



Cerrahların Zihinsel İş Yükü Değerlendirmesinde İşlevsel Beyin Görüntüleme Uygulamaları

Applications of Functional Neuroimaging in Mental Workload Assessment of Surgeons

Hasan Onur KELEŞ

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Yazışma adresi: Hasan Onur KELEŞ ✉ hokeles@ankara.edu.tr

ÖZ

Cerrahların, eğitim ve ameliyat faaliyetleri sırasında bilişsel durumlarının takibini sağlayacak nesnel yöntemlerin geliştirilmesi, hasta güvenliğinin sağlanması ve eğitim süreçlerinin geliştirilmesi açısından önemlidir. İşlevsel beyin görüntüleme için kullanılan, Elektroensefalografi (EEG) ve İşlevsel Yakın-Kızıl Ötesi Spektroskopisi (fNIRS) teknolojileri, özellikle cerrahların beyin dinamiklerinin anlaşılmasında sıklıkla denenmiş, sensör teknolojilerinde ve veri analizlerinde olan gelişmelere bağlı olarak son dönemde araştırmalar hız kazanmıştır. Sürmekte olan bu araştırmalardan beklenen faydalara; geliştirilmiş eğitim programları ve sertifikasyon, daha etkili yeni teknolojiler geliştirilmesi, gerçek zamanlı güvenlik uyarıları ve ameliyathane yönetiminde yardımcı olabilecek modeller geliştirilmesi dahildir. Bunun ötesinde, bu sistemler, ekip dinamiklerinin ve başarısının sayısal hâle getirilmesini sağlayabilecek bir veri kaynağı olarak düşünülmektedir. Bu makalede sıklıkla kullanılmaya başlanan işlevsel beyin görüntüleme yöntemlerinin, zihinsel iş yükü değerlendirmesinde kullanımını uygulamalarını içeren çalışmaların bir derlemesi sunulmaktadır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Zihinsel iş yükü, İşlevsel beyin görüntüleme, EEG, fNIRS, Nöroergonomi

ABSTRACT

It is important to develop objective methods to monitor the cognitive status of surgeons during their training and surgical activities in order to ensure patient safety and improve education processes. Electroencephalography (EEG) and Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) technologies have been used frequently, especially for understanding the brain dynamics of surgeons. These neuroimaging research methods have become more popular with user-friendly wearable sensors and new data analysis methods. Expected benefits from these ongoing studies include improved training programs and certification, the development of more effective new technologies, real-time safety alerts, and models that can assist in operating room management. Beyond that, these systems are considered a data source that can quantify team dynamics and success. This review paper assesses functional neuroimaging studies that focus on mental workload assessment for surgeons.

KEYWORDS: Mental workload, Functional neuroimaging, fNIRS, EEG, Neuroergonomics

■ GİRİŞ

Türkiye'deki ameliyathanelerde yılda yaklaşık 5.5 milyon cerrahi müdahale gerçekleştirilmektedir (26). Tıbbi hatalar, bütün ülkelerde farklı miktarda görülen önemli

bir problemdir. Örnek vermek gerekirse, ABD'de yıllık 20 milyar dolarlık bir maliyetle üçüncü önde gelen ölüm nedenidir. Önemli meselelerden biri, cerrahi kliniklerinde yatan hastalarda ölüm oranının %0.4-0.8, majör komplikasyon oranının %3-17

olmasıdır (8,12). Yapılan çalışmalar, cerrahi komplikasyonların yaklaşık yarısının önlenilebilir olduğunu ve yüksek kapasite ve beceriye sahip ekiplerde advers olay gelişiminin belirgin derece düştüğünü göstermektedir (18). Cerrahi performans, hasta sonuçlarını doğrudan etkiler. Laparoskopik tüm dünyada daha yaygın ve kullanılır hâle gelmekte ancak bu değişim tüm ülkelere eşit yansımamaktadır. Cerrahi beceriler, geleneksel olarak ameliyathanede (OR), kıdemli cerrahların eğitim verdiği bir mentor-çıraklık modeli şeklinde öğretilmektedir. Laparoskopik ameliyatların karmaşıklığı ve gerçekleştirme zorlukları, cerrahi topluluklarının, mentor-çırak modelinin yeniden gözden geçirmelerine zorlamıştır (7). Laparoskopik cerrahi hastalara daha küçük insizyon alanları, daha hızlı iyileşme süreci, daha kısa yatış süresi sağlama ve daha az ağrıya sebep olması gibi pek çok önemli fayda sağlamaktadır. Bununla birlikte dar ve indirekt bir görüş alanından ve kısıtlı taktik geri bildirimden faydalanılabilen laparoskopik cerrahi yöntemleri, cerrahların algısal ve bilişsel becerilerini daha çok zorlamaktadır. Bu durum çeşitli zorluklardaki farklı yeni becerilerin öğretilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesini gerektirmektedir.

