

Primena multispektralnog mapiranja mozga u proceni procesa učenja

Nikola Petrović¹, Filip Đorđević², Vladimir Pejanović³, dr Svetlana Borojević⁴, dr Platon Sovilj⁵

^{1,2,3,5}Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija

⁴Filozofski fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci, Banja Luka, Republika Srpska (BiH)

¹petrovicnikola@uns.ac.rs, ²filip.djordjevic@uns.ac.rs, ³vladimirpejanovic@uns.ac.rs,

⁴svetlana.borojevic@ff.unibl.org, ⁵platon@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: U ovom istraživanju predstavljen je alat razvijen u Python programskom jeziku, namenjen za mapiranje moždane aktivnosti ispitanika tokom izvođenja Strupovog eksperimenta. Koristeći EEG signale, sistem kreira video snimak moždane aktivnosti koji omogućava vizuelizaciju različitih spektara moždanih talasa, uključujući Delta, Teta, Alfa, Beta, Gama i Mi spektre. Cilj istraživanja je analiza kako se moždana aktivnost menja tokom procesa učenja i kako se performanse ispitanika unapređuju tokom vremena. Ključni fokus stavljen je na praćenje kognitivnih promena i adaptacija koje se dešavaju u mozgu tokom Strupovog eksperimenta. Rezultati ove studije pružaju značajne uvide u mehanizme učenja i kognitivnog razvoja, kao i potencijal za primenu u edukativnim i kliničkim uslovima.

Ključne reči: Mapiranje moždane aktivnosti; Merenje biomedicinskih signala; Python aplikacija; Mehanizmi učenja i kognitivni razvoj

Application of Multispectral Brain Mapping in Assessing Learning Processes

Abstract: This research introduces a tool developed in the Python programming language, designed for mapping brain activity of subjects during the Stroop experiment. Utilizing EEG signals, the system creates a video recording of brain activity that enables the visualization of various brain wave spectra, including Delta, Theta, Alpha, Beta, Gamma, and Mu spectra. The aim of the study is to analyze how brain activity changes during the learning process and how the performance of the subjects improves over time. The primary focus is on monitoring cognitive changes and adaptations occurring in the brain during the Stroop experiment. The results of this study provide significant insights into the mechanisms of learning and cognitive development, as well as potential for application in educational and clinical settings.

Key Words: Brain Activity Mapping; Biomedical Signal Measurement; Python Application; Learning Mechanisms and Cognitive Development

1. UVOD

Elektroencefalografija (EEG) predstavlja fundamentalnu tehniku u kognitivnim neuronaukama koja se koristi za merenje električne aktivnosti mozga. Ova metoda funkcioniše tako što meri razliku u naponskim potencijalima između referentne tačke, često naponskog potencijala mastoidne kosti, i odabranih tačaka na površini glave. Te tačke su definisane međunarodnim standardom poznatim kao 10-20 sistem. Ovaj sistem pruža metod za standardizovano postavljanje elektroda na skalpu, gde svaka elektroda ima svoj specifičan kod. U ovom kodiranju, slovo označava deo Centralnog nervnog sistema (CNS) kojem tačka pripada, a broj ukazuje na njenu udaljenost od ose glave. Parni brojevi su dodeljeni tačkama na desnoj strani glave, dok su neparni brojevi na levoj. Ova precizna organizacija omogućava detaljnu analizu i mapiranje moždanih talasa, pružajući uvid u različite kognitivne funkcije i stanja [1]. Tokom frekvencijske analize EEG signala, koristi se pet standardnih spektara: Delta, Teta, Alfa, Beta i Gama. Svaki spektar obuhvata specifične frekvencijske opsege i povezuje se sa određenim stanjima ili funkcijama mozga. Delta talasi (0.5–4 Hz) su najsporiji i obično se javljaju u dubokom snu. Teta talasi (4–8 Hz) su karakteristični za stanja lagane dremke ili intenzivnog emocionalnog angažovanja. Alfa talasi (8–12 Hz) su najčešće prisutni kada je osoba opuštena, ali budna, i često su povezani sa stanjima mira i meditacije. Beta talasi (12–30 Hz) su dominantni tokom budnih, svjesnih stanja, posebno kada je potrebna mentalna aktivnost i fokus. Gama talasi (30 Hz i više) su povezani sa složenim kognitivnim procesima poput percepcije i svjesnog iskustva. Pored ovih standardnih spektara, postoji i Mu spektar (8–13 Hz), koji je specifičan po tome što je povezan sa aktivnošću tzv. mirror neurona. Mu talasi su prisutni kada osoba izvodi motoričke radnje ili posmatra druge kako ih izvode, što ukazuje na njihovu ulogu u učenju putem posmatranja i empatiji. Ovi talasi su posebno zanimljivi istraživačima jer pružaju uvid u neuralne osnove socijalnog ponašanja i empatije.

