

Beyin Bilgisayar Arayüzleri

Bilgisayarlarla İletişim Düşünerek de Mümkün

Dr. Tuncay Baydemir [*Bilim ve Teknik Dergisi*]

Uzun yıllar boyunca insanlar ellerini kullanarak yani dokunarak bilgisayarlarla ve makinelerle etkileşim kurdu.

Ancak bu tür bir etkileşim sınırlıydı ve bu sınırın ötesine geçmek için çok çeşitli çalışmalar yapıldı. Yıllar içerisinde insan-bilgisayar ve insan-makine etkileşimlerini daha sezgisel hâle getirmek amacıyla konuşma, mimik ve hareket gibi diğer iletişim yöntemlerini kullanabilecek teknolojiler geliştirmek için pek çok girişimde bulunuldu. Sonuç olarak ses ya da hareketle bilgisayar ve makinelere komutlar vermek ve onları kullanabilmek günümüz teknolojileri ile mümkün hâle geldi.



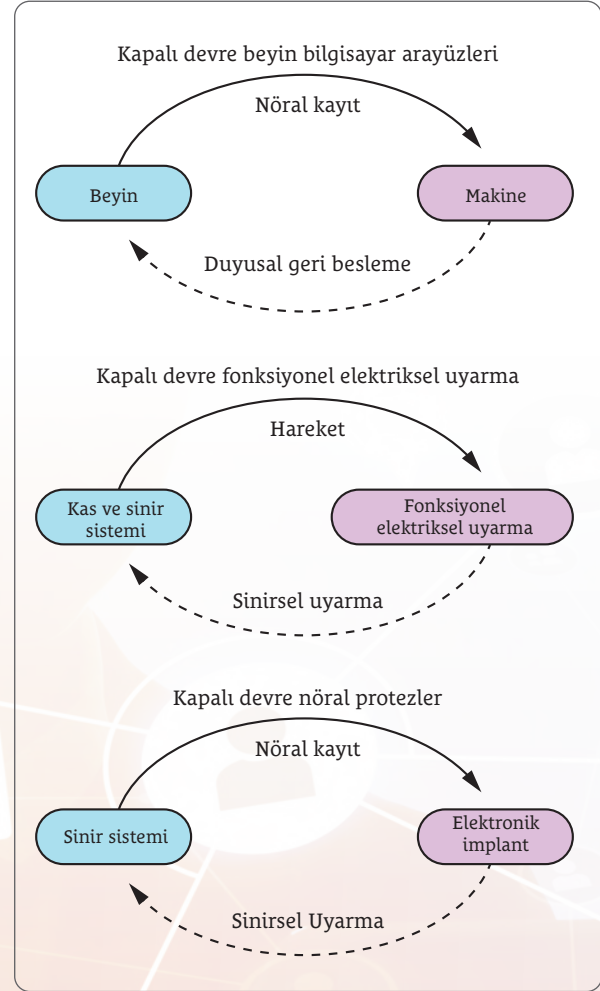
Tüm bu olumlu gelişmeler hayatı kolaylaştırmak adına pek çok yeni teknolojiyi beraberinde getirdi. Ancak hâlâ aşılması gereken sınırlar vardı ve insanlar bilgisayar ve makinelerle daha doğrudan, daha hızlı ve daha kolay iletişim kurabilmeliydi.

Bilişsel sinirbilim ve nörolojik görüntüleme teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte insan beyninin bilgisayar ve makinelerle iletişim kurmasının yolu açıldı. Bu gelişmeler sayesinde beyin dalgalarından sensörler aracılığıyla elde edilen verilerin işlenmesiyle harici cihaz ve makinelerle istenilen komutları vermek mümkün hâle geldi. Bilim-kurgu kitap ve filmlerde fazlaca yer bulmuş olan insanın biyolojik bedeninin dışındaki cihazları beyni sayesinde kontrol edebilmesi fikri bilimsel gelişmelerle birlikte hızlı bir şekilde kurmaca olmaktan çıkıp gerçeklik hâline gelmeye devam ediyor.

Beyin Diliyle Konuşmak

Beyin makine arayüzü olarak da bilinen beyin bilgisayar arayüzü (BBA) sistemleri, (beynin motor fonksiyonlarından bağımsız olarak) beyin mesajlarını harici bir cihaza iletmek için doğrudan bir iletişim yöntemi sağlıyor. Bu arayüzler genellikle bilişsel ve duyuşsal motor fonksiyonlarını desteklemeye, güçlendirmeye veya onarmaya yönelik olarak kullanılabilir. Kullanıcılar beyin aktivitelerini değiştirip dönüştürerek bilgisayar ve makineleri kontrol etmelerini sağlayacak beyin dalgaları üretebiliyorlar.

Daha hızlı ve daha ucuz bilgisayarların üretilmesi, beynin duyuşsal bilgileri nasıl işlediğinin ve motor çıktısına dönüştürdüğünün daha iyi anlaşılması, beyin sinyallerini kaydetme ve bu sinyalleri işleme yöntemlerinin sayı ve kalite bakımından geliştirilmesi ve daha ulaşılabilir hâle getirilmesi ile makine öğrenmesi alanındaki gelişmeler sayesinde beyin bilgisayar arayüzlerine olan ilgi yıllar geçtikçe arttı. Günümüzde bu arayüzleri inşa etmek için birincil motivasyon insandaki kayıp duyuşsal ve motor fonksiyonları geri kazandırma potansiyelleri.



Sinir sistemi ve elektronik cihazlar arasındaki kapalı döngü bağlantı örnekleri

Gelişmiş BBA'lar sadece günlük işleri yerine getirme yollarını değiştirmekle kalmıyor aynı zamanda fiziksel engelli bireylerin yaşam kalitelerini de inanılmaz boyutlarda artırıyor. Konuyla ilgili teknolojik gelişmeler yaralanma veya hastalığa bağlı olarak felç geçiren ve konuşma/mimik yoluyla iletişime geçemeyen kişiler için hayli önemli. Günümüzdeki BBA'ların yaygın kullanım örnekleri arasında duyma engelliler için koklear protezler, görme engelliler için retina protezleri ve Parkinson hastaları için derin beyin uyarıcı protezler sayılabilir. Ayrıca amputeler ve omurlilik yaralanmaları geçirmiş kişilerin kol ve bacak protezlerinin beyin sinyalleri ile kontrolünü artırmak amacıyla araştırmalar devam ediyor. ALS ve felç hastaları için beyin aktivitesi ile kontrol edilen imleçler, sözcük yazıcılar ve seslendiriciler ile tekerlekli sandalyeler de beyin bilgisayar arayüzlerinin olası kullanım alanları arasında.

