



Beyin – Makine Arayüzleri ve Nöroşirürji Uygulamaları

Brain – Machine Interfaces and Neurosurgical Applications

İsmail BOZKURT¹, Buse SARIGÜL²

¹Çankırı Devlet Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniği, Çankırı, Türkiye

²Tuzla Devlet Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniği, İstanbul, Türkiye

Yazışma adresi: İsmail BOZKURT ✉ ibozkurt85@gmail.com

ÖZ

Beyin-bilgisayar arayüzleri olarak da bilinen beyin-makine arayüzleri (BMA), genellikle bir cihaz, uzuv veya proteze bağlantı sağlayan beyin ve bilgisayar arasında direkt bağlantı kuran sistemlerdir. Son 10 yılda heyecan uyandıran gelişmeler sayesinde, pek çok klinik sorunlara yönelik gelişmeler sağlanmıştır. Amyotrofik lateral skleroz veya inmeye bağlı konuşma yetisini kaybeden hastalarda iletişimi tekrar sağlamak, motor nöron hastalığı veya spinal travmaya bağlı paralizisi olan hastalarda harekete katkıda bulunmak veya kognitif fonksiyonları bozulmuş hastalarda hafızayı desteklemek gibi pek çok alanda ümit verici gelişmeler olmuştur. BMA kontrolü, belirlenmiş nöronlar veya kortikal alanlar sayesinde sağlandığından bu gelişmeler beyin fizyolojisi ve öğrenme üzerine de ışık tutmuştur. Bu derlemede özellikle motor BMA olmak üzere BMA'nin klinik ve araştırma uygulamaları ele alınacaktır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Beyin-bilgisayar arayüzleri, Beyin-makine arayüzleri, Motor korteks, Nöroprotez, Nörorehabilitasyon, Parezi

ABSTRACT

Also known as brain-computer interfaces, brain-machine interfaces (BMI) are applications that create a direct link between the brain or specific neurons and a computer, in order to usually control a prosthesis. There have been exciting developments in the last decade in the use of BMI for clinical disorders. Restoring communication in speech disorders after amyotrophic lateral sclerosis or stroke, restoring mobilization after motor neuron disease or spinal trauma, and restoring memory after cognitive dysfunction are some of the areas of BMI. Since BMI is controlled by specific neurons or a specific cortical area, it has also allowed us to better understand brain physiology and learning. This review will focus on the use of BMI in clinical and research applications with emphasis on motor BMI.

KEYWORDS: Brain-computer interfaces, Brain-machine interfaces, Motor cortex, Neuroprosthesis, Neurorehabilitation, Paralysis

■ GİRİŞ

Yakın zamana kadar insanın düşünceleriyle çevresini, bir aleti veya bir bilgisayarı kontrol edebilme düşüncesinin sadece bilim kurguya ait olduğu düşünülmekteydi. Fakat teknolojik gelişim sayesinde beyin ve sinirlerden kaynaklanan sinyaller ile insanlar çevresiyle etkileşim hâline girerek değişim ve kontrol etme becerisine sahip olmuştur. Beyin-bilgisayar arayüzleri olarak da bilinen beyin-makine arayüzleri (BMA); beyin kaynaklı uyarılmış potansiyelleri analiz ederek bunların anlamlı bir fonksiyona dönüşmesini sağlayan

nöral protezlerdir. BMA sayesinde konuşma yetisini kaybetmiş hastalarda kelimelerin hecelenmesi, bilgisayar kontrolü, felçli hastalarda protez hareketi ve hatta paralitik uzvun hareketi mümkün olmuştur. Günümüzde tedavileri çok kısıtlı olan spinal kord hasarı, motor nöron hastalığı ve inme gibi nörolojik sorunları olan hastalarda tekrar fonksiyon kazanma olasılığı heyecan verici bir gelişmedir. BMA sayesinde beyin fizyolojisi, fonksiyonları ve öğrenme alanlarında anlayışımız ve araştırma imkânlarımız da artmıştır. Bu derlemede, BMA tanımı, çalışma prensibi, kullanımı ve gelişmeleri ele alınmıştır.

■ BMA GELİŞİMİ

BMA'nin temeli asıl olarak yaklaşık 50 yıl önce atılmıştır. Fox, Rudell ve Rosenfeld tarafından 1968-69 yıllarında beyin sinyallerinin geri bildirimine dayanan çalışmaları ile insan ve hayvan deneylerinde görsel ve işitsel uyarılmış potansiyellerini kontrol edebilme kabiliyeti gösterilmiştir (12,28). Takibinde yapılan bir deneysel çalışmada maymun beyinde primer motor korteksinde tek bir nöron tarafından ateşlenen potansiyel sonrası bir ibrenin hareket ederek ödül olarak yiyecek vermesi sağlanmıştır (11). Beyin aktivitelerini ve dolayısıyla beyinden kaynaklanan dalgaları kontrol edebilme kapasitesinden yola çıkarak, edimsel koşullanma ile bilgisayar kontrolü yapılabileceği fikri ortaya çıkmıştır (39). Bu fikir geliştirilerek 1988 yılında skalp EEG kaydı ile ölçülebilen P300 yanıtı ile BMI yardımıyla ekrandan kişinin düşündüğü harfler yansıtılabilmektedir (10), 2002 yılında ise EEG ile kayıt edilmiş görsel uyarılmış potansiyel ile düşünülen rakamlar bilgisayara yansıtılabilmektedir (8).

