

BEYİN MAKİNE ARAYÜZLERİ ve YAPAY ZEKA

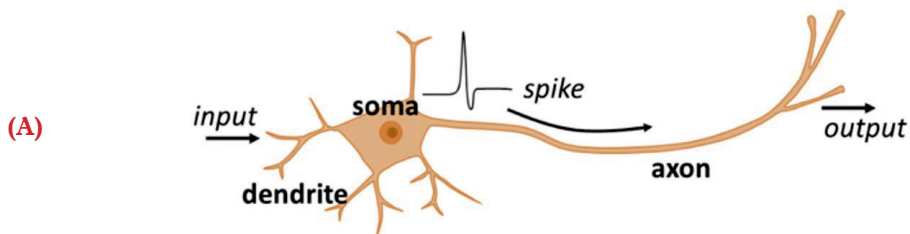
Doç. Dr. Selim Eskiizmirliler
Elektrik Mühendisi
Paris Cité Üniversitesi, INCC
selim.eskiizmirliler@u-paris.fr

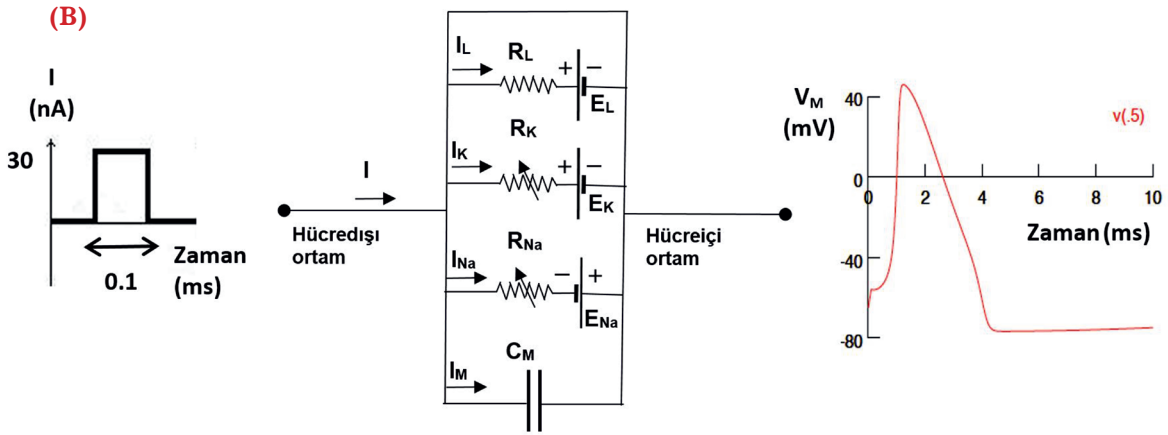
Özellikle son yıllarda, beynin ve onun temel yapı taşı (bileşeni) olan nöronun çalışma prensiplerine ve/veya bu prensiplerin/fonksiyonların simülasyonlarına dayalı uygulamalara dair yazılar kitle iletişim araçlarında ve sosyal medyada giderek daha fazla yer kaplamaya başladı. Öyle ki daha yirmi, otuz yıl öncesinde üstüne çalışanların marjinaler/fantezistler olarak değerlendirildiği “yapay zeka” (YZ) bugün artık birçok bilgisayar uygulamasının benzerlerinden daha iyi olduğunu vurgulamak için kullanılan bir özellik/ürün etiketi haline geldi. Yakın bir gelecekte, günümüzün artık sıradan ve genel kabul gören bir kalite-kontrol işareti haline gelmiş olan “BIO” etiketine benzer bir etiketin YZ uygulamaları için de önerilmesine tanıklık edersek şaşırmamak gerekir. Böyle bir önerme yapay zekânın ne olup ne olmadığına dair bir tartışmayı hatta belki de bir kamplaşmayı da bilim dünyasının gündemine taşıyacaktır. Tarihe meraklı olanlar böylesine bir kamplaşmada zekânın/öğrenmenin vücuttaki yeri konusunda milattan önce Aristoteles’in (M.Ö. 384-322) kalp merkezci (cardiocentrisme) müritleri ile Kadıköylü (Chalcédoine) Herophilus’un (M.Ö. 335-280) beyin merkezci (cephalocentrisme) müritleri arasında yapılmış olan tartışmaya muzipçe vurgu yapacaklar ve yeni kamplaşmanın tartışmasız Herophilus’un takipçileri arasında olacağını öne süreceklerdir.

