genel olarak nörolojik hasarın göstergesidir. İONM uygulamasının nöroşirürjideki yerini anlamak için öncelikler bazı kavramlara açıklık getirmek gereklidir;

Somatosensoryel Uyandırılmış Potansiyeller (SEP)

Periferik sinirler ve dermatom reseptörlerinin uyarılması ile elde edilen potansiyellerdir; sadece posterior kolon fonksiyon sonuçları elde edilmektedir (3,4). Dorsal kolon hasarı ile dokunma, vibrasyon, bilinç dışı propriyosepsiyon ve pozisyon duyuları etkilenmektedir. Üst servikal bölge duyu alan veya

beyin sapı somatosensoryel yollarının izlenmesi, genellikle median veya ulnar sinirin el bileğinden monitörizasyonu ile yapılmaktadır. C8 altında spinal cerrahide ise alt ekstremitelerde SEP monitörizasyonu için ayak bileğinde posterior tibial sinir; diz düzeyinden de peroneal sinirin uyarımı yapılmaktadır. Kayıt için servikal vertebra ve saçlı deri kullanılmaktadır (1).

Motor Uyandırılmış Potansiyeller (MEP)

MEP anterior kolonu ilgilendiren izole kortikospinal yolak hasarlarını ve iskemilerini tespit etmektedir. İONM'da MEP kullanımı motor yolların yapısal ve fonksiyonel bütünlüğünü korumada etkilidir (4). Hızlı uyarıya cevap alınabilmesi ve hızlı geri bildirim vermesi cerrahi sırasında büyük ölçüde kolaylık sağlamaktadır. Özellikle servikal ve torakal girişimlerde kullanımı yaygındır (4). MEP için genellikle üst ekstremitelerde abductor policis brevis, alt ekstremitelerde ise tibialis anterior ve abductor hallucis kasları kullanılmaktadır .

Beyin Sapı Uyandırılmış Potansiyelleri (BAEP)

Saçlı derinin verteks bölgesine, kulak arkasına veya kulak memesine birer elektrot yerleştirilerek elde edilen akustik uyarı sonucu oluşan yedi potansiyel değerlendirilmektedir. Bu potansiyeller sırası ile akustik sinir dalgası, dorsal koklear nükleus, superior oliva, lateral lemniskus, inferior kollikulus, rostral mesensefalon veya kaudal talamus ya da talamokortikal projeksiyon ve işleme korteksi hakkında bilgi vermektedir (22). Serebellopontin köşe ve posterior fossa cerrahileri dışında, kraniyoservikal bileşke bölgesi ve C1-C2 cerrahilerinde de BAEP oldukça kullanışlı bir yöntemdir.

Vizüel Uyandırılmış Potansiyeller (VEP)

Göze flaş uyarı verilerek oksipital görme alanından uyarılar alınması prensibi ile çalışsa da özellikle genel anestezi altında flaş uyarı sağlamak da VEP kaydı almak da her zaman mümkün olmamaktadır. Bu bakımdan diğer İONM yöntemlerine göre daha az kullanım alanı mevcuttur. Yine de optik sinir veya traktus optikus içerir pitüiter tümörler, kavernoöz sinüs tümörleri ve bölgenin anevrizmaları gibi operasyon sırasında kullanılabilmektedir (14).

Prob ile Lokal Uyarı ve Selektif Kas Yanıtlarının Ölçümü

Bazı cerrahilerde, özellikle patolojinin elegant bölgelere yakın olduğu durumlarda, bu bölgelerin tanınması, korunması açısından prob ile zayıf akım şiddetleri kullanılarak lokal uyarılar verip kayıt elde etmek mümkündür. Uyarı tiplerine (monopolar, bipolar, anodal, katodal) alınan yanıtların süresi, şiddeti değişiklik göstererek bilmek istenilen bölge sınırları hakkında bilgi verebilmektedir. Bu yöntem özellikle motor korteks haritalanması, kraniyal sinirlerin ayırt edilmesi ya da spinal yapıların korunması durumlarında tercih edilmektedir.

■ BEYİN VE SINIR CERRAHİSİNDE İONM KULLANIM ENDİKASYONLARI

Intrakraniyal Anevrizmalar

Posterior sirkülasyon anevrizmalarında BAEP ve SEP eş zamanlı kaydedilmesi; anterior dolaşım anevrizmalarında median ve tibial sinir uyarımı ile SEP'lerin kaydedilmesi yöntemi ile iskemi riskinin azaltılması amaçlanmaktadır (10).