İstemli hareketin motor korteksinde yarattığı yanıt daha iyi anlamaya başlamakla beraber temel nörofizyoloji anlayışı değişmiştir. Humphrey, maymunların motor korteksindeki nöronların EEG ile takibi sonrası bir objeye uzanırken kolunun ne kadar uzanacağını öngörebilen çalışması yayınlanmıştır (16). Bunu takiben 1982 yılında nöronların istenilen hareket yönüne göre farklı potansiyeller yarattığı gösterilmiştir (13). EEG mu (μ) değerlerindeki değişiklikler ve motor korteksten kaynaklanan beta dalga gücüne göre ise hareketin ne zaman başlayacağı ve sonlanacağı belirlenebilmiştir. Bu gelişmeler sayesinde BMA aracılığı ile bilgisayar imleçlerinin motor korteksten kaynaklanan sinyaller ile değiştirilebileceği gösterilmiştir. Takibinde ilk insan BMA geliştirilerek, uzuvların hareketi veya hareketin düşüncesine bağlı olarak bilgisayar ara yüzü ile farklı güç seviyeleri elde edilebilmiştir (26,40). Bu gelişim sonrası EEG temelli ve farklı frekans sinyalleri ile çalışan BMA geliştirilmiştir (35).

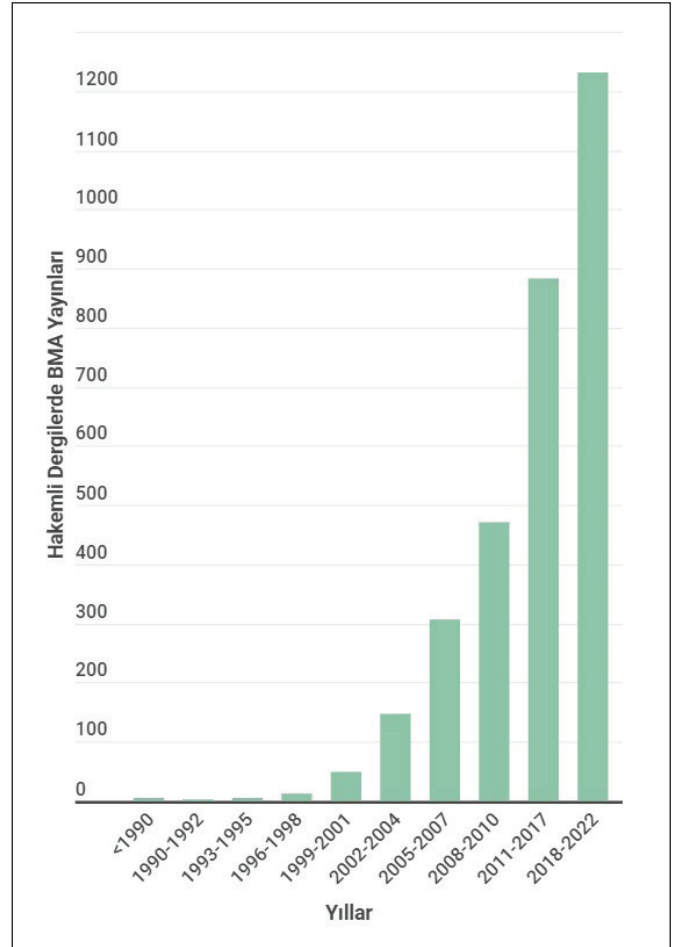
1998 ve 2003 yıllarında pek çok nörondan aynı anda sinyal kaydetme imkânı sağlayan intrakortikal multi elektrotlar geliştirilerek daha karmaşık BMA gelişimine sebep oldu (24,30). Daha karmaşık olan BMA "biyomimetik" olarak adlandırılarak, beyinden kaynaklanan sinyalleri harici bir cihazı kontrol etmek amacıyla kullanılmasını tanımladı. 2002 yılında ilk olarak hayvanlar üzerinde (32) takibinde 2006 yılında ise tetraplejik bir hastada uzuv kontrolü amacıyla (15) kullanılan insan BMA geliştirildi. Bu gelişme sayesinde 20. yüzyıl'da popülaritesi düşük olan BMA çalışmaları, özellikle son 10 yılda olmak üzere belirgin bir artış gösterdi (Şekil 1).

■ BMA SİSTEMİ

BMA, beyin kaynaklı sinyalleri elde ettikten sonra analiz ederek bunları harici bir cihaz veya programa anlayacağı şekilde tercüme eden bilgisayar temelli sistemlerdir (Şekil 2). BMA çalışma prensibi 4 temel basamaktan oluşur; (1) sinyalin elde edilmesi, (2) sinyallerin kodlanması, (3) sinyallerin tercüme edilerek anlamlandırılması ve (4) harici cihaza yönlendirilmesi. Harici bir cihazın veya yazılımın istenilen fonksiyon göstermesi için beyin kaynaklı dalgaların doğru şekilde anlamlandırılması

ve arzu edilen fonksiyonla eşleştirilmesi süreci BMA'nin temelini oluşturur.