İlk Beyin-Makine Arayüzü (BMA) uygulamalarının 1990’lı yıllarda bilim dünyasının gündemine girdiğini göz önüne alarak bu yazıda eski tarihi

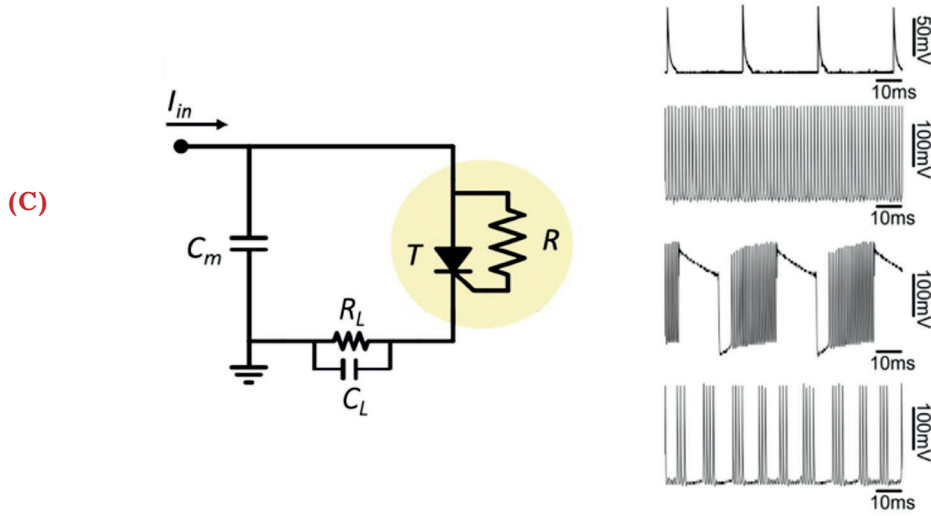
bir yana bırakıp yakın tarihimizin BMA ile ilgili önemli dönüm noktalarına (köşe taşlarına) geçebiliriz. Ancak olası bir şampiyonada sadece beyin merkezci takımlar üstüne bahis oynayacak olanlara Shakespeare’in (1564-1616) Venedik Taciri isimli eserinde ünlü “Söyle bana aşk nerededir, kalpte mi yoksa beyinde mi?” sorusunun kaleme alınmasından onca zaman geçmiş olmasına rağmen bugün hala İngilizce ve Fransızca dillerinde “ezberlemenin” karşılığının “kalpten öğrenmek” (learning by heart veya apprendre par cœur) olduğunu ve aşkı, sevgiyi tüm dillerde hala iki elimizin işaret ve baş parmakları ile kalbin şeklini çizerek tarif etmeye çalıştığımızı hatırlatmazsak bu geçiş layıkıyla yapılmış olmaz.

1906 Nobel Fizyoloji / Tıp Ödülü’nün Camillo Golgi ve Santiago Ramon y Cajal’a nöron teorisi 1963 Fizyoloji / Tıp Ödülü’nün ise A.L. Hodgking ve A.F. Huxley’e nöronun eşdeğer elektrik devresini (Şekil 1.B) tanımlama çalışmaları için verilmesi, şüphesiz beynin ve sinir sisteminin nasıl çalıştığına dair anlayışımızda devrim yaratan iki önemli tarihtir. Bugün beynin, büyük filozof Aristoteles’in o dönemde öne sürdüğü gibi toprak ve su karışımından değil, birbirine bağlı (kimyasal veya elektriksel sinapslar yoluyla 10^{13} ’ten fazla bağlantı oluşturan) milyarlarca nörondan ($>10^{10}$) oluştuğunu ve Demokritos’un (MÖ 469-399) dediği gibi “bedenin kalesi ve zeka ile düşüncenin koruyucusu” olduğunu biliyoruz.





$$I = C_M \frac{dV_M}{dt} + \bar{g}_K n^4 (V_M - E_K) + \bar{g}_{Na} m^3 h (V_M - E_{Na}) + \bar{g}_L (V_M - E_L)$$



Şekil 1:

(A) Biyolojik nöron.

