



# Havacılık Nöroergonomisinde Optik Beyin Görüntüleme Uygulamaları

Murat Perit Çakır<sup>1,2\*</sup>

<sup>1\*</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Enformatik Enstitüsü, Bilişsel Bilimler Bölümü, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-4295-1245), [perit@metu.edu.tr](mailto:perit@metu.edu.tr)

<sup>2</sup> ODTÜ-TSK Modelleme ve Simülasyon Araştırma ve Uygulama Merkezi, Ankara, Türkiye

(İlk Geliş Tarihi 19 Nisan 2021 ve Kabul Tarihi 27 Haziran 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.919993)

**ATIF/REFERENCE:** Çakır, M.P. (2021). Havacılık Nöroergonomisinde Optik Beyin Görüntüleme Uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (25), 380-391.

## Öz

Pilotların, insansız hava aracı operatörlerinin, hava trafik kontrolörlerinin eğitim ve uçuş faaliyetleri sırasında bilişsel durumlarının takibini sağlayacak nesnel yöntemlerin geliştirilmesi uçuş emniyetinin sağlanması, eğitim süreçlerinin optimizasyonu ve yenilikçi insan-makine arayüzlerinin tasarımı bakımından kritik önem taşımaktadır. İşlevsel Yakın-Kızılötesi Tayfölçümü (functional near infrared spectroscopy – fNIRS) optik beyin görüntüleme teknolojisi gibi saha kullanımına uygun, portatif ve güvenilir nörofizyolojik ölçüm yöntemleri bu ihtiyaçlara yönelik bazı önemli avantajlar sunmaktadır. Bu derlemede fNIRS teknolojisinin dayandığı bilimsel temeller ve bu teknolojiyle gerçekleştirilmiş pilot/operatör bilişsel işyükü takibi, kontrol arayüzü değerlendirmesi, G-LoC/hipoksi kestirimi gibi öncü havacılık uygulamalarından örnekler sunularak fNIRS yönteminin havacılık tıbbi ve ergonomisi alanları için sunduğu imkanların özetlenmesi amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Nöroergonomi, Optik Beyin Görüntüleme, İşlevsel Kızıl-ötesi Tayfölçümü, Havacılık Tıbbi, Havacılık Psikolojisi.

## Applications of Optical Brain Imaging Methods in Aviation Neuroergonomics

### Abstract

The development of objective methods that enable monitoring of the cognitive status of pilots, unmanned aerial vehicle operators, and air traffic controllers is critically important in aviation for improving flight safety, optimizing pilot/operator training and developing innovative man-machine interfaces. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) optical brain imaging technology offers significant advantages for this purpose by providing portable, rugged sensors that can be employed in the field to monitor neurophysiological markers during flight operations. This article reviews studies that employ fNIRS technology for cognitive workload assessment, operator interface evaluation, and G-LoC/hypoxia prediction in aviation to document the potential of neurophysiological measurement modalities like fNIRS for aviation medicine and ergonomics.

**Keywords:** Neuroergonomics, Optical Brain Imaging, Functional Near-infrared Spectroscopy, Aviation Medicine, Aviation Psychology.

\* Sorumlu Yazar: [perit@metu.edu.tr](mailto:perit@metu.edu.tr)

## 1. Giriş

Sensör teknolojilerinde yakın zamanda kaydedilen gelişmeler, nörofizyolojik verilerin sahada gerçek zamanlı olarak işlenerek insan-makine etkileşiminin optimizasyonuna yönelik yenilikçi uygulamaların geliştirilmesi için önemli fırsatlar sunmaktadır. Giyilebilir, invazif olmayan, hafif, kablosuz arayüzler üzerinden veri toplanmasına olanak sağlayan yeni nesil sensörler göz izi, kalp atışı, nefes sıklığı, deri iletkenliği gibi fizyolojik belirteçlerin yanı sıra optik beyin görüntüleme ve elektroensefalografi yöntemleri aracılığıyla beyin işlevlerinin de sahada izlenmesine imkân vermektedir. Bu teknolojilerin havacılık özelinde pilot, İHA operatörü veya hava trafik kontrolörü gibi son kullanıcıların fizyolojik verileri üzerinden bilişsel durumlarına yönelik çıkarımların hem eğitim hem de görev sırasında yapılabilmesine olanak vermesi, bu teknolojilere gösterilen ilginin son yıllarda artmasına ve nöroergonomi gibi yeni araştırma alanlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur (Parasuraman ve Rizzo, 2008; Ayaz vd., 2013; Ayaz ve Dehais, 2019).

Havacılıkta ilk bakışta artan otomasyonla birlikte insan faktörlerinin önemi azalmış gibi görünse de gelişen teknolojiyle birlikte hava aracı sayısı ve çeşitliliğinde gözlenen artış hava operasyonlarının karmaşıklığını da arttırmaktadır. Pilot ve yer operatörlerinin görev sırasındaki bilişsel durumları ve görev hazırlık aşamasında aldıkları eğitim havacılık güvenliği için belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu tür kritik süreçlerde nörofizyolojik belirteçlerde gerçekleşen değişimlerin anlamlandırılarak operatörlerin bilişsel durumlarına yönelik sağlıklı çıkarımların yapılabilmesi, eğitim süreçlerinin kişiselleştirilerek optimize edilmesi, görev sırasında oluşabilecek bilinç kaybı, aşırı iş yükü gibi durumların kestirimi gibi uçuş güvenliğine tesiri olacak yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi konusunda önemli fırsatlar sunmaktadır (Ayaz vd., 2012; Çakır vd., 2016).

Bu makalede son dönemde nöroergonomi uygulamalarında sıklıkla kullanılmaya başlanan fNIRS yöntemiyle beyin işlevlerinin takip edildiği havacılık uygulamalarını içeren çalışmaların bir derlemesi sunulmaktadır. Bu amaçla öncelikle pilot/operatör performansıyla ilişkilendirilen bilişsel süreçlerin kısa bir özeti verilmiş, bu süreçlerin izlenmesi için kullanılan nörofizyolojik yöntemlerle ilgili literatürdeki ana bulgular özetlenmiştir. Sonraki kısımda mevcut yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunan fNIRS yönteminin dayandığı fiziksel /fizyolojik prensipler detaylandırılmış ve fNIRS teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon eğitimi ve bilişsel iş yükü takibi uygulamaları ile hava trafik kontrol arayüzü değerlendirmesi çalışmalarının bulguları özetlenmiştir. Ayrıca fNIRS kullanılarak kokpit içerisinde yapılmış bilişsel işyükü takibi ve hipoksi/G-LoC kestirimi gibi uygulamalardan da örnekler sunulmuştur. Son olarak fNIRS gibi nörofizyolojik ölçümlerin havacılık tıbbi ve ergonomisi çalışmaları için sunmakta olduğu imkanlar hakkında genel bir değerlendirme yapılmıştır.

## 2. Havacılıkta Performansı Etkileyen Bilişsel Süreçler

Havacılıkta insan faktörleri literatüründe pilot/operatör performansı üzerinde belirleyici rol oynayan temel bilişsel süreçler bilişsel işyükü (İng. cognitive workload), durumsal

farkındalık (İng. situational awareness), bölünmüş dikkat (İng. divided attention), zihinsel bitkinlik, işgörememezlik (İng. mental fatigue, incapacitation), vijilans/tetiklik (İng. vigilance) ve yorgunluk/sersemlik (İng. drowsiness) gibi kavramlarla ifade edilmektedir (Wickens, 2008; 2014). Havacılık ve bilişim teknolojisindeki ilerlemeler pilotların ve operatörlerin üzerindeki iş yükünü azaltmak amacıyla tasarlanmış pek çok sistem bileşeninin ve kontrol arayüzünün geliştirilmesini sağlamıştır. Ancak havacılık sisteminde yer alan aktörlere halen önemli görevler düşmektedir (Parasuraman ve Wickens, 2008). Örneğin, pilotlardan uçuş sırasında tetikte kalarak durumsal farkındalıklarını sürdürmeleri, sorunları/arızaları zamanında fark ederek çözüm için gerekli kararları vermeleri ve ilgili prosedürleri uygulamaları beklenmektedir. Hava trafik kontrolörleri veya İHA faydalı yük operatörleri özelinde ise operatörlerin belirlenen hava araçları veya hedefleri takip etmeleri ve tetikte kalmaları beklenmektedir. Uluslararası Sivil Havacılık Kurumu'nun (ICAO) yayınladığı kaza/kırım istatistikleri incelendiğinde, irili ufaklı tüm kazaların %26'sında pilotun bilişsel durumuna etki eden faktörlerin başlıca etken olduğu görülmektedir (ICAO, 2014). Bu oran ölümlü kazalar dikkate alındığında daha da artmaktadır. Dolayısıyla, pilotların bilişsel durumlarını güvenilir olarak izleyebilen sistemlerin geliştirilmesi, eğitim prosedürlerinin etkililiğinin artırılması ve bu tür kazaların önüne geçilmesi bakımından havacılığa önemli katkılar yapma potansiyeline sahiptir.

Simülasyonlar pilotlara ve operatörlere görev sırasında kullanacakları arayüzleri gerçekçi fakat hata yapmaya müsait bir ortamda kullanma imkânı tanıdığı için modern havacılık eğitiminde kritik bir rol üstlenmektedir. Uçuş simülasyonları pilot adaylarının uçuş kontrolleri üzerinde zamanla uzmanlaşarak gerçek uçuşa hazırlanmalarına, tecrübeli pilotların ise sanal uçuşlar gerçekleştirerek uçuş prosedürleri konusundaki bilgi ve becerilerini taze tutmalarına yardımcı olmaktadır. Hava trafik kontrol simülasyonları ise sahada görev almadan operatörlerin iş akışına aşına olmalarına ve birden fazla işi koordine etme konusunda eğitim yapmalarına olanak vermektedir. Buna ek olarak, simülasyonlar gerçek görev sırasında test edilmesi mümkün olmayan, ancak karşılaşılabilecek muhtemel olan tehlike durumlarında yapılması gereken işlemlere yönelik eğitimlerin güvenle ve düşük maliyetle yapılmasına olanak sağlamaktadır. Son olarak, arayüz ve aviyonik tasarım alternatiflerinin seri üretime geçilmeden önce deneklerle bu ortamlarda denenerek kullanılabilirlik analizlerinin yapılabilmesi, simülasyonların sunduğu bir diğer önemli imkândır.

Simülasyon ortamında havacılık performansında kritik rol oynayan bilişsel süreçlere yönelik yapılan değerlendirmeler ağırlıklı olarak davranışsal veriler üzerinden yapılmaktadır. Bu veriler genellikle (a) uçuş senaryosunun eğitmen pilot tarafından durdurularak pilotun mevcut durum hakkındaki farkındalık düzeyini sınamak amacıyla yöneltilen sorulara verilen yanıtların doğruluk oranına, (b) kaydedilen uçuş bilgilerinin ideal bir performans modelinden sapma miktarına veya (c) sanal görev sonrası pilotun NASA Task Load Index (TLX) gibi bir anket yardımıyla görev sırasında ne derece zorlandığına dair yaptığı öznel değerlendirmelere dayanmaktadır.