Beynin fizyolojik yollarını kullanarak uzuvların veya duyuların kontrolünün aksine, alışagelmemiş olmayan yollar ile bir başka cihaza hükmetmesi sağlanır. Bu sadece santral sinir sistemi (SSS) kaynaklı sinyaller ile yapılması hâlinde BMA olarak adlandırılır, dolayısıyla ses veya kasılma ile yönetilen harici cihazlar BMA kategorisine girmez. EEG cihazı da tek başına BMA sistemini oluşturmadığı gibi, bu sistemler zihin okuyan sistemler değildir. Kişinin, yeterli eğitim sonrası yaratacağı sinyaller ile beraber çalışarak arzu edilen fonksiyonu yerine getirmek üzere tasarlanmıştır. Temel prensip olarak SSS'den kaynaklanan kortikal sinyaller toplanır. Bu sinyaller analiz edilerek dalga şekline göre dijital yazılım kodlamasına çevrilir. Elde edilen sinyallerin çoğu beyin bazal çalışma sinyalleri ve başka düşünceleri oluşturabilir, bu sinyallerin ayıklanarak arzu edilen fonksiyona yönelik anlamlandırılması gerekmektedir. Bu kodlamalar ise bilgisayar aracılığı ile anlamlı ve istenilen fonksiyonlarla eşleştirilir. Bu fonksiyonlar arasında en sık olarak robotik protezler, dijital cihazların kullanımı (telefon, bilgisayar, tablet vb.), ses üretme veya iletişim kurma veya mobilizasyon amacıyla hareketli bir nesneyi yönetme (elektrikli sandalye) bulunur (34). BMA kişiye özel olarak tasarlanır, kişi ile özel bir



Şekil 1: Hakemli dergilerde yayınlanmış BMA çalışmalarının yıllara göre dağılımı.

eğitim sürecinden geçerek zamanlama, şiddet ve sonlandırma gibi arzu edilen fonksiyonun ince ayarları yapıldıktan sonra verim elde edilebilir.