(B) Hodgkin & Huxley tarafından 1952 yılında önerilen ve $MP > eşik$ ise girişteki kare dalga sinyale yanıt olarak çıkışta bir AP (spike) elde edilmesini sağlayan bir nöronun eşdeğer elektrik devresi. CM: Membran kapasitansı; RNa, RK, RL sırasıyla sodyum, potasyum ve sızıntı kanallarının dirençlerini; ENa, EK, EL ilgili iyon kanallarının denge potansiyellerini temsil etmektedir.

(C) Marcelo Rozenberg ve ekibinin üzerine çalıştığı (2023) eşdeğer devre ve bu devre (MBN modeli -Memristor Bursting Neuron) ile elde edilen spike train örnekleri.

Nöron Gerçekten Elektriksel Bir Devre Elemanı (Komponent) Olarak Tanımlanabilir mi?

Merkezi sinir sisteminin temel sinyal (bilgi) işleme elemanı olarak kabul edilebilecek olan nöron, ana girişini oluşturan dendritler aracılığıyla birden fazla (hatta binlerce) sinyal kabul edebilir (Şekil 1.A). Bu girdilerin ağırlıklı toplamı nöron gövdesinde (soma) gerçek zamanlı olarak entegre edilir ve basit bir osiloskopa canlı organizmada (in vivo) veya laboratuvar koşullarında (in vitro) ölçülebilen mV seviyelerinde bir Membran Potansiyeline (MP) dönüştürülür. Bu potansiyel daha sonra mükemmel bir sinyal iletim kablosu olan nöronun biricik aksonuna yani çıkışına (output) gönderilir.

MP'nin değeri, büyüklüğü her nörona spesifik bir değer olan eşik değerini aşmıyorsa nöronun dinlenme (veya pasif) durumunda olduğu söylenir. Çıkış sinyali bu durumda aksonun girişinde giriş sinyallerinin ağırlıklı toplamının entegrasyonu sonucu oluşan MP'nin şeklini ve büyüklüğünü (amplitude) mükemmel bir şekilde takip eder ve aksonun sonunda sıfırlanarak iptal olur. Sinyal işleme ve iletme jargonu ile konuşacak olursak pasif halinde gürültünün sıfır olduğu bir iletimden bahsedebiliriz.

Tersi durumda, $MP \geq$ eşik değer (aktif durum) olduğunda, MP bir aksiyon potansiyeli (AP) şeklini (spike) alır (Şekil 1.B), frekansı MP'nin büyüklüğü ile orantılı olan ancak ne büyüklüğü ne şekli değişmeden yani hiçbir enerji kaybına uğramadan aksonun sonuna ulaşan bir dizi impuls ya da impuls katarı (spike train) şeklinde yayılır. Bu fenomen, Şekil 1.B'de gösterildiği gibi, bir kare dalga sinyali yanıt olarak bir AP (spike) elde etmemizi sağlayan basit bir elektrik devresiyle simüle edilebilir. Kimyasal sinapslar söz konusu olduğunda, AP'nin aksonun ucuna ulaşması nörotransmitterlerin sinaptik aralığa salınmasıyla sonuçlanır ve bu da post-sinaptik nöronlarda nörotransmitterin tipine bağlı olarak bir AP'nin önlenmesine (inhibition) veya tetiklenmesine neden olur. Böylece bir nörondan diğerine iletilen MP'nin frekans kodlamasının aktarımı gerçekleşir. Yapay nöron modelinin (veya eşlenik elektronik devrenin) tarihsel örneğini Şekil 1.B'de vermişken okuyucu bu alandaki en son yapılan çalışmalardan bir örneği de Şekil 1.C'de görebilir, (M. Rozenberg, 2023) [1].

Biyolojik nöronun çalışma prensipleri ve simülasyonu -bir başka deyişle yapay nöron modeli üzerine- bildiklerimizi tazelemişken yapay zeka ve uygulamaları konusuna geçmeden orijinal ya da biyolojik zeka üstüne bildiklerimizi ya da doğru diye bilinen bazı temel yanlışları kısaca hatırlamakta yarar var. Okuyucu Sinir Bilimi (Neuroscience) alanının tıp fakültelerinde okunan temel kaynakçalarına göz atarsa “öğrenmek” veya “zeka” diye bir kavramdan neredeyse hiç bahsedilmediğini hemen görecektir. Çünkü her iki kavram da sinir bilminde farklı hafıza türleri olarak tanımlanır. Gündelik hayatta “öğrenmek” olarak adlandırdığımız fonksiyon prosedürel hafıza, “hafızaya kaydetmek” olarak adlandırdığımız fonksiyon ise deklaratif hafıza olarak adlandırılır. Sadece İnternet'te kısa bir wikipedia taraması bile başka birçok öğrenme ya da hafızaya kaydetme fonksiyonunun başka hafıza biçimleri olarak tanımlandığını (implicit, semantic, episodic, vb.) görmeye yeterli olacaktır. Bunun nedeni ise