Strupov eksperiment, poznat i kao Stroop test, je klasični neuropsihološki test koji se koristi za istraživanje procesa pažnje i interferencije. Test uključuje zadatke gde se od ispitanika traži da identifikuju boju tinte u kojoj je napisana reč koja sama može biti naziv druge boje. Ova vrsta zadatka dovodi do interferencije između različitih

informacija koje mozak obrađuje (boja slova i značenje reči), te stoga test služi kao sredstvo za proučavanje pažnje, obrade informacija i kognitivnog kontrolisanja [2]. U ovom radu, Strupov test je prilagođen tako da uključuje četiri boje: crvenu, zelenu, narandžastu i ljubičastu, pri čemu su reči koje označavaju ove boje bile su ispisane na engleskom jeziku. Zadatak ispitanika bio je da brzo i tačno identifikuju boju slova pritiskom odgovarajućeg slova na tastaturi (R za crvenu, G za zelenu, O za narandžastu, P za ljubičastu). Ovaj pristup testiranja omogućava precizno merenje vremena reakcije i stepena interferencije između vizualnog stimulansa i kognitivne obrade informacija. Korišćenje tastature za unos odgovora pruža objektivne podatke o brzini i tačnosti reakcija ispitanika, što je posebno korisno u kontekstu analize EEG signala dobijenih tokom eksperimenta. Ovaj test pruža detaljan uvid u procese pažnje, obrade informacija i kognitivnog kontrolisanja, čineći ga ključnim alatom u ovom istraživanju.

Mapiranje mozga na osnovu EEG signala predstavlja naprednu tehniku koja ne samo da omogućava vizualizaciju moždane aktivnosti, već i pruža detaljnu kvantitativnu analizu moždanih talasa i njihove distribucije unutar različitih delova mozga. Boje se koriste za prikazivanje relativne snage signala na različitim frekvencijama, gde svaka boja na skali predstavlja određeni raspon amplitude signala. U ovom kontekstu, plava boja obično predstavlja nižu aktivnost, zelena srednju aktivnost, žuta višu aktivnost, a crvena boja najvišu aktivnost moždanih talasa. Ova vizuelna reprezentacija omogućava istraživačima da brzo i efikasno identifikuju delove mozga koje su najaktivniji tokom određenih kognitivnih zadataka ili u stanjima poremećaja. Pored vizualnog prikaza aktivnosti mozga, uz svaki crtež mozga priložena je i skala boja koja varira od najsvetlijih do najtamnijih nijansi. Ova skala pomaže u preciznom tumačenju intenziteta moždane aktivnosti, omogućavajući istraživačima da kvantitativno procene razlike u aktivnostima između različitih moždanih regija. Ovaj pristup pruža ključne informacije ne samo o lokaciji, već i o intenzitetu moždane aktivnosti, što je od suštinskog značaja za dublje razumevanje kompleksnih kognitivnih procesa i neuroloških stanja. Kroz kombinaciju ove vizualizacije i frekvencijske analize, mapiranje mozga na osnovu EEG signala postaje veoma koristan alat za istraživanje i razumevanje funkcionisanja mozga [3, 4].

U okviru ovog istraživanja, iskoristili smo priliku da analiziramo podatke dobijene iz Strupovog eksperimenta od dvadeset ispitanika, prosečne starosti od 25 godina. Pre početka eksperimenta, učesnicima je pruženo detaljno uputstvo o postupku izvršavanja zadataka, uz demonstraciju pravilnih odgovora na različite vrste stimulacija. Tokom faze aktivnog testiranja, ispitanici su imali zadatak da što brže i preciznije reaguju na predstavljene stimulse. Paralelno sa izvođenjem testa, vršeno je kontinuirano merenje EEG signala korišćenjem petokanalnog EEG uređaja, Emotiv Insight [5]. Nakon završetka testiranja, ispitanici su ispunjavali kratak upitnik koji je služio za procenu subjektivnog osećaja stresa, koncentracije i relaksacije. Svi prikupljeni podaci su arhivirani u csv formatu, zajedno sa dodatnim informacijama koje pruža Emotiv Insight uređaj, dok su specifični parametri eksperimenta zabeleženi u odvojenom json fajlu.

