

Beyin-Kompüter İnterfeysinin Tibbdə Tətbiqləri: Mövcud Vəziyyəti və Perspektivləri

Məmməd Həşimov

ETN İnformasiya Texnologiyaları İnstitutu, Bakı, Azərbaycan
mamedhashimov@gmail.com

Xülasə— Beyin-kompüter interfeysi (BKİ) bir-birini qarşılıqlı şəkildə tamamlayan insan beyini ilə kompüter arasında əlaqə sistemidir. Bu interfeys insan bədəninin sinir-əzələ sistemi ilə deyil, onun zehni fəaliyyətinin köməyi ilə əlaqənin qurulmasına imkan verir. Təqdim olunan məqalədə BKİ-nin tibb sahəsində tətbiqlərinə baxılmışdır. Bu məqsədlə məqalədə BKİ-nin mövcud vəziyyəti və gələcək perspektivləri barədə məlumat verilmişdir. BKİ-nin arxitekturası təhlil edilmiş, beyindən siqnalların alınması üsulları və texnikaları araşdırılmış, həmin siqnallar vasitəsilə cihazların işləmə prinsipi təqdim edilmişdir. BKİ-nin klinik tətbiqləri ilə bağlı həyata keçirilən təcrübələr və onlardan əldə olunan nəticələr göstərilmişdir. BKİ-nin laboratoriya mühitindən real həyat tətbiqmələrinə keçməsi üçün bu sahədə mövcud olan problemlər analiz edilmişdir.

Açar sözlər: beyin-kompüter interfeysi, elektroensefaloqrafiya, beyin kompüter interfeysinin arxitekturası, beyin kompüter interfeysinin klinik tətbiqləri, beyin kompüter interfeysi problemləri.

I. GİRİŞ

Uzun illərdir ki, bir çox tədqiqat mərkəzlərində insan beyini ilə müxtəlif cihazlar arasında birbaşa əlaqənin qurulması istiqamətində intensiv tədqiqat işləri aparılır. Bu tədqiqatlar beyin siqnalları vasitəsilə insan beyini ilə kompüterlər, əlil arabaları, protez cihazları və digər alətlərin idarə olunması məqsədilə həyata keçirilmişdir. Məhz buradan "Beyin-kompüter interfeysi" termini meydana gəlmişdir [1].

BKİ müəyyən bir obyekt və ya cihazın insan beyini vasitəsilə birbaşa idarə edilməsi məqsədilə əlaqəni təmin edir. Beyində baş verən fiziki prosesləri dəqiq şəkildə izləyən sensorların köməyi ilə beyindən məlumatın əldə edilməsi və istənilən cihazın proqram təminatı vasitəsilə idarə olunması mümkündür. İnsan beyini təqribən 100 milyard neyronlardan ibarət mürəkkəb bir şəbəkədən təşkil olunmuşdur. İnsan düşünərkən, hərəkət edərkən, nəyisə hiss edərkən və ya xatırlayarkən neyronlar işləyir və elektrik siqnallarını göndərməklə beyinə və ya beyindən məlumatın ötürülməsini həyata keçirir. Həmin elektrik siqnallarını müxtəlif texnologiyaların köməyi ilə aşkar edib cihazın, maşının, kompüterin idarə olunması məqsədilə istifadə etmək olar [2].

BKİ insan beyini ilə xarici cihazlar arasında birbaşa əlaqə yaratmağa imkan verən inkişaf etməkdə olan texnologiyadır. Bu texnologiya beyin siqnallarını analiz edərək birbaşa kompüterlərə və ya digər cihazlara ötürülməsini təmin edir. BKİ insanlara beyin siqnallarından istifadə edərək kompüterləri, robotları və ya digər cihazları idarə etməyə imkan

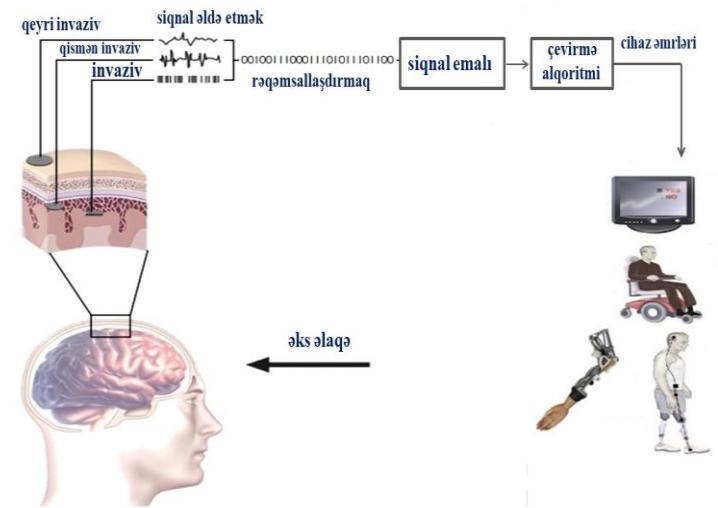
verən beyinə implantasiya edilmiş və ya başa taxılmış elektron sistemlərdir.