beynin temel sinyal işleme elemanı olan nöronun kendisine atfedilen bir işi yapmayı “öğrenme”sinin -en kaba hali ile- iki ve sadece iki yolunun olmasıdır: 1) giriş sinyalinin (ya da giriş sinyallerinin entegre edilmiş ağırlıklı toplamının) büyüklüğünü kodlayacak bir frekans cevabı oluşturmak 2) bu cevabın kendisinden sonraki nöronlara doğru bir şekilde aktarılması için aksonu aracılığı ile synapse aralığına yollanması gereken nörotransmitter miktarını (konsantrasyonunu) belirlemek. İşte tam da bu nedenle yapay nöron modeli tabanlı öğrenme algoritmalarının üstünde çalıştıkları iki temel konu yukarıda bahsettiğimiz ağırlıkları ve çıkış sinyalinin frekans cevabını giriş sinyalini/bilgisini kodlayacak şekilde adapte etmektir.

Yapay zekânın daha bugünkü kadar moda olmadığı 1990'ların ünlü ama bugün de güncelliğini koruyan BackPropagation, Selforganizing Maps, Support Vector Machine gibi algoritmalar bunlara verilecek ilk örnekler olsa gerektir. Eğer son yıllarda (2023) yıldızı parlayan, heyecan uyandıran nöron tabanlı yapay zeka algoritmalarından bir örnek vermek istersek Reservoir Computing uygulamalarından bahsedebiliriz, (Cai, H. Et.al. 2023) [2]. Ancak okuyucu buraya kadar gelmişken “Bilinç” üzerine biyolojik bilgisini de tazelemek isterse hayal kırıklığına uğramaması için sinir bilimi temel kitaplarını değil doğrudan psikoloji biliminin kaynaklarını karıştırmasını tavsiye edebiliriz.

Bu bölümün bir özeti olarak vücut hareketlerimizi kontrol etmek için oluşturduğumuz motor komutların olduğu gibi çevreyi ve kendi vücudumuzu algılamamızı sağlayan duyuşal sinyallerin de beyindeki sinir ağları tarafından işlenen ve kodlanan ve beyin yaptığı işi temsil eden bir elektriksel sinyalden ibaret olduğunu söyleyebiliriz. Bu beyin aktivitesi beyin içine bir veya daha fazla mikro elektrot yerleştirilerek invazif olarak ölçülebildiği gibi, EEG (Elektro Encephelogram) elektrotları kullanılarak non-invazif olarak da ölçülebilir.

Beyin Makine Arayüzü (BMA) Teknolojileri:

Kısaltmasının üç harfinin kavramsal olarak da işaret ettiği gibi, BMA yukarıdan aşağıya doğru biraz farklı bir sırayla dizilmiş üç ana parçadan (Şekil 2.A) oluşur: Beyin → Arayüz → Makine. BMA sistemleri beyin elektriksel aktivitesini kaydeden, bu sinyali yapay zeka ve/veya makine öğrenme algoritmaları kullanarak bu aktivitenin kodunu çözen, ve çözülen kodu robot kolları, protezler, vb. gibi antropomorfik veya başka türden cihazların (açma/kapama düğmesi, tekerlekli sandalye, çim biçme makinesi gibi) kontrol sinyallerine çevirmek sureti

ile bu makinelerin doğrudan beyin korteksinde ölçülen (kortikal) sinyallerle kullanılabilmesini sağlayan birbirine bağlı donanım ve yazılımlardan oluşur. Bu nedenle BMA, beyin ile bir cihaz arasında doğrudan bir ilişki kurmanın bir yolu olarak görülebilir ve omurilik hasar gördüğünde veya amputasyon sonrasında kaybedilen motor fonksiyonların geri kazanılmasını mümkün kılabilir. BMA kendi başına bilimsel bir keşif değil, nöro bilim, hesaplamalı nöro bilim, yapay öğrenme ve bilgisayar teknikleri alanlarında ve ayrıca yapay uzuvların geliştirilmesinde ve robotik alanında yapılan diğer birçok öncü çalışmanın bir sonucudur (Eskiizmirli & Goffette, 2015)[3].