U svrhu efikasne analize ovako prikupljenih podataka, razvijen je softverski alat u Python programskom jeziku. Ovaj alat omogućava automatsko učitavanje EEG signala i pridruženih obeležja, i na taj način korisnicima pruža opciju vizualizacije mapiranja mozga za celokupni signal, kao i za seriju vremenskih prozora unutar signala. U nastavku rada je dat opis razvijenog alata, njegove funkcionalnosti, kao i preliminarne rezultate dobijenih ovim metodama istraživanja.

2. METODOLOGIJA

Aplikacija pod nazivom „Brain Mapper“ je razvijena u python programskom jeziku korišćenjem više neophodnih biblioteka. Korisnički interfejs je razvijen uz pomoć custom tkinter biblioteke [6] i kreiran je da na najjednostavniji način obezbedi korisnicima učitavanje, odabir, anonimizaciju, prikaz i čuvanje podataka. Slika 1. opisuje metodologiju i veze između pojedinačnih modula.

2.1 Učitavanje podataka

Učitavanje podataka je ključni korak u obradi i analizi EEG signala, stoga je aplikacija „Brain Mapper“ dizajnirana da podržava učitavanje podataka iz različitih izvora. Trenutna verzija aplikacije omogućava učitavanje podataka iz edf (European Data Format) i csv (Comma-Separated Values) fajlova, koji su široko korišćeni u obradi EEG signala.

EDF fajlovi su posebno korisni jer sadrže bogat set metapodataka koji su sastavni deo EEG zapisa. To obuhvata informacije poput naziva EEG kanala, frekvencije odbirkovanja signala, markere postavljene tokom snimanja i automatski registrovane metapodatke. Ovi metapodaci omogućavaju aplikaciji da automatski konfiguriše parametre za analizu i vizualizaciju podataka, čime se značajno olakšava proces obrade.

Sa druge strane, csv format podataka nije standardizovan i može varirati u zavisnosti od softvera koji je korišćen za izvoz podataka. „Brain Mapper“ u trenutnoj verziji podržava formatiranje koje koristi EmotivPRO softverski paket. Prilikom snimanja EEG, EmotivPRO[7] kreira tri povezana fajla: json fajl sa obeležjima događaja, csv fajl sa sirovim EEG podacima i dodatni csv fajl sa ručno unesenim markerima. Json fajl sadrži struktuirane informacije o događajima koji su zabeleženi tokom snimanja, uključujući datum i vreme događaja, indeks, aplikativni port, tip markera, tip vrednosti i samu vrednost. Ovi metapodaci su od ključnog značaja za povezivanje EEG signala sa specifičnim eksperimentalnim uslovima i događajima. EEG podaci u csv formatu su organizovani u kolone, sa svakim EEG

kanalom predstavljenim serijom odbiraka izraženih u mikrovoltima. Pored ovih sirovih podataka, csv fajl takođe sadrži preko osamdeset kolona metapodataka koji daju dublji uvid u kvalitet snimljenog signala i kontekst u kojem su podaci zabeleženi. To uključuje, između ostalog, vremenske oznake za svaki odbirak, kvalitet signala na svakom kanalu, kao i podatke sa troosnog žiroskopa, akcelerometra i magnetometra. Takođe su dostupni i podaci o procenjenim kognitivnim stanjima kao što su stres, pažnja, koncentracija i relaksacija, koji pružaju dodatnu vrednost u analizi EEG signala. Ovaj pristup učitavanju i obradi podataka obezbeđuje sveobuhvatan skup informacija koji istraživačima omogućava da izvedu detaljnu analizu EEG signala u kontekstu specifičnih kognitivnih zadataka i eksperimentalnih uslova.