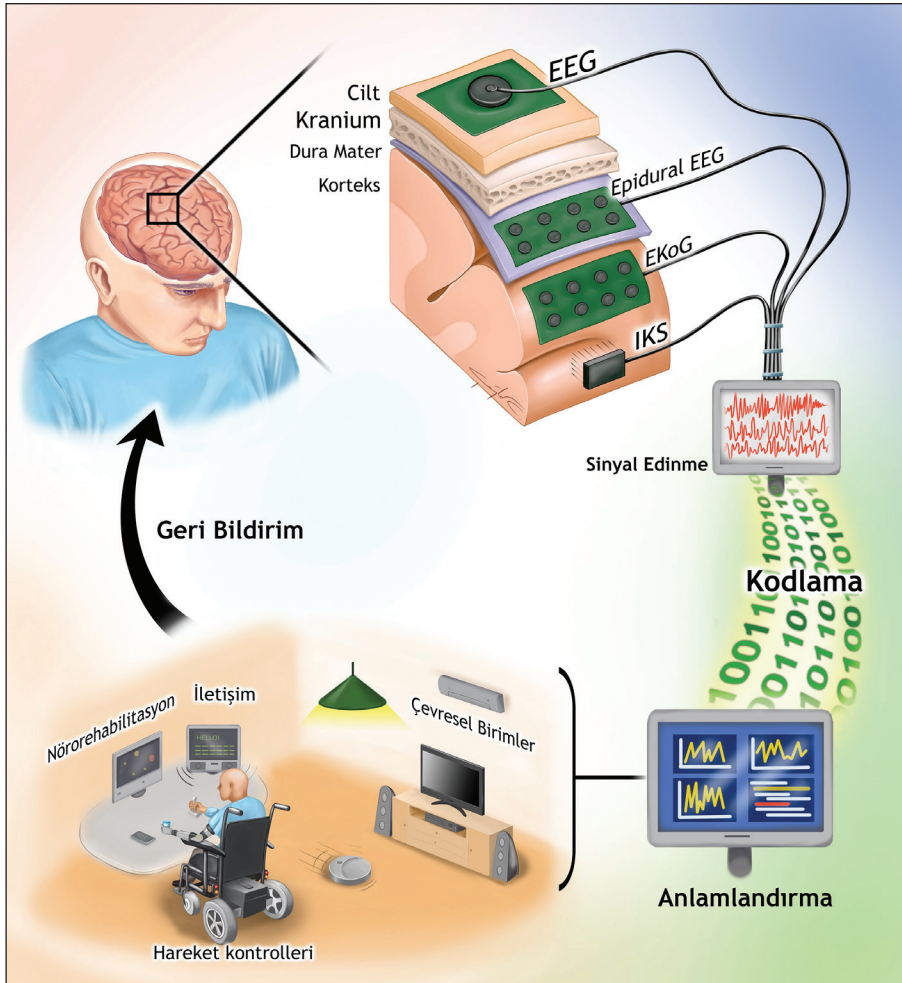
■ SİNYAL KAYNAKLARI

Prensip olarak beyinden kaynaklanan her türlü sinyal BMA için kullanılabilir. Fakat en sık kullanılan ise voltaj-bağımlı veya iyon-bağımlı kanalların aktivasyonu ile post-sinaptik membranlar tarafından üretilen elektrik sinyalleridir. Kafa derisi üzerinden kayıt edilen EEG ilk BMA çalışmalarında sıklıkla kullanılmıştır. Kolay, güvenli ve ucuz olması tercih sebebi olmakla beraber dura, kraniyum ve cilt katmanlarından geçerken uğrayacağı sinyal kaybı en büyük dezavantajdır (1). Epilepsi açısından yapılan EEG çalışmalarında dahi deri üzerinden alınan sinyallerin eksik veya yanlış ölçümü de olabileceğinden, daha direkt ve invazif ölçümler hedeflenmiştir. Tetraplejik hastada ilk defa denenmiş olan intrakortikal sinyal (IKS) elde etmek amacıyla korteks içerisine yerleştirilen elektrotlar geliştirilmiştir (15). Daha kesintisiz ve artifaktsız dalga kayıt etme özelliği bulunan IKS'in dezavantajı ise invazif olmaları, kraniyotomi ve transkortikal geçiş gerektirmesi, daha lokalize bir alanın sinyallerini elde etmesi ve uzun dönem cihazın fonksiyonunu koruyabilme kapasitesinin bilinmemesidir.

Bir başka sinyal kaynağı ise subdural mesafeden pia üzerinden elde edilen elektrokortikografi (EKOg) yöntemidir. Korteks üzerine yerleştirilen şeritler (18), korteksi penetre eden makroelektrot şeritler (19) veya intraventriküler şeritler (33) ile elde edilen ölçümlerdir. EKOg ile daha fazla alanın sinyali elde edilebilmesine karşın, yine cerrahi girişim gerektirmesi ve uzun vade dayanıklılıktan kaynaklanan dezavantajları mevcuttur.

EKOg kadar güvenli veriler elde edilebilen fakat daha az invazif olması sebebiyle bir diğer kaynak ise epidural alan potansiyeli ölçümüdür. Epidural EEG ile eşdeğer bir yaklaşım ile dura açılmadan epidural alana yerleştirilen elektrotlar ile hayvan ve insan deneylerinde güvenilir BMA sistemi kurulabilmektedir (35).

Henüz emekleme aşamasında olan fakat gelecek vaat eden invazif olmayan bazı yöntemler mevcuttur. Magnetoencefalografi (MEG) ile piramidal aksonlar boyunca ilerleyen elektriksel akım ölçülerek bilgisayar işaretçisi kontrol edilebilmiştir (22). Yine invazif olmayan fMRI (fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme) ve fNIR (fonksiyonel yakın kızılötesi görüntüleme) ile beyin aktif olan bölgelerindeki artmış kan akımı ölçülmüştür (41). Bundan yola çıkarak gerçek zamanlı fMRI ile sadece kişinin düşünmesi ile robotik protez kol hareket ettirebilmiştir (21).



Şekil 2: EEG, EKOg veya IKS kaynaklarından elde edilen sinyaller bilgisayar yazılım aracılığıyla kodlandırıldıktan sonra hastanın kullanıma alanlarına hitap etmesi için yine yazılım ile anlamlandırılır. Kişiden kişiye farklılıklar göstereceği ve bir nörorehabilitasyon süreci olduğu için, hastanın eğitilmesi ve yazılımın kişiye göre düzenlenmesi gerekir. Başarılı bir BMA ile hasta protez hareketleri, mobilizasyon ve iletişim becerilerini kazanır, çevresel birimlerin kontrolünü gerçekleştirebilir.

■ NÖROREHABİLİTASYON

20. yüzyıl'ın sonlarına doğru BMA konusundaki gelişmeler hız kazanmış olmakla beraber asıl terapötik sonuçların elde edileceği nörorehabilitasyon ile ilgili araştırmalar yeni yeni ilgi almaya başlamıştır. Bununla birlikte sanal gerçeklik (virtual reality) ve transkraniyal direkt uyarım (transcranial direct current stimulation) ile birleştirildiğinde BMA'nın klinik sonuçlarının daha fazla iyileştirilebildiği de çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (3,36).

BMA'nın ilk ortaya çıkışında, iletişim ile ilgili yarattığı yenilikler göze çarpsa da; zaman içerisinde bu sistemlerin tetraplejik bireylerde intrakortikal elektrotlar sayesinde robotik kolların güvenilir kontrolünü sağlamaya da katkısı olabileceğine dair ümit vaat eden çalışmalar ortaya çıktı (36). İlk olarak 1969 yılında Sterman tarafından rehabilitatif BMA, bir diğer adıyla biofeedback BMA olarak öne sürülen teorik konseptte ana fikir, nöral aktivitenin uyarım olmadan koşullandırılmasının, davranış üzerinde etkili olabileceğiydi (37). Örneğin, ağır epilepsi vakalarında uyarım olmadan sensorimotor ritimlerin koşullandırılmasının, grand-mal nöbet sıklığını azaltabileceği gösterilmiştir (38).