Simülasyon eğitimi üzerine yapılan çalışmalar bu ortamlarda edinilen becerilerin gerçek görev deneyimine güçlü yansımaları olduğunu göstermekle beraber, literatürde bu eğitimin etkililiğini arttırmaya yönelik yenilikçi yaklaşımlara ihtiyaç olduğu ifade edilmektedir (Hays vd., 1992; Salas vd., 1998; Dahlstrom vd., 2008). Davranışsal verilere dayalı değerlendirmelerin sahip

olduğu dezavantajlar bu arayışın altında yatan ana nedenlerden bir tanesidir. Örneğin pilotların rutin uçuş görevine ek olarak mental aritmetik gibi ikinci bir görevi de idame ettirmeleri gereken bir deneysel görev senaryosunda bazı pilotların performansında daha sert düşüşlerin gözlenmesi, ancak bu pilotların normal uçuş görevini icra ederken ki performanslarının diğer pilotlardan ayırt edilemeyecek kadar benzer olması, pilotların beceri düzeylerine bağlı olarak mental işyükü kapasiteleri bakımından farklılaşabildiğini göstermiştir (Yeh ve Wickens, 1988). Bu tür çalışmalar sonucunda, aynı görevin deneyimli pilotlar ve yeni pilotlar üzerinde değişik seviyelerde bilişsel işyükü oluşturabildiği, bir görevi icra ederken kapasitesinin tamamına yakınına yakınını kullanmak durumunda olan pilotun o an gerçekleşen acil bir durum karşısında geç tepki verebildiği, zamanla artan uçuş deneyimi ve alınan eğitimle birlikte ilgili bilişsel kapasitenin de artması neticesinde bu gibi durumlara başa çıkmanın pilotlar için daha kolay hale gelebildiği gözlenmiştir (Borghini vd., 2011). Davranışsal verilerden tespit edilmesi zor olan bu tür durumlar pilotların bilişsel işyükü kapasiteleri hakkında daha sağlıklı yorum yapılmasına imkân verecek yöntemlerin araştırılmasını teşvik etmiştir. Bu bakımdan, literatürde özellikle pilotun bilişsel durumunun daha nesnel yöntemlerle takip edilmesini sağlayan ölçme yöntemlerine olan ilginin artmakta olduğu görülmektedir (Borghini vd., 2014).

### 3. Havacılıkta Nörofizyoloji Uygulamaları

Pilotların/Operatörlerin bilişsel durumlarının izlenmesinde nesnel yöntemlere duyulan ihtiyaca karşılık vermek amacıyla yürütülen araştırmaların önemli bir kısmı, bu süreçlerle ilişkili olduğu düşünülen nörofizyolojik verilerin işlenerek kullanılmasını ve eğitim sürecinin bir parçası haline getirilmesini hedeflemektedir. Bu alanda yapılan öncü çalışmalar elektroensefalografi (EEG), elektro-kardiyogram (EKG), elektro-okulogram (EOG), elektromyogram (EMG) ve elektro-dermal tepki ölçümü (GSR/EDR) gibi yöntemler kullanarak beyin dalgalarının salınımı, kalp atış hızı, göz kırpması sıklığı, göz bebeğinin büyümesi, göz odaklanması, kas hareketleri ve deri iletkenliği değişimi gibi pek çok nörofizyolojik parametrenin pilotun/operatörün bilişsel durumu ile nasıl bir ilişkisi olduğunu araştırmaktadır (De Rivecourt vd., 2008; Haarman vd., 2009; van Dijk vd., 2011; Wilson, 2002; Wilson vd., 2007). Elde edilen bulgular bu veriler üzerine kurgulanan istatistiksel modeller ve örüntü tanıma algoritmaları yardımıyla, pilotun simülasyon eğitimi sırasında bilişsel durumunda gerçekleşen değişikliklerin takip edilmesinin mümkün olduğuna işaret etmektedir (Wilson ve Russel, 2007).

Havacılık açısından kritik öneme sahip bilişsel süreçlerin nörofizyolojik izdüşümleri literatürde ağırlıklı olarak EEG, EKG, EMG, EOG ve GSR verileriyle incelenmiştir. Bu algılayıcılar beyin işlevlerine odaklanan, direkt yöntemler (EEG) ve sinir sisteminin vücutta yarattığı fizyolojik etkileri takip eden, dolaylı yöntemler (EKG, EMG, EOG ve GSR) olmak üzere iki ana grupta ele alınabilir. Dolaylı yöntemlerin kullanıldığı çalışmalarda pilotun iş yükünde artış olduğu durumlarda kalp atış hızında artma, göz kırpması sıklığında ve uzunluğunda azalma, göz odaklanmasında artma gibi değişiklikler olduğu gözlenmiştir (Borghini vd., 2014). Fakat bu ölçümleri bilişsel işyükünden bağımsız olarak benzer şekillerde etkileyen faktörlerin var olması, pilotun bilişsel durumuna yönelik çıkarımların tek bir algılayıcı aracılığıyla yapılmasını zorlaştırmaktadır. Örneğin kokpit içerisindeki ışık miktarındaki

değişim ve göstergelerden yayılan ışık, göz bebeği büyüklüğü ve göz kırpması sıklığı gibi değişkenleri bilişsel işyükünün yarattığı değişikliklere benzer bir şekilde etkileyebilmektedir (De Rivecourt vd., 2008). Benzer bir şekilde kalp atış hızı değerleri de nefes alma hızı, kaygı, kas yorgunluğu gibi bilişsel işyükü kaynaklı olmayan nedenlerle benzer bir değişim gösterebilmektedir. Salt fizyolojik parametrelere dayanarak pilotun bilişsel durumuna yönelik güçlü bir çıkarım yapmanın zorluğu dolayısıyla, güvenilirliği arttırmak adına bu tür fizyolojik bilgilerin beyin kaynaklı bilgilerle bir arada ele alındığı yöntemler literatürde son zamanlarda öne çıkmaya başlamıştır.

Havacılık uygulamalarında pilotun/operatörün beyin işlevlerine odaklanan yöntemler ağırlıklı olarak EEG teknolojisini kullanmaktadır. EEG nöron gruplarının elektriksel faaliyetleri nedeniyle kafa derisi üzerine konumlandırılmış elektrotlarda oluşan düşük seviyeli elektrik potansiyel değişimlerini ölçen bir yöntemdir. Simülasyon ortamında yapılan çalışmalar dikkat dağılmasına bağlı olarak performansın düştüğü durumlarda theta bandındaki güç dağılımında bir azalma ve alpha bandındaki dağılımda değişim olduğunu, görev koşullarının zorlaşmasına bağlı olarak dikkatin odaklandığı durumlarda ise ön-orta ve tepe-orta bölgedeki elektrotlardan izlenen theta bandında güç artışı olduğunu göstermiştir (Dussault vd., 2005; Borghini vd., 2011; Borghini vd., 2014). EEG yöntemindeki temel zorluk elektrotların iletkenliklerinin devamlının sağlanması ve elektromanyetik etkilerden korunmasıdır. Yüksek kalitede veri toplanabilmesi özel jellerin kullanılmasını ve zahmetli bir sensör yerleştirme aşamasını içermektedir. Yakın zamanda geliştirilen kuru elektrot teknikleri ve kablosuz arayüzler EEG yönteminin bu dezavantajlarını azaltmayı ve havacılık uygulamalarındaki kullanımını derinleştirmeyi hedeflemektedir (Scholl vd., 2016).

Öncü çalışmalarda önemli bulgular elde edilmekle beraber, mevcut bilgi birikimini bir araya getirerek nörofizyolojik verilerin simülasyon ile bütünleşik olarak kullanılmasını sağlayan gerçekçi uygulamalara duyulan ihtiyaç henüz giderilememiştir (Borghini vd., 2014). Mevcut yöntemlerde karşılaşılan en büyük sorunlardan bir tanesi karmaşık teknik kurgu dolayısıyla sağlıklı veri toplanmasında yaşanan pratik zorluklardır. Ayrıca, mevcut çalışmalarda tespit edilen bilişsel durumlara yönelik örüntüler deney sonrasında yapılan çevrimdışı analizlere dayanmaktadır. Verileri gerçek zamanlı işleyerek bu tür bilişsel çözümleri yapabilen uygulamaların geliştirilmesi günümüzde halen aktif bir araştırma sahasıdır.

fNIRS optik beyin görüntüleme yöntemi ışık temelli ve portatif olması bakımından literatürde kullanılan emsallerine kıyasla havacılık uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır. Havacılık uygulamaları için kritik önemi olan karar verme, işleyen bellek, dikkat yönetimi, motor kontrol gibi süreçlerin idamesinde önemli bir rol oynadığı bilinen prefrontal, premotor, motor, temporal ve parietal kortekste yer alan çeşitli bölgelerin ve aralarındaki bağımlılık ilişkilerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesine imkân veren fNIRS yöntemi, simülasyon ortamlarında nörofizyolojik verilerin sağlıklı olarak toplanması ve işlenerek faydalı bilgiye dönüştürülmesi bakımından önemli avantajlar sunmaktadır. Teknolojik ve teorik gelişmeler sayesinde fNIRS sensörlerinin belirli beyin bölgelerini hedefleyebilecek şekilde küçültülebilmesi uçuş sırasında da bu süreçlerin izlenebileceğine işaret etmektedir. İlerleyen bölümlerde fNIRS teknolojisinin çalışma prensipleri, güncel

sistemlerin özellikleri ve fNIRS ile yapılan öncü havacılık uygulamaları özetlenmiştir.