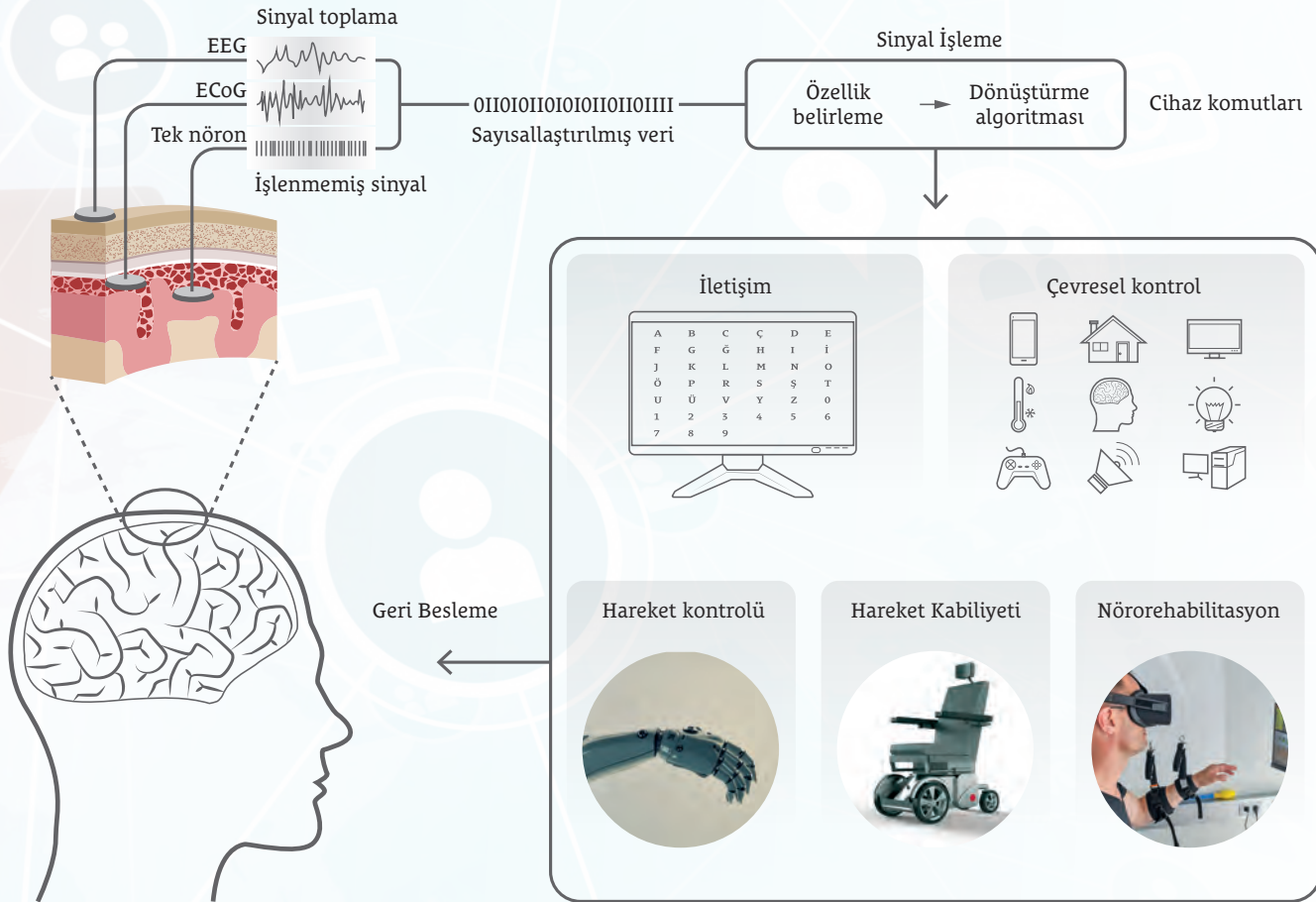
Diğer taraftan, son zamanlarda oyun ve eğlence uygulamalarından robotik beden kontrolü ve eğitim faaliyetlerine kadar farklı alanlarda kullanıma yönelik BBA'larla ilgili araştırmalar yapılıyor. Teknolojinin gelecekte ne kadar yaygınlaşacağı henüz net olarak belli değil. Ancak gelişmeler kaydedildikçe ve kullanım alanları arttıkça ahlaki ve etik boyutların da derinlemesine ele alınması gerekli gözüküyor.

Beyin ve Ötesi

İnsan beyni dünyada başka bir şey ile karşılaştırılmaz. Hakkında hemen hemen her gün yeni bilgiler öğrenmeye devam ettiğimiz oldukça karmaşık bir organ olan beyin vücut ağırlığının ortalama %2'sini oluşturuyor. Yaklaşık 1300-1400 gr ağırlığındaki bu büyüleyici or-

gan duyarlar yoluyla bilgi almak, aldığı bilgileri işlemek, yorumlamak ve ifade etmek de dâhil olmak üzere tüm vücut fonksiyonlarını kontrol ediyor. Zekâ, yaratıcı düşünce, duygu ve anılar beyin tarafından yönetiliyor. Ayrıca kalbin çalışmasını ve solunum hızını düzenleyerek farklı durumlara nasıl tepki vereceğimizi de belirliyor.

Beyin, gerçekleştirilmesi istenen göreve bağlı olarak vücudun her yerinde bulunan milyonlarca alıcıdan gelen sinyalleri uygun kas hareketlerini uygulayacak komut sinyallerine dönüştürerek vücutta ilgili yerlere iletilmesini sağlıyor. Bu kapalı devre gerçek zamanlı kontrol sistemi, yapay olarak bilim insanları tarafından oluşturulan benzer herhangi bir sisteme göre oldukça üstün. Beynin eşsiz bilgi işleme yetenekleri büyük ölçüde paralel ve dağıtılmış hesaplama yönteminden kaynaklanıyor. İşin büyük kısmı



BBA sisteminin bileşenleri. Beyin aktivitesinden kaynaklı elektrik sinyalleri farklı bölgelerden elektrotlar aracılığı ile kaydedilir. Bu sinyaller güçlendirilir ve sayısallaştırılır. Uygun karakteristik sinyaller belirlenir ve çıkış cihazını kontrol etmeyi sağlayan komutlara dönüştürülür. Cihazdan gelen geri bildirim etkili cihaz performansı için kullanıcıya beyin sinyallerini düzenleme imkânı sunar.

Mak, J.N., Wolpaw, J.R., "Clinical applications of brain-computer interfaces: current state and future prospects", *IEEE Rev Biomed Eng*, 2:187-199, 2009.

nöron olarak bilinen sinir hücrelerince gerçekleştiriliyor. İnsan vücudunda yaklaşık 86 milyar nöron bulunuyor. Bu nöronlar oldukça karmaşık elektrokimyasal cihazlar ve yüzlerce nörondan aldıkları bilgiyi işleyerek diğer nöronlara iletiyorlar. Milisaniye sürelerinde gerçekleşen bu eşsiz veri akışı, yeni veri girişlerine ve değişen koşullara göre anlık olarak yeniden düzenleniyor.

Nöronlar Konuşur mu?