Mikrovasküler Dekompresyon Teknikleri

Kranyal sinirlerin etkilendiği nörovasküler kompresyonların cerrahilerinde rutin olarak BAEP ve ilgili kranyal sinir EMG'si ile kayıtlar yapılmaktadır (1,4,10,11,14,22). Bunlardan 8. kranyal sinir, özellikle serebellopontin bölge cerrahilerinde, diğer kranyal sinirlere oranla cerrahi müdahaleden daha fazla etkilenmektedir. BAEP'in işitme fonksiyonlarını korumada etkinliği kanıtlanmıştır (10,15).

Serebellopontin Açık Tümörleri

Vestibüler schwannoma ve epidermoid tümör gibi serebellopontin açık tümörlerinin eksizyonunda en büyük zorluk; koklear ve fasyal sinirin yakın komşulukları ve bu iki sinirin cerrahi sırasındaki manipülasyonlara hassas tepki göstermeleridir. Nitekim serebellopontin köşe tümörü cerrahisi sonrası işitme azlığı ve periferik fasyal paralizisi görülme yüzdeleri yüksektir. Günümüzde BAEP ve fasyal sinir EMG'si peroperatif olarak kullanılarak bu risk en aza indirilmeye çalışılmakta, birçok klinikte İONM olmaksızın bu cerrahiler yapılmamaktadır.

Pedikül Vidaların Stimülasyonu

Cerrah elindeki elektrot ile vidayı uyardığında 6 mA ve altındaki stimülasyon ile sinir kökü uyarılabilir ise enstrümantasyon ya yanlıştır ya da pedikül vidası kemik kırığına sebep olarak ilerlemiştir (1,12).

Konjenital Spinal Lezyonlar

Kauda ekuina lezyonları cerrahisinde SEP ve MEP birlikte kullanılmalıdır. Gergin omurilik (tethered kord), diastematomyeli ve lipom gibi konjenital spinal lezyonlarda özellikler ürogenital ve sfinkter fonksiyonlar hakkında bilgi edinmek önemlidir. Bu amaçla cerrahi süresince; pudental SEP, bulbokavernöz refleks monitörizasyonu ve anal sfinkter kasın MEP değerleri takip edilmektedir (9).

İntramedüller Omurilik Tümörleri

Bu cerrahilerde hasarlanma en sık miyelotomi sırasında olmaktadır. Sadece SEP kullanımı dorsal miyelotomi sırasında hasarı gösterebilir, ancak yeterli değildir. SEP ve MEP birlikte kullanılarak tümör rezeksiyonunun yapılması nöral doku hasarını en aza indirmektedir (18).

Spinal Deformite Cerrahisi

İskemi, kompresyon ya da traksiyona bağlı nörolojik hasarlar İONM ile erken dönemde fark edilebilmekte ve işlem durdurularak durum geriye çevrilebilmektedir. SEP ve MEP' in birlikte kullanımı önerilmektedir.

■ TARTIŞMA

İONM kullanımı son yıllarda birçok kliniğin standart uygulaması haline gelmiştir. Özellikle cerrah, nörofizyolog ve anestezi işbirliği ile yapılan uygulamalarda spesifitesinin %90-100 düzeylerine çıktığı bildirilmiştir (22). İONM kullanımı ile amaçlanan temel hedef kalıcı motor defisit gelişiminin önüne geçmek ve cerrahi sonrası daha az morbidite ile hastayı sağlığına kavuşturmak. İşlevselliği etkileyen düzeyde motor defisiti olan her bireyin gerek fizik tedavi süreci gerek

üretim çarkında yerini alamaması, topluma ekonomik bir yük oluşturmaktadır. Bu bakımdan İONM kullanımının dolaylı olarak ekonomik bir fayda sağladığı da kabul edilmektedir (1,22).

Günümüzde sinir dokusunun hasarlanma ihtimali olan tüm girişimlerde; parotis bezine ilişkin ameliyatlarda fasyal sinirin korunmasından aort anevrizmalarında omurilik infarktını önlemeye kadar multidisipliner olarak İONM uygulama endikasyonu vardır. Bu uygulama ile geçmişten beri süregelen cerrahi yöntemlerin daha güvenilir yapılması ve operasyon sonrası morbiditenin daha az olması amaçlanmaktadır.