## 4. Kızılötesi Işık ile Optik Beyin Görüntüleme Yöntemi

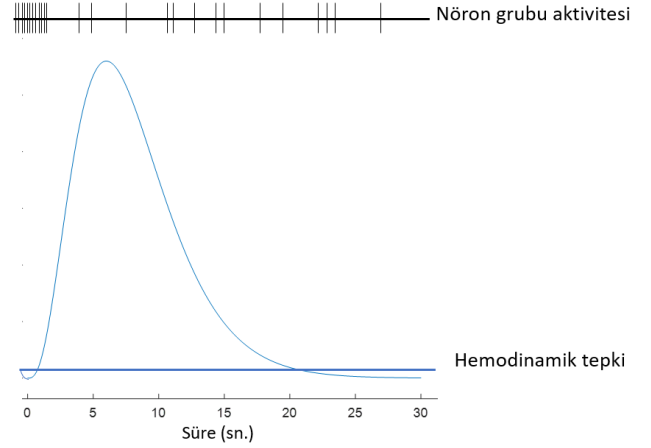
### 4.1. fNIRS Yönteminin Kısa Tarihçesi

1930'lu yıllarda optik alanında kaydedilen gelişmeler sonucunda kızılötesi ışınların deri, kemik, kas dokusu gibi yüzeylerden geçerek doku içerisinde spesifik molekül yapılarıyla etkileşime girdiğinin keşfedilmesi, bir dizi yenilikçi analiz yönteminin ortaya çıkmasına öncülük etmiştir (Chance, 1991). Kızılötesi ışınlarla kas dokusu üzerinde yapılan çalışmalar kasılmayı sağlayan metabolik reaksiyon sırasında gerekli olan oksijeni sağlamak için hemoglobin ve myoglobin moleküllerinin taşıdıkları oksijen atomlarını yitirdikleri sırada kızılötesi ışınlarla olan etkileşimlerinde bir farklılık olduğu anlaşılmıştır (Millikan, 1937). Bu bulgular oksijen doyumu oranı yüksek ve düşük kanın kızılötesi yelpazede farklı renklerde görüldüğü anlamına gelmektedir. Kan dolaşımındaki doymuş oksijen oranını invazif ölçüm gerektirmeden ışık yardımıyla ölçme imkânı veren puls oksimetre cihazları bu prensibe dayanmaktadır (Mannheimer, 2007). Kan oksijen doyumu oranının bu yöntemle izlenebildiğinin keşfi sonrasında havacılıkta yapılan öncü uygulamalardan birisi Glenn Millikan'ın kulak memesi üzerine yerleştirilen puls oksimetre yardımıyla pilotun maskesine verilen oksijen oranını ayarlayan hipoksi önleme sistemi olmuştur (Millikan, 1942; Severinghaus ve Astrup, 1986).

Kas hücrelerinde olduğu gibi beyin dokusunda yer alan sinir hücrelerinin de elektrik potansiyel oluşturabilmeleri için yoğun miktarda enerjiye ihtiyacı bulunmaktadır. Glikoz metabolizmasıyla sağlanan bu enerji aynı zamanda ortamda oksijen bulunmasını gerektirmektedir. Kasların aksine myoglobin gibi yapılar içerisinde oksijen depolayamayan sinir hücrelerinin enerji ihtiyacının karşılanması için gerekli olan oksijen dolaşım sistemi aracılığıyla kılcal damarlar üzerinden beyin dokusuna sağlanır. Sinir hücreleri aktifleştiği zaman açığa çıkan enerji ihtiyacı ile birlikte dokuyu besleyen kılcal damarlarda artan miktarda oksijen bağlı hemoglobin (HbO veya HbO<sub>2</sub>) molekülü oksijenini bırakarak deoksi-hemoglobin (HbR veya Hb) molekülüne dönüşür. Dokudaki bu değişim 4-5 saniyelik bir süre içerisinde dolaşım sisteminin bu bölgeye yüksek miktarda oksijen bağlı hemoglobin arzı yapmasını tetikler (Şekil 1). Hemodinamik tepki olarak adlandırılan bu fizyolojik süreç nedeniyle aktifleşerek enerji ihtiyacı normale göre yükselen beyin dokusundaki HbO<sub>2</sub> konsantrasyonunda artış gözlenir (Buxton vd., 1998; Buxton vd., 2004). Değişen HbO<sub>2</sub> yoğunluğu nedeniyle dokudaki kanın optik özelliklerinin de güçlü bir şekilde değişmesi, fNIRS yöntemiyle hemodinamik tepkilerin izlenmesi için bir fırsat sunmaktadır. Sinir dokusu ve dolaşım sistemi arasındaki bu nörovasküler eşleşme aynı zamanda İşlevsel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI) ve pozitron ışınım tomografisi (PET) gibi nörogörüntüleme yöntemlerinin de temelini oluşturmaktadır (Iadecola, 2017).

fNIRS yönteminin işlevsel beyin işlevlerinin takibi için kullanılabilmesi ilk kez Jobsis'in (1977) hiperventilasyon sırasında korteksdeki oksijenlenme değişiminin izlenebildiğini gösteren çalışmasıyla ortaya çıkmıştır (Ferrari & Quaresima, 2012). Yöntemin hasta yenidoğan bebekler üzerinde yapılan ilk uygulamaları sonucundaoksi-hemoglobin, deoksi-hemoglobin,

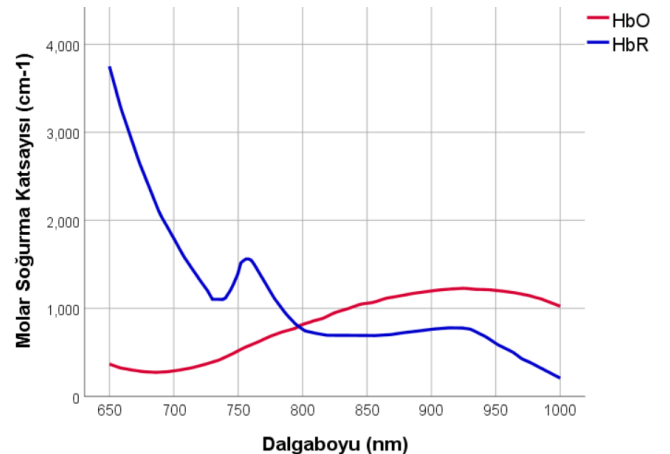
kan hacmi değişimi gibi ölçümlerin yapılabildiğinin gösterilmesi işlevsel beyin işlevlerinin fNIRS yöntemiyle izlenebileceğine yönelik ilk kanıtları sunmuştur (Cope ve Delpy, 1988). 1990'lı yıllarda ilk cihazların ortaya çıkmasıyla fNIRS yöntemiyle işlevsel beyin işlevlerinin izlenmesine yönelik çalışmaların sayısında artış gözlenmeye başlamıştır (Chance vd., 1993; Villringer vd., 1993; Villringer ve Chance, 1997). 2000'li yıllara gelindiğinde yazılım ve donanım bakımından yaşanan gelişmeler sonucunda daha çok ölçüm noktası destekleyen fNIRS sistemlerinin geliştirilmesiyle beraber bu yöntem giderek artan bir kullanım alanına sahip olmuştur (Obrig vd., 2000; Ayaz vd., 2012).



Şekil 1. Nöron gruplarının elektriksel aktivitesine bağlı olarak oluşan hemodinamik tepki.

### 4.2. fNIRS Yönteminin Fiziksel Temelleri

fNIRS yönteminin fiziksel temeli kırmızı ve kızıl-ötesi dalgaboylarındaki ışığın doku içerisinde oksijen taşıma görevli olan hemoglobin moleküllerinin varlığıyla orantılı olarak soğurulmasına dayanmaktadır. 650-950 nm dalgaboyu aralığında dokuda bulunan su, melanin gibi kromoforlara kıyasla en çok soğurulan molekül nöronların aktifleşmeleri için kritik önem taşıyan oksijeni hücrelere taşıyan hemoglobin molekülüdür (Şekil 2). Hemoglobinin oksijen bağlı ve oksijeni yitirmiş durumları bu dalgaboyu aralığında aynı zamanda farklı soğurma özellikleri göstermektedir. 700 nm civarında deoksi-hemoglobin, 900 nm civarında ise oksihemoglobinin daha çok soğurma yapması nedeniyle fNIRS sistemleri genellikle bu değerlere yakın dalgaboylarını kullanmaktadır.



Şekil 2. Optik pencere olarak adlandırılan 650-950nm dalgaboylarındaki ışık için HbO ve HbR soğurma katsayıları.

fNIRS sistemleri beyin dokusunu kızılötesi ışınlarla inceleme yaklaşımları bakımından sürekli aydınlatma (İng. continuous wave), frekans modülasyonlu (İng. frequency domain) ve zaman eksenli (İng. time domain) olmak üzere üç ana grup altında toplanmaktadır (Scholkmann vd., 2012; Ferrari ve Quaresima, 2012). Frekans modülasyonu yönteminde dokuya belirli salınım özellikleri olan ışınlar gönderilmekte ve toplanan sinyalin frekans, genlik, faz gibi özelliklerinde gözlenen değişim üzerinden belirli kromoforların hedef dokudaki varlığı hakkında kestirim yapılmaktadır. Zaman eksenli analizde ise pico-saniye uzunluğunda kızılötesi ışınlar dokuya gönderilerek algılayıcıya ulaşan fotonların ulaşma sürelerinin noktasal dağılım özellikleri (İng. point spread function) incelenmektedir (Pifferi vd., 2016; Yamada vd., 2019). Dağılım ve frekans modülasyonu özellikleri üzerinden HbO<sub>2</sub> ve Hb konsantrasyonlarının daha hassas ölçülmesi mümkün olmakla beraber, bu yöntemler lazer ışık kaynakları, fiberoptik iletim kanalları ve karmaşık elektronik devre tasarımı gerektirdiği için sahadan ziyade laboratuvar ortamında verimli olarak kullanılabilirlerdir.

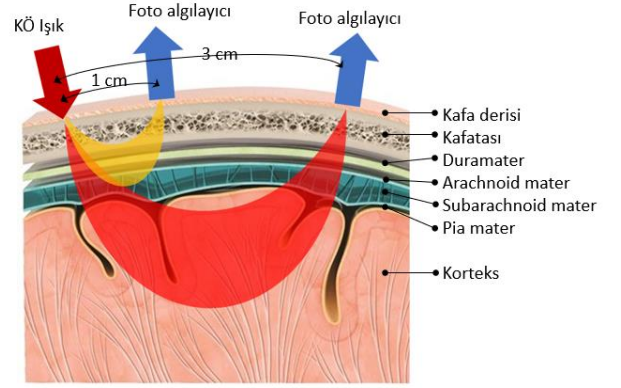
Sürekli aydınlatma yöntemi lazer yerine LED gibi kontrolü daha kolay ve daha az maliyetli ışık kaynaklarının kullanımına izin vermesi nedeniyle özellikle mobil fNIRS sistemlerinin tasarımında tercih edilmektedir. Sürekli aydınlatma içeren yöntemde belirli bir yoğunlukta ışık kaynağıyla aydınlatılan beyin dokusundan yansarak algılayıcılara ulaşan ışığın yoğunluğu arasındaki fark incelenmektedir. Optik pencere içerisindeki dalga boylarına sahip fotonlar beyin dokusuna nüfuz ettiğinde kısmen emilmekte kısmen de yansıtılmaktadır. Seçilen dalgaboyları itibariyle verilen ve toplanan ışınların şiddetinde oluşan farklılık ortamdaki HbO<sub>2</sub> ve Hb varlığıyla orantılı olarak gerçekleşmektedir. Doku gibi yoğun bir ortamdan geçen fotonların izledikleri yolun geometrisi ve uzunluğu da algılayıcıya ulaşan ışınların yoğunluğuna tesir etmektedir.