Cerrah performansı üzerinde belirleyici rol oynayan temel bilişsel süreçler ile çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu temel bilişsel süreçlerden en önemlisi, zihinsel iş yükü (cognitive workload) olarak ifade edilebilir. Zihinsel iş yükü yanında, durumsal farkındalık (situational awareness), bölünmüş dikkat (divided attention), zihinsel bitkinlik, işgörememezlik (mental fatigue, incapacitation), vijilans/tetiklik (vigilance) ve yorgunluk/sersemlik (drowsiness) gibi kavramlar da bilişsel süreçlerde ifade edilmektedir (25,27).

Cerrahlar genellikle süre baskısı altında, uzun periyotlar içerisinde karmaşık enstrümanlar kullanmakta, hemşire ve anestezi uzmanlarıyla iletişim ve karmaşık monitör arayüzleri ile etkileşim hâlinde dirler. Uzun eğitimleri süresince teknik beceriler edindikleri gibi birtakım teknik olmayan beceriler de geliştirirler (29). Bunlara durum farkındalığı (bilgiyi edinme, anlama ve olası yeni durumları tahmin etme) ve görev yönetimi (değişime ayak uydurma) dahildir. Stratejik müdahalelerden birisi örneğin laparoskopik operasyonu açık operasyona çevirme kararının verilmesidir. Birincil görevlerde (örneğin dikiş atma gibi) gelişecek sıradışı bir zorluk, olası diğer tehlikelerin anlaşılmasını zorlaştırabilir veya planları sekteye uğratabilir. Kamera açısını düzeltmek gibi neredeyse otomatikleşmiş zihinsel faaliyetler veya endoskopun optik ekseni ile cihazların monitördeki düzeni arasındaki uyumsuzluklar bile cerrahın genel becerisi üzerindeki kaynakları kısıtlayabilir. Yeni cihaz tasarımı ve eğitime bağlı zihinsel iş yükünde gelişecek değişiklikler sadece verimi değil hastalar üzerindeki sonuçları da etkileyecektir. Davranışsal ve fizyolojik ölçümler cerrahların iş yükü gözlemini geliştirebilir. Cerrahın iş yükünün ölçümünün geliştirilmesinde, işlevsel görüntüleme ve fizyolojik ölçümler ile operatörün durumu hakkında farklı açılardan bilgi sahibi olunabilir. Cihazların giderek küçülmesi ve sensör tasarımında olan gelişmelerle birlikte, yeni yöntemler ve uygulama alanları ortaya çıkmıştır (3,9).

Zihinsel iş yükünün farklı kaynaklarda farklı tanımları bulunmaktadır. Çok yönlü karmaşık bir yapıdır. Kısaca zihinsel iş yükü, bireyin belirli bir süre boyunca bir görevi tamamlaması için gerekli olan zihinsel iş miktarıdır. Genel olarak bir görevin

sorumlulukları, gerçekleştirildiği koşullar ve çalışanların yetenekleri, davranışları ve algıları arasındaki etkileşimden ortaya çıkar. Zihinsel iş yükünün değerlendirilmesinde geleneksel olarak performans değerlendirmesi ve öznel değerlendirme gibi istenmeyen sonuçlara yol açabilen ve kısıtlı yöntemler kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmeler sayesinde kullanıcı dostu sensörlerin geliştirilmesi ve uluslararası bilim topluluğunda kabul görmesi, becerilerin değerlendirilmesinde objektif verilerin kullanımını artırmaktadır. Cerrahi beceriler temel olarak beyin aktivitesinden kaynaklandığı için, bu kapsamda sinir sistemi aktivitesinin değerlendirilmesine odaklanılmasıyla birlikte periferik fizyolojik parametrelerin de değerlendirilmesinin yapılabilmesi mümkündür (1,31).