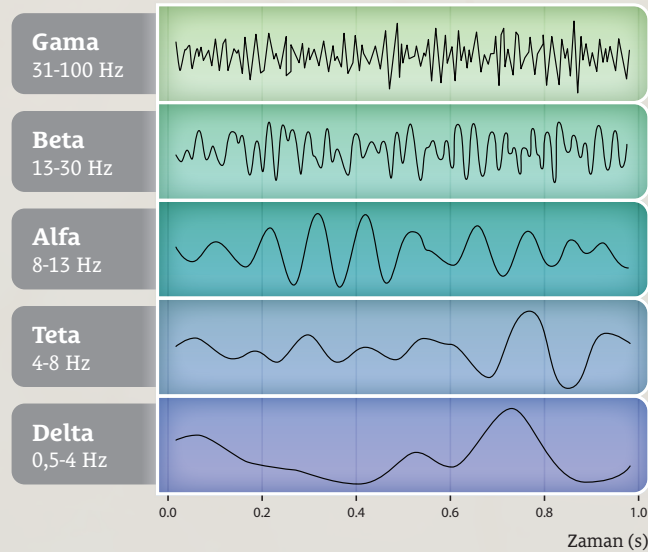
Beyin sinyallerinin uygun algoritmalarla işlenmesiyle vücut dışında bulunan harici bir cihaz kontrol edilebiliyor. Bunu başarmak için nöronların dilinden anlamak gerekiyor. Bir nöron diğer nöronlardan yeterince güçlü girdiler aldığı anda bir dizi olay serisi tetikleniyor. İyonların hareketlerine bağlı olarak nöronların elektriksel potansiyel değerlerinde aksiyon potansiyeli de denilen hızlı artış ve düşüşler meydana geliyor. Elektrik potansiyelindeki bu ani artış ve düşüşler nöronlar arasındaki iletişimi temsil ediyor. Bu değişikliklerden elde edilen veriler BBA'lar sayesinde işlenerek bilgisayar ve makinelere iletmek üzere dijital verilere dönüştürülüyor.



Farklı Beyin Sinyalleri-Farklı Anlamlar

Beyin nöral aktiviteler ile birlikte beyin bilgisayar arayüzlerinde kullanılacak çeşitli sinyaller üretiyor. Beyin aktivitesine bağlı olarak kaydedilebilen sinyaller frekansa bağlı olarak beş sınıfa ayrılıyor:

İnsan Beyin Dalgası Desenleri



Gama Dalgaları: 31-100 Hz aralığındaki bu beyin dalgaları kısa süreli hafıza ve çok boyutlu entegrasyon hâllerinde gözlenir. Yüksek gama aktivitesinin motor görevler için de görüldüğü belirtiliyor.

Beta Dalgaları: 13-30 Hz frekans aralığındaki beta dalgaları alarm durumundaki ve yüksek dikkat hâlindeki kişilerde görülür.

Alfa Dalgaları: 8-13 Hz frekans aralığındaki dalgalardır. Uyanık hâldeki kişide gözleri kapalı ve rahat durumdayken gözlenir. Kişi bir hareket yaptığında veya bir hareket gerçekleştirdiğini hayal ettiğinde bu dalgalarda düşüş veya kaybolma görülür.

Teta Dalgaları: 4-8 Hz frekans aralığına sahip olup çocuk ve yetişkinlerde uyuşukluk ve uyku ile uyanıklık arasındaki hâli temsil eder. Yetişkinlerde yüksek teta seviyeleri anormal olarak kabul edilir.

Delta Dalgaları: 0,5-4 Hz aralığında frekansa sahip delta dalgaları en yüksek genliğe sahip ve en yavaş olan sinyaller. Bebeklerde ve yavaş dalga uykusundaki yetişkinlerde görülür.

Beyin Bilgisayar Arayüzü Ne Anlam Taşıyor?

Beyin bilgisayar arayüzleri, beyin sinyallerini toplayıp analiz eden ve bu analiz sonucunda istenen eylemlerin gerçekleştirilmesi amacıyla bu sinyalleri çıkış cihazlarına aktarmak üzere komutlara dönüştüren bilgisayar tabanlı sistemlerdir. Örneğin bu tür bir arayüz ile kullanıcı elini sağa veya sola doğru hareket ettirdiğini hayal ederek bilgisayar ekranındaki bir topu sağa veya sola hareket ettirebilir.

Dikkat edilirse bu tanım BBA'ları merkezi sinir sistemi tarafından üretilen sinyalleri ölçen ve bu sinyalleri kullanan sistemlerle sınırlıyor. Örneğin sesle, hareketle ya da kaslarla aktive edilen bir iletişim sistemi bu tanımlamaya girmiyor. Diğer yandan, beyindeki elektriksel aktiviteyi ölçen elektroensefalogram (EEG) cihazı da tek başına bir arayüz sayılmıyor. Çünkü bu cihaz sadece beyin sinyallerini kaydediyor ve tek başına kullanıldığında kullanıcının çevresinde herhangi bir çıktı üretmiyor. Özetle, BBA'lar temel olarak kullanıcıların beyin sinyallerini kullanarak onlarla birlikte çalışırlar.

BBA teriminin 1970'lerde ortaya çıkmasından itibaren bu konudaki araştırmalar her geçen gün arttı ve dünya çapında pek çok laboratuvarında BBA'lar ana çalışma konusu oldu. Dolayısıyla pek çok yeni kavram, metot ve uygulama alanı ortaya çıktı. Günümüzde de yeni gelişmeler yaşanmaya devam ediyor.

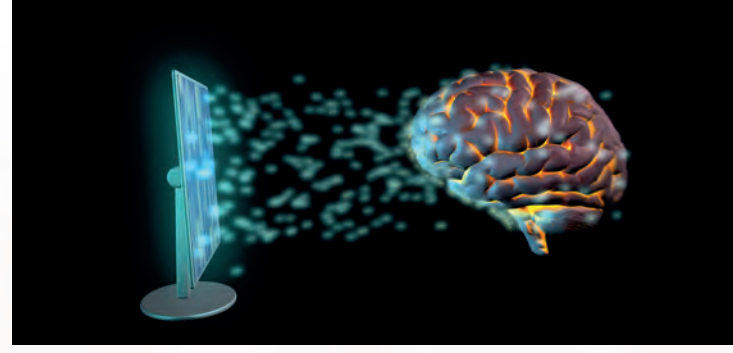
Bu Arayüzler Nasıl Çalışıyor?

21. yüzyılın başlarında farklı beyin sinyallerini kaydetmek için yeni teknikler ve yöntemler geliştirilmesinin BBA araştırmalarına olumlu etkisi oldu. Bu sayede konuyla ilgili farklı yöntemler kullanılarak çok sayıda araştırma yapıldı. Ancak yöntemler ne kadar farklı olursa olsun tüm BBA sistemleri aynı temel prensip ve adımlar üzerinden çalışıyor. Prensip olarak bir BBA sistemini kontrol etmek için beyin sinyalleri kullanılıyor. Öncelikle tespit edilen beyin sinyalleri çevrimiçi sınıflandırma algoritmaları ile güçlendiriliyor, filtreleniyor ve kodlara dönüştürülüyor. Sonra BBA çıkışı bir protez, ortez, tekerlekli sandalye, robot veya imlecini hareketini kontrol etmek veya kasların veya beynin elektriksel uyarılmasını yönlendirmek için kullanılabilir.



