

Beyin bilgisayar arayüzleri

Prof. Dr. Bahar Güntekin



1977'de İzmir'de doğdu. Dokuz Eylül Üniversitesi Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Yüksekokulundan mezun oldu (1999). Doktora çalışmalarını Dokuz Eylül Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik anabilim dalında tamamladı (2006). İstanbul Kültür Üniversitesinde Beyin Dinamiği Kognisyon ve Karmaşık Sistemler Araştırma Merkezinin kuruluşunda yer aldı, 2006-2016 yılları arasında merkezin müdür yardımcılığı görevini üstlendi. 2010 yılında biyofizik doçenti oldu. 2015 yılında TÜBA Üstün Başarılı Genç Bilim İnsanı Ödülü'nü, 2016 yılında ise ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı Araştırma Teşvik Ödülü'nü kazanan Güntekin'in çalışma alanları EEG, EEG'de sinyal analizi, uyarılmış beyin osilasyonları, başta nöropsikiyatrik hastalıklar olmak üzere EEG beyin osilasyonlarının klinik uygulamaları ve kognitif sinirbilimdir. 2019 yılından beri TÜBİTAK Sağlık Bilimleri Araştırma Grubu Danışma Kurulu üyesi olan Güntekin, halen İstanbul Medipol Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik Anabilim Dalı Başkanı olarak çalışmaktadır.

İngiliz araştırmacı Caton (1), 1875 yılında tavşan ve maymun beyinlerinde spontane elektriksel aktiviteyi ölçmeyi başarmış, 1924 yılında Alman nöropsikiyatrist Hans Berger ise ilk kez insan saçlı derisi üzerinden beyin elektriksel kayıtlarını almıştır. Hans Berger bu araştırmasını 1929 yılında yayımlamıştır (2). Hans Berger daha ilk kayıtlarda alfa (8-13 Hz) ve beta (15-30 Hz) dalgalarını tanımlamış ve aldığı bu elektriksel kayda "Elektroensefalogram" (EEG) adını vermiştir. Beyindeki sinir hücreleri birbirleri ile elektriksel bağlantılar ile iletişim kurarlar ve hücresel kayıtlar alındığında sinir hücrelerindeki inhibitör post sinaptik potansiyelleri, eksitator post sinaptik potansiyelleri ve en sonunda aksiyon potansiyellerini ölçmek mümkündür. Kafatası üzerine bir aktif elektrot bağlanıp, ikinci bir elektrot da referans elektrot olarak bağlandığında, o elektrot altındaki sinir hücrelerinin tüm elektriksel toplu aktivitesi ölçülmüş olur. Beyin saçlı derisi üzerinden alınan bu kayıtlar doğrusal olmayan, karmaşık sinyallerdir. İnsanın anlık beyin aktivitesine bağlı olarak bu sinyaller, zamanda, frekansta ve topolojik olarak farklılıklar gösterir. Hans Berger daha ilk aldığı kayıt sırasında dahi gözler kapatıldığında beyinin görme bölgesi olan "occipital" bölgede alfa dalgalarının arttığını göstermiştir. Alfa ve beta dalgalarından sonra 1936'da Walter (3) daha düşük frekanslar olan delta (0,5-3,5 Hz) ve teta (4-7 Hz) dalgalarını tanımlamış, Jasper ve Andrews'in 1938'de gamma dalgalarını tanımlaması ile tüm frekans bantları isimlendirilmiştir (4). Her ne kadar günümüzde, birçok kitapta bu frekans bantlarının görev tanımları yapılmış olsa

da son 20 senedir yapılan çalışmalar ile bu frekans bantlarının her birinin multifonksiyonel olduğu kabul görmektedir (5). Bu frekans bantlarında açığa çıkan elektriksel sinyaller bebektikten, çocukluğa, çocukluktan gençliğe, yetişkinliğe ve yaşlılığa doğru değişiklik gösterir. Beyin değişikliğe bu elektriksel sinyaller de değişir.