Zihinsel iş yükünün objektif olarak belirlenmesi için farklı işlevsel beyin görüntüleme yöntemleri kullanılmaya başlanılmıştır. Bu makalede nöroergonomi uygulamalarında artarak kullanılmaya başlanan işlevsel beyin görüntüleme yöntemleriyle beyin işlevlerinin takip edildiği zihinsel iş yükü değerlendirme uygulamalarını içeren çalışmaların bir derlemesi sunulmaktadır. Bu amaçla öncelikle cerrahların zihinsel iş yükü ile ilişkilendirilen bilişsel süreçlerden bahsedilmiş, bu süreçlerin izlenmesi için kullanılan işlevsel görüntüleme yöntemleriyle ilgili literatürdeki ana bulgular özetlenmiştir.

■ CERRAHİDE İŞLEVSEL NÖROGÖRÜNTÜLEME UYGULAMALARI

Cerrahların bilişsel durumlarının takibinde nesnel yöntemlere duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bilişsel süreçlerle ilişkili olduğu düşünülen işlevsel nörogörüntüleme verilerin işlenerek kullanılmasını ve eğitim sürecinin bir parçası hâline getirilmesi amaçlanmaktadır. Cerrahi eğitim ve ameliyat süreçlerinde kritik önemde olan bilişsel süreçleri anlamak için literatürde ağırlık olarak Elektroensefalografi (EEG) ve İşlevsel Yakın-Kızıl Ötesi Spektroskopisi (fNIRS) kullanılmıştır. İnsan beyninin fonksiyonel aktivitesi fNIRS, EEG ve fMRI görüntüleme yöntemleriyle gözlemlenebilir (4,20). Bu yöntemlerin her birinin avantajları ve dezavantajları vardır. EEG nöral aktivitenin elektriksel boyutunu kafa derisi yüzeyine yerleştirilen elektrotlarla tümüyle non-invazif bir şekilde ölçmeye olanak sağlayan, yüksek zamansal çözünürlüklü, düşük uzamsal çözünürlüklü, en eski görüntüleme yöntemidir. Taşınabilir, kablosuz EEG cihazlarının ulaşılabilirliğinin artması ile birlikte, nöroergonomi ve cerrahi alanında farklı uygulamalara kapı açmıştır. fNIRS, beynin korteks kısmında kan akışında meydana gelen değişiklikleri ölçerek beyin aktivitesinin doğrudan veya dolaylı olarak ölçülmesine olanak tanıyan işlevsel bir görüntüleme yöntemidir. Temel olarak kafa derisi üzerine yerleştirilmiş kızılötesi ışın yayan LED veya lazer ve fotonları algılayabilen silikon fotodetektörden oluşur. Beyin aktivasyonlarının ölçülebilmesi için farklı dalga boyunda iki kızılötesi ışık kaynağı ile beyin dokusu aydınlatılmaya çalışılmaktadır. Bu ışık kaynağından çıkarak beyin dokusuna erişen fotonlar beyinde belirli bir yol izleyerek detektörlere geri yansımakta ve gönderilen ışık miktarı ve dedektörler tarafından algılanan ışık miktarı arasındaki farktan yola çıkarak beynin incelenen bölgesindeki aktivasyon seviyeleri belirlenebilmektedir. Bu yöntemler arasında Yakın Kızıl Ötesi Spektroskopisini (fNIRS) ayırabiliriz. fNIRS güvenli