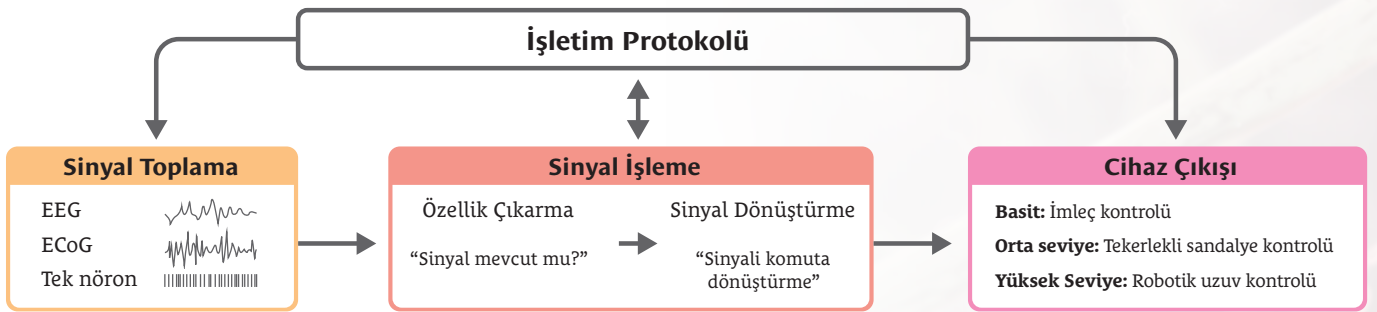
Temel Bileşenler

BBA'ların işleyiş sistemi kullanıcının amacını gösteren beyin sinyallerinin tespit edilip gerekli ölçüm ve analizleri yapıldıktan sonra yönetilecek cihaza uygun komutlara dönüştürülmesine dayanıyor. Bu sistem temel olarak dört ana bileşenden oluşuyor:



- 1. Sinyal Toplama:** Bu işlem belirli bir sensör teknolojisi kullanılarak (kafa derisine veya beyne yerleştirilen elektrotlar gibi) beyin sinyallerinin ölçülmesini kapsıyor. Bu sinyaller elektronik işleme için uygun seviyelere yükseltiliyor ve istenmeyen sinyaller filtreleme yoluyla temizleniyor. Daha sonra sayısallaştırılan sinyaller bilgisayara iletiliyor.
- 2. Özellik Belirleme:** Bu adımda amaçla ilgili sinyaller yabancı içerikten ayrılıyor ve çıkış komutlarına çevrilmeye uygun bir hâle getirilmek üzere analiz ediliyor. Bu adımda kullanıcının amacı ile sinyaller arasında güçlü bir ilişki ve uyum sağlanması gerekiyor.
- 3. Özellik Dönüştürme:** Elde edilen ilgili sinyaller çıkış cihazı için uygun komutlara dönüştürüldükleri algoritmaya aktarılıyor. Kullanılacak algoritmanın anlık değişikliklere uyum sağlaması ve cihazın tam kontrolünü kapsamaması için dinamik bir yapıda olması gerekiyor.
- 4. Cihaz Çıkışı:** Düzenlenen komutlar harici aygıtı çalıştırıyor ve imleç kontrolü, robotik kol hareketi, dijital konuşma gibi işlevler gerçekleşiyor. Kullanıcıya cihazın çalışması ile geri bildirim sağlanıyor ve döngü kapanıyor.

Bu bileşenler, işlemin başlangıcını ve zamanlamasını, sinyal işleminin ayrıntılarını, cihaz komutlarının doğasını ve performans gözetimini tanımlayan bir işletim protokolü tarafından kontrol ediliyor. Etkili bir çalışma protokolü, bir BBA sisteminin esnek olmasını ve her kullanıcının özel ihtiyaçlarını karşılamasını sağlıyor.



Beyin bilgisayar arayüzü bileşenleri

Beyin Dalgaları Nasıl Ölçülüyor?

Beyin dalgalarını ölçmek için pek çok farklı yöntem bulunuyor. Beynin hangi bölgesinden sinyal toplamak amaçlanıyorsa buna uygun yöntemleri kullanmak gerekiyor.

İnvazif (girişimsel) teknikler cerrahi operasyon yapılmasını gerektiriyor. Beynin içine yerleştirilen elektrotlar veya çoklu-elektrot örgüleri sayesinde sinyaller toplanıyor. Bu yöntemle tek bir nörondan veri almak bile mümkün. Beyin dokusu ile direkt temas sağlanması hızlı ve güvenilir veri elde edilmesini sağlıyor. Diğer yandan küçük de olsa cerrahi bir müdahalenin gerekliliği ağrı ve enfeksiyon oluşma riskine yol açıyor.

İnvazif olmayan tekniklerde ise beyin dalgaları kafa derisi üzerine yerleştirilen elektrotlar ile ölçülüyor. Herhangi bir cerrahi müdahaleye ihtiyaç duyulmaması bu tekniklerin avantajlı yönü olarak öne çıkıyor.

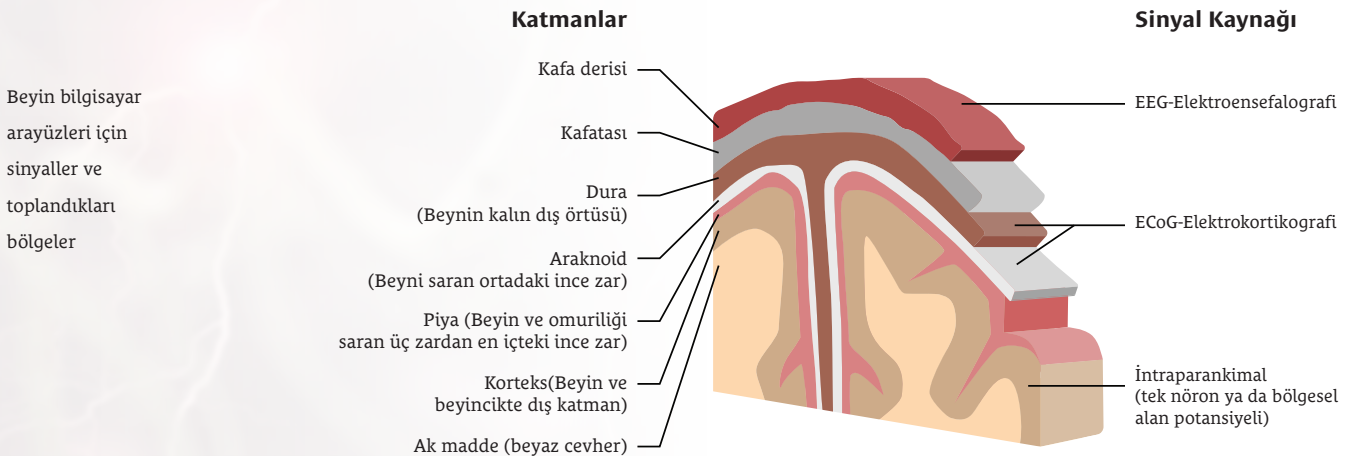
Hangi Sinyal Toplama Yöntemleri Kullanılıyor?

Sinyallerin toplanması için amaca göre farklı yöntemler kullanılıyor. Bu yöntemler cerrahi müdahalenin gerekli olup olmamasına göre sınıflandırılabilir.

Cerrahi müdahale gerektirmeyen (invazif olmayan) yöntemlerin başlıcaları arasında elektroensefalografi (EEG), magnetoensefalografi (MEG), fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI) ve fonksiyonel yakın-kızılötesi spektroskopisi (fNIRS) yer alıyor.