Beyinde açığa çıkan bu elektriksel sinyalleri modüle etmek mümkün müdür? Bu sinyaller beyin fonksiyonları sonucunda açığa çıktığına göre bu elektriksel sinyallerin modülasyonu ile beyin fonksiyonlarında değişiklikler yapmak mümkün müdür? Bu elektriksel sinyalleri kullanarak farklı cihazlarla, özellikle de bilgisayarlarla iletişime geçmek mümkün müdür? Bu soruların tamamının cevabı "evet" olarak yanıtlanabilir. Beyinde açığa çıkan elektriksel sinyalleri modüle etmek mümkündür. Aslında basit bir duysal sinyal bile beyin dalgalarını modüle edebilir. Adrian ve Matthews 1934 yılında beyin dalgalarının görsel uyarınının frekansı ile eşit olacak şekilde modüle olabildiğini gösteren ilk araştırmacılar (6). Kararlı durum potansiyelleri (steady-state responses) adı verilen bu potansiyeller yıllar sonra birçok araştırmacı tarafından defalarca gösterilmiştir (7). Beyin işitsel ya da görsel olarak verilen uyarın frekansında elektriksel sinyaller açığa çıkarır, yani kişiye 40 Hz'lik bir görsel ya da işitsel sinyal verdiğinizde beyinde 40 Hz yanıtlar açığa çıkar. Bu da beyinin dışarıdan gelen uyarınlarla senkronize olabilme yeteneğini gösterir. Bu basit duysal sinyaller dışında özellikle son 15-20 sene içerisinde gelişme gösteren beyin elektriksel ve manyetik

sinyallerle uyararak modüle eden sistemler de geliştirilmiştir. Manyetik kraniyal stimülasyon, transkraniyal düz akım ve transkraniyal alternatif akım ile beyin ve dolayısı ile beyin dalgalarını modüle etmek mümkündür. Hem sağlıklı kişilerin bilişsel performanslarını geliştirmek hem de psikiyatrik ve nörolojik hastalıklarda tedaviye destek olmak amacıyla farklı uygulamalar geliştirilmektedir. Örneğin beyin "occipital" bölgesine 10 Hz frekansında (alfa frekans aralığı) bir alternatif akım uygulandığında beyin bu bölgesinde 10 Hz frekansındaki beyin dalgaları (alfa) artış gösterir (8).

Bir sonraki soru olan "Bu elektriksel sinyalleri kullanarak farklı cihazlarla, özellikle de bilgisayarlarla iletişime geçmek mümkün müdür?" sorusuna geldiğimizde ise, bu sorunun cevabını verirken bu makalenin esas konusu olan beyin-bilgisayar arayüzlerine (BBA) geçiş yapmış oluyoruz. Beyin elektriksel sinyallerini kullanarak farklı cihazlarla ve bilgisayarlarla iletişime geçmek mümkündür. Beyin-bilgisayar arayüzlerinin çalışma prensiplerine baktığımızda günümüzde en çok hem pratik kullanımları, hem zamansal çözünürlükteki üstünlükleri, hem de beyin hücrelerinin direkt elektriksel aktivitesinin ölçümü sebebi ile en çok EEG'nin kullanıldığı görülmektedir. Ancak EEG dışında, beyin kan akımı artışı azalışı üzerinden beyin fonksiyonlarını değerlendirebilen Fonksiyonel Manyetik Rezonans görüntüleme (fMRG) ve Fonksiyonel Yakın Kızılötesi Spektroskopisi (fYKS), beyin hücrelerinin manyetik aktivitesini ölçen Manyetoensefalogram (MEG) ile de çalışan beyin bilgisa-



yar arayüzleri mevcuttur. Ancak fMRG ve MEG çok büyük cihazlar olması ve taşınma problemleri nedeni ile pratik kullanımları oldukça kısıtlıdır. Yakın kızılötesi spektroskopisinin ise zamansal çözünürlüğü EEG ile karşılaştırıldığında oldukça yavaş olduğu için kullanımı kısıtlıdır. EEG ile milisaniyeler içerisinde kayıt almak mümkün iken, fYKS ile beyin aktivitesi 4-5 sn. sonra kayıt edilebilmektedir. Tüm bu sebepler ile beyin-bilgisayar arayüzlerinde günümüzde en çok beyin elektriksel sinyalleri kullanılmaktadır (9).