zararsız kablosuz ve alternatiflerine göre (fMRI, MEG) düşük maliyetli görüntüleme sistemi olarak araştırma amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. fMRI işlevsel görüntülemede en çok kullanılan ve beyindeki vasküler yanıtın bir sonucu olarak dokuda bulunan oksihemoglobin/deoksihemoglobin oranındaki değişimleri ölçmemize olanak sağlayan bir teknolojidir. fMRI ağır ve taşınmaz bir sistem olmasından dolayı nöroergonomi, cerrahi eğitim ve zihinsel iş yükü çalışmalarında en az kullanılmıştır. fMRI uzamsal çözünürlüğü en yüksek işlevsel beyin görüntüleme teknolojisidir. Beynin bütün katmanlarından bilgi toplama yeteneği ile fNIRS ve EEG den ayrılmaktadır. Çoklu İşlevsel Görüntülenmesi (fNIRS+fMRI, EEG+fNIRS vb), davranışın nöral temellerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasında son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Beynin dinamiklerinin anlaşılmasında mekânsal ve zamansal boyutlar hakkında bilgi sahibi olmak ve birlikte değerlendirmek önemlidir (14).

İşlevsel görüntüleme dışında, sinir sisteminin vücutta yarattığı fizyolojik etkileri takip eden, elektro-kardiyogram (EKG), elektrookulogram (EOG), elektromyogram (EMG) ve elektrodermal tepki ölçümü (GSR/EDR) gibi yöntemler kullanılarak, kalp atış hızı, göz kırpması sıklığı, göz bebeğinin büyümesi, göz odaklanması, kas hareketleri ve deri iletkenliği değişimi gibi nörofizyolojik parametrenin cerrahların bilişsel durumu ile nasıl bir ilişkisi olduğunu araştırmaları devam etmektedir. Bu yöntemler işlevsel görüntüleme yöntemleri ile de birleştirilerek, veri miktarının artırılması sağlanabilir. Elde edilen bulgular bu veriler üzerine kurgulanan istatistiksel modeller ve makine öğrenmesi algoritmaları yardımıyla, cerrahın simülasyon eğitimi sırasında bilişsel durumunda gerçekleşen değişikliklerin takip edilmesinin mümkün olduğuna işaret etmektedir (22,31).

■ BİLİŞSEL İŞ YÜKÜ TAKİBİ

Çok sayıda çalışma, işlevsel beyin görüntülemenin zihinsel durum tanımlayıcılarını doğru bir şekilde ölçebileceğini göstermektedir. Örneğin, bilişsel iş yükü seviyeleri, sürekli dikkat, uyanıklık, stres, uyusukluk ve sözel ve mekânsal hafıza düzeyleri ölçülebilir (16). Çalışmalar aynı zamanda bu tür tanımlayıcıların cerrahların görünen performanslarıyla da ilişkili olduğunu göstermektedir (28). Örneğin, Yurko ve ark. standart bir kendi kendine raporlama aracı tarafından ölçülen zihinsel iş yükünün, laparoskopik cerrahi eğitiminde işlenen hata oranı ve dikiş atma kalitesi ile orantılı olduğunu göstermiştir. NASA-TLX'ten yararlanarak eğitime yeni başlamış asistanların laparoskopik performanslarını analiz etmiş ve simülasyon yoluyla edinilen becerilerin ameliyathane koşullarına ne kadar taşınabileceğini açıklamaya çalışmıştır (30). Eğitimin başında elde edilen zihinsel ve fiziksel gereksinim oranları ile eşzamanlı ameliyathane performans puanlamasının (yanlışlıkla yapılan yaralamalar, dikiş kalitesi) tahmin edilebileceğini göstermişlerdir. NASA-TLX gibi subjektif yöntemler kısıtlayıcı olabilir ve sadece kısıtlı bilgi sağlayabilir. Bununla birlikte bilginin sağladığı fayda, cerrahın zihinsel yükünün kısıtlayıcı olmayan ve sürekli yollarla ölçümüne duyulan ihtiyacı ön plana çıkarmaktadır.

Bununla birlikte, zihinsel durum tanımlayıcılarını karakterize etme çabaları ve bireysel ve takım performansı üzerindeki etkileri önemli bir sorunla karşı karşıyadır: tanımlayıcılar doğrudan gözlemlenemez. Araştırmacılar, bu tanımlayıcıları nicelleş-

tirmek için geleneksel olarak fizyolojik değişkenlere (örneğin kalp hızı, NIRS, EEG, deri iletkenliği), davranışsal göstergelere (örneğin ikincil görev performansı) veya anket sonuçlarına (örneğin NASA-TLX anketi) başvururlar.