Bu texnologiyanın əsas məqsədi beyin aktivliyinə əsaslanaraq insanın niyyətini aşkar etmək və onu funksional hərəkətlərə çevirməkdir. Ənənəvi sinir-əzələ kanallarından istifadə etmədən həyata keçirilən bu rabitə növü, xüsusilə fiziki məhdudiyyətli şəxslər üçün yeni imkanlar yaradır. Tibb sahəsində BKİ-nin tətbiqi son illərdə geniş tədqiqat obyektinə çevrilmişdir. Tibbdə BKİ neyrorəabilitasiya və diaqnostikada böyük vədlər verir. Bu texnologiya iflic, amiotrofik lateral skleroz (ALS), onurğa beyini zədələri və digər neyroloji pozuntularla yaşayan şəxslərə kommunikasiya, reabilitasiya və ətraf mühitlə qarşılıqlı əlaqə imkanları təqdim edir. Eyni zamanda, BKİ psixoloji və neyroloji xəstəliklərin erkən diaqnostikasında, eləcə də emosional vəziyyətlərin monitorinqində istifadə olunur.

Bu məqalənin məqsədi BKİ-nin arxitekturasını və onun tibb sahəsindəki klinik tətbiqlərini təhlil etməkdir.

II. BEYIN-KOMPÜTER İNTERFEYSİNİN ARXITEKTURASI

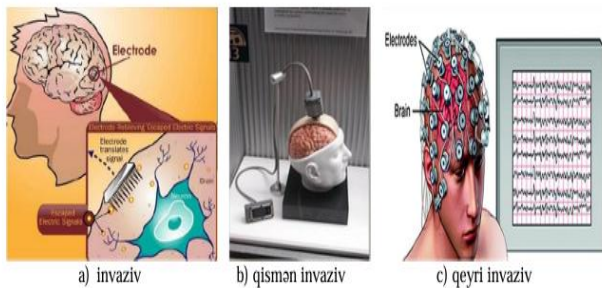
BKİ 4 əsas mərhələdən ibarətdir [3, 4]: siqnal əldəetmə, siqnal emalı, çevirmə algoritmi və yekun cihaz (şəkil 1).



Şəkil 1. Beyin-kompüter interfeysinin arxitekturası.

A. Birinci mərhələ – signal əldəetmə

Bu mərhələdə müəyyən üsul və texnikalardan istifadə edərək beyin siqnallarının əldə olunması prosesi həyata keçirilir. Bunun üçün şəkil 2-də qeyd olunan üç üsuldən istifadə olunur [1, 5, 6].



Şəkil 2. Beyindən siqnalların alınması üsulları.

İnvaziv üsul. BKİ texnologiyasında invaziv üsul birbaşa beyinin daxilində elektrodların yerləşdirilməsini nəzərdə tutur (şəkil 2a). Bu metod neyron aktivliyini çox yüksək dəqiqliklə qeydə almağa imkan verir. İnvaziv metodlar çox yaxşı siqnal keyfiyyətinə malikdir. İnvaziv üsullar sinir hüceyrələrinin fəaliyyətini birbaşa ölçdüyü üçün siqnalların keyfiyyəti (yüksək amplituda, aşağı səs küy) qeyri-invaziv üsullardan qat-qat yüksək olur. Bu üsul vasitəsilə robot əllərin və protezlərin idarə olunmasında daha dəqiq nəzarət təmin edilir. Lakin invaziv üsul beyinə kompleks cərrahi müdaxilə tələb etdiyindən insan sağlamlığı üçün zərərli hesab olunur. İnfeksiya, toxuma zədələnməsi və s. kimi ciddi fəsadlar mümkündür. Bu səbəbdən yalnız klinik tədqiqatlarda və ağır funksional itkiləri olan xəstələrdə tətbiq olunur.