Beyin-bilgisayar arayüzlerinde kullanılan elektriksel sinyal yöntemleri farklılıklar göstermektedir. Öncelikle teknikler, invazif ve non-invazif olacak şekilde ayrılır. Non-invazif olan teknik tamamen zararsız ve günümüzde EEG'nin kullanıldığı şekilde kayıt edilmesi ile mümkün iken, invazif tekniklerde beyin üzerine ya da beyinin içerisine elektrotlar yerleştirilerek beyinin elektriksel aktivitesi ölçülmekte ve beyinden bilgisayara giden sinyaller bu elektrotlardan kaydedilen elektriksel sinyaller ile elde edilmektedir, bu elektrotlar hem sinyal alıcı hem de sinyal gönderici olarak da kullanılabilir (10).

Beyin sinyallerini nörofizyolojik olarak kontrol etmeye yönelik ilk girişim temeli 1968'de Wyrwicka ve Sterman tarafından kedilerde gerçekleştirildi (11). Araştırmacılar kedi beyinlerinde, sensörimotor ritimleri kaydetti ve daha sonra bu ritimleri duysal geri bildirimle dönüştürerek ödüllendirme ile kedilerde sensörimotor ritimlerde artış sağladı. İnsanlarda ise ilk araştırma 1969'da Kamiya (12) tarafından yayınlandı, Kamiya ve arkadaşları

ilk nörofeedback çalışmalarından birini gerçekleştirdi. Araştırmacılar, sağlıklı bireylere sürekli olarak verilen duysal geri bildirimle, kişilerin alfa dalgalarını değiştirebildiklerini gösterdi. Beyin-bilgisayar arayüzü terimini literatürde ilk kez kullanan araştırmacı ise Jacques Vidal'dir. Vidal 1973'te bilgisayar ekranındaki oku invazif olmayan EEG-Görsel Uyarılmış Potansiyeller ile kontrol edilebilen bir sistem geliştirmeyi başardı (13). 1970'lerin sonları ve 1980'ler BBA çalışmaları için yavaş geçse de 1980'lerin sonlarında ve 1990'larda araştırmalar hızlandı. 1988 yılında Farwell ve Donchin, "P300-heceleyici" olarak bilinen şu anda yaygın olarak kullanılan BBA paradigmasını öneren bir makale yayınladı (14). Bu yöntemden sonra, Wolpaw ve ark (15), Sensori-Motor Ritimler ile çalışan BBA geliştirdiler. 1993'de ise Avusturya'da, Gert Pfurtscheller (16) ve ekibi benzer bir yöntem ile çalışan BBA geliştirdi, Pfurtscheller bu yöntemle motor-impulsi tabanlı BBA adını verdi. 1999'da Niels Birbaumer ve arkadaşları üçüncü bir BBA paradigması çeşidi üzerinde çalışıyorlardı, araştırmacılar genliği gönüllü olarak artırılabilen veya azaltılabilen Yavaş Kortikal Potansiyelle dayalı bir BBA sistemi geliştirdiler (17). 1988'de Bozinovski ve arkadaşları ilk kez alfa dalgaları ile robot kontrolünün mümkün olduğunu gösterdiler (18, 19).

1990'larda geliştirilen BBA'larda daha çok kişilerin kendi beyin dalgaları eğitilirken, 1990'ların sonlarında, 2000'li yılların başlarında ileri düzey analizler yapan makine öğrenme yöntemlerinin, sınıflandırıcıların gelişmesi ile yazılımlar ve bilgisayarlar kişilerin sinyallerini tanıyacak

şekilde eğitildiler (20). Kongrelerde ilk BBA'lar konusunda sunular dinlerken, kişilerin eğitimlerinin uzunluğunu BBA'lar için dezavantaj olarak algıladığımı hatırlıyorum, ancak kısa süre sonra makine öğrenme yöntemleri ve sınıflandırmaların kullanılmasının BBA'ları nasıl iyi ve hızlı yönde geliştirdiğini de görmek mümkün oldu. 1990'ların sonlarında, ayrıca invazif tekniklerle hayvan çalışmalarında da önemli başarılar elde edildi. Bu çalışmalara verilecek örneklerden biri 1999'da Berkeley Üniversitesinde Stanley ve arkadaşlarının (21) yaptığı çalışmadır. Bu araştırmacılar kedi beyinine, görme fonksiyonlarında önemli yeri olan alan lateral genikülat çekirdek bölgesine elektrot yerleştirdi. Daha sonra kedilere sekiz farklı video seyrettirdiler. Bu videoları seyrederken kaydedilen elektriksel sinyaller daha sonra matematiksel filtreler kullanılarak analiz edildi ve bu analizler görüntülerin tekrar inşa edilmesinde kullanıldı. Böylece ilk kez bir canlı tarafından algılanan bir görüntü, beyindeki elektriksel sinyaller kullanılarak ekrana yansıtılabildi.