Analitik kimya alanında keşfedilen Beer-Lambert kanunu bu ilişkiyi logaritmik bir bozulma fonksiyonu olarak modelleyerek ışık yoğunlukları arasındaki farklılık ve fotonların izlediği yolu dikkate alarak hedeflenen kromoforların konsantrasyonları hakkında bir kestirim yapılmasına izin vermektedir. fNIRS yönteminde ışık kaynaklarının ve algılayıcıların kafa derisi üzerindeki konumları nedeniyle fotonlar kavisli bir yol izleyerek algılayıcılara ulaşmaktadır. Bu durum ışık kaynağı ve algılayıcının karşılıklı konumlandığı durumu modelleyen Beer-Lambert formülüne bir uyarılama yapılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle fNIRS literatüründe bu formül Uyarlanmış Beer-Lambert kanunu (İng. Modified Beer Lambert Law – MBLL) olarak ifade edilmektedir. Aşağıda verilen formül fNIRS sistemiyle optik pencere içerisinde bulunan iki farklı dalga boyunda ışın kullanılarak elde edilen optik yoğunluk değişimi değeri ile (İng. optical density) HbO<sub>2</sub> ve Hb kromoforlarının yoğunluklarındaki değişim arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \Delta OD_{\lambda 1} \\ \Delta OD_{\lambda 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log \left( \frac{I}{I_0} \right)_{\lambda 1} \\ \log \left( \frac{I}{I_0} \right)_{\lambda 2} \end{bmatrix} = d \cdot DPF \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{\lambda 1}^{Hb} & \epsilon_{\lambda 1}^{HbO_2} \\ \epsilon_{\lambda 2}^{Hb} & \epsilon_{\lambda 2}^{HbO_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Hb \\ \Delta HbO_2 \end{bmatrix}$$

Formülde hedef kromoforların bu dalga boylarındaki soğurulma katsayıları ( $\epsilon_{\lambda 1}^{Hb}$ ,  $\epsilon_{\lambda 1}^{HbO_2}$ ,  $\epsilon_{\lambda 2}^{Hb}$ ,  $\epsilon_{\lambda 2}^{HbO_2}$ ) ışık kaynağı- algılayıcı arası mesafe (d) ve fotonların izlediği yolun geometrisine yönelik bir düzeltme katsayısı (DPF-differential path factor) yer almaktadır. Optik yoğunluk farkı ( $\Delta OD_{\lambda 1}$ )

gözlenen ham kızılötesi ışın miktarının belirlenen bir referans aralıkta (ör. dinlenme veya görev başlangıç aşaması) gözlenen değerlerden çıkarılmasıyla elde edilir. MBLL denklemi optik yoğunluktaki değişim değeri üzerinden hedeflenen dokudaki HbO<sub>2</sub> ve Hb yoğunluğunda gerçekleşen değişimi yordamak için kullanılır. Şekil 3'te görüldüğü üzere ışık kaynağı ve algılayıcı arasındaki mesafeye bağlı olarak fotonların izlediği hüzmelerin derinliği değişmektedir. Mevcut sistemler ışık kaynakları ve algılayıcılar arasında 2.5-3 cm aralık bırakarak 1.5-2 cm civarında derinliklere ulaşabilmektedir.



Şekil 3. Işık kaynağına 1 ve 3 cm uzaklıkta konumlandırılmış algılayıcılara ulaşan kızılötesi ışınların dokuda izlediği yolların şematik gösterimi.

### 4.3. Mevcut Mobil fNIRS Sistem Örnekleri

Saha kullanımına uygun, giyilebilir fNIRS sistemleri arasında bir kesit Tablo 1'de sunulmuştur. Mevcut sistemler izleyebildikleri beyin bölgeleri, kanal sayıları, dalga boyları, örneklem hızları ve veri aktarım arayüzleri bakımından çeşitlilik göstermektedir. Dolayısıyla ölçüm yapılacak uygulama ortamının ihtiyaçlarına ve kısıtlarına göre uygun bir fNIRS sistemi seçilmesi önem taşımaktadır. Şekil 4'de mevcut sistem tasarımlarını temsilen yedi farklı ürünün görselleri sunulmuştur.



Şekil 4. Örnek portatif fNIRS sistemleri. Artinis Portalite<sup>†</sup> (1), Biopac fNIR Devices 2000M<sup>‡</sup> ve alın üzerine yerleştirilen sensör pad (2), GowerLabs LUMO<sup>§</sup> (3), Artinis Brite MKII<sup>\*\*</sup> (4), Shimadzu LIGHTNIRS<sup>††</sup> (5), Soterix OBELAB NIRSIT<sup>\*\*</sup> (6), Hitachi/NeU WOT-HS<sup>§§</sup> (7).

<sup>†</sup> www.artinis.com/portalite

<sup>‡</sup> www.biopac.com/product/fnir-2000m-systems/

<sup>§</sup> www.gowerlabs.co.uk/lumo

<sup>\*\*</sup> www.artinis.com/brite

<sup>††</sup> www.shimadzu.com/an/products/life-science-lab-instruments/imaging/lightnirs/

<sup>\*\*</sup> soterixmedical.com/research/nirsit

<sup>§§</sup> neu-brains.site/en/brain-activity-measurement/

Tablo 1. Sahada Kullanılan Portatif fNIRS Sistemleri ve Temel Teknik Özellikleri

fNIRS Cihaz Marka/Model	Hedef Bölge	Kanal Sayısı	Örneklem Hızı (Hz)	Kullanılan Dalgaboyları (nm)	Işık kaynağı	Ağırlık (gram)/Pil Süresi (saat)	Bağlantı
Artinis Brite MK II **	Esnek	27	150	760, 850	LED	300 gr / 3s	Bluetooth
Artinis Octamon	Frontal	8	50	760, 850	LED	260 gr / 3s	Bluetooth
Artinis Octamon+	Esnek	8	50	760, 850	LED	260 gr / 3s	Bluetooth
Artinis PortaLite	Frontal	3	50	760, 850	LED	88 gr / 8 s	Bluetooth
Biopac fNIR Devices 2000M	Frontal	18	2-10	730, 850	LED	200 gr / 2s	Bluetooth
GowerLabs LUMO *	Esnek	48-1728	3.2-20.5	735, 850	Lazer	195 gr / -	Bluetooth
g.tec g.SENSOR fNIRS **	Sensorimotor ve Frontal	8	10	735, 850	LED	140 gr/1.5-8s	Wi-Fi
Hamamatsu NIRO-200NX	Frontal	2	0.03-20	735, 810, 850	LED	700 gr / 0.5s	RS-232c
HCMedx NirSmart	Esnek	40	10-23	760, 850	Lazer	-	Wi-Fi
Hitachi/NeU WOT 100	Frontal	16	5	705, 830	Lazer	650 gr / 2s	Wi-Fi
Hitachi/NeU WOT 220	Frontal	22	5	705, 830	Lazer	700 gr / 2s	Wi-Fi
Hitachi/NeU WOT-HS	Frontal ve Temporal	34	10	705, 830	LED	525 gr / 2s	Wi-Fi
Hitachi/NeU HOT-1000	Frontal	2	10	705, 830	LED	125 gr / 4s	Bluetooth
Hitachi/NeU HOT-2000	Frontal	2	10	705, 830	LED	129 gr / 4s	Bluetooth
Hitachi/NeU ExBrain XB-01	Frontal	1	5	705, 830	LED	30 gr / 3s	Bluetooth
NIRx Sport 2 **	Esnek	40-60	70-240	760, 850	LED	970 gr / 8 s	Wi-Fi
Plux/Charles River Analytics	Frontal	1	500	660, 950	LED	45 gr / 10 s	Bluetooth
Seenel Medelopt **	Esnek	32	64	760, 850	LED	-	Wi-Fi
Shimadzu LIGHTNIRS	Esnek	20	13.3	780, 805, 830	Lazer	1600 gr / 4s	Wi-Fi
Shimadzu SPEEDNIRS	Esnek	22	13.3	780, 805, 830	Lazer	1600 gr / 4s	Wi-Fi
Soterix/OBELAB NIRSIT *	Frontal	32-204	16.276	780, 850	Lazer	550 gr / 8s	Wi-Fi
Spectratech OEG-17H	Esnek	14-57	0.76-6.10	770, 840	LED	2000gr/2-6s	LAN
Spectratech OEG-16H-01	Frontal	16	0.76-6.10	770, 840	LED	2000gr/2-10s	LAN

\* Difüze Optik Tomografi (DOT) desteği

\*\* EEG entegrasyonu desteği

Mevcut portatif fNIRS sistemleri (1) az kanallı, hafif ve kolay uygulanabilir sensörler (ör. Portalite), (2) orta seviyede kanal destekleyen ve sabit sensör geometrisi kullanan sistemler (ör. fNIR 2000M, NIRSIT, Hitachi/NeU WOT-HS), (3) çok kanal destekleyen ve baş üzerine esnek yerleşim sağlayan sistemler (ör. Brite, Lightnirs, LUMO) olarak üç ana grupta ele alınabilir.

Tablo 1'de verilen mobil fNIRS sistemlerinin hepsi sürekli aydınlatma tayfölcümü yöntemini kullanmaktadır. Nispeten daha basit kontrol devreleri içermesi, esnek tasarıma izin vermesi ve az pil tüketmesi nedeniyle bu yöntem mobil uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Buna karşılık bazı sistemlerin daha ekonomik ve kullanım kolaylığı getiren LED'ler yerine ışık kaynağı olarak lazer kullandığı görülmektedir. Lazer temelli sistemler LED sistemlere göre pil tüketimi, ağırlık ve büyüklük bakımından dezavantajlı olmakla beraber foton karakteristiklerinin daha hassas kontrolünün sağlanması bakımından bazı avantajlar sunmaktadır.

Mevcut sistemlerin büyük bir çoğunluğu çift dalga boyu kullanmaktadır. Hamamatsu ve Shimadzu sistemleri 805/810 nm gibi HbO<sub>2</sub> ve Hb moleküllerinin yakın oranda soğurma yaptığı, izobestik nokta olarak adlandırılan ek bir dalga boyunda daha ölçüm alabilmektedir. fNIR Devices ve Artinis gibi sistemlerde

ise ortam ışığının düzeyini izlemek amacıyla LED ışık kaynakları kapalı konumdayken de veri çekebilme özelliği bulunmaktadır. Bu özellik sayesinde algılayıcıların deri ile yeterince temas sağlamaması nedeniyle sızıntı olması gibi durumlar tespit edilebilmektedir.

Sistemler destekledikleri örnekleme hızları bakımından da farklılık göstermektedir. Örneklem hızı sütununda aralık verilen sistemler kontrol yazılımları üzerinden hız değişikliği yapılmasını destekleyebilmektedir. Hemodinamik tepkinin oluşumunun ve sönümlenmesinin yaklaşık 8-10 saniye gibi bir süre alması ve bilişsel süreçler idame edilirken beyin dokusunda gerçekleşen hemodinamik hareketlerin üst üste binerek ekleniyor olması nedeniyle 2 saniyede bir (0.5 Hz) örnekleme yapabilen bir fNIRS sisteminden de korteksdeki oksijen tüketimi hakkında faydalı bilgi alınması mümkündür. Daha yüksek hızlarda örnekleme yapan sistemler hemodinamik tepkiler ve ilişkili fizyolojik süreçler hakkında daha çok bilgi edinilmesini sağlamaktadır.