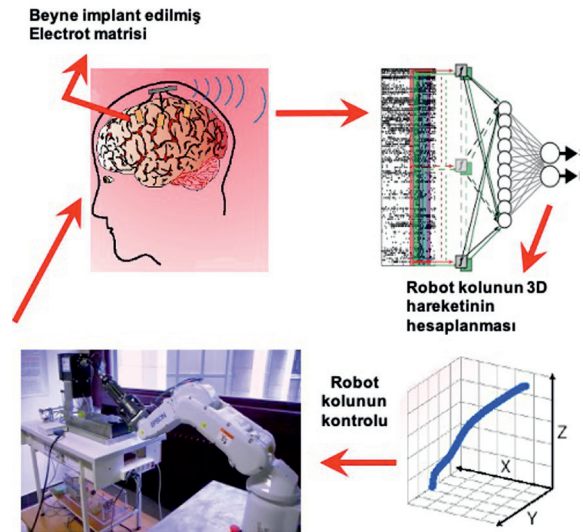
BMA Uygulamaları ve Yapay Zeka Tekniklerinin Rolü:

Bir dizi kortikal sinyalin bir kaldırıcı kontrol etmek için kullanılabileceğinin sıçanlarda deneysel olarak gösterildiği 1999 yılı (Chapin et. al. 1999), BMA'nın doğum yılı olarak kabul edilebilir. Bu çalışmayı çok kısa bir süre sonra prensibin maymunlarda (Velliste et.al. 2008) ve ardından tetraplejik (felçli) hastalarda (Hockberg et. al. 2012) kullanılması izlemiş ve bu denekler kendilerini beslemek veya bir nesneyi manipüle etmek için robotik bir kolu kontrol edebilmişlerdir (Tagliabue et.al. 2015) [4]. BMA'ların kabul görmüş bir sınıflandırması, bunları nöron sinyalinin nasıl kaydedildiğine göre ayırır: (1) Non-invazif (kortikal potansiyelleri kaydetmek için kafatasının yüzeyine yerleştirilen elektrotlarla - Elektroensefalografi, EEG) (2) Yarı-invazif (kortikal potansiyelleri kaydetmek için subdural olarak (beyin zarının altına) implante edilen bir elektrot örtüsü ile - Elektrokortikografi, ECoG) (3) invazif (bir veya daha fazla kortikal alanda özellikle motor ve parietal kortekste) AP katarlarını (Spike train) veya yerel alan potansiyellerini (LFP) kaydetmek için beyin korteksine yerleştirilen mikroeletrotlarla [5]. Okuyucu burada ayrıca, implant edilen her elektrotun hem kayıt yapmak hem de dokunduğu nöronu ve/veya nöron grubunu uyarmak için kullanılabileceğini de not etmelidir.

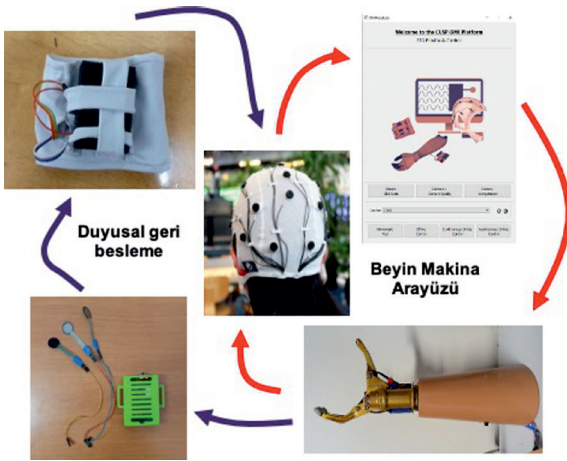
Son iki teknik, BMA uygulamaları için hareketi kodlamada kullanılan yapay zeka ve/veya makine öğrenme algoritmalarına hareket bileşenlerini daha iyi ve kesin şekilde kodlama (deşifre etme) imkânı verecek giriş sinyalleri sunmalarına rağmen kapsamlı bir ameliyat gerektirmektedir ve mevcut uygulamalar, özellikle korteks içine yerleştirilen elektrotların bir süre sonra destekleyici hücreler tarafından sarılmasından dolayı zaman içinde (1-2