BMA, ilk defa klinik ortamda kilitleme sendromu (locked-in syndrome) olan bir hastada uygulanmıştır. Bu uygulamada BMA, bilincin açık olduğu bir durumda paralize olmuş bir beden için dışı vuru mu sağlayan bir pencere görevi görmektedir (4). Spasyal ve motor görevlerin düşünülmesiyle birlikte bilinçli hastanın dış dünyayla iletişim kurması sağlanmıştır. Yakın zamanda, beyin sapı enfarktı olan tetraplejik bir hastada benzer bir sistem kullanılmıştır (31). Bu gelişmeler ile parali z olan hastalarda yaşam koşullarının, sistemlerin maliyet ve risklerinin azaltılmasıyla birlikte iyileştirilebileceği oldukça ümit verici bir gelişmedir (36).

BMA, temel prensip olarak elektrot bağlantılarıyla oluşturduğu uyarılarla ekstremitelerde çeşitli fonksiyonların gerçekleştirilmesini sağlar. Ayrıca yapılan çalışmalar, bu sistemlerin fonksiyonel iyileşmeyi ve nöroplastisiteyi artırdığını göstermiştir (6). Bir çalışmada, BMA'nın ipsilateral beyin aktivitesini pekiştirerek ve hem kontralateral hem de ipsilateral somatosensoryel ve motor alanlarda yeniden düzenleme sağlayarak, kronik inme hastalarında etkilenen ekstremitede propriyoseptif fonksiyonu geri kazandırabileceği gösterilmiştir (6). Bir diğer çalışmada, sağlıklı bireylerde BMA egzersizinden 1 saat sonra yapılan fonksiyonel ve konvansiyonel MR görüntülemelerinde; görsel uyarılarla birlikte oksipital/pariyetal alanların ve motor uyarılarla birlikte prekuneus/sensorimotor alanlarda gri madde T1 sinyallerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca aynı alanlarda fonksiyonel bağlantının da arttığı gözlenmiştir (25). Bu çalışmalar, BMA'nın fonksiyonel kayıp yaratan birçok hastalıkta nöroplastisiteyi artırabileceğini göstermektedir.

Son zamanlarda BMA'nın omurilik yaralanmalarından sonraki rehabilitasyon sürecindeki kullanım alanları da araştırılmaya başlanmıştır. Donati'nin 2016'da yaptığı bir çalışmada; robotik alt ekstremitte ortezleriyle kronik paraplejik hastalarda iki bacaklı mobilizasyon hedeflenmiştir. Bu amaçla EEG bazlı BMA ile postür sağlayan robotik sistemin ve alt ekstremitte iskeletin kontrol edilmesi sağlanmıştır. Bu BMA'nın en önemli

özelligi, görsel uyarının yanında taktik uyarının hastanın ön kol derisine ulaştırılabilmesi olmuştur (9). Bu çalışmada omurilikte lezyonun aşağısı tamamen paraplejik olmakla birlikte, 12 ay BMA ile rehabilitasyon sonrası hastalarda nosiseptif duyu, propriyosepsiyon ve vibrasyon, yaralanmanın altındaki kasların istemli kontrolü ve mesane kontrolü gibi fonksiyonlarda iyileşme olduğu görülmüştür. Hastaların yarısında tam paraplejiden parsiyel paraplejiye doğru geçiş olmuştur. Bu çalışma, BMA'nın uzun dönem kullanımıyla birlikte omurilik yaralanmasında kortikal ve spinal plastisiteyi artırabileceğini göstermiştir (20).

■ BMA ve ARAŞTIRMA

BMA'nın ana hedefi, hastalarda iyileşmeye katkıda bulunmak ve bilhassa rehabilitasyon hususunda yaşam kalitesini arttırmak olsa da; bu teknoloji, nörofizyoloji başta olmak üzere nörobilimin ilerlemesine de katkı sağlamak için büyük bir potansiyel taşımaktadır (35). Örneğin; dışarıdan verilen uyarıyla birlikte nöronal aktivite ile davranış arasındaki korelasyon direkt olarak gösterilebilmektedir. Bu sistem, beyin-davranış ilişkilerini yöneten bilinçli ve bilinç altı geri dönüş (feedback) mekanizmalarının daha detaylı incelenmesinde fayda sağlayabilir (23). Bunun yanında, farklı hastalıkların patofizyolojisinin daha doğru anlaşılmasına da katkı sağlayabilir (23). Bu hususta, epilepsi ve Parkinson hastalığında patolojik nöral aktivitelerden biri olan beta dalgalarının kontrolünü sağlamada BMA kullanılırken bu semptomlara sebep olan unsurlar da ortaya konulabilmektedir (5). Ayrıca epilepsi hastalarında BMA ile, nöbet oluşturan biyobelirteçlerin ortaya konulması da bu hastalığın patofizyolojisinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayabilir (14).