İnsan çalışmalarına bakıldığında özellikle son yıllarda büyük gelişmeler olduğu göze çarpmaktadır. Etik kurallar sebebi ile insanda invazif yöntemlerle çalışmalar sadece bu uygulamadan fayda sağlayacak hastalar üzerinde çalışılmaktadır. İnvazif olmayan uygulamalar ise birçok sağlıklı ve hasta grupları ile çalışılmaktadır. İnsanlarda invazif uygulamaların, özellikle felçli hastaların fonksiyonlarını geliştirmede, görme ve işitme kayıplarında, epileptik hastaların nöbetlerinin tespitinde ve kontrolünde, hareket bozukluklarının tedavisinde kullanılmaya başlandığı görülmektedir.

Beyin-bilgisayar arayüzü dışında, direkt beyine takılmayan ancak görme (retinal implant) ve işitme (cochlear implant) yetisinin geri kazanılmasında önemli olan nörobionik elektrotlar da kullanılmaktadır. Bu uygulamaların başarılı örneklerinden iki tanesi "Boston Retinal Implant" ve "Argus" adı verilen retinal implantlardır. Her ikisinde de elektrotlar beyin yerine retina yerleştirilir (22).

Felçli hastaların yaşamsal faaliyetlerine yardım etmek amacı ile geliştirilen invazif BBA'lar ise ilk kez Kennedy ve Bakay (23) tarafından "Locked-in sendromu" olan bir hastada uygulanmıştır. Bu hasta BBA yardımı ile bilgisayar ekranındaki oku iletmeyi başarmıştır. 2005'de ise Matt Nagle isimli tetraplejik felçli bir hasta BBA yardımı ile ilk kez yapay bir eli hareket ettirmeyi başarmıştır (24).

Son yıllarda BBA üzerine yapılan çalışmalar büyük ivme kazanmıştır. Büyük teknoloji firmalarının da yarışa katılması ile bilim kurgu film ve dizilerinin gerçek olabilme ihtimalleri sorgulanmaya başlanmış, sosyal medyada özellikle Elon Musk'ın Neurolink projesi büyük sansasyon yaratmıştır. Haber ajansı Reuters Neurolink'in amacını, Alzheimer, demans ve omurilik yaralanmaları gibi nörolojik durumların iyileştirilmesine yardımcı olmak ve nihayetinde insanlığı yapay zekâ ile birleştirmek için en karmaşık insan beynine kablosuz beyin-bilgisayar arayüzleri ile çalışan binlerce elektrot içeren bir implantı yerleştirmek" olarak duyurmuştur (25). Amerikan Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA), 1970'lerden bu yana BBA alanında yenilikçi bilimsel araştırma ve teknoloji gelişmelerini finanse etmektedir. DARPA projelerinin iki amacı olduğu belirtilmektedir (1) sinirsel ve/veya davranışsal işlevi yeniden sağlamayı amaçlayan BBA araştırmaları ve (2) insan eğitimini ve performansını iyileştirmeyi amaçlayan BBA araştırmaları (26).

Büyük teknoloji firmalarının internet siteleri, bu konuda gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar tarandığında tüm dünyanın BBA çalışmalarına büyük önem verdiği ve bu konuda büyük yatırımlar yaptığı görülmektedir. BBA'lar ile esas amaç farklı hastalıklara tedavi geliştirmek ve insan hayatını kolaylaştırmak gibi gözükse de insan-robot, insan-makine birleşimleri ile fiziksel ve zihinsel kapasiteleri normal insanlardan daha üstün insanların da var edilebileceği göz ardı edilmemelidir.