Cerrahi sırasında kullanılan yeni teknolojilerin hatasız biçimde uygulanabilmesi için doğru anestezi yöntemlerine ihtiyaç vardır. Yani İONM teknolojisinin sadece kullanımı ve endikasyonları değil doğru yorumlanması ve hasta ile ilgili en doğru sonuçları vermesi de multidisipliner bir sürece bağlıdır. İONM parametrelerinin anesteziye hassasiyeti, ilgili nörolojik yollara ve kullanılan ajanlara bağlı olarak değişmektedir. Ketamin ve etomidat dışındaki tüm anestezi ajanlar, yeterli kadar yüksek dozda verildiklerinde, elektriksel potansiyellerde depresyona neden olmaktadır (20). Anestezi seçimi, İONM ve cerrahi ihtiyaçlara göre belirlense de İONM için genel anestezi şarttır denilebilir. Genel anestezinin 4 evresi vardır; İONM anestezinin idame evresinde uygulanmakta, premedikasyon ve indüksiyon evrelerinde ise cerraha bilgi vermektedir. Bu süreçte parametreleri etkilemeyecek biçimde hareket edebilmesi için anestezistin konuyla ilgili yeterli bilgi ve deneyime sahip olması önemlidir.

İONM sonuçlarında yalancı değerlere sebep olabilecek birçok etken bulunmaktadır. Genel olarak bu etkenlerden MEP' ler SEP' lere göre daha yavaş etkilenmektedir. Aksonal iletimde önemli rol oynayan ısı, bu değişkenlerin başında gelmektedir. Her 1° C düşüş 1 ms kadar uzamaya neden olur, 22° C' nin altında SEP sinyali alınmaz (2). Genel anestezi altında hastanın vücut ısısının 36°C üzerinde ve mümkün olduğunda sabit tutulması İONM yalancı negatif veya pozitif sonuçları engellemede oldukça önemlidir.

Kan akımının genel anestezi altında devamı, potansiyellerin doğru değerlendirilmesi için önemli faktörlerden biridir. Sistemik hipotansiyon, pozisyona bağlı bölgesel kanlanma bozuklukları potansiyellerde düşmeye sebep olmaktadır (8). Nöral dokunun ihtiyacı olan oksijen ve glukozun yeterli düzeyde olması için yeterli doku perfüzyonu şarttır. Kortikal kan akımı 18 ml/100 gr/dak altına inince amplitüdümler azalır, latanslar uzar; SEP' deki düşüş iskeminin habercisidir. Subkortikal ve spinal SEP' ler ise iskemiye daha dirençlidir. Ancak spinal kordun %75'inin anterior spinal arterden kanlanması ve SEP' ler ile spinal kord posteriorunun fonksiyonlarının değerlendirilmesi sebebi ile diğer parametrelere göre iskemiye duyarlılığı daha az kabul edilmektedir (2).

Ventilasyona bağlı İONM değerlerinde değişiklik olabilir ancak pH 7.2'nin üzerinde tutulduğu sürece nöronal etkilenme beklenmemektedir (8). SEP değerlerinde değişiklik olması için hipokarbinin 20 mmHg' nin altında olması gerektiği bildirilmiştir (5).

Belirgin anemi İONM potansiyellerinin yanlış pozitifliğine sebep olabilmektedir. Hb 7 g/dl altındaki değerlerde fonksiyon

bozukluğu gelişmeye başlamaktadır. Hızlı ve çok miktarda kan kaybı olması, hematokritte %15 azalma olması ile potansiyellerde düşüş başladığı bildirilmiştir (17).

Periferik sinir cerrahisinde İONM uygulamaları ile preganglionik ve postganglionik yaralanmalar birbirinden ayrılabilir. Preganglionik yaralanmalarda uyarılar yüksek amplitüdü ve kısa latanslıdır, postganglionik lezyonlar ise zayıf ve düz seyir gösterir. Postganglionik sinir lezyonlarında aksiyon potansiyelinin korunduğu vakaların %90'ından fazlasında herhangi bir greftlemeye gerek kalmadan sinirin iyileştiği görülmüştür (17). Periferik sinirin bipolar stimülatör ile 5 mV – 10 mV arası yavaş yavaş artırılarak uyarı verilmesi, bu ayrımın yapılmasında kullanılan temel yöntem olup, bu aşamada yüksek değerlerin uygulanması yanlış pozitifliğe sebep olmaktadır (19).