Elektroensefalografi (EEG) en yaygın kullanılan nörofizyolojik kayıt tekniklerinden birisi. Kafa derisine yerleştirilen yüzey elektrotları ile beyindeki elektriksel faaliyetlerin ölçülmesi prensibiyle çalışıyor. Elektrotlar ve serebral korteks arasındaki kemik ve cilt mesafesi nedeniyle, EEG tek nöron uyarımlarını doğru bir şekilde tespit edemiyor. Daha çok serebral korteks içindeki aktif nöron grupları üzerindeki bölgesel akım akışlarını ölçebiliyor. Cerrahi müdahale gerektirmemesi, ucuz ve taşınabilir olması EEG cihazının araştırmalarda yaygın kullanımının en önemli nedenlerinden.

Magnetoensefalografi (MEG) nöron aktivitesine bağlı oluşan manyetik alanı ölçmek için kullanılan bir kayıt yöntemi. Aktif nöronlar elektrik akımı ürettiğinde manyetik alan oluşturuyor. Tek bir nöronun aktifleşmesiyle oluşan manyetik alan ise ölçülemeyecek kadar küçük. Dolayısıyla ancak çok sayıda nöron birlikte aktifleşince ölçüm mümkün hâle geliyor. Yöntemin fazla tercih edilmemesinin altında yatan temel nedenler cihazın taşınmaz olması ve yüksek maliyetler. Ayrıca çevresel manyetik alanların sonuçları etkilememesi için yüksek hassasiyette cihazlar ve iyi bir yalıtım gerekiyor.



Leuthardt, E.C. ve ark., "Evolution of brain-computer interfaces: going beyond classic motor physiology", *Neurosurg Focus*, 27(1):E4, 2009.

Fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI) beyin aktivitesini haritalandırmak üzere manyetik rezonans görüntüleme tekniklerini kullanan dolaylı bir prosedür içeriyor. Yöntem nöral aktiviteye bağlı olarak kandaki oksijen miktarında ve kan akışında gerçekleşen değişiklikleri ölçüyor. Yöntem beynin bir zihinsel sürece dâhil olduğu zaman daha fazla oksijen tüketmesi ve buna bağlı olarak bu bölgelere kan akışının artması gibi basit bir prensibe bağlı olarak çalışıyor.

Fonksiyonel yakın-kızılötesi spektroskopisi (fNIRS), fMRI'ya benzer şekilde serebral kortekste bulunan kandaki oksijen miktarı değişimlerini ölçüyor. Bunu gerçekleştirirken oksijenli ve oksijensiz kanın ışık emilimindeki farktan yararlanılıyor. Sonuçta dolaylı olarak nöral aktivite tayin ediliyor.

İnvazif yani cerrahi müdahale gerektiren yöntemlerde beyin sinyallerini yakalamak için özel cihazlar kullanmak gerekiyor. Kritik sayılabilecek cerrahi müdahaleler yoluyla beyne yerleştirilen cihazlar sinyal alımını invazif olmayan yöntemlere göre daha yüksek kalitede gerçekleştiriyor. Başlıca invazif yöntemler arasında elektrokortikografi (ECoG) ve intrakortikal nöron kaydı (INR) sayılabilir.

Elektrokortikografi (ECoG), beyin sinyallerinin kaydedilmesi için elektrotların beyne yerleştirilmesini içeren bir teknik. Prosedür olarak beyin yüzeyine elektrotlar yerleştirmek için kafatasına bir kesi yapılmasını gerektiriyor. Daha sonra ızgara ya da şerit hâlindeki bir dizi elektrot veri alınacak bölgeye yerleştiriliyor ve elektriksel uyarılar bu sayede kaydediliyor.

Intrakortikal nöron kaydı (INR) beynin gri madesindeki nöronsal aktivitenin kaydedilmesini sağlayan bir teknik. EEG ve ECoG'a benzer şekilde beyin elektriksel uyarılarını ölçen bu teknik, tek bir nöron aktivasyonunu analiz edebildiği gibi çoklu nöron aktivasyonlarını da yüksek hassasiyetle tespit edip ölçebiliyor.

Beyin Bilgisayar Arayüzleri için Kilometre Taşları

1920'lerde insan beyninin elektriksel akımlar ürettiğini gösteren ilk kişi Alman bilim insanı Hans Berger oldu. Bu akımlar beyin aktivitesini gösteriyor ve kafa derisi üzerine yerleştirilen elektrotlar sayesinde ölçülebiliyordu. Böylece EEG yöntemi doğmuş oldu. İcadından itibaren EEG, sinirbilimde bilişsel işlevlerin sinirsel etkileşimlerini anlamak ve bu konularda çalışmak için oldukça önemli bir araç olarak kabul gördü. Gelişmelerle birlikte EEG'nin beyin aktivitesi için bir iletişim kanalı veya bilgi taşıyıcısı olarak kullanılabilirliği fikri de ortaya çıktı.

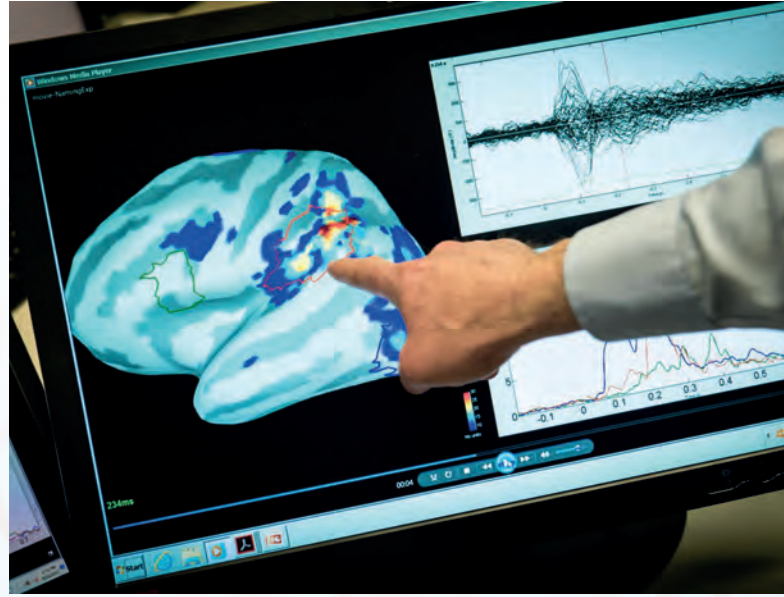


Hans Berger

Nörofizyolojik olarak beyin sinyallerini kontrol etmeye yönelik ilk girişim Wyrwicka ve Serman tarafından 1968 yılında gerçekleştirildi. Aynı zamanlarda Joseph Kamiya, bir eğitim sürecinden sonra insanın EEG aktivitesinin (özellikle de alfa dalgalarının) kontrol edilebileceğini gösterdi. Gerçek zamanlı verilerle kişinin beyin aktivitesinin düzenlenebileceğini gösteren bu bilgiler ışığında "nöroterapi" alanı doğmuş oldu. 1969 yılında Fetz, maymunlarda tek kortikal nöron aktivasyonunun edimsel şartlanma ile sağlanabileceğini gösterdi. Tüm bu gelişmeler günümüzdeki BBA'ların temelini oluşturdu.