Günümüzde BMA araştırmalarındaki ilerlemelerin çoğu laboratuvar çalışmalarıyla sınırlı olup, ağır engellilikleri olan hedef kitleyi içeren çalışmalar sayıca azdır. Bu süreçte laboratuvar ortamında kazanılmış gelişmelerin, klinik kullanıma adaptasyonu ve insanlarda fayda sağlaması henüz başlamıştır (34). Öte yandan bu adaptasyon süreci de, laboratuvar çalışmalarının dışında farklı sorunları beraberinde getirmektedir. Örneğin; BMA'ların uzun ömürlü ve hastane ortamından bağımsız çalışmaya uygun hâle getirilmesi ve hastaların, bu cihazları kullanmalarına uygun ev ortamlarını sağlayabilmesi gereklidir. Ayrıca bu cihazların kullanımıyla birlikte hayat kalitesindeki artışın da multidisipliner olarak değerlendirilmesi, klinik uygulamaların yaygınlaşmasını sağlayacak araştırmalara da yön verecektir (34).

■ BMA ve NÖROŞİRÜRJİ

BMA, günümüzde hızla gelişen ve gelecek için büyük yatırımlarla birlikte umut vaat eden bir endüstri olma yolundadır ve bu pazarda nöroşirürji, nörolojik hastalıklarla ve tedavi süreçlerinde verilen kararlarla birebir ilgilenen bir bilim dalı olmasından ötürü bu süreçte önemli bir role sahiptir. Nöroşirürjiyenler, yeni cihazların sinir sistemine yerleştirilmesi için yapılması gereken girişimsel işlemlerde yetkili kişilerdir (7). Öte yandan doğru endikasyonlarla birlikte bu cihazların doğru hastalar için kullanılması, hastaların takibi ve cihazların ortaya çıkarabileceği komplikasyonlar da çoğunlukla nöroşirürjiyenlerin sorumlu-

luğ olacaktır. Hem bu sebeple, hem de yakın gelecekte bu sistemlerin daha yaygın kullanımı öngörüldüğünden dolayı nöroşirürjiyenler arasında bu alanda uzmanlaşacak hekimlere ihtiyaç duyulacaktır. Bu uzmanlaşma için gerekli eğitim süreçlerinin planlanması ve uygulamada gerekli olabilecek donanımsal altyapının hazırlanması faydalı olacaktır.

Fonksiyonel nöroşirürji giderek popüleritesi ve talebi artan bir dal olmuştur. BMA ise geleceğe hitap eden, gelişim potansiyeli yüksek ve bilim-kurgudan gerçeğe dönüşmekte olan bir alandır. Bu alan çok yönlü olup çeşitli uzmanlıkların ortaklaşa çalışacağından, nöroşirürjiyenler bu alanda geliştirerek ekibin vazgeçilmez ögesi olacaktır. BMA bir süreçtir ve bu sürecin cerrahi kısmında yer almaya en uygun yegâne meslek nöroşirürjidir.

■ BMA GELECEĞİ ve SORUNLARI

BMA'nın, tıp alanında sağlayacağı gelişmelerin yanında bu teknolojinin yaygınlaşmasının önünde hâlen çözülmesi gereken birtakım problemler mevcuttur.

Teknik açıdan BMA ve nöroprotezlerde duyu geri bildiriminin olmaması, özellikle uzuv kontrolünde mühim bir konudur. Geri bildirim sadece görsel ve işitsel duyularla kısıtlıdır. Arzu edilen fonksiyonun durdurulması, kısıtlanması ve derecelendirilmesi ancak sağlıklı bir geri bildirim olması hâlinde en uygun düzeye gelir. Mevcut nöroprotezler, hastanın görsel uyarılarıyla birlikte motor eylemlerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır ve duysal uyarının olmaması, objelerin istenildiği şekilde hareket ettirilmesini ve yönetilmesini taktik ve proprioseptif bilginin olmamasından dolayı kısıtlamaktadır. Yeni çalışmalar ile paralizisi olan hastalarda motor ve duysal uyarıların birlikte iletilmesini sağlayan çift yönlü uyarım içeren uzuvlar geliştirilmektedir (2,27).

BMA'da bir diğer sorun da, yabancı cisime karşı vücudun verdiği fizyolojik reaksiyondur. Bu reaksiyonla birlikte cihaz etrafında fibrotik bir doku oluşmakta ve elektrik sinyallerinin etkili iletimi engellenmektedir, bu sebeple cihazların kullanım süreleri kısa olmaktadır (17). Yapılacak araştırmalar ile daha uzun ömürlü ve biyoyoumluluğu daha fazla olan cihazlar geliştirilmesi, pratikte kullanımı daha da yaygınlaştırabilir. Öte yandan bu elektronik cihazlarına vücut sıvılarının girişi de engellenmelidir. Ayrıca bu cihazların içerdiği elektronik materyaller ve kablosuz arayüzlerin daha küçük bir hacme sığdırılması konusunda da geliştirmelere ihtiyaç vardır (29). BMA'nın; hem uyarıcı hem kaydedici çoklu elektrotlarla birlikte, birden fazla beyin bölgesindeki elektriksel bağlantılarının tek bir merkezde toplanabilmesine dair geliştirmeler devam etmektedir. Bu sayede veri bütünleştirme ve nöromodülasyon kapasitesi artırılarak; psikiyatrik bozukluklar, hareket bozuklukları, epilepsi ve hatta demans gibi hastalıkların tedavisine de katkı sağlanabilecektir (29).