Qismən invaziv. Burada implantlar beyni dəşmədən kəllə sümüyünün altına yerləşdirilir (şəkil 2b). Qismən invaziv üsul beyinin səthinə, lakin beyin toxumasına daxil olmadan yerləşdirilən cihazlar vasitəsilə siqnal toplayır. Bu zaman siqnalların keyfiyyəti aşağı olsa da, beyindən gələn siqnalların qəbul edilməsi invaziv üsulla müqayisədə insan sağlamlığına ziyan vurmur və tam invaziv metodlarla müqayisədə daha az risklidir. Qismən invaziv üsullar siqnal keyfiyyəti və təhlükəsizlik baxımından balanslı həll hesab olunur. Bu metod uzunmüddətli istifadəyə daha uyğundur və klinik tədqiqatlarda geniş istifadə olunur. Epilepsiyanın diaqnostikası və bəzi neyrocərrahi prosedurlar zamanı tez-tez tətbiq edilir. Siqnallar birbaşa beyin səthindən alındığı üçün dəqiqlik yüksək olur. Bu metod əsasən Elektrokortikoqrafiya (ing. *EcoG*, *Electrocorticography*) texnologiyasına əsaslanır. Bu üsuldə beyin qabığından elektrik aktivliyini qeyd etmək üçün elektrodlar birbaşa beyinin açıq səthinə yerləşdirilir. Neyro görüntülmə zamanı elektrodların kəllənin içərisinə yerləşdirilməsi üçün cərrahi kəsiyin həyata keçirilməsi tələb olunur.

Qeyri-invaziv. Bu cür BKİ texnologiyaları xəstənin beyində heç bir implantasiya olmadan siqnalları yüksək keyfiyyətlə qeyd edir (şəkil 2c). Qeyri-invaziv üsul beyin

siqnallarını xarici cihazlar vasitəsilə, heç bir cərrahi müdaxilə olmadan qeydə alır. Qeyri-invaziv üsuldə sensorlar baş dərisinə yerləşdirildiyindən invaziv üsulla müqayisədə onun istifadəsi daha asandır. Ən çox istifadə olunan metod elektroensefaloqrafiya (ing. *Electroencephalography (EEG)*) texnologiyasıdır. EEG cihazları baş dərisinə yerləşdirilən elektrodlarla beyin fəaliyyətini ölçür. Bu üsul təhlükəsiz, ağrısız və istifadəsi rahatdır, ona görə də geniş yayılmışdır. Qeyri-invaziv BKİ-lər əsasən tədqiqat, reabilitasiya və oyun texnologiyalarında istifadə olunur. Siqnal keyfiyyəti invaziv və qismən invaziv üsullarla müqayisədə daha zəifdir, çünki siqnallar kəllə və dəri qatlarından keçərək zəifləyir. Bununla belə, müasir siqnal emal və süni intellekt metodları bu çatışmazlığı müəyyən qədər kompensasiya edə bilir.

Qeyri-invaziv üsullar real vaxt rejimində işləyə bilən sistemlər üçün əlverişli hesab olunur. Bu metod, xüsusilə sağlam insanlar üçün nəzərdə tutulan tətbiqlərdə, məsələn, oyun interfeysləri və diqqət təlimlərində üstünlük təşkil edir. Qeyri-invaziv üsul üçün əsasən aşağıdakı texnologiyalardan istifadə olunur [7]:

- *Elektroensefaloqrafiya* (ing. *Electroencephalography (EEG)*). Baş dərisinə yerləşdirilən elektrodlarla beyin dalğalarını ölçmək üçün ən geniş yayılmış texnologiyadır.
- *Funksional yarım-infraqırmızı spektroskopiya* (functional near-infrared spectroscopy (FNIRS)). Qeyri-invaziv üsul olaraq, beyinin oksigenlə zəngin və oksigensiz hemoqlobin səviyyələrini ölçməklə neyron fəaliyyətinin qiymətləndirilməsində mühüm rol oynayır.
- *Maqnetoensefaloqrafiya* (ing. *Magnetoencephalography (MEG)*). Beyinin maqnit siqnallarını ölçür, yüksək məkan və zaman dəqiqliyi ilə fərqlənir, lakin çox bahalıdır.
- *Funksional Maqnit Rezonans Görüntülmə* (ing. *Functional magnetic resonance imaging (fMRI)*). Beyin fəaliyyətini qan axını dəyişiklikləri əsasında yüksək məkan dəqiqliyi ilə qeyri-invaziv şəkildə vizuallaşdıran bir metodudur.

Beyinin fəaliyyəti zamanı yaranan elektrik siqnalları yuxarıda qeyd olunduğu kimi beyinin daxilində, kəllə sümüyünün altında və ya baş dərisində yerləşdirilən elektrodlar vasitəsilə qeydə alınmaqla aşkarlanır. Daha sonra siqnallar elektron emala uyğun səviyyələrə qədər gücləndirilir, rəqəmsallaşdırılır və kompüterə ötürülür. Orada isə siqnalların emalı prosesi həyata keçirilir.