BBA teknolojileri insanlarda büyük heyecan uyandırsa da bazı etik soruları da beraberinde getirmektedir. Etik problemler günümüzde açığa çıkanlar, orta vadede ve uzun vadede teknolojinin daha da gelişmesi ile birlikte açığa çıkacak olanlar olmak üzere ayrılmaktadır (27, 28). Erken dönem etik problemlerden bazıları şöyledir: (1) Güvenlik ve risk-fayda analizleri; beyin yüzeyine, ya da beyin içine yerleştirilen elektrotlardan kaynaklanan enfeksiyon, akut travma, implant çevresi skar doku gelişimi invazif BBA'larda önemli riskler taşımaktadır. (2) Araştırma etiği ve onam formu; BBA'ların kendilerini ifade edemeyen hasta gruplarında kullanımına dayalı, hastanın gerçekten işlem için onayının olup olmayacağını anlaşılamaması olası bir etik problemdir. Teknolojinin ilerlemesi ile gelişebilecek orta vade etik problemlere örnek olarak, BBA'ların yapısal ya da yazılımsal problemlerle kişinin isteminden farklı hareket etmesi ve buna bağlı kişinin kendisinde ya da çevresinde oluşabilecek hasarlardan kimin sorumlu olacağı sorusu verilebilir. Teknolojinin daha da ilerlemesi ile gelişebilecek etik problemlere örnek olarak ise, BBA'ların birçok bilgi toplaması sebebi ile bu bilgilerin kötü amaçlarla kullanımı, BBA'ların bir çeşit hack'lenmesi anlamına gelebilecek bilgi hırsızlığı, ya

da insan-makine, insan-robot birleşiminin kişinin benlik duygusunda yaratabileceği dezenformasyon, cyborgların ne kadar insan olduğunun sorgulanması olarak sıralanabilir (27, 28).

Tüm bu etik problemlere rağmen BBA teknolojisi son hızla ilerlemeye devam etmektedir. Bu çalışmalar birçok ülkede büyük yatırımlarla desteklenmektedir. Peki ülkemizde BBA çalışmaları ne düzeydedir? Özel sektörün çalışmalarını detaylı ve objektif araştırarak benim bilgim dahilinde bir platform olmadığından bu sorunun cevabını bilimsel makalelerin yayımlandığı "Scopus" veri tabanını tarayarak cevaplıyor olacağım. "Scopus" veri tabanında "Brain Computer Interface" anahtar kelimesi ile arama yaptığımızda karşımıza özellikle sayıları son yıllarda artış gösteren "21982" bilimsel makale çıkmaktadır. Ülke sıralamalarına baktığımızda çalışma sayısı açısından ilk 5 sırayı Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Almanya, Birleşik Krallık ve Japonya'nın aldığını görmek mümkündür. Türkiye kaynaklı toplam 299 makale olduğu ve bu makalelerin en çok Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sabancı Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi öğretim üyeleri tarafından yazıldığı gözlenmektedir. (Özel sektör ve patent başvuruları dikkate alınmamıştır, BBA çalışmalarının ülkemizdeki