Günümüzde literatürde MEP' e ait yanlış negatif bildirim yok denilecek kadar azdır (7). Bu ifade MEP monitörizasyonunun objektifliğini ve üstünlüğünü gösterse de bu esnada karşılaşılabilecek bazı problemler de vardır. Skalp elektrik stimülasyonu ile çene kaslarının direkt olarak aktive edilmesi sonucu hastanın ısırması bu sorunlardan biridir. Bu amaçla entübasyon sırasında ısırma önleyici bir materyal hastanın ağzına dikkatlice yerleştirilmeli ve ekstübasyon sırasında da materyalin orada olduğu anestezi uzmanı tarafından hatırlanmalıdır. Elektrik uyarımının istenmeyen bir sonucu olan nöbet, kortikal uyarı yapıldığında EEG kayıtlarının da alınması ile önlenmektedir. Kas kasılmalarına bağlı hastanın hareket etmesi, cerrahi en çok etkileyen durumlardan biridir. Bu durumu önlemede en iyi yöntem teknik ekibin cerrah ile koordine çalışmasıdır.

İONM kullanılan operasyonlarda, cerrahi sırasındaki değerlendirme ve cerrahi uyarı, yönlendirme süreci, teknik ekip tarafından yapılmaktadır. Son yıllarda artan ihtiyacı karşılamak için gerekli olan “yetişmiş eleman” sayısına ulaşamaması sebebi ile bazı firmalarca kısa dönem kurslara tabi tutulan, operasyon tecrübesi yeterli olmayan hatta belki de eğitimi bu alanda olmayan ara elemanlarla teknik destek vermeye çalışılmaktadır. Tüm bunların gayri resmi sebepleri arasında “ekonomik getirinin” karşılanmaması ya da kâr indeksinin arttırılmak istenmesi sayılabilir de operasyona yansıyan gerçek, tüm teknik donanım ve teknoloji kullanımına rağmen cerrahin operasyon sırasında yalnız kalması, hukuksal süreçte operasyondan tek sorumlu olarak gözükmesidir.

Multidisipliner kullanım alanına sahip olan İONM, cerraha kolaylık sağlamakta, hasta sağlığını gözetmektedir. Ancak bir yandan da cerrahi sırasındaki sorumluluk teknolojik verilerin ışığında paylaşılmaktadır. Günümüzde birçok alanda olduğu gibi bu alanda da sorumluluk çoğu zaman sadece cerraha yüklenmektedir. Gerek hasta ve yakınları açısından gerekse kanunlarda bu konuya bakış açısı bellidir. Belki de her İONM firmasının “yetişmiş elemanları”nın da hastaya aydınlatılmış onam şeklinde bilgi vermesi, sorumluluğu paylaştıklarını belirtmesi, teknik ekip dışında “bilim insanı” olarak da kendilerini tanıtmaları gerekmektedir ancak bu henüz hiç dile getirilmemiş bir konudur.

Sorumluluklar paylaşılmadıkça, kullanılan teknolojiye güven artmadıkça İONM uygulanan operasyonlar sınırlı sayıda

merkezde ve sınırlı sayıda cerrah tarafından yapılan ameliyatlara devam edecektir. Oysa endikasyonlar incelendiğinde bu operasyonlar beyin ve sinir cerrahisinin temelini oluşturan ameliyatlardır. Belki de artık konuya farklı şekilde bakmak ve yeni şeyler söylemek gereklidir.

■ SONUÇ

İONM uygulaması, gerek tıbbi gerekse hukuksal nedenlerden ötürü giderek yaygınlaşan, multidisipliner bir uygulamadır. Bu işlemin gerçekten de hasta yararına sonuçlanabilmesi için hukuksal süreçte sorumluluklar tanımlanmalı, sorumluluk içine anestezi uzmanları ve nörofizyologlar da dahil edilmeli, yeterli ve gerekli eğitim İONM uygulama sürecinde yer alan herkese verilmeli ve süreç standart olarak denetlenmelidir. Tüm bunlar ilk aşamada “zaman ve masraf” olarak görülse de tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de nörolojik hasarlı bireylerin yıllık ekonomik ve sosyal giderleri hesaplandığında, İONM uygulamasının artacak maliyetinin daha küçük bir boyutta olacağı aşikardır.