Daha sonra 1973 yılında California Üniversitesinden Belçikalı araştırmacı Jacques J. Vidal yayınladığı makale ile "beyin bilgisayar arayüzü" (BBA) terimini ilk defa ortaya attı. Vidal BBA'ları insan-bilgisayar iletişimde beyin sinyallerini kullanan, böylece bilgisayar ve protez cihazlar gibi dış süreçler üzerinde kontrolü sağlayan araçlar olarak tanımladı ve EEG sinyallerini bilgisayar kontrol sinyallerine dönüştüren bir sistemi ortaya koydu. 1980'lerin sonu ve 1990'ların başında ABD ve Avrupa'dan araştırmacılar bugün kullanılan birçok önemli yaklaşımı tanımlayan gerçek zamanlı BBA uygulamalarına öncülük ettiler.

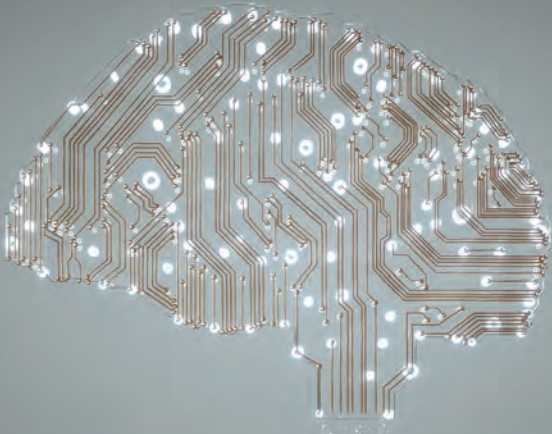
- ◆ 1929 • İlk insan EEG'si (Hans Berger)
- ◆ 1968 • Alfa Dalgaları
 - Nöro geri besleme başlangıcı (Joseph Kamiya)
- ◆ 1973 • İlk BBA (Jacques Vidal)
 - "Beyin Bilgisayar Arayüzü" terimi ortaya çıktı (Jacques Vidal)
 - Senkronize EEG kullanımı (Nina Sobell)
- ◆ 1988 • P300-speller (Farwell ve Donchin)
 - Fiziksel bir nesne kontrolü için EEG beyin sinyalleri ilk kez kullanıldı.
- ◆ 1989 • Brainwave çizim oyunu (Sobell ve Trivich)
- ◆ 1991 • Sensorimotor ritim tabanlı BBA (Wolpaw ve ark.)
 - Utah Dizisi adı verilen ve beyin hücrelerini uyarmak veya çıktılarını elektronik devrelere kaydetmek için beyne implante edilebilir 100 elektrotlu cihaz icat edildi (Richard A. Normann).
- ◆ 1993 • Motor-Görüntü tabanlı BBA (Pfurtscheller ve ark.)
- ◆ 1995 • Kararlı durum görsel uyarılmış potansiyeller tabanlı BBA
 - Uçuş simülatörü uygulaması (McMillan ve ark.)
- ◆ 1997 • FDA tarafından Parkinson hastalığının tedavisi için derin beyin uyarımı onaylandı.
- ◆ 1999 • Yavaş kortikal potansiyel tabanlı BBA
 - Düşünce çeviri cihazı (Birbaumer ve ark.)
 - İlk uluslararası BBA toplantısı
- ◆ 2000 • Ortak mekânsal desenler algoritması önerildi (Ramoser ve ark.).
- ◆ 2001 • Maymunlar üzerinde invazif BBA'lar (Nicolelis)
- ◆ 2005 • Boyundan aşağısı felçli olan Matthew Nagle yapay bir eli kontrol eden ilk kişi oldu. Teknolojiyi ayrıca oyun oynamak, TV çalıştırmak ve e-postalara erişmek için de kullanabildi.
- ◆ 2007 • Fonksiyonel yakın kızılötesi spektroskopisi (fNIRS) (Sitaram ve ark.)
- ◆ 2008 • Elektrokortikografi (Schalk ve ark.)
- ◆ 2014 • "Beyin-Bilgisayar Arayüzleri" dergisi ilk sayısı
- ◆ 2015 • Uluslararası BBA topluluğu
- ◆ 2016 • Felç hastası Nathan Copeland beyin duyuusal bölgesini uyaran BBA sayesinde zihin kontrollü bir robotik kolla dokunma hissinin yaşadığı.
- ◆ 2019 • Neuralink beyne esnek, iplik benzeri binlerce elektrot yerleştirmek için özel olarak üretilmiş bir cerrahi robot kullanmayı içeren gelişmiş BBA teknolojisi planlarını açıkladı.



1988 yılında Farwell ve Donchin, "P300 speller" (harf kodlayıcı) olarak bilinen BBA ile ilgili bir makale yayımladılar. Bu yayında belirli bir olaya veya uyarana bağlı olarak ölçülen EEG'deki sapmaları temel alarak harfleri teker teker kodlama işlevini gerçekleştiren bir arayüz önerdiler. P300 adı verilen olay tabanlı sistemde, bilgisayar ekranında rakamlar ve harflerden oluşan 6x6'lık bir tablo görünür. Bu tablonun satır ve sütunları rastgele bir şekilde yanıp sönüyor ve hedef harf yandığında EEG sinyalleri bunu algılayabiliyor. Birkaç tekrardan sonra kullanıcının seçtiği harfin hangi satır ve sütunda olduğu tespit ediliyor. Bu çalışma BBA'ların felçli kullanıcıların çevreleriyle iletişim kurmasını sağlamak için oldukça önemli bir potansiyel taşıdığını da göstermiş oldu.

1991'de Jonathan Wolpaw ve arkadaşları ekranda imleç kontrolü için bir BBA geliştirdi. Kullanıcılar bir eğitimden sonra düşünce yoluyla ekrandaki topu yukarı-aşağı hareket ettirebildiler. 1993'te Gert Pfurtscheller ve ekibi kullanıcıların sağ ve sol el hareketlerini düşünmesi ile elde edilen verileri bilgisayar komutlarına dönüştüren bir BBA geliştirdi. Tüm bu gelişmeler ve daha fazlası düşünceleri komutlara çeviren aygıtlar anlamına geliyordu. Böylece kullanıcıların beyin aktivitesi ile iletişim kurabilmesi ve harici makineleri yönlendirmesi hedefleniyordu.

2006 yılında primer motor korteksine bir dizi mikroelektrot yerleştirilen felçli bir gencin BBA ile e-posta hesabına girmesi, televizyon çalıştırması, protez bir eli açıp kapaması ve robotik kolla basit eylemleri gerçekleştirmesi sağlandı. 2011 yılında Krusienki ve Shih'in geliştirdikleri bir BBA ile kişinin ECoG sinyallerinin ekranda beliren kelimeleri harf harf kodlamak üzere doğru bir şekilde işlenebileceği gösterildi.