B. İkinci mərhələ – siqnalın emalı

Siqnalın emalı mərhələsi beyində baş verən mürəkkəb proseslər səbəbindən BKİ-nin ən vacib və çətin tərəfidir. Siqnal emalı, müvafiq siqnal xüsusiyyətlərinin (yəni, şəxsin niyyəti ilə əlaqəli siqnal xüsusiyyətləri) kənar məzmunundan ayrılması üçün rəqəmsal siqnalların təhlili və onların yekun əmərlərə çevrilməsi məqsədilə yığcam formada təqdim olunmasıdır. Bu xüsusiyyətlər istifadəçinin məqsədi ilə əlaqəli olmalıdır. Bu mərhələdə məqsəd siqnalın çıxarılması xüsusiyyətlər əsasında istifadəçinin niyyətini (məsələn, hansı

istiqamətə baxmaq istədiyini və ya hansı hərəkəti etmək istədiyini) müəyyənləşdirməkdir.

BKİ texnologiyasında siqnalların emalı mərhələsi beyindən alınan xam siqnalları maşın tərəfindən şərh edilə bilən mənalı xüsusiyyətlərə çevirmək üçün vacibdir. Bura, adətən, ilkin emal, xüsusiyyət çıxarılması, xüsusiyyət seçimi və təsnifat daxildir [8, 9]. Siqnal emalı mərhələsində süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi BKİ-nin performansını və funksionallığını əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Süni intellekt alqoritmləri xüsusilə xüsusiyyətlərin çıxarılması, seçilməsi və təsnifatı mərhələlərində geniş istifadə olunur [10, 11].

İlkin emal. Burada siqnalları təmizləmək və artefaktlardan (göz qırpması, əzələ hərəkətləri, elektromaqnit müdaxilələr və s.) azad etmək prosesi həyata keçirilir. Əvvəlcədən işlənmiş siqnallar müxtəlif səs-küylərə, o cümlədən elektrik xəttinin səs-küyünə, fizioloji səslərə, hərəkət artefaktlarına və müdaxilə səslərinə məruz qalır. Bu səslər bütün BKİ prosedurunun səmərəliliyinə təsir edə bilər. Bu səbəbdən səs-küyün aradan qaldırılması və ya azaldılması üçün müxtəlif alqoritmlərdən istifadə edilir.

Xüsusiyyətlərin çıxarılması. Burada əsas məqsəd siqnalların daxilində istifadəçi niyyətini əks etdirə biləcək əsas xüsusiyyətləri əldə etməkdir. Süni intellekt siqnallardakı mürəkkəb və qeyri-xətti nümunələri avtomatik olaraq öyrənə bilir. Bunun üçün dərin öyrənmə modelləri (məsələn, CNN və Autoencoder-lər) istifadə olunur. Bu, ənənəvi metodlardan fərqli olaraq, əl ilə xüsusiyyətlərin çıxarılması ehtiyacını azaldır.

Xüsusiyyətlərin seçilməsi və azaldılması. Burada əsas məqsəd yalnız faydalı və informativ xüsusiyyətləri saxlamaq, sistemin sürətini və dəqiqliyini artırmaqdır. Maşın öyrənməsi alqoritmləri informativ xüsusiyyətləri seçərək modelin yükünü azaldır və performansını artırır. Bunun üçün genetik alqoritmlər və qarmaqarışq axtarış metodları, tətbiq edilir.

Təsnifat. Bu mərhələdə əsas məqsəd seçilmiş xüsusiyyətlərə əsaslanaraq istifadəçinin niyyətini (komanda, sağ əli hərəkət etdirmək, seçim etmək və s.) müəyyənləşdirməkdir. Burada Maşın öyrənmə modelləri (Support Vector Machine, k-Nearest Neighbors, Decision Trees, Random Forest, Naive Bayes və Dərin öyrənmə modeli (Convolutional Neural Networks) istifadə olunur.

Yuxarıda qeyd olunan siqnal emalı prosesləri zamanı yaranan siqnal xüsusiyyətləri daha sonra üçüncü yeni çevirmə alqoritmə mərhələsinə ötürülür.

C. Üçüncü mərhələ – çevirmə alqoritmə

Çevirmə alqoritmə mərhələsində siqnal xüsusiyyətlərinin cihazın anlayacağı müvafiq əməllərə (yəni, istifadəçinin niyyətini yerinə yetirən əməllərə) çevrilməsi həyata keçirilir. Bu mərhələnin əsas funksiyası emal olunmuş və təsnifləşdirilmiş siqnalı istifadəçi üçün faydalı əməllərə çevirməkdir (məsələn: kursurun sağa hərəkəti, prostetik əlin açılması, və s.). Bu mərhələ, BKİ texnologiyalarının real həyatda tətbiq oluna bilməsi üçün kritik rol oynayır, çünki insan beyinindən gələn abstrakt siqnallar buradakı çevirmə ilə konkret və faydalı əməllərə çevrilir.