Tıbbi kullanımının yanında BMA; hastalığı olmayan bireylerde hafıza, bilişsel fonksiyonlar, duyu-algı, dil ve motor kontrol gibi fonksiyonların geliştirilmesi konusunda gelecek için umut vericidir. Şu anda girişimsel olmayan sensörlerle beyin-beyin iletişimleri sağlanabilmekle beraber, bu fikirlerin etik yönü oldukça tartışmalıdır. Örneğin, BMA ile motor ve duyu

fonksiyonlarda elde edilecek ek getiri sayesinde engelli sporcuların bu cihazları kullanmasıyla birlikte kazanacakları haksız avantaj veya bu cihazları kullanan askeri personellerin güçsel olarak üstünlüğü endişe verici etik problemlerdir. Ayrıca bireyde bir hastalık olmadan bu teknolojinin kullanımı ve implantasyonu ortaya çıkabilecek risk-fayda ilişkisinde bireysel ve toplumsal düzeyde ne kadar riskin kabul edilebilir olduğu konusu da dikkat çekmektedir (7). Bu hususta doğru endikasyonlarla cihazların yerleştirilmesi, büyük oranda nöroşirürjiyenlerin sorumluluğunda olacaktır.

■ SONUÇ

BMA, hızla gelişmekte olan bir biyoteknoloji ürünü olmakla birlikte klinik pratikte kullanımı yakın gelecekte birçok hastalıkta tedaviye yön verecek niteliktedir. Bu cihazların iyileştirilmesi ve çeşitli maddi, teknolojik ve etik sorunların üstesinden gelinmesiyle birlikte nöroşirürji alanında da cerrahi uygulamaları farklı bir boyuta taşınması kaçınılmazdır.

■ KAYNAKLAR

1. Akhtari M, Bryant HC, Mamelak AN, Heller L, Shih JJ, Mandelkern M, Matlachov A, Ranken DM, Best ED, Sutherland WW: Conductivities of three-layer human skull. *Brain Topogr* 13(1):29-42, 2000
2. Bensmaia SJ, Miller LE: Restoring sensorimotor function through intracortical interfaces: Progress and looming challenges. *Nat Rev Neurosci* 15(5):313-325, 2014
3. Bermúdez i Badia S, GarcíaMorgade A, Samaha H, Verschure PF: Using a hybrid brain computer interface and virtual reality system to monitor and promote cortical reorganization through motor activity and motor imagery training. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 21(2):174-181, 2013
4. Birbaumer N, Ghanayim N, Hinterberger T, Iversen I, Kotchoubey B, Kübler A, Perelmouter J, Taub E, Flor H: A spelling device for the paralysed. *Nature* 398(6725):297-298, 1999
5. Brown P, Oliviero A, Mazzone P, Insola A, Tonali P, Di Lazzaro V: Dopamine dependency of oscillations between subthalamic nucleus and pallidum in Parkinson's disease. *J Neurosci* 21: 1033-1038, 2001
6. CariaA, da Rocha JLD, Gallitto G, Birbaumer N, Sitaram R, Murguialday AR: Brain-machine interface induced morpho-functional remodeling of the neural motor system in severe chronic stroke. *Neurotherapeutics* 17(2):635-650, 2020
7. Chari A, Budhdeo S, Sparks R, Barone DG, Marcus HJ, Pereira EAC, Tisdall MM: Brain-machine interfaces: The role of the neurosurgeon. *World Neurosurg* 146:140-147, 2021
8. Cheng M, Gao X, Gao S, Xu D: Design and implementation of a brain-computer interface with high transfer rates. *IEEE Trans Biomed Eng* 49(10):1181-1186, 2002
9. Donati AR, Shokur S, Morya E, Campos DS, Molioli RC, Gitti CM, Augusto PB, Tripodi S, Pires CG, Pereira GA, Brasil FL, Gallo S, Lin AA, Takigami AK, Aratanha MA, Joshi S, Bleuler H, Cheng G, Rudolph A, Nicoletti MA: Long-term training with a brain-machine interface-based gait protocol induces partial neurological recovery in paraplegic patients. *Sci Rep* 6:30383, 2016