yıl) sinyal kalitesinde önemli düşüşler gözlemlendiğini rapor etmektedir. Sonuç olarak invazif teknikte elde edilen beyin aktivitesine göre (zayıf sinyal-gürültü oranı ve düşük uzamsal çözünürlük nedeni ile) daha kaba ve kod çözümü daha zor bir sinyal olmasına rağmen beyin aktivitesinin invazif olmayan tekniklerle ölçüldüğü EEG tabanlı BMA'lar, bilişim, tıbbi teşhis ve neurofeedback tedavilerini de içeren davranışsal araştırmalardan video oyunu araştırma ve geliştirmeye kadar invazif sinyal tabanlı BMA'lara göre çok daha geniş bir alanda uygulanmaktadır.

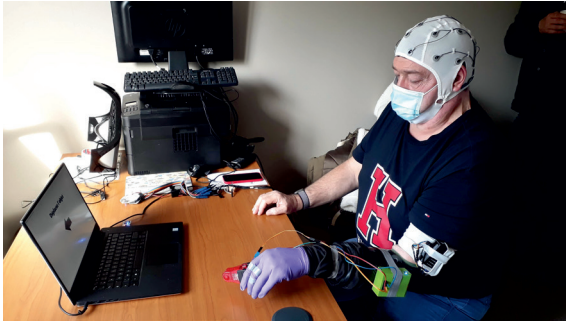
Ottobock France ve IRMA (Institut Robert Merle d'Aubigné) ile işbirliği içinde yürüttüğümüz devam eden bir CIFRE projesinde, protez kullanımında BMA tabanlı sensorimotor kontrol sağlamak amacıyla klasik miyoelektrik protezin (Myobock, Ottobock) değiştirilmiş bir versiyonu üzerindeki çalışma Şekil 2.B non-invasif BMA sistemleri için bir örnek olarak verilebilir. Yeni sistem, girdi olarak kullanıcının EEG sinyallerinin yanı sıra kullanıcının koluna takılan bir bileklik tarafından üretilen titreşimleri de duyuşsal geri besleme sinyali olarak kullanmaktadır. Bu duyuşsal sinyal titreşim frekansları protezin parmak uçlarına yerleştirilmiş kuvvet sensörleri tarafından ölçülen baskı kuvvetleri ile orantılı motorlar tarafından sağlanmaktadır. (Piozin et.al. 2022, 2024) [6,7]'de bildirilen ilk sonuçlar, protezlerdeki ana hareket türlerini kontrol etmek için kablosuz, invazif olmayan BMA kullanımını için bir kavram kanıtı sunmaktadır.



Şekil 2: (A) İnvazif bir BMA'nın genel sinyal işleme döngüsünün şematik gösterimi.



Şekil 2: (B) Miyoelektrik el protezlerinin sensorimotor kontrolü için CIFRE projesinin bir parçası olarak geliştirilen non-invazif BMA'nın sinyal işleme döngüleri.



Şekil 3: Ampute bir protez kullanıcısı BMA tabanlı sensorimotor kontrollü protezin ilk prototipini deneyler sırasında test ederken.

Gelecek Beklentileri, Zorluklar ve Etik Sorunlar:

Yazının giriş bölümünde yapay zekânın ne olup ne olmadığına ya da neyin yapay zekâ olup olmadığına dair bir tartışmanın önümüzdeki dönemin önemli konularından biri olabileceğine vurgu yapmıştık. Devamında aktardığımız bilgiler ışığında böyle bir tartışmada dikkate alınması gerektiğini düşündüğümüz birkaç noktayı belirtmek de faydalı olabilir. Bu tartışmaya her şeyden önce tarihin makinelerin, otomasyon tekniklerinin, bilgisayarların bir işi ve/veya bir fonksiyonu hiçbir öğrenme (zeka) özelliğine sahip olmadan (ya da eskiden böyle tanımlamadığımız) insan beyninin ve/veya vücudunun yapabileceğinden çok daha hızlı, çok daha yüksek performansla ve çok daha fazla veriyi karşılaştırarak yapabildiğinin örnekleri ile dolu olduğunun altını çizerek başlayabiliriz. Dikkate alınması gereken ikinci önemli nokta eğer simü-