D. Dördüncü mərhələ – çevirmə alqoritməndən gələn əməllər

Çevirmə alqoritməndən gələn əməllər yekun cihazı işə salır, hərfin seçilməsi, kursora nəzarət, robot qolun istifadəsi və s. kimi funksiyaları təmin edir. Cihazın fəaliyyəti istifadəçi ilə əks əlaqə yaradır, beləliklə də, idarəetmə tamamlanır

III. BEYİN-KOMPÜTER INTERFEYSİNİN KLİNİK TƏTBIQLƏRİ

BKİ texnologiyası inkişaf etmiş neyroloji qiymətləndirmə və idrak proseslərinin anlaşılması sahəsində bir sıra əhəmiyyətli irəliləyişlərə nail olmuşdur. Ümumi tibbi tətbiqlər sahəsində isə, bu texnologiya neyroloji pozuntuları olan, danışa bilməyən və ya iflic olmuş, həmçinin insult və ya kəskin beyin travması keçirmiş pasiyentlər üçün mühüm irəliləyişlər əldə etmişdir. Potensial BKİ istifadəçiləri fiziki və idrak imkanlarına, həmçinin BKİ sistemlərindən istifadə məqsədlərinə görə üç qrupa bölünür [12]:

Tamamilə hərəkətsiz və ya ciddi dərəcədə hərəkət məhdudiyyətli şəxslər. Bu şəxslər BKİ texnologiyalarının əsas istifadəçi qruplarından biridir. Bu şəxslər əzələlər vasitəsilə hərəkət və ya danışma qabiliyyətini demək olar ki, tam itirmiş olurlar. Bu qrupa ALS xəstələri, beyin kötüyü insultu keçirmiş şəxslər aiddir. Bu istifadəçilər üçün BKİ yeganə ünsiyyət və nəzarət vasitəsidir. Onlar EEG əsaslı sistemlərlə düşüncə vasitəsilə "bəli/xeyr" cavabları verir, mətn yazır və ya sadə cihazları idarə edə bilirlər.

Qismən hərəkət qabiliyyəti olan istifadəçilər. BKİ texnologiyalarının ikinci əsas hədəf qrupunu təşkil edir. Bu şəxslər müəyyən dərəcədə fiziki hərəkət qabiliyyətini saxlamış olsalar da, gündəlik həyat fəaliyyətlərində əhəmiyyətli məhdudiyyətlərlə üzləşirlər. Bu qrupa insult keçirmiş pasiyentlər, onurğa beyini zədəsi olan, lakin qismən hərəkət edə bilən şəxslər, serebral iflic olanlar, erkən mərhələli ALS xəstəlikləri olanlar daxildir. Bu şəxslər üçün BKİ mövcud qabiliyyətləri tamamlamaq və ya gücləndirmək üçün istifadə olunur. Məsələn, reabilitasiya zamanı əl və ya ayaq hərəkətlərini stimullaşdırmaq məqsədilə.

Sağlam və funksional qabiliyyətli şəxslər (təcrübə və qeyri-tibbi istifadəçilər). Bu qrupa oyun həvəskarları, virtual reallıq (VR) istifadəçiləri və tədqiqatçılar daxildir. Bu istifadəçilər BKİ-ni yeni təcrübələr, diqqət monitorinqi, emosional vəziyyətin təhlili, ağıllı ev sistemlərinin idarəedilməsi və yaradıcılıq məqsədləri üçün istifadə edirlər.

Beyin-kompüter interfeysinin klinik tətbiqləri, neyroloji və motor pozuntuların (sinir sistemi və əzələ funksiyalarındakı problemlər nəticəsində hərəkətlərin idarəsində yaranan çətinliklər və ya anormallıqlar) müalicəsi və kompensasiya olunması sahəsində mühüm irəliləyişlərə səbəb olmuşdur. Bu texnologiya beyin siqnallarını analiz edərək istifadəçiyə cihazları və sistemləri düşüncə ilə idarə etməyə imkan verir. Aşağıda BKİ-nin əsas klinik tətbiq sahələri göstərilmişdir [13-15]:

Ünsiyyətin bərpası BKİ-nin ən mühüm klinik tətbiq sahələrindən biridir. Bu texnologiya, danışma və yazma qabiliyyətini itirmiş, lakin şüuru sağlam qalan şəxslərə ünsiyyət qurmaq imkanı verir. Əsasən ALS və insult keçirən xəstələr üçün istifadə olunur. BKİ istifadəçinin beyin

siqnallarını toplayaraq onların seçimlərini və ya fikirlərini təhlil edir. P300 və SSVEP (Sabit Görüntülü Görmə Potensialları) əsaslı speller sistemləri vasitəsilə istifadəçi diqqətini ekrandakı simvollarla yönəldərək sözlər və cümlələr yarada bilir. Motor təsəvvürə əsaslanan (Motor imagery) sistemlər isə istifadəçi yalnız xəyalən hərəkət edərək sistemlə əlaqə qurur. Bəzi sistemlər seçilən sözləri avtomatik səsə çevirərək danışq funksiyasını da bərpa edir. Bu texnologiya sayəsində uzun müddət izolyasiya vəziyyətində olan şəxslər yenidən öz fikirlərini ifadə edə bilərlər. Beləliklə, BKİ ünsiyyət maneələrini aradan qaldıraraq sosial və emosional təcridin qarşısını alır.