10. Farwell LA, Donchin E: Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 70(6):510-523, 1988
11. Fetz EE: Operant conditioning of cortical unit activity. *Science* 163(3870):955, 1969
12. Fox SS, Rudell AP: Operant controlled neuralevent: Formal and systematic approach to electrical coding of behavior in brain. *Science* 162(3859):1299-1302, 1968
13. Georgopoulos A, Kalaska J, Caminiti R, Massey J: On the relations between the direction of two-dimension alarm movements and cell discharge in primate motor cortex. *J Neurosci* 2(11):1527-1537, 1982
14. Grasse DW, Karunakaran S, Moxon KA: Neuronal synchrony and the transition to spontaneous seizures. *Exp Neurol* 248: 72-84, 2013
15. Hochberg LR, Serruya MD, Friehs GM, Mukand JA, Saleh M, Caplan AH, Branner A, Chen D, Penn RD, Donoghue JP: Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature* 442(7099):164-171, 2006
16. Humphrey DR, Schmidt E, Thompson W: Predicting measures of motor performance from multiple cortical spike trains. *Science* 170(3959):758, 1970
17. Klopffleisch R, Jung F: The pathology of the foreign body reaction against biomaterials. *J Biomed Mater Res A* 105(3):927-940, 2017
18. Krusienski DJ, Shih JJ: Control of a brain-computer interface using stereotactic depth electrodes in and adjacent to the hippocampus. *J Neural Eng* 8(2):025006, 2011
19. Krusienski DJ, Shih JJ: Control of a visual keyboard using an electrocorticographic brain-computer interface. *Neurorehabil Neural Repair* 25(4):323-331, 2011
20. Lebedev MA, Nicolelis MA: Brain-machine interfaces: From basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation. *Physiol Rev* 97(2):767-837, 2017
21. Lee JH, Ryu J, Jolesz FA, Cho ZH, Yoo SS: Brain-machine interface via real-time fMRI: Preliminary study on thought controlled robotic arm. *Neurosci Lett* 450(1):1-6, 2009
22. Mellinger J, Schalk G, Braun C, Preissl H, Rosenstiel W, Birbaumer N, Kübler A: An MEG-based brain-computer interface (BCI). *Neuroimage* 36(3):581-593, 2007
23. Moxon KA, Foffani G: Brain-machine interfaces beyond neuroprosthetics. *Neuron* 86(1):55-67, 2015
24. Nicolelis MA, Dimitrov D, Carmena JM, Crist R, Lehw G, Kralik JD, Wise SP: Chronic, multisite, multielectrode recordings in macaque monkeys. *Proc Natl Acad Sci U S A* 100(19):11041-11046, 2003
25. Nierhaus T, Vidaurre C, Sannelli C, Mueller KR, Villringer A: Immediate brain plasticity after one hour of brain-computer interface (BCI). *J Physiol* 599(9):2435-2451, 2021
26. Pfurtscheller G, Neuper C: Motor imagery and direct brain-computer communication. *Proceedings of the IEEE* 89(7): 1123-1134, 2001
27. Raspopovic S, Capogrosso M, Petrini FM, Bonizzato M, Rigosa J, DiPino G, Carpaneto J, Controzzi M, Boretius T, Fernandez E, Granata G, Oddo CM, Citi L, Ciancio AL, Cipriani C, Carrozza MC, Jensen W, Guglielmelli E, Stieglitz T, Rossini PM, Micera S: Restoring natural sensory feedback in real-time bidirectional hand prostheses. *Sci Transl Med* 6(222):222ra19, 2014
28. Rosenfeld JP, Rudell AP, Fox SS: Operant control of neuralevents in humans. *Science* 165(3895):821-823, 1969
29. Rosenfeld JV, Wong YT: Neurobionics and the brain-computer interface: Current applications and future horizons. *Med J Aust* 206(8):363-368, 2017
30. Rousche PJ, Normann RA: Chronic recording capability of the Utah intracortical electrode array in cat sensory cortex. *J Neurosci Methods* 82(1):1-15, 1998
31. Sellers EW, Ryan DB, Hauser CK: Non invasive brain-computer interface enables communication after brainstem stroke. *Sci Transl Med* 6(257):257re7, 2014
32. Serruya MD, Hatsopoulos NG, Paninski L, Fellows MR, Donoghue JP: Brain-machine interface: Instant neural control of a movement signal. *Nature* 416 (6877):141,142, 2002
33. Shih JJ, Krusienski DJ: Signals from intraventricular depth electrodes can control a brain-computer interface. *J Neurosci Methods* 203(2):311-314, 2012
34. Shih JJ, Krusienski DJ, Wolpaw JR: Brain-computer interfaces in medicine. *Mayo Clin Proc* 87(3):268-279, 2012
35. Slutzky MW: Brain-machine interfaces: Powerful tools for clinical treatment and neuroscientific investigations. *Neuroscientist* 25(2):139-154, 2019
36. Soekadar SR, Birbaumer N, Slutzky MW, Cohen LG: Brain-machine interfaces in neurorehabilitation of stroke. *Neurobiol Dis* 83:172-179, 2015
37. Serman MB, Wyrwicka W, Howe R: Behavioral and neurophysiological studies of the sensorimotor rhythm in the cat. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 27:678-679, 1969
38. Serman MB, Macdonald LR: Effects of central cortical EEG feedback training on incidence of poorly controlled seizures. *Epilepsia* 19:207-222, 1978
39. Vidal JJ: Toward direct brain-computer communication. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering* 2:157-180, 1973
40. Wolpaw JR, Birbaumer N, McFarland DJ, Pfurtscheller G, Vaughan TM: Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology* 113(6):767-791, 2002
41. Wolpaw JR, Wolpaw EW: *Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice*. New York, NY: Oxford University Press, 2012