Öğrenme araştırması, bilişsel yük ve beceri uzmanlığı arasındaki etkileşimi göstermiştir (5). Eğitimci tarafından yapılan doğrudan gözlem ve gözden geçirme, bir asistanın yeterince performans gösterdiğini, ancak eğitim ortamlarının ötesinde beceri tutmayı veya gerçek performansı öngörmediğini gösterebilir. Karmaşık görevlerin ustalığı, bilişsel yükte giderek artan bir azalma ile ilişkilidir (13,25) ve minimal invaziv operasyonlar, açık operasyonlardan daha yoğun iş yüküdür. Ayrıca, ameliyathanede daha düşük performans gösterebilir ve performans azalması eğitim sırasındaki zihinsel iş yüküyle ilişkilidir. Aynı performans gösteren stajyerler, sonraki performansta farklılık gösterebilir ve bu, bilişsel yüklerindeki farklılıklarla tahmin edilebilir (24).

Belirgin ihtiyaca rağmen, ameliyathanedeki zihinsel iş yükünün fizyolojik ölçümlerle takibi üzerine çalışmaların sayısı sınırlıdır. Bazı çalışmalarda standart ve robotik cerrahi fizyolojik ölçümler yoluyla karşılaştırılmıştır (11). Cerrahlar EEG ile takip edilmiştir (17,32). EEG kullanılan çalışmalarda, ortak bulgulardan en önemlisi, yüksek zihinsel iş yükü ve görev koşullarının zorlaşmasına bağlı olarak, frontal elektrotlarda ölçülen teta (4-7) bandında güç artışı olduğu ifade edilmiştir (2,17).

Son yıllarda fNIRS kullanarak cerrahlar ile yapılan çalışmalarda, zihinsel iş yükü değerlendirilmeleri yapılmıştır. Zihinsel iş yükünün makine öğrenmesi algoritmaları da kullanılarak cerrahların iş yükleri doğru bir şekilde ayrılmaya ve tahmin edilmeye çalışılmıştır (15,21,31). Crewther ve ark. tıp öğrencileri ile yaptığı fNIRS çalışmasında, 3 haftalık bir laparoskopik eğitim sonucunda, zihinsel iş yüklerinde azalma olduğunu ve bilateral prefrontal hemodinamik aktivasyonda simetri olduğunu yaptığı çalışmada göstermiştir (6). Modi ve ark. tarafından farklı kıdemde asistan gruplarında, zaman baskısı görevinde, prefrontal aktivasyonda ve performanslarda azalma gözlemlenmiştir. Son sene asistanlarında olan prefrontal azalmanın daha az olduğu ve zihinsel iş yüklerinin daha yavaş arttığı gösterilmiştir (19). fNIRS ve EEG cihazına ek olarak, göz izleme cihazları (eye tracking) kullanılarak, görev gerekliliklerine karşı gösterilen zihinsel eforun değerlendirilmesinde gözbebeği çapı ve nabız değişimleri de hesaplanabilir (10,23).

Bu çalışmaların öncelikli amacı, zihinsel iş yükünü sayısal olarak ortaya koyacak, çoklu yöntemlerle edinilen geniş bir veri kümesi oluşturmak olup, nihai hedefte ameliyathanede kullanılacak bir ölçüm sistemi oluşturmaktır. Edinilen veri kümesi EEG, fNIRS ve göz takibi cihazları ile kaydedilebilir. Ayrıca algısal işlemlerin iş yükündeki etkilerini incelemek için faydalı olacaktır ve çoklu görev senaryolarında dolaylı yoldan zihinsel iş yükü oluşturmada etkili olduğu kanıtlandığından düşük ihtimalli sesli uyarı kullanarak işitsel uyarılmış potansiyel (AEP) ölçümü yapılabilir. Sürmekte olan bu araştırmadan beklenen faydalara; geliştirilmiş eğitim programları ve sertifikasyon, daha etkili yeni teknolojiler geliştirilmesi, gerçek zamanlı güvenlik uyarıları ve ameliyathane yönetiminde yardımcı olacak modeller geliştirilmesi dâhildir. Bunun ötesinde, sistem,

ekip dinamiklerinin ve başarısının sayısal hâle getirilmesini sağlayabilecek bir veri kaynağı olarak düşünülmektedir.