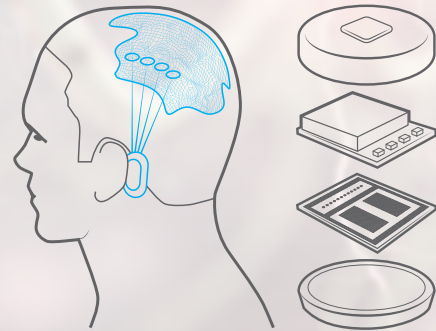
BBA'larda kullanılmak üzere geliştirilen elektrotlar beyni uyarmak için de kullanılabilir. Derin beyin uyarıcıların Parkinson hastalığının tedavisinde kullanımı FDA (ABD Gıda ve İlaç Başkanlığı) tarafından 1997 yılında onaylandı. Günümüzdeyse derin beyin uyarımı yöntemi kas gevşekliği, sara, esansiyel tremor (kontrol dışı titreme) ve obsesif kompulsif bozukluk gibi rahatsızlıkların tedavisinde de kullanılıyor. Bir diğer uygulamada ise kişinin epileptik nöbet geçirmesine neden olan anormal nöral aktiviteler önceden tespit edilerek nöbetin engellenmesi sağlanabiliyor. Ayrıca robotik uzuvlar kullanan kişiler bu arayüzlerle dokunma hissini yaşayabiliyor. Geliştirilen sistemler kronik depresyon ve travma sonrası stres bozukluğu gibi psikiyatrik bozuklukların tedavisinde de potansiyel uygulamalar bulabiliyor.

Mevcut Durum ve Yakın Gelecek

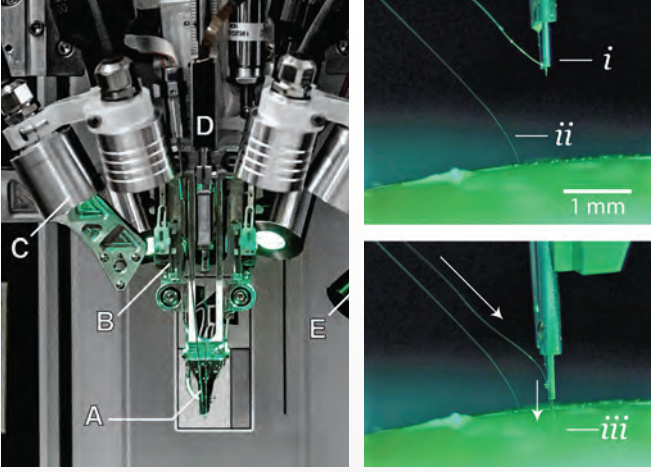
BBA sistemlerinin insanlar üzerinde kullanılması hayali, beyin sinyallerinin kaynaklarının daha iyi anlaşılması, bu sinyalleri kaydetmek için yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve veri toplama/işleme tekniklerindeki ilerlemeler ile birlikte gerçeğe dönüştü. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmaları ile beyinden gelen sinyallerin daha hızlı ve kolay bir şekilde işlenmesinin de önü açıldı. Tüm bu gelişmeler BBA alanındaki araştırma sayısının ve yapılan yatırımların artmasına yol açtı.

Silikon Vadisi'nde de çok sayıda şirket BBA'larla ilgili araştırma geliştirme faaliyetlerinde bulunuyor. DARPA (ABD Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı) BBA araştırmalarını hızlandırmak için önümüzdeki dört yıl boyunca on farklı kategoride BBA araştırmalarını destekleyeceğini açıkladı. Desteklenecek alanlar arasında insan vücudunun iyileşmesini destekleyecek cihazlar, sinyal çözünürlüğü ve veri transferi teknolojileri, duyu algılanması için kablosuz arayüzler, hafıza güçlendiriciler, nöropsikolojik hastalık tanı ve tedavisi ve yeni protez sistemleri sayılabilir.

Elon Musk'ın 2016'da BBA araştırmaları için kurduğu Neuralink şirketi geçen yıl temmuz ayında yaptığı halka açık sunumla dikkatleri üstüne çekti. Yeni bir elektrot dizisinin ve bu elektrotları beyne yerleştirmek için geliştirilen sistemin tanıtıldığı sunum aynı ayda Elon Musk ve Neuralink tarafından yayımlanan makaleyi de özetliyor ve yapılacak yeni araştırmalar



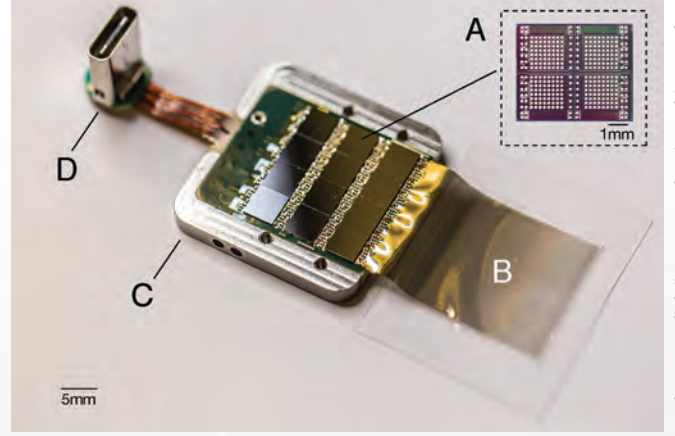
<https://www.sciencefocus.com/future-technology/should-you-upgrade-your-brain/>



Robotik elektrot yerleştirici. Elektrotlar çeşitli sensörler yardımıyla hassas iğneler kullanılarak beyne yerleştiriliyor.

hakkında ipuçları veriyordu. Şirketin geliştirdiği BBA prototipi, intrakortikal kayıt ve uyarım görevleri için esnek ince film elektrot dizisi ve bu elektrotları beyne yerleştirmek için geliştirilen cerrahi bir robottan oluşuyor. Elektrot dizileri polimer iplikler şeklinde olup her bir iplik 32 elektrot içeriyor. Bir elektrot dizisi 96 polimer iplikten oluşuyor, bu da bir iplikle toplamda 3072 elektrot yerleştirilmesi anlamına geliyor. Sistem canlı hayvanlar üzerinde denendi ve olumlu sonuçlar alındı. 2020 yılı içerisinde insan katılımcılar üzerinde ilk klinik çalışmaların yapılması hedefleniyor. Cihazı yerleştirmenin lazer göz ameliyatı kadar kolay olacağı bildirilirken ilk katılımcıların omurilik yaralanması geçirmiş kişilerden oluşacağı bildirildi. Bu hastalara 4000'e yakın nöronla bağlantı kuracak dört çipin yerleştirilmesi planlanıyor.

Neuralink'in yeni "N1" sensörü 4 mm kenar uzunluğunda bir kare şeklinde. Bu sensör 8 mm çapa ve 4 mm yüksekliğe sahip hava geçirmez bir kılıfa sığabiliyor. Her bir sensör iplikler şeklinde dizili olan 1024 elektrota bağlanıyor ve bu elektrotlar beyindeki sinir hücrelerinden veri topluyor. Her bir iplik elektrot dizisi bir insan saç telinin onda biri kalınlığa sahip esnek bir yapıya sahip. Bu elektrotlar kafatasına 8 mm'lik bir kesik açılarak beyin dış yüzeyinden içeriye çok hassas robotik cerrahi işlemlerle yerleştiriliyor. Daha sonra elektrotlara bağlı sensörler de aynı kesikten yerleştiriliyor ve üzeri kapatılıyor. Hastaya 10 adet sensörün eş zamanlı olarak bağlı olabileceği be-



Sensör cihazı. A- İşlemci, 256 kanal veriyi işleme kapasitesine sahip uygulamaya özgü tümeleşik devre (cihaz bu çiplerden 12 tane içeriyor, toplamda 3072 kanaldan gelen veri işlenebiliyor) B-Substrat üzerindeki iplik elektrotlar, C-Titanyum kılıf D-Güç ve veri bağlantısı

Musk, E., Neuralink, "An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels", *bioRxiv* 705801, 2019.

lirtiliyor. Bu da yaklaşık 10.000 elektrotun veri toplaması anlamına geliyor. Kulak arkasında derinin hemen altına yerleştirilen bir indüksiyon bobinine bağlanan sensörler kulağa takılan giyilebilir bir cihazla bluetooth yoluyla bağlantı kuruyor.