Skup podataka je dobijen pomoću EmotivPRO aplikacije i naziv podataka je formatiran na sledeći način (ime i prezime).(godina rođenja).(naziv eksperimenta).(sadržaj fajla).(ekstenzija). Kao prvi korak u implementaciji, izvršena je anonimizacija podataka na taj način što je kreiran novi skup podataka gde su ime i prezime ispitanika zamenjeni kreiranim identifikacionim kodom. Na kraju algoritma za anonimizaciju je sačuvan poseban rečnik koji nam daje relaciju između identifikacionog koda i ličnih podataka ispitanika, ovaj rečnik se ne deli i ostaje sačuvan samo kod vlasnika snimaka.

2.2 Obrada podataka

Učitani EEG podaci u vidu dvodimenzionalne matrice se pretvaraju u mne strukturu sirovih podataka, metapodaci se pretvaraju u mne info strukturu koja se koristi zajedno sa mne strukturom podataka. Dobijena mne struktura EEG podataka da se pomoću Welch transformacije za spektralnu gustinu signala dobije dvodimenzionalna matrica snage signala na celokupnom vremenskom i frekvencijskom opsegu. Matrica snage i vektor svih frekvencija služe za definisanje i prilagođavanje FOOOF modela koji ima za cilj analizu svih spektara snage u EEG signalu. Pomoću `get_bands_peak` funkcije se iz kreirane FOOOF grupe dobijaju informacije o pikovima unutar definisanog frekvencijskog opsega u obliku niza gde prvi element predstavlja frekvenciju pika, a drugi element predstavlja snagu (amplitudu) pika. Funkcija `plot_topomap` iz mne biblioteke pomoću generisanih informacija o pikovima unutar željenog frekvencijskog opsega generiše grafik mapiranja mozga uz označavanje pozicija elektroda, nakon čega se pomoću vektora amplituda generiše skala vrednosti u decibelima koja se nalazi sa desne strane grafika.

2.3 Prikaz i čuvanje

Za vizualizaciju EEG podataka, aplikacija pruža korisniku mogućnost da detaljno specificira parametre prikaza za izabrani eksperiment. Korisnik prvo bira spektre EEG signala koje želi da prikaže. Nakon toga, korisnik ima opciju da odabere da li želi prikaz mapiranja mozga za celokupan EEG signal ili za pojedinačne vremenske prozore unutar signala. Ovaj izbor omogućava prilagođavanje analize pri čemu prikaz celog signala nudi opšti pregled moždane aktivnosti tokom čitavog eksperimenta, dok prikaz po prozorima omogućava uvid u dinamiku aktivnosti u određenim trenucima, što može je korisno za identifikovanje promena u moždanoj aktivnosti koje se dešavaju tokom specifičnih zadataka ili stimulacija. Kada su odabir spektara i modalitet prikaza definisani, aplikacija generiše grafički prikaz koji može biti statička slika ili dinamički snimak, u zavisnosti od izabranih parametara. Ovaj prikaz vizuelno reprezentuje mapiranje mozga, ističući aktivne regione i njihove spektralne karakteristike.

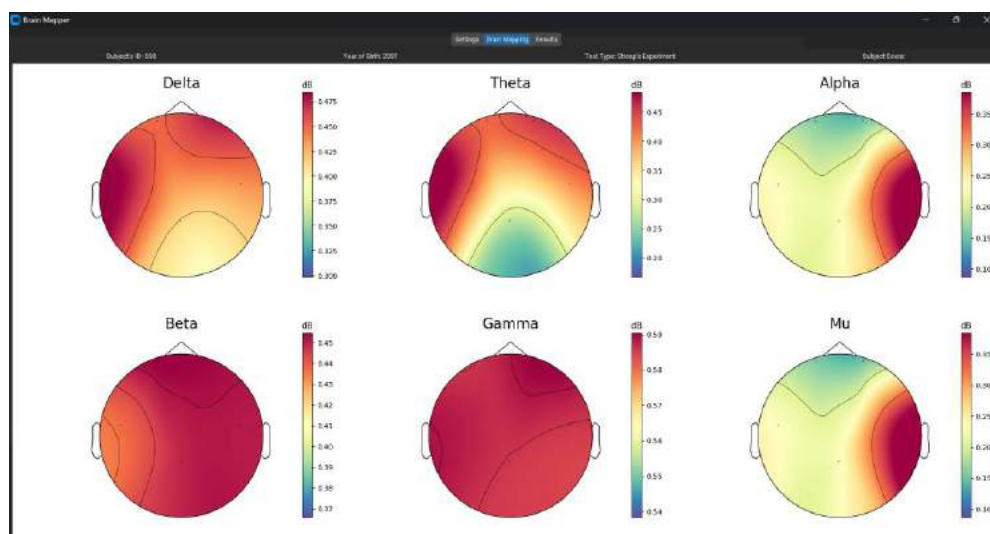
Dodatno, aplikacija sadrži poseban panel za prikaz rezultata koje je ispitanik postigao tokom eksperimenta. Ovaj informativni panel detaljno prikazuje ključne performanse ispitanika, uključujući njihovo reakciono vreme, broj tačnih odgovora i ukupan procenat tačnosti. Osim pomenutih parametara, aplikacija takođe prikazuje i procenjena kognitivna stanja ispitanika što uključuje pažnju, kognitivni stres i koncentraciju.