Özellikleri özetlenen fNIRS sistemlerini birbirinden ayıran bir diğer önemli özellik izleyebildikleri beyin bölgeleridir. Biopac fNIR Devices 2000M veya NIRSIT gibi sistemler alın üzerine konumlandırılarak frontal korteks üzerinden veri almak üzere optimize edilmiştir. Hitachi/NeU WOT-HS gibi sistemler

temporal korteksi de kapsayacak şekilde kapsama alanını arttırabilmektedir. Tablo 1'de hedef bölge sütununda esnek değerine sahip Artinis Brite MKII, NIRx Sport2, NirSmart, LUMO gibi sistemler ise ışık kaynağı ve algılayıcıların ayrı ayrı monte edilmesine izin vererek daha esnek sensör yerleşimine olanak sağlamaktadır. Kızılötesi fotonlar deri ve kafatasından geçebilmesine rağmen saç folikülleri tarafından saçılma uğratıldığı için saçlı doku üzerinden veri alınması için özel ışık kaynağı ve algılayıcı tasarımları kullanılması gerekmektedir.

Son olarak LUMO ve NIRSIT sistemleri Difüze Optik Tomografi (Diffuse Optical Tomography - DOT) yöntemini uygulayabilmeleri bakımından diğer sistemlerden ayrılmaktadır. DOT yöntemiyle ölçüm yapan sistemler aralarındaki mesafe bakımından çeşitlilik gösteren çok sayıda ışık kaynağı ve algılayıcı kombinasyonu üzerinden veri alınmasını sağlayarak beyin dokusunda birden fazla derinlik seviyesinden yüksek yoğunluklu ölçüm alınmasını sağlamaktadır. Örneğin 12 parçalı desende LUMO sistemi 48 kanal desteklemesine rağmen DOT yöntemini kullanarak kanal sayısını teorik olarak 1728'e çıkararak 3 cm derinliğe kadar gerçekleşen hemodinamik tepkilerin 3 boyutlu bir görüntüsünü oluşturabilmektedir (Frijia vd., 2021). Saha kullanımı için uygun olmayan, laboratuvar kullanımına yönelik tasarlanmış fNIRS sistemlerinin yer aldığı daha geniş derleme ve değerlendirmeler için Pinti vd. (2018), Quaresima ve Ferrari (2019) ve Scholkmann vd. (2014) gibi kaynaklara başvurulabilir.

Mobil fNIRS sistemlerindeki çeşitlilik farklı çalışmaların ihtiyaçlarına göre uygun sistemlerin belirlenmesini de gerektirmektedir. Örneğin, jet pilotlarıyla uçuş sırasında veri alınması planlandığında kask kullanımı, ortam kısıtları ve havacılık kuralları gereği PortaLite, XB-01 veya Plux türü kask altına uygulanabilecek boyutlardaki sensörler nispeten daha uygulanabilir çözümler olarak değerlendirilebilir. Diğer sensörlerin kullanımı daha fazla noktadan veri alınmasını sağlayarak daha kapsamlı bilgi toplanmasını sağlamakla beraber özel bir kask tasarımı ve montaj işlemi gerektirecektir. Uçuş simülatörü gibi kokpite kıyasla daha çok serbestliğin olduğu veri çekim durumlarında Tablo 1'de listelenen sistemlerin hepsi teknik olarak kullanılabilir. İzlenmesi hedeflenen beyin bölgelerine ve pilotlar açısından kabul edilebilir giyilebilirlik özelliklerine sahip olduğu değerlendirilen sensörlerle simülatör uçuşları sırasında veri toplanarak hemodinamik hareketlerin izlenmesi mümkündür.

#### 4.4. Mobil fNIRS Verilerinin Analiz Sürecini Etkileyen Faktörler

Sahada portatif fNIRS sensörleri ile yapılan ölçümlerin anlamlandırılabilmesinde laboratuvar ortamında temel bilişsel süreçler üzerinde farklı teknolojilerle gerçekleştirilen detaylı gözlemlerin oluşturduğu birikimin önemli bir rolü bulunmaktadır. Laboratuvar ortamında daha büyük fNIRS sistemleriyle yapılan çalışmalara ek olarak hemodinamik tepkinin ölçümüne odaklanan işlevsel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI) çalışmalarından elde edilen bulgular da saha çalışmaları için yol gösterici niteliktedir. Saha kullanımında odaklanılacak ölçüm bölgelerinin belirlenmesinde ve ilgili bilişsel süreçler ekseninde beklenen etkilere yönelik ilk hipotezlerin kurgulanmasında bu birikimden yararlanılmaktadır.

Gerçek kullanım sırasında fiziksel koşulların sinyaller üzerinde kontrollü laboratuvar ortamına kıyasla bazı olumsuzluklar getirmesi söz konusudur. fNIRS optik doğası

gereği çevresel kızılötesi ışık kaynaklarının varlığından, saç ve terlemeden etkilenebilmektedir. Ortam ışığının etkisinin azaltılması için sensörlerin kızılötesi ışın geçirmeyen özel kumaşlar ile örtülmesi ve spesifik dalga boyları dışındaki aralıkları filtreleyebilen algılayıcılar kullanılması yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

Harekete bağlı olarak kanlanmada oluşabilecek değişiklikler fNIRS sinyalleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu tür fiziksel harekete bağlı etkilerin oluşturduğu sinyal değişiminin bilişsel etkilerden kaynaklanan değişimlere kıyasla yüksek genliğe sahip olması ve çoğu mobil sistemin baş hareketlerini izlemek için kullanılabilir ivme ölçerlere sahip olması harekete bağlı etkilerin azaltılması için etkili yöntemler geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Ayaz vd., 2010; Molavi ve Dumont, 2012).

fNIRS sinyallerine önemli yansımaları olan bir başka önemli etken kardiyovasküler etkiler olarak adlandırılan nabız, nefes alma döngüleri ile Mayer dalgalarıdır. Bu tür kardiyovasküler etkilere ait frekans aralıkları hemodinamik etkilere kıyasla daha yüksek aralıklarda bulunduğu için band-geçiren veya sonlu dürtü filtreleri kullanılarak sinyaller bu etkilerden arındırılabilir (Barker vd., 2013). Uygulama bağlamında kullanımı gerektiğinde süzülen bu bilgiler üzerinden nabız, nabız değişkenliği, nefes alma sıklığı gibi nöroergonomi araştırmalarında sıklıkla kullanılan ek bilgiler de elde edilebilmektedir.

Son olarak, fNIRS yönteminin bir diğer önemli kısıtı izlenebilen beyin dokusunun yüzeye yakın bölümlerle kısıtlı olması ve kafa büyüklüğüne bağlı olarak sensör konumlarının kişiler arası farklılıklar gösterebilmesidir. Üst seviye bilişsel süreçlerin ağırlıklı olarak yüzeye yakın olan korteks bölgesiyle ilişkili olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla bu kısıta rağmen fNIRS'den yararlı bilgi alınabilmesi mümkündür. Derin yapıların görülebildiği fMRI gibi teknikler katılımcının yatar pozisyonda ve kapalı bir ortamda, sabit konumda durmasını gerektirdiği için saha kullanımına elverişli değildir. Mobil, portatif ölçüm imkânı sayesinde daha derin bölgelerin izlenebildiği fMRI gibi yöntemlerin kullanılmayacağı uçuş simülatörü gibi ortamlarda veri toplama imkânı sağlaması fNIRS yönteminin sunduğu en önemli avantajlardan birisidir. Saha uygulamaları getirdiği teknik zorluklara rağmen beynin daha gerçekçi uyaranlara maruz kaldığı durumlarda incelenmesine olanak vermektedir. Laboratuvar deneylerine kıyasla gerçekçi koşullarda beyin yanıtlarının da güçlenmesi ölçümlerin saha ortamlarında yapılmasına odaklanan çalışmalar için önemli bir motivasyon kaynağıdır.

## 5. fNIRS Havacılık Uygulamaları

Bu kısımda havacılık alanında fNIRS teknolojisiyle gerçekleştirmiş bazı öncü çalışmalar, bilişsel iş yükü takibi ve beceri kazanımının nörofizyolojik izdüşümleri genel başlıkları altında özetlenmiştir. Buna ek olarak fNIRS teknolojisinin gerçek uçuş sırasında bilişsel işyükü takibi ve hipoksi kestirimi amacıyla kullanıldığı çalışmalardan da örnekler sunulmuştur.

### 5.1. Beceri Kazanımının Nörofizyolojik İzdüşümleri

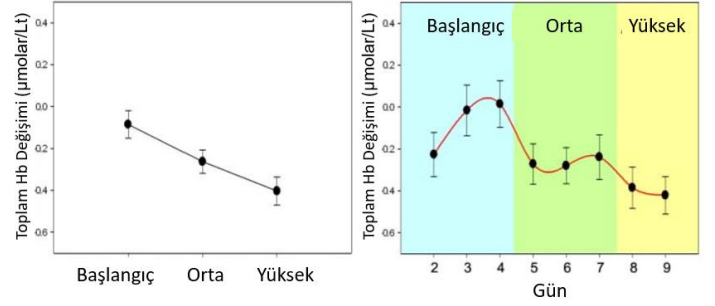
Simülatör ortamları çeşitli senaryoların planlanıp aynı koşullarda tekrar edilerek koşulmasını sağlayabildiği için pilot/operatör eğitiminde önemli bir role sahiptir. Bu tür

eğitimler sırasında fNIRS ölçümlerinin alınarak simülâtörden elde edilen performans parametreleriyle bir arada yapılan değerlendirmeler pilotların/operatörlerin beceri gelişimi süreçlerinin hem davranışsal hem de nörofizyolojik bakımdan değerlendirilmesi imkanını sunmaktadır. Bu bağlamda İHA operatörlerinin eğitimi ve bilişsel iş yükü takibi için yapılan bir fNIRS çalışmasında prefrontal korteks bölgesinden alınan ölçümlerin operatörün artan deneyimine bağlı olarak istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar gösterdiği gözlenmiştir (Ayaz vd., 2013; Ayaz vd., 2012; Izzetoglu vd., 2014). Bu çalışma sırasında İHA simülâtör uçuş deneyimi olmayan katılımcılar, İHA simülâtöründe piste yaklaşma ve iniş görevlerini üç haftalık bir süreye yayılan ve birer saat süren 9 seans içerisinde tekrarlı olarak icra etmiştir. Kullanılan senaryolar acemi bir pilotu gerçekçi ve kritik derecede önemli olan iki İHA görevine maruz bırakarak, zaman içerisinde davranışsal olarak gösterdikleri gelişimin nörofizyolojik izdüşümlerini ortaya çıkarmayı amaçlamıştır. İlk senaryoda katılımcılardan ekranda beliren hedeflere doğru İHA'yı yönelterek piste dönüş manevrasını tamamlamaları istenmiştir. İkinci senaryoda ise katılımcılardan piste yaklaşmak üzere olan İHA'yı piste başarıyla indirmeleri istenmiştir. İki senaryoda da katılımcıların belirli hız ve yatış açısı kısıtlamalarına uyararak ve yer yer olumsuz hava koşullarıyla mücadele ederek İHA'yı mümkün mertebe en kısa yoldan ve düzgün bir biçimde uçurmaları istenmiştir. Performans değerlendirmesi İHA'nın bu manevralar sırasında izlemesi beklenen yükseklik, yön ve hız parametrelerinden ne derece saptığının ölçülmesi yoluyla yapılmıştır. Tüm katılımcılar başlangıçta güç (throttle), joystick ve rudder pedallarını 9 hafta süresinde her hafta tutarlı bir şekilde performans seviyelerini ilettiler son hafta itibariyle mükemmel yakın performansla iniş yapabilir duruma gelmişlerdir.