■ KAYNAKLAR

1. Aydınlar E: İntraoperatif omurilik monitörizasyonu. İçinde: Zileli M, Özer F (ed), Omurga ve Omurilik Cerrahisi. Üçüncü Baskı, Cilt 1, İzmir: İntertıp yayınevi, 2014:413-419
2. Chansakul C, Nair DR: Evoked potential monitoring. In:Farag E (ed), Anesthesia for Spine Surgery. Cambridge, 2012:89-105
3. Ertekin C: Somatosensory spinal ve serebral evoked potansiyeller. İçinde: Ertekin C (ed), Santral ve Periferik EMG Anatomi-Fizyoloji-Klinik. İzmir: Meta Basım, 2006:710-711
4. Greenberg M: Electrodiagnostics. In: Greenberg M (ed), Handbook of Neurosurgery. 6th ed, New York: Thieme Publishers, 2006:145-148
5. Grundy BL, Heros RC, Tung AS: Intraoperative hypoxia detected by evoked potential monitoring. Anesth Analg 60:437-439,1981
6. Hilger J: Facial nerve stimulator. Trans Am Acad Ophth Otolaryngol 68: 74-76, 1964
7. Hong JY, Suh SW, Modi HN, Hur CY, Song HR, Park JH: False negative and pozitive motor evoked potentials in one patient: Is single motor evoked potential monitoring reliable method? A case report and literature review. Spine 35(18): E912-916,2010
8. James ML: Anesthetic considerations. In: Husain AM, (ed), A Practical Approach to Neurophysiological Intraoperative Monitoring. Demos Medical Publishing, 2008:55-56
9. Kothbauer KF, Novak K: Intraoperative monitoring for tethered cord surgery: An update. Neurosurg Focus 16: E8, 2004
10. Lopez JR, Chang SD, Steinberg GK: The use of electrophysiological monitoring in the intraoperative management of intracranial aneurysms. J Neurol Neurosurg Psychiatry 66:189-196,1999
11. Lu Y, Qureshi SA: Cost effectiveness studies in spine surgeries: A narrative review. Spine J 14:2748-2762, 2014
12. Maguire J, Wallace S, Madiga R, Leppanen R, Draper V: Evaluation of intrapedicular screw position using intraoperative evoked electromyography. Spine 20:1068-1074,1995

13. McLain RF, Saavedra FM: Intraoperative nonparalytic monitoring. In: Benzel EC (ed), Spine Surgery: Techniques, Complication Avoidance, and Management. 3rd ed. Chapter 179. Philadelphia, PA: Elsevier/Saunders, 2012:1701-1703
14. Moller A: Anatomy and physiology of motor systems. In: Moller A (ed), Intraoperative Neurophysiological Monitoring. 2nd ed, New Jersey: Humana Press Inc, 2006:157-159
15. Moller AR, Janetta PJ: Monitoring facial EMG during microvascular decompression operations for hemifacial spasm. J Neurosurg 66:681-685,1987
16. Penfield W, Steelman H: The treatment of focal epilepsy by cortical excision. Ann Surg 126: 740-761, 1947
17. Saavedra M, McLain RF: Intraoperative neurophysiological monitoring: Surgeon's point of view. In: Farag E (ed), Anesthesia for Spine Surgery. Cambridge 2012:122-129
18. Sala F, Palandri G, Basso E, Lanteri P, Deletis V, Faccioli F, et al: Motor evoked potential monitoring improves outcome after surgery for intramedullary spinal cord tumors: A historical control study. Neurosurgery 58: 1129-1143, 2006; discussion 1129-1143
19. Shin AY, Spinner RJ, Steinmann SP, Bishop AT: Adult traumatic brachial plexus injuries. J AM Acad Orthop Surg 13:382-396,2005
20. Sloan TB, Heyer EJ: Anesthesia for intraoperative neurophysiologic monitoring of the spinal cord. J Clin Neurophysiol 19(5):430-443,2002
21. Vauzella C, Stagnara P, Jouvinroux P: Functional monitoring of spinal cord activity during spinal surgery. Clin Orthop Relat Res 93:173-178, 1973
22. Waxman S: Somatosensory systems S. In: Waxman (ed), Clinical Neuroanatomy. 27th ed. China: Mc Geaw-Hill Education, 2013:277-283