le edilmesi arzu edilen fonksiyon/iş spesifik ve düzenli ve en az hata ile tekrar edilmesi değişik koşullara adapte olmasından daha önemli ise otomasyon tekniklerinin “zeki” algoritmalarından daha iyi/güvenilir sonuçlar verebileceği olmalıdır. Öğrenme fonksiyonu -her ne kadar sinirbilimi tarafından böyle tanımlanmasa da- nörona ait bir özellik ise o zaman yapay zeka algoritmalarını yapay nöron modeli tabanlı olan/olmayan algoritmalar olarak iki ana gruba ayırmak metodolojik olarak doğru bir başlama noktası olarak görülebilir.

Yapay zeka konusu üzerine tartışmanın daha şimdiden yarattığı heyecan, merak, ilgi ve bu duygulara paralel olarak oluşan korkular göz önüne alındığında beraberinde derin felsefi, ideolojik ve hatta sosyolojik tartışmaları da getireceğini öngörmek abartı olmayacaktır. Tartışmanın bu boyutuna yukarıda örneklerini verdiğimiz BMA uygulamaları üzerinden devam edebiliriz. Bu yeni araştırma alanının uyandırdığı heyecan ve merak sadece vaat ettiği çok sayıda uygulamadan değil, aynı zamanda insanlar üzerinde deney yapılmasına ve artırılmış insan (augmented human) bağlamında çalışmalar yürütülmesine olanak tanımasından da kaynaklanmaktadır [3]. Tıbbi uygulamalar en çok öne çıkanlar olsa da endüstri (askeri uygulamalarla ilgilenenler de dahil), eğlence, güvenlik vb. alanlardaki karar vericiler bu alanda neler olup bittiğini gözlemlemekle yetinmeyip, sonuçları çok nadir yayımlanan kendi araştırmalarına da yatırım yapmaktadırlar.

İster yapay nöron tabanlı ister lineer veya nonlineer makine öğrenme algoritmalarını kullanıyor olsunlar, cevapları gündelik protez kullanımında olduğu gibi diğer non-invazif hatta invazif BMA uygulamalarında da kontrol kalitesini etkileyecek bir dizi kritik soruyu alanlarına göre aşağıdaki gibi gruplandırılabiliriz:

1) Beyin aktivitesinin kaydedilmesi: Uygulama için ne tür bir EEG sistemi uygun olacaktır? En iyi performansı elde etmek için hangi beyin bölgelerinin kaydedilmesi gerekir? Arzu edilen hareketin tetiklenmesi EEG sinyali üzerinde otomatik ve güvenilir, tekrar edilebilir bir şekilde tespit edilebilir mi? Eğer bu olmuyorsa farklı uzuvların istemli hareketleri (göz açıp-kapama gibi) bu amaç için kullanılabilir mi? Tatmin edici bir kontrol seviyesi elde etmek için kullanmamız gereken en uygun elektrot sayısı nedir?

2) Sinyal işleme -özellik çıkarma- ve beyin aktivitesinin kod çözümü (decoding): Bu iki

işlemi yerine getirmek için literatürde önerilen çok sayıda alternatif göz önüne alındığında, ilgili algoritmaların doğru kombinasyonu ne olacaktır?

3) Duyusal geri besleme: Duyusal geri beslemenin BMA tabanlı kontrol sistemlerinin performansına katkısı nedir?