BEYİN BİLGİSAYAR ARAYÜZÜ ÇEŞİTLERİ	
Beynin Dolaşım al aktivitesi artışı-azalışı üzerinden kullanılan BBA'lar: fMRG-Fonksiyonel Manyetik Rezonans Tabanlı BBA fYKS- Fonksiyonel yakın kızılötesi spektroskopisi Tabanlı BBA	
Beyin hücrelerinin manyetik aktivitesini ölçen sistem üzerinden kullanılan BBA: Manyetoensefalogram Tabanlı BBA	
Beyin hücrelerinin Elektriksel aktivitesini ölçen sistem üzerinden kullanılan BBA: Elektroensefalogram Tabanlı BBA	
EEG-invazif uygulamalar:	Yerel alan potansiyelleri Tek ünite aktivite Multi ünite aktivite Elektrokortikografi
EEG'nin Non-invasif uygulaması ile kullanılabilen Beyin Bilgisayar Arayüzü Yöntemlerine Örnekler	
P300-heceleyci (Farwell ve Donchin, 1988).	P300-heceleycide, bir bilgisayar ekranında 6 X6 harf ve rakamlardan oluşan bir izgaraya görüntülenir. Bu izgaranın satırları ve sütunları rastgele yanıp söner ve kullanıcıdan heceleme istediği harfin kaç kez yanıp söndüğünü sayması istenir. Bu şekilde, hedef harf her yanıp söndüğünde, bu, kullanıcının EEG sinyallerinde P300 olarak bilinen ve tespit edilebilen bir olaya ilişkin potansiyeli tetikler. Birkaç yanıp sönmeye tekrardan sonra, kullanıcının heceleme istediği harfin hangi satır ve hangi sütunda bulunduğunu tespit etmek ve böylece bu harfi seçmek mümkün hale gelir
EEG'nin invazif olmayan uygulamaları:	Mü ritmi olarak da adlandırılan Sensori-motor ritimler (8-15 Hz), kişilerde EEG ile sensori-motor korteks üzerinden kayıt edilebilir. Kişi bir hareket yapmaya hazırlandığında bu ritimler desenkronize olur, yani genlikleri azalır. Bu ritimlerin özellikleri kişi sadece hareketi gerçekleştirdiğinde değil, bu hareketi gerçekleştirmeyi düşündüğünde ya da bu hareketi gerçekleştiren birini izlediklerinde de aynı özellikleri gösteriyor olmasıdır. Bu sayede kişiler hareketi düşündüklerinde dahi sensori-motor ritimleri desenkronize olur, BBA sistemi bu sinyali kullanarak bilgisayar üzerinde hareketi gerçekleştirebilir.
Yavaş Kortikal Potansiyel (Birbaumer ark. 1999)	Genliği gönüllü olarak artırılabilen veya azaltılabilen Yavaş Kortikal Potansiyele dayalı bir BBA sistemidir. Bu ilke, bir kullanıcının bir komut grubunu veya diğerini sırasıyla Yavaş Kortikal Potansiyelin genliğini artırarak veya azaltarak seçmesini sağlayan "Düşünce Çeviri Cihazı" tasarlamak için kullanıldı.

durumu konusunda, tüm platformlardaki veriler ayrıca daha detaylı taranmalıdır). Daha çok mühendis ekipler tarafından gerçekleştirilen bu çalışmalara sağlık alanındaki araştırmacıların katkısının nispeten az olduğu görülmektedir. Çalışma alanlarından bilgisayar bilimleri 207 makale ile öne çıkarken sağlık bilimleri alanında 75 makalenin yer aldığı görülmektedir. Bilgisayar bilimleri ile sağlık bilimleri oranının yaklaşık dörtte bir olması sağlık bilimleri ile multidisipliner olarak yürütülmüş çalışmaların nispeten az olduğunu düşündürmektedir. Tüm dünyada ise 10 bin 924 makalenin bilgisayar bilimleri, 5 bin 859 makalenin sağlık bilimleri, 5 bin 160 makalenin ise sinirbilimleri alanında olduğu göze çarpmaktadır. Dünyada bilgisayar bilimleri, sağlık bilimleri çalışma oranı ikiye birdir, aynı şekilde bilgisayar bilimleri sinirbilim oranı da ikiye birdir. Daha detaylı bir analiz yapmadan tam kanıya varmak mümkün olmasa da ülkemizde BBA konusunda farklı disiplinlerden oluşan çalışma gruplarının az olabileceği öngörülmektedir. Oysa ki tüm dünyada olduğu gibi BBA çalışmaları, bilgisayar, mühendislik, matematik, fizik gibi teknik bilimler ile, Tıp (klinik ve temel bilimler), sağlık bilimleri, sinirbilim, fizyoterapi ve psikoloji gibi diğer bilim dallarının katılımını gerektirir. Beyin bilgisayar arayüzlerinin hem bilimsel çalışmaları hem de sonrasında ürüne dönüşebilecek potansiyelle dönüşmesi ülkemiz teknolojik gelişiminde önemli yer oynayabilir. Büyük multidisipliner ekiplerle, üniversite sanayi işbirliği ile önemli çalışmalar gerçekleştirilmek mümkündür ve kanımca ülkemiz için de oldukça gereklidir. Farklı üniversitelerden büyük multidisipliner ekiplerin bir araya getirilmesi, bunu için fiziki mekan, maddi destek sağlanması, bu konuda çalışan nitelikli insan kaynağının artırılması için özellikle bu konularda çalışan ileri düzey uluslararası laboratuvarlara doktora öğrencilerinin gönderilmesi ve bu öğrencilerin geri istihdamı, bunun dışında Türkiye’de bu konu ile çalışabilme potansiyeli olan öğretim üyelerinin uluslararası ağlara katılmaları konusunda desteklenmesi ve yine yurt dışında bu konu ile çalışan araştırmacıların ülkeye geri kazandırılması ülkemizin bu yarışta geri kalmamasına vesile olacaktır diye düşünüyorum.