■ SONUÇ

Cerrahi operasyonlarının daha güvenli hâle getirilebilmesi için cerrahların bilişsel durumlarının tespiti ve takibi için kullanılacak güvenilir, nesnel ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu derlemede değinilen öncü çalışmalarda elde edilen bulgular, fNIRS ve EEG gibi laboratuvar dışında (ameliyathane vb) kullanıma uygun, portatif ve güvenilir nörofizyolojik ölçüm yöntemlerinin bu ihtiyaca yönelik önemli avantajlar sunabileceğine işaret etmektedir. Özetlenen öncü çalışmalar görev icrası sırasında zihinsel iş yükünde oluşan değişimin gerçek zamanlı takibi gibi faydalı bilgilerin fNIRS ve EEG yöntemiyle elde edilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Gelecekte, fNIRS ve EEG donanımlarında olan gelişmeler sonucu ortaya çıkan kablosuz ve taşınabilir sistemler ve analiz yöntemlerinde olan gelişmelerle birlikte zihinsel iş yükü takibi çalışmaları artarak devam edecektir. Bu çalışmalar sonucu, ameliyathane, cerrah ve hasta güvenliğini sağlamak için, ameliyathane içerisinde kullanılacak yeni yöntemler ve sistemler geliştirilecektir.

■ KAYNAKLAR

1. Aghajani H, Garbey M, Omurtag A: Measuring mental workload with EEG+fNIRS. *Front Hum Neurosci* 11:359, 2017
2. Antonenko P, Paas F, Grabner R, van Gog T: Using electroencephalography to measure cognitive load. *Educ Psychol Rev* 22(4):425-438, 2010
3. Ayaz H, Shewokis PA, Bunce S, Izzetoglu K, Willems B, Onaral B: Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment. *Neuroimage* 59(1):36-47, 2012
4. Bunge S, Kahn I: Cognition: An overview of neuroimaging techniques. In: *Encyclopedia of Neuroscience*. Elsevier 2009:1063-1067
5. Byrne AJ, Murphy A, McIntyre O, Tweed N: The relationship between experience and mental workload in anaesthetic practice: An observational study. *Anaesthesia* 68(12):1266-1272, 2013
6. Crewther BT, Shetty K, Jarchi D, Selvadurai S, Cook CJ, Leff DR, Darzi A, Yang GZ: Skill acquisition and stress adaptations following laparoscopic surgery training and detraining in novice surgeons. *Surg Endosc* 30(7):2961-2968, 2016
7. Gallagher AG, Jordan-Black JA, O'Sullivan GC: Prospective, randomized assessment of the acquisition, maintenance, and loss of laparoscopic skills. *Ann Surg* 256(2):387-393, 2012
8. Gawande AA, Thomas EJ, Zinner MJ, Brennan TA: The incidence and nature of surgical adverse events in Colorado and Utah in 1992. *Surgery* 126(1):66-75, 1999
9. Gramann K, Gwin J, Ferris D, Oie K, Jung TP, Lin CT, Liao LD, Makeig S: Cognition in action: Imaging brain/body dynamics in mobile humans. *Rev Neurosci* 22:593-608, 2011
10. He W, Bryns S, Kroeker K, Basu A, Birch D, Zheng B: Eye gaze of endoscopists during simulated colonoscopy. *J Robot Surg* 14(1):137-143, 2020
11. Hubert N, Gilles M, Desbrosses K, Meyer JP, Felblinger J, Hubert J: Ergonomic assessment of the surgeon's physical workload during standard and robotic assisted laparoscopic procedures. *Int J Med Robot* 9(2):142-147, 2013
12. Kable AK, Gibberd RW, Spigelman AD: Adverse events in surgical patients in Australia. *Int J Qual Heal Care* 14(4):269-276, 2002
13. Keehner MM, Tendick F, Meng M V, Anwar HP, Hegarty M, Stoller ML, Duh QY: Spatial ability, experience, and skill in laparoscopic surgery. *Am J Surg* 188(1):71-75, 2004
14. Keles HO, Barbour RL, Omurtag A: Hemodynamic correlates of spontaneous neural activity measured by human whole-head resting state EEG+fNIRS. *Neuroimage* 138:76-87, 2016