Neuralink bu teknoloji sayesinde nörolojik bozukluklardan kaynaklı hastalıklara çözüm bulmayı amaçlıyor. BBA'lar kullanılarak gerçekleştirilmesi planlanan hedeflerin bahsedilen çalışmalarla sınırlı kalmayacağı öngörülüyor. İnsanın yapay zekâ ile ortak bir yaşama sahip olması, beyin ve hafıza güçlendirme ve beyin kapasitesini artırma gibi konuların da üzerinde düşünülüyor. Tüm bunlar gerçekleştirilemez gibi görünse de araştırmalar ve teknolojik gelişmelerin ne sonuçlar getireceğini şimdiden kestirmek mümkün değil.

Örneğin, Robert Hampson önderliğinde gerçekleştirilen çalışmada, hipokampüsteki (beynin hafızadan sorumlu bölümü) beyin hücreleri uyarılarak kısa süreli hafıza geliştirilebildi. Hâlihazırda beyinlerine elektrot yerleştirilmiş sara hastaları üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmada nöronların uyarılması sonucunda hatırlama esnasında %35 daha fazla beyin aktivitesi kaydedildi. Elde edilen sonuçlar demans (bellek ve benzeri zihinsel yeteneklerin bozukluğu rahatsızlıkları) hastalarının tedavisi için önemli olmasının yanında sağlıklı bireylerde hafızanın güçlendirilmesinin mümkün olabileceği anlamına da geliyor.

Geliştirilmesi Gereken Yönler ve Bazı Riskler Yok mu?

BBA teknolojisi beyin dilini, güçlü işlemciler, yapay zekâ ve makine öğrenmesi kullanarak uygun algoritmalarla vücut dışındaki cihazların anlayacağı bir dile çeviriyor. Fiziksel ve zihinsel pek çok rahatsızlığı önlemek, iletişim kurmak ve duyu organlarını kullanmaya yardımcı olmak gibi pek çok alanda insan hayatını kolaylaştırmak için kullanılan ve daha fazla alanda kullanılması planlanan bu teknolojinin bazı riskleri ve gelecekte olabileceklere bağlı kaygı uyandırıcı yönleri de var.

İlk olarak şimdi kullanılan teknolojinin temel risklerinden ve geliştirilmesi gereken yönlerinden bahsetmek gerekiyor. Beyne yerleştirilecek cihaz ve elektrotlar yıllar boyunca performanslarında düşme gözlenmeyecek şekilde dayanıklı olmalı. Beynin sıcak ve sulu bir ortam olması sonucunda malzemeler zamanla korozyona uğrayabilir ve elektrotların çalışma performansı düşebilir. Hâliyle performansı zamanla düşmeyen ve kısa sürede bozulmayacak bir sistem tasarlanması kaçınılmaz hâle geliyor.

Düşünülmesi gereken bir diğer konu ise biyoyumluluk. Beynin koruyucu hücreleri olan glialar parçalayamadıkları yabancı maddelerin etrafını sarar, glialar elektrotların etrafını sararsa sinyalleri kaydetmesi beklenen elektrotlar işlevlerini yerine getiremez hâle gelir. Biyoaktif moleküllerle kaplanmış polimer elektrotlar bu konuda bir çözüm olarak düşünülebilir. Sonuç olarak BBA sistemleri için biyoyumlu, zararsız ve kararlı malzemeler geliştirilmesi gerekiyor. Beyne yerleştirilecek elektrotların oldukça ince ve esnek yapıda olması beyin dokusuna zarar verilmesini en az düzeye indiriyor. Ancak mevcut sağlık sorunları olan kişiler üzerindeki uygulamalarda bağışıklık sistemini tehlikeye sokabilecek ve enfeksiyon riskine açık cerrahi prosedürler gerekiyor.

Riskler söz konusu olduğunda sadece sağlıkla alakalı olanlardan bahsetmek yeterli değil. Sonuç olarak bu arayüzler aracılığıyla elde edilen veriler kaydedilecek. Gelecekte bu kayıtlardan elde edilen bilgiler kişinin

düşünce ve duygularının başkaları tarafından öğrenilmesi ve izlenmesi anlamına gelebilir. Ayrıca beyin gücüyle kablosuz olarak kontrol edilebilecek cihazlarla ilgili sınırlamalar, otokontrol ve kişisel yükümlülükler gibi hukuksal konuların da yakın zamanda tartışılması gerekiyor. Şimdilik uzak gibi görünen olası gelişmeler, teknolojideki hızlı ilerleyişle beklenenden daha kısa sürede karşımıza çıkabilir. ■

Kaynaklar

- Papadelis, C., Braun, C., ve ark., "Using Brain Waves to Control Computers and Machines", *Advances in Human-Computer Interaction*, Cilt 2013, Article ID 802063, 2013.
- <https://towardsdatascience.com/a-beginners-guide-to-brain-computer-interface-and-convolutional-neural-networks-9f35bd4af948>
- Drew, L., "Agency and the algorithm", *Nature*, 571, S19-S21, 2019.
- Chaudhary, U., Birbaumer, N., Ramos-Murguialday, A., "Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation", *Nature Reviews, Neurology*, Cilt 12, s.513-525, 2016.
- Shih, J.J., Krusienski, D.J., ve ark., "Brain Computer Interfaces in Medicine", *Mayo Clinic Proc.*, 87(3), s.268-279, 2012.
- Smalley, E., "The Business of brain-computer interfaces", *Nature Biotechnology*, Cilt 37, s.978-982, 2019.
- Musk, E., Neuralink, "An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels", *bioRxiv* 703801; DOI: <https://doi.org/10.1101/703801>, 2019.
- Fouad, M.M. ve ark., Brain-Computer Interface: A Review, *Brain-Computer Interfaces- Current Trends and Applications*, Haz. Hassanien, A.E., Azar, A.T., s.3-30, Intelligent Systems Reference Library 74, Springer, 2015.
- Ramadan, R.A. ve ark., Basics of Brain Computer Interface, *Brain-Computer Interfaces- Current Trends and Applications*, Haz. Hassanien, A.E., Azar, A.T., s.31-49, Intelligent Systems Reference Library 74, Springer, 2015.
- Lotte, F. ve ark, Introduction: Evolution of Brain-Computer Interfaces, *Brain Computer Interfaces Handbook-Technological&Theoretical Advances*, s.1-52, CRC Press, 2018.
- Rao, R.P.N., *Brain-Computer Interfacing-An Introduction*, Cambridge University Press, 2013.
- Abdulkader, S.N. ve ark., "Brain computer interfacing: Applications and challenges", *Egyptian Informatics Journal*, 16, s.213-230, 2015.
- <https://www.sciencefocus.com/future-technology/should-you-upgrade-your-brain/>
- <https://www.sciencefocus.com/future-technology/everything-you-need-to-know-about-neuralink/>