Beyin bilgisayar arayüzlerinin insanlık yararına kullanılmasını büyük merakla beklerken, kötüye kullanıma olasılıkları konusunda da teknoloji geliştikçe insanlığın yeni adımlarla bu tür kötü uygula-

maların önüne geçebilme olasılığına olan inancımı koruyorum. Teknoloji ve bilim hep iyi yönde kullanılması dileği ile.

Kaynaklar

- 1) Caton, R., (1875), *Electrical Currents of The Brain, The Journal of Nervous and Mental Disease*, 2(4), 610.
- 2) Berger, H., (1929), *kber das Elektrencephalogramm des Menschen, Arch. Psychiatr. Nervenkr*, 87, 5279570. <https://doi.org/10.1007/BF01797193> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)
- 3) Walter, W. G., (1936), *The Location of Cerebral Tumours by Electro-Encephalography, The Lancet*, 228(5893), 305-308. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(01\)05173-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(01)05173-X) (Erişim Tarihi: 19.02.2021)
- 4) Jasper, H. H., & Andrews, H. L., (1938), *Electro-Encephalography: III. Normal Differentiation of Occipital and Precentral Regions in Man, Archives of Neurology & Psychiatry*, 39(1), 96-115. doi:10.1001/archneurpsyc.1938.02270010106010
- 5) Başar, E., Başar-Eroglu, C., Karakaş, S., & Schürmann, M., (2001), *Gamma, Alpha, Delta, and Theta Oscillations Govern Cognitive Processes, International Journal of Psychophysiology*, 39(2-3), 241-248. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00145-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00145-8) (Erişim Tarihi: 19.02.2021)
- 6) Adrian, E. D., & Matthews, B. H., (1934), *The Berger Rhythm: Potential Changes from The Occipital Lobes in Man, Brain*, 57(4), 355-385.
- 7) Norcia, A. M., Appelbaum, L. G., Ales, J. M., Cottreau, B. R., & Rossion, B., (2015), *The Steady-State Visual Evoked Potential in Vision Research: A Review, Journal of Vision*, 15(6), 4-4. <https://doi.org/10.1167/15.6.4> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)
- 8) Helfrich, R. F., Schneider, T. R., Rach, S., Trautmann-Lengsfeld, S. A., Engel, A. K., & Hermann, C. S., (2014), *Entrainment of Brain Oscillations By Transcranial Alternating Current Stimulation, Current Biology*, 24(3), 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.12.041> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)
- 9) Chaudhary, U., Birbaumer, N., & Ramos-Murguialday, A., (2016), *Brain-computer Interfaces for Communication and Rehabilitation, Nature Reviews Neurology*, 12(9), 513. doi: 10.1038/nrneuro.2016.113
- 10) Kawala-Sterniuk, A., Browarska, N., Al-Bakri, A., Pelc, M., Zygarlicki, J., Sidikova, M., ... & Gorzelanczyk, E. J., (2021), *Summary of over Fifty Years with Brain-Computer Interfaces-A Review, Brain Sciences*, 11(1), 43. <https://doi.org/10.3390/brainsci11010043>
- 11) Wyrwicka, W., & Serman, M. B., (1968), *Instrumental Conditioning of Sensorimotor Cortex EEG Spindles in The Waking Cat, Physiology & Behavior*, 3(5), 703-707. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(68\)90139-X](https://doi.org/10.1016/0031-9384(68)90139-X) (Erişim Tarihi: 19.02.2021)
- 12) Kamiya, J., (1968), *Conscious Control of Brain Waves, Psychology Today*, 1, 56-60.
- 13) Vidal, J. J., & JJ, V., (1973), *Toward Direct Brain-Computer Communication, Annu Rev Biophys Bioeng*, 2, 157-80. doi: 10.1146/annurev.bb.02.060173.001105
- 14) Farwell, L. A., & Donchin, E., (1988), *Talking off the Top of Your Head: Toward a Mental Prosthesis Utilizing Event-Related Brain Potentials, Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 70(6), 510-523. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(88\)90149-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(88)90149-6) (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