Motor funksiyaların bərpası (reabilitasiya) BKİ texnologiyalarının klinik sahədə ən perspektivli tətbiqlərindən biridir. Bu yanaşma hərəkət qabiliyyəti qismən və ya tam itmiş şəxslərin yenidən motor funksiyalarına sahib olmasına yönəlib. Xüsusilə insult, serebral iflic və onurğa beyini zədələri keçirmiş pasiyentlər üçün geniş istifadə olunur. BKİ pasiyentin beyin siqnallarını oxuyaraq hərəkət etmək istəklərini analiz edir və bu siqnalları robotik reabilitasiya qurğularına və ya elektrik stimulasiya cihazlarına ötürür. Beləliklə, pasiyent düşüncə yolu ilə əzələlərin aktivləşməsinə nail olur. Bu proses beyin-sinir əlaqələrinin yenidən qurulmasına şərait yaradır. Beləliklə, BKİ texnologiyası reabilitasiyada həm effektivliyi artırır, həm də bərpa müddətini qısaldır.

Neyroprotezlərin idarə edilməsi BKİ texnologiyasının ən qabaqcıl və praktiki tətbiq sahələrindən biridir. Bu üsul, fiziki əza itkisi və ya iflic səbəbilə əzələlərə nəzarəti itirmiş şəxslərə protezləri düşüncə yolu ilə idarə etmək imkanı verir. BKİ istifadəçinin beyinindən gələn siqnalları qeydə alır və bu siqnalları xüsusi alqoritmlər vasitəsilə mühərrik əməllərinə çevirir. Nəticədə, istifadəçi robotik qol, əl və ya ayaq protezini heç bir fiziki hərəkət etmədən, yalnız düşünərək hərəkət etdirə bilir.

Epilepsiyada BKİ texnologiyasının tətbiqi xəstəliyin daha dəqiq izlənməsi, erkən aşkarlanması və potensial olaraq qarşısının alınması baxımından mühüm əhəmiyyət daşıyır. BKİ epilepsiya xəstələrinin beyin dalğalarını real vaxtda izləyərək, tutma (səyrimə) öncəsi anormal siqnalları aşkar edə bilir. Bu, tutmanın proqnozlaşdırılması və istifadəçiyə və ya tibbi heyətə xəbərdarlıq edilməsi imkanı yaradır. Tutmanın baş verəcəyini əvvəlcədən bilmək xəstənin özünü təhlükəsiz yerə çəkməsinə və ya oturmasına imkan verir, bu da yıxılma, zədələnmə və digər qəza risklərini azaldır. BKİ vasitəsilə xəstə və yaxınları tutma başlamazdan əvvəl vizual, səsli və ya titrəyişli xəbərdarlıq ala bilər. Xüsusilə EEG əsaslı sistemlər epileptik fəaliyyətin topoqrafik yerini və formasını müəyyənəndirərək diaagnostikani dəqiq aparmağa kömək edir. Süni intellektlə təchiz olunmuş alqoritmlər minlərlə siqnalı təhlil edərək fərdi tutma nümunələrini öyrənir və zamanla daha dəqiq nəticələr təqdim edir.

Depressiyada BKİ texnologiyalarının tətbiqi, emosional vəziyyətin monitorinqi və tənzimlənməsi üçün yeni, qeyri-invaziv və fərdi yanaşma təqdim edir. Bu texnologiya əsasən neurofeedback üsulu ilə həyata keçirilir. Burada istifadəçi öz beyin dalğalarını izləyərək, onları istənilən səviyyəyə yönləndirməyi öyrənir. Pasiyent ekran üzərindən öz beyin aktivliyini real vaxtda izləyir və vizual/səsli geribildirimlər

vasitəsilə emosional vəziyyətini idarə etməyə çalışır. Bu metod xüsusilə dərmanlara cavab verməyən və ya əlavə müalicəyə ehtiyac duyan xəstələr üçün alternativ hesab olunur. Uzunmüddətli tətbiqlər nəticəsində emosional sabillik artır, stress və özünüqəbul səviyyəsi yaxşılaşır.