İHA görevleri sırasında katılımcıların deneyim seviyesi ilerledikçe (başlangıç/orta/uzman) beyinlerinin ön bölgesinde Biopac fNIRS cihazı ile izlenen toplam hemoglobin (HbT) yoğunluğundaki değişim miktarında anlamlı bir farklılık olup olmadığı tek yönlü, tekrarlı ANOVA testi ile sınanmıştır. Önceki çalışmalarda (Ayaz vd., 2012) benzer bilişsel süreçlere odaklanan deneylerden elde edilen bulgular, sol prefrontal korteksin inferior frontal gyrus bölgesinin bu süreçler sırasında istikrarlı yanıt verdiği gözlemlendiği için veri analizi sırasında bu kanala odaklanılmıştır. İstatistiksel bulgular tecrübe seviyesi arttıkça öğrenmeye bağlı olarak davranışsal ölçümlerde gözlenen iyileşmeye paralel olarak, bu bölgeden toplanan fNIRS işaretinde istatistiksel olarak anlamlı bir düşme olduğunu göstermiştir (Şekil 5, sol). Bu durum simülâtör ortamında zamanla gerçekleşen öğrenme ve beceri gelişimi süreçlerinin beynin ön bölgesine olan yansımalarının fNIRS teknolojisiyle izlenmesinin mümkün olduğuna işaret etmektedir.

Haftalık seanslar özelinde gelişim sürecine bakıldığında ise beceri düzeyinin performansa göre başlangıç düzeyinde olduğu aşamada ilk etapta prefrontal oksijenlenmede artış olduğu, davranışsal aşama kaydedildiğinde düşüş trendi olduğu görülmektedir (Şekil 5, sağ). Orta seviye performans döneminde ise yine kısmen prefrontal oksijenlenmede artış olmuş, performans en iyi noktaya geldiği aşamada ise en düşük düzeyde oksijenlenme gözlenmiştir. Başlangıç ve orta düzeyde gözlenen bu tür dalgalanmalar sürecin negatif bir eğim ile doğrusal olarak ilerlemediğini, kişilerin göreve angaje olma durumlarına göre doğrusal olmayan değişkenlikler gösterebildiğine işaret etmektedir. Katılımcıların İHA simülasyonunda kısa bir eğitim ile bu sürece dahil olmuş olmaları nedeniyle ilk denemelerindeki

prefrontal oksijenlenme düzeyi kontrollere aşına olarak performans iyileşmesi yaşadıkları ikinci ve üçüncü seanslarda göreve angajman düzeyleriyle beraber artış göstermiştir. Orta gelişim düzeyinde ise aynı işlevlerin aynı düzeyde prefrontal etki oluşturmadığı, fakat katılımcıların temel kontrol yüzeylerine aşına olduktan sonra görev başarı puanlarını arttırmak amacıyla sarfettikleri ek çabanın bu kısımdaki seanslarda belirli bir düzeyde prefrontal oksijenlenme oluşturduğu görülmektedir. En üst düzey performans görülen son iki seansta ise davranışsal performansın ideal değerlere yakınsamasıyla prefrontal oksijenlenmenin daha da düşük seviyelerde gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 5. İHA simülâtör çalışmasında tekrarlı senaryo uygulaması sırasında performans aşamaları ve seanslara göre fNIRS sinyallerinde gözlenen ortalama değişim (Ayaz vd., 2012, s.6).

Nörobilim literatüründe eğitime bağlı olarak katılımcıların Tetris gibi görevlerde uzmanlaşma trendine odaklanan çalışmalarda da performans artışına paralel olarak prefrontal korteks bölgesindeki aktifleşme düzeyinde azalma olduğu raporlanmıştır (Haier vd. 2009). Bu durumun ilgili görevin uzmanlaşan kişi için başlangıç düzeyine göre daha az düzeyde üst düzey, bilinçli düşünme eforu gerektirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu örüntüler aynı performansı gösteren iki bireyin görevi icra ederken prefrontal kortekslerinde gerçekleşen aktivite düzeyleri üzerinden değerlendirmeler yapılması için bir fırsat sunmaktadır. Farklı uzmanlık düzeylerinde olan operatörlerin bir arayüzü kullanırken prefrontal korteks aktiviteleri bakımından farklı trendler gösterdiği fNIRS literatüründe farklı uygulama ortamlarında gözlenmiştir (İşbilir vd., 2019). Başka bir deyişle, fNIRS ölçümleri davranışsal performans ölçümleriyle bir arada ele alınarak *bilişsel rezerv* kavramının niceliksel bir ifadesi tanımlanabilir. Örneğin görev performansı arttıkça prefrontal korteksdeki aktifleşmenin azalması, pilotun uçuş sırasında gerçekleşebilecek acil durumlara daha çabuk reaksiyon göstererek doğru kararlar almasını sağlayacak bilişsel rezervin uzmanlaşma sonucunda bu bölgede oluştuğuna işaret etmektedir. Dolayısıyla, fNIRS işaretleri ve davranışsal performans verileri bir arada kullanıldığında simülâtör eğitimi sırasında pilotun sahip olduğu bilişsel rezervin miktarına yönelik faydalı çıkarımlar yapılması mümkün görünmektedir.

## 5.2. Bilişsel İşyükü Takibi

Bu kısımda operatörlerin ekolojik olarak geçerli ortamlarda görevlerini icra ederken bilişsel işyüklerinde gerçekleşen değişimin fNIRS yöntemiyle ölçülebileceğine işaret eden iki deneyin sonuçlarına yer verilmiştir. İlk çalışmada bir grup hava trafik kontrolörü standard n-geri testi ve iki değişik arayüz aracılığıyla hava trafik kontrol görevi icra ederken fNIRS ölçümü yapılmıştır (Ayaz vd., 2012). N-geri testinde katılımcı-

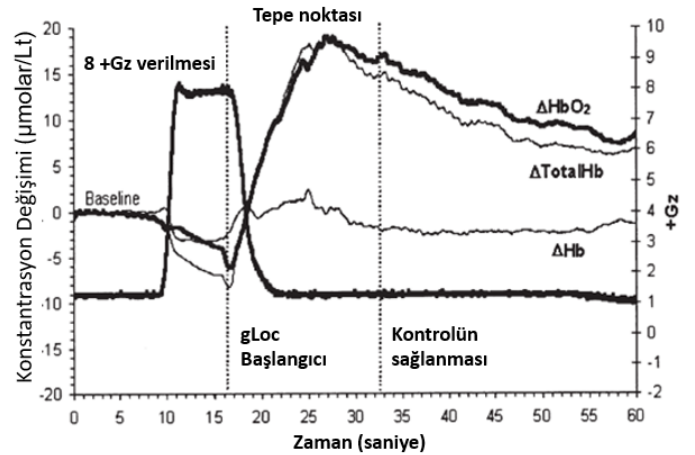


lardan ekranda beliren karakterleri izleyerek tekrar etme sıklıklarında görülen örüntülere göre bir düğmeye basmak suretiyle tepki vermeleri istenmiştir. Test sırasında katılımcıların 1-geri durumunda arka arkaya aynı karakterin geldiği hallerde, 2-geri durumunda gözlenen karakterin bir önceki aşamada gösterilen ile aynı olduğu hallerde, 3-geri durumunda ise gözlenen karakterin iki aşama önce gösterilen karakterle aynı olduğu hallerde düğmeye basmaları beklenmektedir. Seviye arttıkça akılda tutulması gereken karakter miktarı da arttığı için bu test nöropsikoloji ve insan faktörleri literatüründe işleyen bellek ve dikkat kapasitesinin ölçümü için sıklıkla kullanılmaktadır (Smith ve Jonides, 1997). Hava trafik kontrolü görevinde ise kontrolör ve pilotlar arasında iki tür iletişim kanalı kullanılmaktadır. İlk görevde kontrolörler pilotlarla ses bazlı iletişim kurarak uçaklara yönlendirmede bulunmuş, ikinci görevde ise iletişim için ses yerine yeni geliştirilen chat arayüzünü kullanmışlardır. Takip edilen uçak miktarı 6, 12 ve 18 olmak üzere sistematik olarak artırılarak görevlerin zorluğu artırılmıştır (Willems et al., 2006, 2010). Bu deneylerde fNIRS ile prefrontal korteks bölgesi üzerinde yapılan ölçümle incelendiğinde görev zorluğu arttıkça prefrontal korteksdeki aktifleşme miktarında da aynı yönde bir artış olduğu gözlenmiştir. Ayrıca chat bazlı arayüzün ses temelli arayüze kıyasla daha az prefrontal aktivite oluşturduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla bu çalışma alternatif arayüz tasarımlarının operatörler üzerinde oluşturduğu bilişsel iş yükü bakımından değerlendirilmesinde fNIRS teknolojisinden yararlanılabileceğini göstermektedir.

Son yıllardaki çalışmalar fNIRS yönteminin mental iş yükünün uçuş simülöründe görev koşutururken gerçek zamanlı olarak değerlendirilmesinin de mümkün olabileceğine işaret etmektedir. Örneğin Gateau vd. (2015) öncü çalışmasında pilotun dorsolateral prefrontal korteks bölgesinden alınan fNIRS sinyalleri üzerine support-vector machine algoritmasını koşturarak uçuş simülöründe düşük ve yüksek mental iş yükü oluşan durumların kestirilebileceği gözlenmiştir. Benzer bir çalışmada Çakır vd. (2016) bir Airbus A320 simülörü uçuş sırasında mental iş yükü düzeyini 3 kademeli olarak (düşük, orta, yüksek) fNIRS sinyalleri üzerine doğrusal ayırdedici modeller koşturarak %70 doğruluk payıyla öngörebilmiştir (Şekil 6). Son olarak, Kikuwa vd. (2008) gerçek bir helikopter uçuşu sırasında iş yükünün arttığı durumlarda (ör. dağa yaklaşma manevrası) fNIRS sinyallerinde de anlamlı bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular fNIRS yöntemiyle prefrontal korteks bölgesinde izlenen hemodinamik değişimlerin havacılık uygulamaları sırasında mental iş yükü kestirimi için etkili bir biçimde kullanılabileceğine işaret etmektedir.