15. Keles HO, Cengiz C, Demiral I, Ozmen MM, Omurtag A: High density optical neuroimaging predicts surgeons's subjective experience and skill levels. *PLoS One* 16(2):e0247117, 2021
16. Lin AL, Gao JH, Duong TQ, Fox PT: Functional neuroimaging: A physiological perspective. *Front Neuroenergetics* 2:17, 2010
17. Maimon NB, Bez M, Drobot D, Molcho L, Intrator N, Kakiashvili E, Bickel A: Continuous monitoring of mental load during virtual simulator training for laparoscopic surgery reflects laparoscopic dexterity: A comparative study using a novel wireless device. *Front Neurosci* 15:694010, 2022
18. Mazzocco K, Petitti DB, Fong KT, Bonacum D, Brookey J, Graham S, Lasky RE, Sexton JB, Thomas EJ: Surgical team behaviors and patient outcomes. *Am J Surg* 197(5):678-685, 2009
19. Modi HN, Singh H, Orihuela-Espina F, Athanasios T, Fiorentino F, Yang GZ, Darzi A, Leff DR: Temporal stress in the operating room: Brain engagement promotes "coping" and disengagement prompts "choking." *Ann Surg* 267(4):683-691, 2018
20. Modi HN, Singh H, Yang GZ, Darzi A, Leff DR: A decade of imaging surgeons' brain function (part I): Terminology, techniques, and clinical translation. *Surgery* 162(5):1121-1130, 2017
21. Nemani A, Yücel MA, Kruger U, Gee DW, Cooper C, Schweitzberg SD, De S, Intes X: Assessing bimanual motor skills with optical neuroimaging. *Sci Adv* 4(10):eaat3807, 2018
22. Omurtag A, Roy RN, Dehais F, Chatty L, Garbey M: Tracking team mental workload by multimodal measurements in the operating room. In: Ayaz H, Dehais F, (eds), *Neuroergonomics: The Brain at Work and in Everyday Life*. London: Academic Press, 2019:99-104
23. Peysakhovich V, Dehais F, Duchowski A: Why is eye tracking an essential part of neuroergonomics? In Ayaz H, Dehais F (ed), *Neuroergonomics: The Brain at Work and in Everyday Life*, Chapter: 4. Academic Press, 2018:27-30
24. Prabhu A, Smith W, Yurko Y, Acker C, Stefanidis D: Increased stress levels may explain the incomplete transfer of simulator-acquired skill to the operating room. *Surgery* 147(5):640-645, 2010
25. Schneider W, Shiffrin RM: Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychol Rev* 84(1):1-66, 1977
26. T.C. Sağlık Bakanlığı Sağlık Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü, Sağlık İstatistikleri Yıllığı, 2019. <https://sbsgm.saglik.gov.tr/TR,82338/saglik-istatistikleri-yilligi-2019-yayinlanmistir.html>

27. Wickens CD: Effort in human factors performance and decision making. *Hum Factors* 56(8):1329-1336, 2014
28. Van Merriënboer JJG, Sweller J: Cognitive load theory in health professional education: Design principles and strategies. *Med Educ* 44(1):85-93, 2010
29. Yule S, Flin R, Maran N, Rowley D, Youngson G, Paterson-Brown S: Surgeons' non-technical skills in the operating room: Reliability testing of the notss behavior rating system. *World J Surg* 32(4):548-556, 2008
30. Yurko YY, Scerbo MW, Prabhu AS, Acker CE, Stefanidis D: Higher mental workload is associated with poorer laparoscopic performance as measured by the NASA-TLX tool. *Simul Healthc* 5(5):267-271, 2010
31. Zakeri Z, Mansfield N, Sunderland C, Omurtag A: Physiological correlates of cognitive load in laparoscopic surgery. *Sci Rep* 10(1):1-13, 2020
32. Zander TO, Shetty K, Lorenz R, Leff DR, Krol LR, Darzi AW, Gramann K, Yang GZ: Automated task load detection with electroencephalography: Towards passive brain-computer interfacing in robotic surgery. *J Med Robot Res* 2(1):1750003, 2016