15) Wolpaw, J. R., Ramoser, H., McFarland, D. J., & Pfurtscheller, G., (1998), *EEG-Based Communication: Improved Accuracy by Response Verification, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 6(3), 326-333. DOI: 10.1109/86.712231

16) Pfurtscheller, G., Flotzinger, D., & Kalcher, J., (1993), *Brain-computer Interface—A New Communication Device for Handicapped Persons, Journal of Microcomputer Applications*, 16(3), 293-299. <https://doi.org/10.1006/jmca.1993.1030> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

17) Birbaumer, N., Ghanayim, N., Hinterberger, T., Iversen, I., Kotchoubey, B., Kübler, A., ... & Flor, H., (1999), *A Spelling Device for the Paralyzed, Nature*, 398(6725), 297-298. <https://doi.org/10.1038/18581>(Erişim Tarihi: 19.02.2021)

18) Bozinovski, S., Bozinovska, L., & Setakov, M., (1988), *Mobile Robot Control Using Alpha Wave from the Human Brain, In Proc. Symp. JUREMA, Zagreb*, pp. 247-249.

19) Bozinovski, S., Sestakov, M., & Bozinovska, L., (1988, November), *Using EEG Alpha Rhythm to Control a Mobile Robot, In Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 1515-1516, IEEE. DOI: 10.1109/IEMBS.1988.95357

20) Lotte, F., Nam, C. S., & Nijholt, A., (2018), *Introduction: Evolution of Brain-Computer Interfaces, Nam, C. S., Nijholt, A., Lotte, F., Brain-Computer Interfaces Handbook: Technological and Theoretical Advance, Taylor & Francis (CRC Press)*, pp. 1-11.

21) Stanley, G. B., Li, F. F., & Dan, Y., (1999), *Reconstruction of Natural Scenes from Ensemble Responses in the Lateral Geniculate Nucleus, Journal of Neuroscience*, 19(18), 8036-8042. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.19-18-08036.1999> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

22) Chuang, A. T., Margo, C. E., & Greenberg, P. B., (2014), *Retinal Implants: A Systematic Review, British Journal of Ophthalmology*, 98(8), 852-856. <http://dx.doi.org/10.1136/bjophthalmol-2013-303708> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

23) Kennedy, P. R., & Bakay, R. A., (1998), *Restoration of Neural Output from A Paralyzed Patient by a Direct Brain Connection, Neuroreport*, 9(8), 1707-1711. DOI: 10.1097/00001756-199806010-00007

24) Leigh, D., (2006), *The Group Trainer's Handbook: Designing and Delivering Training for Groups, Kogan Page Publishers*.

25) <https://www.reuters.com/article/tech-neuralink-musk/musks-neuralink-venture-promises-to-reveal-a-working-brain-computer-device-idINL8N2FT7EL> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

26) Miranda, R. A., Casebeer, W. D., Hein, A. M., Judy, J. W., Krotkov, E. P., Laabs, T. L., ... & Ling, G. S., (2015), *DARPA-Funded Efforts in the Development of Novel Brain-computer Interface Technologies, Journal of Neuroscience Methods*, 244, 52-67. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2014.07.019> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

27) Burwell, S., Sample, M., & Racine, E., (2017), *Ethical Aspects of Brain Computer Interfaces: A Scoping Review, BMC Medical Ethics*, 18(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12910-017-0220-y> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

28) Attiah, M. A., & Farah, M. J., (2014), *Minds, Motherboards, and Money: Futurism and Realism in the Neuroethics of BCI Technologies, Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 86. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00086> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)