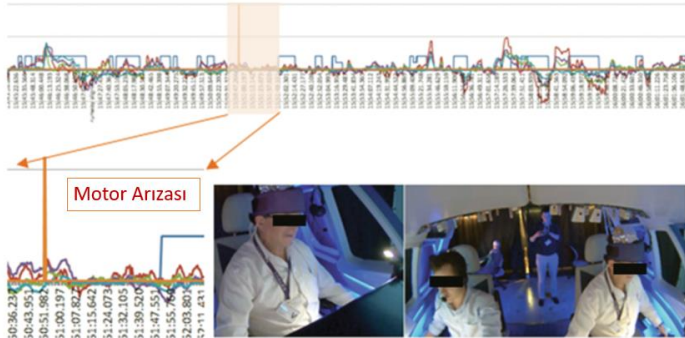
### 5.3. Hipoksi ve G-LoC Kestirimi Uygulamaları

Yüksek irtifada düşük hava basıncına maruz kalma dolayısıyla oluşan hipoksi ve yüksek hızda yapılan manevralar sırasında yerçekimi nedeniyle yaşanan bilinç kaybı (İng. gravity induced loss of consciousness – G-LoC) durumları uçuş emniyetini tehdit eden başlıca fizyolojik durumlardır. Bu durumların önceden tespit edilerek gerekli tedbirlerin alınabilmesi (ör. oto pilota geçilerek güvenli bir irtifaya inilmesi veya pilota önceden uyarı verilmesi) uçuş emniyetinin sağlanması için önem taşımaktadır. İki durumda da beyindeki kan akışı ve oksijen içeriğinde değişiklik oluştuğu için fNIRS teknolojisi hipoksi ve G-LoC kestirimi yapılması için de önemli fırsatlar sunmaktadır. Ryoo vd. (2004) santrifüj içerisinde yaptıkları fNIRS çalışmasında G-LoC etkisinin görülmeye başlamasından kısa bir süre önce prefrontal korteksdeki oksijen doygunluk düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir düşüş gözlendiğini raporlamıştır. Benzer bir şekilde Benni vd. (2003) tarafından yapılan santrifüj çalışmasında G-baskısı uygulanırken deoksi-hemoglobin düzeyinde bir miktar artma ve oksihemoglobin seviyesinde azalma olduğu, G-baskısı ortadan kalkınca ise temiz kan miktarında yoğun bir artış olduğu ve bu artışı takip eden 20 saniyelik sürede bilincin tekrar açıldığı gözlenmiştir (Şekil 7). Kobayashi ve Miyamoto (2000) ise F15 pilotlarıyla gerçek uçuş sırasında yapılan manevralar sırasında aldıkları fNIRS verilerinde benzer örüntüler bulunduğunu raporlamıştır.



Şekil 7. Oksi- ve deoksi-hemoglobin miktarlarında +8 Gz'lik stress öncesi, sırası ve sonrasında gözlenen değişim (Benni vd., 2003, s. 374).

Mevcut çalışmalar G-LoC tespiti için tüm pilotlara uygulanabilecek genel bir kritik eşik değeri henüz tespit edebilmiş değildir. fNIRS ile 114 pilot üzerinde yapılan geniş kapsamlı bir çalışma G-LoC oluşumunun oksijen doygunluk miktarında ortalama %15'lik bir azalmayla birlikte ortaya çıktığını göstermiş (Kurihara vd. 2007), ancak bu değer pilotların G-LoC yaşadığı anın kestirilmesi için yeterli bir kesinlik vermemektedir. Bu durumun pilotların g-toleranslarındaki farklılıklardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. G-LoC'a nazaran hipoksi ise fNIRS ile nispeten az çalışılmış bir alandır. Pilotların soluduğu hava karışımının kimyasal içeriğinin değiştirilerek hipoksi etkisi yaratıldığı bir deneyde G-LoC etkisine benzer bir şekilde beyindeki oksijenleşme seviyesinde önemli düşüşler olduğu gözlenmiştir (Davranche vd., 2016).



Şekil 6. fNIRS ile gerçek zamanlı bilişsel iş yükü takibi yapılan bir simülör uçuşu sırasında motor arızası sonrası gözlenen yanıt. (Çakır vd., 2016, s.155).

## 6. Sonuç

Havacılık operasyonlarının daha güvenli hale getirilebilmesi için pilotların ve operatörlerin bilişsel durumlarının tespiti ve takibi için kullanılacak güvenilir, nesnel ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu derlemede değinilen öncü çalışmalarda elde edilen bulgular, fNIRS optik beyin görüntüleme teknolojisi gibi saha kullanımına uygun, portatif ve güvenilir nörofizyolojik ölçüm yöntemlerinin bu ihtiyaca yönelik önemli avantajlar sunabileceğine işaret etmektedir. Özetlenen öncü çalışmalar görev icrası sırasında bilişsel işyükünde oluşan değişimin gerçek zamanlı takibi, alternatif arayüzlerin operatörler üzerinde oluşturdukları bilişsel işyükü bakımından kıyaslanması, g-loc/hipoksi gibi durumların kestirimi gibi faydalı bilgilerin fNIRS yöntemiyle elde edilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Daha büyük örneklerle çeşitli havacılık senaryolarını da içine alacak şekilde yapılacak çalışmalar sayesinde nörofizyolojik yöntemlerle bilişsel süreç takip yöntemlerinin daha da geliştirilmesi olası görünmektedir. Bu yöntemlerin geliştirilmesiyle simülasyon eğitimlerinin kişinin bilişsel özelliklerine göre kişiselleştirilebildiği akıllı eğitim ortamları, insan-makina tümleşmesine vesile olan yenilikçi, etkin arayüzlerin tasarımı gibi başka önemli çıktılar da elde edilmesi beklenmektedir. Mobil sistemlerin giderek daha çok kortikal bölgeden veri alınmasına imkân vermesi ve difüze optik tomografi gibi yöntemlerin yaygınlaşmaya başlaması bölgeler arası bağlantı ilişkileri ve 3-boyutlu trend analizleri üzerinden mevcut analizlerin derinleştirilmesi için önemli fırsatlar sunmaktadır. Son olarak literatürde değişik sensörlerle elde edilen bulgular göz önünde bulundurulduğunda, fNIRS sistemlerinin EEG, göz izleme cihazı gibi ek ölçümlerle birleştirildiği çok kipli analiz yaklaşımıyla daha güçlü bilişsel değerlendirmeler yapılabileceği değerlendirilmektedir.

## Kaynakça

Ayaz, H., Onaral, B., Izzetoglu, K., Shewokis, P. A., McKendrick, R., & Parasuraman, R. (2013). Continuous monitoring of brain dynamics with functional near infrared spectroscopy as a tool for neuroergonomic research: Empirical examples and a technological development. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 1-13.

Ayaz, H., Çakır, M. P., İzzetoğlu, K., Curtin, A., Shewokis, P. A., Bunce, S. C., & Onaral, B. (2012, March). Monitoring expertise development during simulated UAV piloting tasks using optical brain imaging. In *Proceedings of 2012 IEEE aerospace conference* (pp. 1-11). IEEE.

Ayaz, H., Shewokis, P. A., Bunce, S., Izzetoglu, K., Willems, B., & Onaral, B. (2012). Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment. *Neuroimage*, 59(1), 36-47.

Ayaz, H., Bunce, S., Shewokis, P., Izzetoglu, K., Willems, B., & Onaral, B. (2012). Using Brain Activity to Predict Task Performance and Operator Efficiency. In H. Zhang, A. Hussain, D. Liu & Z. Wang (Eds.), *Advances in Brain Inspired Cognitive Systems* (Vol. 7366, pp. 147-155). Berlin: Springer.

Ayaz, H., Shewokis, P. A., Curtin, A., Izzetoglu, M., Izzetoglu, K., & Onaral, B. (2011). Using MazeSuite and Functional Near Infrared Spectroscopy to Study Learning in Spatial Navigation. *Journal of Visual Experiments* (56), e3443.

Ayaz, H., Willems, B., Bunce, B., Shewokis, P. A., Izzetoglu, K., Hah, S., Onaral, B. (2010). Cognitive Workload Assessment of Air Traffic Controllers Using Optical Brain Imaging Sensors. In T. Marek, W. Karwowski & V. Rice (Eds.), *Advances in Understanding Human Performance: Neuroergonomics, Human Factors Design, and Special Populations* (pp. 21-31): CRC Press.

Ayaz, H., Izzetoglu, M., Shewokis, P. A., & Onaral, B. (2010, August). Sliding-window motion artifact rejection for functional near-infrared spectroscopy. In *Proceedings of 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology* (pp. 6567-6570). IEEE.

Ayaz, H., & Dehais, F. (Eds.). (2019). *Neuroergonomics: The brain at work and in everyday life*. Academic Press.

Barker, J. W., Aarabi, A., & Huppert, T. J. (2013). Autoregressive model based algorithm for correcting motion and serially correlated errors in fNIRS. *Biomedical Optics Express*, 4(8), 1366-1379.

Benni, P. B., Li, J. K., Chen, B., Cammarota, J., & Amory, D. W. (2003). NIRS monitoring of pilots subjected to+ Gz acceleration and G-induced loss of consciousness (G-LOC). In *Oxygen Transport to Tissue XXIV* (pp. 371-379). New York: Springer.

Borghini, G., Isabella, R., Vecchiato, G., Toppi, J., Astolfi, L., Caltagirone, C., & Babiloni, F. (2011). Brainshield: HREEG study of perceived pilot mental workload. *Italian Journal of Aerospace Medicine*, 5, 34-47.

Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 58-75.

Bunce, S., Izzetoglu, K., Ayaz, H., Shewokis, P., Izzetoglu, M., Pourrezaei, K., & Onaral, B. (2011). Implementation of fNIRS for Monitoring Levels of Expertise and Mental Workload. In D. Schmorow & C. Fidopiastis (Eds.), *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems* (Vol. 6780, pp. 13-22). Berlin: Springer.

Buxton, R. B., Wong, E. C., & Frank, L. R. (1998). Dynamics of blood flow and oxygenation changes during brain activation: the balloon model. *Magnetic Resonance in Medicine*, 39(6), 855-864.

Buxton, R. B., Uludağ, K., Dubowitz, D. J., & Liu, T. T. (2004). Modeling the hemodynamic response to brain activation. *Neuroimage*, 23, S220-S233.