Buraya kadar yapay zeka uygulamalarının gündelik hayatımıza etkilerini ve ortaya çıkardığı soruları ağırlıklı olarak BMA'ların tıbbi uygulama örnekleri üzerinden özetlemeye çalıştık. Ne var ki BMA'ların sunduğu teorik ve teknolojik konsept sadece makine-insan ilişkisi/iletişimi üzerinden değil insan-insan ilişkisi/iletişimi üzerinden de radikal dönüşümlere ve çok ciddi etik ve felsefi tartışmalara kapı aralamaktadır. (Rao R.P.N. et.al 2014) [8]'de sunulan ve (Eskiizmirliler & Goffette 2015) [3]'de de tartışılan BMA kısaltmasından esinlenip BBA (Beyin Beyin Arayüzü) uygulamaları diye adlandırabileceğimiz insanlarda beyinden beyine iletişimle ilgili çalışmalar buna verilebilecek belki de en çarpıcı/düşündürücü örnek olabilir. Makalede detaylı olarak anlatılan deneye katılan iki araştırmacı birbirlerini göremeyecek ve duyamayacak uzaklıkta iki odada bulunmaktadır. Birinci araştırmacı (gönderici) başında bir EEG kaskı olduğu halde bir video oyunu oynamaktadır. Oyun EEG sinyalleri ile ekrandaki bir noktayı hareket ettirmek ve nokta hedefe ulaştığı anda patlamasını sağlayacak şekilde işaret parmağı ile klavyede doğru zamanda/doğru tuşa basmaya karar vermekten ibarettir. İkinci araştırmacı (alıcı) uzak odada birinci araştırmacının EEG sinyallerini isleyen bir bilgisayar tarafından kontrol edilen TMS (Transcranial Magnetic Stimulation) cihazına bağlıdır ve TMS alıcının beyinde parmaklarını kontrol eden bölgeyi bilgisayardan gelecek tetikleme sinyaline göre uyatabilmektedir. Makalede alıcının ekranı ve oyunu görmemesine rağmen göndericinin aldığı kararı bilinçsizce takip ederek aynı hareketi nasıl başarı ile yapabildiği rapor edilmektedir. Makale ekinde verilen videoda [9] duyulan zafer çılgınlıklarını ister BMA ister başka yapay zeka uygulamaları üzerinden yürütülsün, tartışmaların sanılandan daha zorlu geçeceğinin ve daha uzun bir zamana yayılacağına habercisi olarak görebiliriz.



Şekil 4: Washington Üniversitesi araştırmacısı Rajesh Rao (solda) zihniyle bilgisayar oyunu oynuyor. Kampüsün başka bir noktasında araştırmacı Andrea Stocco (sağda) da beyninin sol motor korteks bölgesine manyetik bir uyarı bobini takıyor. Stocco'nun sağ işaret parmağı, ilk insan beyni-beyin arayüzü gösterisinin bir parçası olarak "ateş" düğmesine basmak için istemsizce hareket etti. (University of Washington)

Kaynakça:

- [1] M. Rozenberg, (2023) "Solid State Neuroscience: Spiking Neural Networks as Time Matter" (2023), Journal of Physics, Conf. Ser. 2533 012007
- [2] Cai, H., Ao, Z., Tian, C. et al. (2023) "Brain organoid reservoir computing for artificial intelligence". Nat Electron 6, 1032–1039 (2023).
- [3] S. Eskiizmirliler & J. Goffette. (2015) "Brain-machine interface (BMI) as a tool for understanding human-machine cooperation." in "Inquiring into human enhancement: interdisciplinary and international perspectives", chapitre 7, pp:138–160, Edité par S. Bateman et.al. Palgrave Macmillan.
- [4] M. Tagliabue, Y. Hao, M. Duret, T. Brochier, A. Riehle, M.A. Maier, S. Eskiizmirliler (2015), "Estimation of two-digit grip type and grip force level by frequency decoding of motor cortex activity for a BMI application." Proceedings of International Conference on Advanced Robotics (IEEE, ICAR), 2015, pp. 308–315.
- [5] Homme bionique, ARTE 2015, https://www.youtube.com/watch?v=gfKwxk3_BPQ
- [6] C. Piozin, G.H. Altamira, C. Simon, B. Lavrard, J.Y. Audran, F. Waszak, S. Eskiizmirliler, (2022) "Motion prediction for the sensorimotor control of hand prostheses with a brain-machine interface using EEG", Proceedings of IEEE-BCI Winter Conference.
- [7] C. Piozin, G.H. Altamira, C. Simon, B. Lavrard, J.Y. Audran, F. Waszak, S. Eskiizmirliler, (2024) "Changes in the distinction of grasp types for the sensorimotor control of a myoelectric prosthesis using a non-invasive Brain-Machine Interface", yayınlanmak üzere sunulmuş.
- [8] Rao R.P.N., Stocco A., Bryan M., Sarma D., Youngquist T.M., Wu J. and Prat C.S. (2014) 'A Direct Brain-to-Brain Interface in Humans'. PLoS ONE 9(11): e111132.doi:10.1371/journal.pone.0111132.
- [9] <https://www.washington.edu/news/2013/08/27/researcher-controls-colleagues-motions-in-1st-human-brain-to-brain-interface/>