IV. BEYİN-KOMPÜTER INTERFEYSİ SAHƏSİNDƏ MÖVCUD PROBLEMLƏR

Hal-hazırda inkişaf mərhələsində olan BKİ-nin maraqlı və dinamik gələcəyinə baxmayaraq, əlbəttə ki, texnoloji problemləri və riskləri də vardır. BKİ sahəsində mövcud olan əsas problemlər aşağıda göstərilmişdir [1, 3, 8,]:

İnsan beyininin dərk edilməsi. BKİ sahəsində insan beyininin dərk edilməsində bir sıra çətinliklər mövcuddur. Əvvəla, beyinin mürəkkəb funksional strukturu siqnalların dəqiq emalını çətinləşdirir. Eyni zamanda, fərqli insanların beyin siqnalları arasında fərqliliklər BKİ sistemlərinin standartlaşdırılmasını çətinləşdirir. Bu səbəbdən, daha dəqiq modellər və inkişaf etmiş siqnal emalı üsullarına ehtiyac var ki, BKİ texnologiyaları daha etibarlı və geniş istifadə oluna bilsin.

Nəticələrin qeyri-dəqiqliyi. BKİ-də nəticələrin qeyri-dəqiqliyi texnologiyanın geniş tətbiqinə əngəl yaradan əsas problemlərdəndir. EEG kimi qeyri-invaziv metodlarla toplanan siqnallar zəif və səs-küylü olur, bu da səhv analizlərə səbəb ola bilər. Beyin siqnalları zamanla və fərqli şəraitlərdə dəyişə bildiyindən nəticələrin sabitliyi təmin edilmir. İstifadəçilərin fərdi xüsusiyyətləri, yorğunluq və diqqət səviyyəsi də sistemin dəqiqliyinə mənfi təsir göstərir. Bu səbəbdən, yüksək dəqiqlikli nəticələr əldə etmək üçün siqnal emalı və maşın öyrənməsi üsullarının daha da təkmilləşdirilməsinə ehtiyac vardır.

İstifadə rahatlığı. BKİ-lərinin istifadəsi bəzən istifadəçilər üçün çətin və narahat ola bilər. Xüsusilə yaş və ya motor pozuntuları olan şəxslər üçün elektrodların düzgün yerləşdirilməsi və sistemin kalibrovkası əlavə çətinlik yaradır. Bu səbəbdən, istifadəsi daha sadə və rahat olan qurğuların hazırlanması vacib hesab olunur.

Təhlükəsizlik problemləri. BKİ hazırda bir istifadəçinin niyyətləri, şəxsi düşüncələri, oxuduqları və ya baxdıqları haqda məlumatların əldə edilməsi üçün istifadə edilir. İstifadə olunan sinir siqnalları şəxsi və həssas məlumatlar daşıya bilər, bu da məlumatların icazəsiz əldə olunması riskini artırır. Sistemlərə edilə biləcək kiberhücumlar həm istifadəçinin məlumat təhlükəsizliyini, həm də fiziki təhlükəsizliyini təhdid edə bilər. Bu səbəbdən BKİ texnologiyalarında məlumatların şifrələnməsi və təhlükəsizlik protokollarının tətbiqi zəruridir.

Yuxarıda qeyd olunan problemləri ümumiləşdirərək BKİ-nin çatışmazlıqlarını aşağıdakı kimi göstərmək olar [1]:

- Tədqiqatlar hələ ilkin mərhələdədir;
- Avadanlıq tam olaraq portativ deyil;
- İstifadəçi BKİ qurğularından istifadə etməzdən əvvəl geniş təlimlər keçməlidir;
- Beyində aparılan əməliyyatlar riskli ola bilər və beyinin fəaliyyətinin dayanmasına səbəb ola bilər;

- Beyində BKİ cihazlarının götürə bilmədiyi kimyəvi reaksiyalar mövcuddur;
- Etik məsələlər sistemin inkişafına mane ola bilər;
- Kəllə xaricindəki elektrodlar beyindən çox az signal ala bilər;
- Kəllə içərisinə yerləşdirilmiş elektrodlar beyində toxumaları zədələyir;
- BKİ texnologiyası və onun quraşdırılması çox xərc tələb edir;
- Virus hücumları beyində pis təsirlərə səbəb ola bilər;
- BKİ texnologiyasının sürətlə fəaliyyət göstərə bilməsi üçün hələ bir sıra texnologiyaların inkişaf etdirilməsi tələb olunur.