Çakır, M. P., Vural, M., Koç, S. Ö., & Toktaş, A. (2016). Real-Time monitoring of cognitive workload of airline pilots in a flight simulator with fNIR optical brain imaging technology. In D. Schmorow & C. M. Fidopiastis (Eds.), *Foundations of augmented cognition: Neuroergonomics and operational neuroscience* (pp. 147-158). Cham, Switzerland: Springer.

Chance, B. (1998). Near-infrared images using continuous, phase-modulated, and pulsed light with quantitation of blood and blood oxygenation. *Annals of New York Academy of Sciences*, 838, 29-45.

Chance, B. (1991). Optical method. *Annual Review of Biophysics and Biophysical Chemistry*, 20(1), 1-30.

Chance, B., Anday, E., Nioka, S., Zhou, S., Hong, L., Worden, K., . . . Thomas, R. (1998). A novel method for fast imaging of brain function, non-invasively, with light. *Optics Express*, 2(10), 411-423.

- Dahlstrom, N., Dekker, S., Van Winsen, R., & Nyce, J. (2009). Fidelity and validity of simulator training. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10(4), 305-314.
- Davranche, K., Casini, L., Arnal, P. J., Rupp, T., Perrey, S., & Verges, S. (2016). Cognitive functions and cerebral oxygenation changes during acute and prolonged hypoxic exposure. *Physiology & Behavior*, 164, 189-197.
- De Rivécourt, M., Kuperus, M. N., Post, W. J., & Mulder, L. J. M. (2008). Cardiovascular and eye activity measures as indices for momentary changes in mental effort during simulated flight. *Ergonomics*, 51(9), 1295-1319.
- Ferrari, M., & Quaresima, V. (2012). A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *Neuroimage*, 63(2), 921-935.
- Frijia, E. M., Billing, A., Lloyd-Fox, S., Rosas, E. V., Collins-Jones, L., Crespo-Llado, M. M., ... & Cooper, R. J. (2021). Functional imaging of the developing brain with wearable high-density diffuse optical tomography: A new benchmark for infant neuroimaging outside the scanner environment. *Neuroimage*, 225, 117490.
- Haarmann, A., Boucsein, W., & Schaefer, F. (2009). Combining electrodermal responses and cardiovascular measures for probing adaptive automation during simulated flight. *Applied Ergonomics*, 40(6), 1026-1040.
- Haier, R. J., Karama, S., Leyba, L., & Jung, R. E. (2009). MRI assessment of cortical thickness and functional activity changes in adolescent girls following three months of practice on a visual-spatial task. *BMC Research Notes*, 2(1), 1-7.
- Hays, R. T., Jacobs, J. W., Prince, C., & Salas, E. (1992). Requirements for future research in flight simulation training: Guidance based on a meta-analytic review. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2(2), 143-158.
- Jobsis, F. F. (1977). Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, 198(4323), 1264-1267.
- Harrison, J., Izzetoglu, K., Ayaz, H., Willems, B., Hah, S., Ahlstrom, U., Woo, H., Shewokis, P., Bunce, S.C., Onaral, B. (2014). Cognitive Workload and Learning Assessment During the Implementation of a Next-Generation Air Traffic Control Technology Using Functional Near-Infrared Spectroscopy. *IEEE Transactions in Human-Machine Systems* 44(4), 429-440.
- Harrison, J., Izzetoglu, K., Ayaz, H., Willems, B., Hah, S., Woo, H., . . . Onaral, B. (2013). Human Performance Assessment Study in Aviation Using Functional Near Infrared Spectroscopy. In D. Schmorow & C. Fidopiastis (Eds.), *Foundations of Augmented Cognition* (Vol. 8027, pp. 433-442), Berlin: Springer.
- Heeger, D. J., & Ress, D. (2002). What does fMRI tell us about neuronal activity? *Nature Reviews Neuroscience*, 3(2), 142-151.
- Hoshi, Y., & Tamura, M. (1997). Near-infrared optical detection of sequential brain activation in the prefrontal cortex during mental tasks. *Neuroimage*, 5(4), 292-297.
- Hoshi, Y., & Tamura, M. (1993). Detection of dynamic changes in cerebral oxygenation coupled to neuronal function during mental work in man. *Neuroscience Letters*, 150(1), 5.
- Iadecola, C. (2017). The neurovascular unit coming of age: a journey through neurovascular coupling in health and disease. *Neuron*, 96(1), 17-42.
- ICAO (2014). Safet Report. International Civil Aviation Organization. [http://www.icao.int/safety/Documents/ICAO\\_2014%20Safety%20Report\\_final\\_02042014\\_web.pdf](http://www.icao.int/safety/Documents/ICAO_2014%20Safety%20Report_final_02042014_web.pdf)
- Izzetoglu, K., Ayaz, H., Menda, J., Izzetoglu, M., Merzagora, A., Shewokis, P., Onaral, B. (2011). Applications of Functional Near Infrared Imaging: Case Study on UAV Ground Controller. In D. Schmorow & C. Fidopiastis (Eds.), *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems* (Vol. 6780, pp. 608-617). New York: Springer.
- Izzetoglu, K., Bunce, S., Onaral, B., Pourrezaei, K., & Chance, B. (2004). Functional Optical Brain Imaging Using Near-Infrared During Cognitive Tasks. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 17(2), 211-227.
- Kikukawa, A., Kobayashi, A., & Miyamoto, Y. (2008). Monitoring of pre-frontal oxygen status in helicopter pilots using near-infrared spectrophotometers. *Dynamic Medicine*, 7(1), doi:10.1186/1476-5918-7-10.
- Kobayashi, A., & Miyamoto, Y. (2000). In-flight cerebral oxygen status: continuous monitoring by near-infrared spectroscopy. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 71(2), 177-183.
- Kurihara, K., Kikukawa, A., Kobayashi, A., & Nakadate, T. (2007). Frontal cortical oxygenation changes during gravity-induced loss of consciousness in humans: a near-infrared spatially resolved spectroscopic study. *Journal of Applied Physiology*, 103(4), 1326-1331.
- Mannheimer, P. D. (2007). The light-tissue interaction of pulse oximetry. *Anesthesia & Analgesia*, 105(6), S10-S17.
- Menda, J., Hing, J. T., Ayaz, H., Shewokis, P. A., Izzetoglu, K., Onaral, B., & Oh, P. (2011). Optical brain imaging to enhance UAV operator training, evaluation, and interface development. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 61(1-4), 423-443.
- Millikan, G. A. (1937). Experiments on muscle haemoglobin in vivo; the instantaneous measurement of muscle metabolism. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B-Biological Sciences*, 123(831), 218-241.
- Millikan, G. (1942). The oximeter, an instrument for measuring continuously the oxygen saturation of arterial blood in man. *Review of Scientific Instruments* 13, 434-444.
- Molavi, B., & Dumont, G. A. (2012). Wavelet-based motion artifact removal for functional near-infrared spectroscopy. *Physiological Measurement*, 33(2), 259.
- Parasuraman, R., & Wickens, C. D. (2008). Humans: Still vital after all these years of automation. *Human factors*, 50(3), 511-520.
- Pifferi, A., Contini, D., Dalla Mora, A., Farina, A., Spinelli, L., & Torricelli, A. (2016). New frontiers in time-domain diffuse optics, a review. *Journal of Biomedical Optics*, 21(9), 091310.
- Pinti, P., Aichelburg, C., Gilbert, S., Hamilton, A., Hirsch, J., Burgess, P., & Tachtsidis, I. (2018). A review on the use of wearable functional near-infrared spectroscopy in naturalistic environments. *Japanese Psychological Research*, 60(4), 347-373.
- Quaresima, V., & Ferrari, M. (2019). Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for assessing cerebral cortex function during human behavior in natural/social situations: a concise review. *Organizational Research Methods*, 22(1), 46-68.
- Ryoo, H. C., Sun, H. H., Shender, B. S., & Hrebien, L. (2004). Consciousness monitoring using near-infrared spectroscopy

- (NIRS) during high+ Gz exposures. *Medical Engineering & Physics*, 26(9), 745-753.
- Salas, E., Bowers, C. A., & Rhodenizer, L. (1998). It is not how much you have but how you use it: Toward a rational use of simulation to support aviation training. *The International Journal of Aviation Psychology*, 8(3), 197-208.
- Scholl, C. A., Chi, Y. M., Elconin, M., Gray, W. R., Chevillet, M. A., & Pohlmeier, E. A. (2016). Classification of pilot-induced oscillations during in-flight piloting exercises using dry EEG sensor recordings. In *2016 IEEE 38th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 4467-4470). IEEE.
- Severinghaus, J.W. & Astrup, P.B. (1986). History of blood gas analysis. *Journal of Clinical Monitoring*, 2(4), 270-288.
- Shewokis, P. A., Ayaz, H., Izzetoglu, M., Bunce, S., Gentili, R. J., Sela, I. & Onaral, B. (2011). Brain in the loop: assessing learning using fNIR in cognitive and motor tasks. In Schmorrow D.D., Fidopiastis C.M. (eds) *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems. FAC 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 6780* (pp. 240-249). Berlin: Springer.
- Strangman, G., Boas, D. A., & Sutton, J. P. (2002). Non-invasive neuroimaging using near-infrared light. *Biological Psychiatry*, 52(7), 679-693.
- Sweeney, K. T., Ayaz, H., Ward, T. E., Izzetoglu, M., McLoone, S. F., & Onaral, B. (2012). A methodology for validating artifact removal techniques for physiological signals. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 16(5), 918-926.
- van Dijk, H., van de Merwe, K., & Zon, R. (2011). A Coherent Impression of the Pilots' Situation Awareness: Studying Relevant Human Factors Tools. *International Journal of Aviation Psychology*, 21(4), 343-356.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human Factors*, 50(3), 449-455.
- Wickens, C. D. (2014). Effort in human factors performance and decision making. *Human Factors*, 56(8), 1329-1336.
- Villringer, A., & Chance, B. (1997). Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function. *Trends in Neurosciences*, 20(10), 435-442.
- Wilson, G. F. (2002). An analysis of mental workload in pilots during flight using multiple psychophysiological measures. *International Journal of Aviation Psychology*, 12(1), 3-18.
- Wilson, G. F., Caldwell, J. A., & Russell, C. A. (2007). Performance and psychophysiological measures of fatigue effects on aviation related tasks of varying difficulty. *International Journal of Aviation Psychology*, 17(2), 219-247.
- Wilson, G. F., & Russell, C. A. (2007). Performance enhancement in an uninhabited air vehicle task using psychophysiological determined adaptive aiding. *Human Factors*, 49(6), 1005-1018.
- Yamada, Y., Suzuki, H., & Yamashita, Y. (2019). Time-domain near-infrared spectroscopy and imaging: A review. *Applied Sciences*, 9(6), 1127.
- Yeh, Y. Y., & Wickens, C. D. (1988). Dissociation of performance and subjective measures of workload. *Human Factors*, 30(1), 111-120.