NƏTİCƏ

BKİ tətbiqləri, əsasən laboratoriya şəraitində nümayişlərlə məhdudlaşdırılmışdır və hələlik gündəlik həyatda tam istifadə edilmir. Yaxın gələcəkdə BKİ tətbiqləri kompüter, mobil telefon və bir sıra digər texnologiyalar kimi gündəlik fəaliyyətdə insanların istifadəsinə veriləcəkdir. Bu səbəbdən BKİ-nin inkişafının müxtəlif komponentləri ilə bağlı tədqiqatlar ardıcıl və sürətli şəkildə davam etdirilir. BKİ tibdə geniş tətbiq imkanlarına malik innovativ texnologiyadır. Bu sistemlər iflic və digər xəstəliklərdən əziyyət çəkən pasiyentlər üçün ünsiyyət və hərəkət bacarıqlarının bərpasında mühüm rol oynayır. Eyni zamanda, diaqnostika və reabilitasiya proseslərinin dəqiqliyini və effektivliyini artırmaqla, fərdi yanaşma imkanlarını genişləndirir. Lakin texnologiyanın inkişafı ilə paralel olaraq signalın qeyri-dəqiqliyi, təhlükəsizlik və etik məsələlər kimi problemlər də hələ tam həll olunmamış qalır. Daha həssas signal emal alqoritmləri, dəqiqliyi artırılan qurğular və qeyri-invaziv sistemlər vasitəsilə daha effektiv tətbiqlər mümkün olacaq. Gələcək tədqiqatlar bu çətinliklərin aradan qaldırılmasına və BKİ-nin kliniki praktikada daha geniş istifadəsinə imkan verəcəkdir.

İSTİNADLAR

- [1] M. Həşimov, “Beyin Kompüter Interfeysi: perspektivləri, tətbiqləri və problemləri,” *Informasiya texnologiyaları problemləri*, №1, s. 46–54, 2021.
- [2] U. Aroosa, A. Ureeba, and G. K. Muhammad, “Recent Trends, Applications, and Challenges of Brain-Computer Interfacing,” *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, vol. 9, no. 2, pp. 58–65, 2017.
- [3] B. Maiseli, A. T. Abdalla, L. V. Massawe, M. Mbise, K. Mkocha, N. A. Nasser, M. Ismail, J. Michael and S. Kimambo, “Brain-computer interface: trend, challenges, and threats,” *Brain Informatics*, vol. 10, pp. 2-16, 2023.
- [4] M. A. Javaid, “Brain-Computer Interface,” *SSRN Electronic Journal*, pp. 2-30, 2013.
- [5] Y. Suna, X. Chenb, B. Liua, L. Liangc, Y. Wang, S. Gaoa, and X. Gao, “Signal acquisition of brain-computer interfaces: A medical-engineering crossover perspective review,” *Fundamental Research*, vol. 5, pp. 3-16, 2025.
- [6] L. S. F Alessandro, C. M. Leonardo, E. C. M Erica, and G. S. Sarah, “A Survey of Interactive Systems based on Brain Computer Interfaces” *Journal on Interactive Systems*, , vol. 4, no. 1, pp. 3–13, 2013.
- [7] J. Peksa and D. Mamchur, “State-of-the-Art on Brain-Computer Interface Technology,” *Sensors*, vol. 23, 6001, 2023.
- [8] N. A. Sarah, A. Ayman, and S. M. M Mostafa, “Brain computer interfacing: Applications and challenges,” *Egyptian Informatics Journal*, vol. 15, pp. 213–230, 2015.
- [9] A. Mansoor, M. W. Usman, N. Jamil, and M. A. Naeem, “Deep Learning Algorithm for Brain-Computer Interface,” pp. 1-12, 2020.
- [10] S. Chenna, “Exploring the Use of Artificial Intelligence in Brain-Computer Interfaces for Improved Control and Communication,” *Woxsen University*, 13 p, 2023. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4447601>
- [11] X. Zhang, Z. Ma, H. Zheng, T. Li, and et al, “The combination of brain-computer interfaces and artificial intelligence: applications and challenges,” *Annals of Translational Medicine*, vol. 8, 712, 2020.
- [12] F. Lotte, R. N. Roy, “Brain-Computer Interfaces’ Contributions to Neuroergonomics,” *Neuroergonomics*, pp. 43-48, 2019.
- [13] M. V. Cruz, S. Jamal, and S. C. Sethuraman, “A Comprehensive Survey of Brain-Computer Interface Technology in Healthcare: Research Perspectives,” *preprints.org*. 2024. doi: 10.20944/preprints202403.0082.v1
- [14] Z. A. Alkaff, N. H. A. H. Malim, P. Sumari and J. M. Abdullah, “Applications of Brain Computer Interface in Present Healthcare Setting,” In book: *New Insights in Brain-Computer Interface Systems*, 2024.
- [15] N. M. Joseph, and R.W. Jonathan, “Clinical Applications of Brain-Computer Interfaces: Current State and Future Prospects,” *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 2, pp. 187–199, 2009.