Čuvanje rezultata vizualizacije mapiranja mozga u aplikaciji je prilagođeno kako bi pružilo fleksibilnost i detaljno dokumentovanje. Korisnici imaju mogućnost da sačuvaju generisane slike ili snimke mapiranja mozga u različitim formatima, uključujući jpg, png, mp4 i gif. Izbor formata zavisi od tipa vizualizacije koja je izabrana: statične slike se mogu sačuvati kao jpg ili png fajlovi, dok se dinamički prikazi, poput onih koji prikazuju mapiranje mozga nad vremenskim prozorima, mogu sačuvati kao mp4 ili gif fajlovi. Jedna od ključnih karakteristika je da svaka sačuvana slika ili snimak ne samo da prikazuje rezultat mapiranja, već uključuje i dodatne informacije u zaglavlju. Ovo zaglavlje sadrži podatke o ispitaniku, kao što su identifikacioni kod i drugi relevantni podaci koji su zadržani nakon procesa anonimizacije. Takođe, zaglavlje sadrži sažetak rezultata koje je ispitanik ostvario tokom eksperimenta, uključujući reakciono vreme, broj tačnih odgovora i procenat tačnosti.

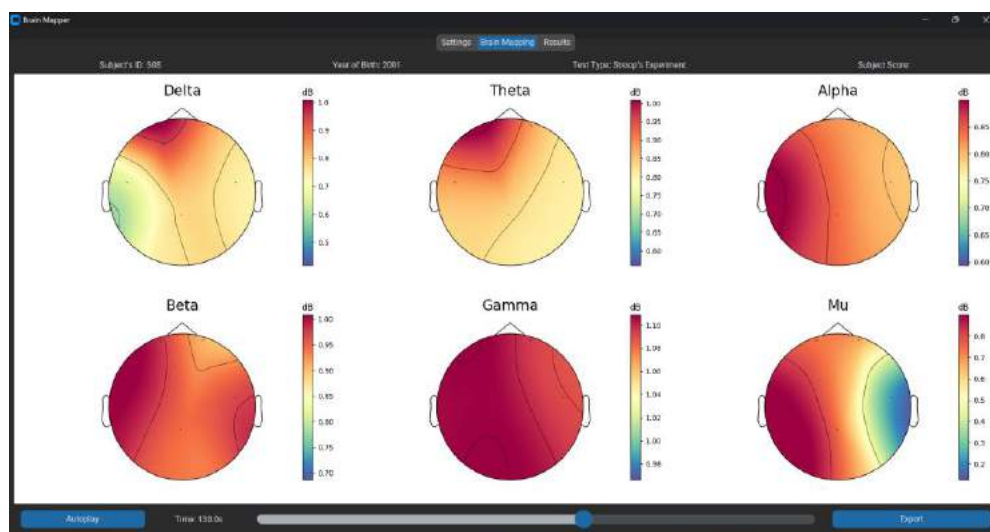
3. REZULTATI

Kada se uporede Slika 1 i Slika 2, rezultati pokazuju određene razlike u moždanoj aktivnosti različitih područja mozga. Tokom izvođenja Strupovog zadatka dolazi do promena u izraženosti (dominaciji) pojedinih moždanih talasa, što je u skladu sa ranijim istraživanjima [8]. Najmanja promena se uočava na gama talasima, koji se vezuju za složene kognitivne procese, te takvi rezultati impliciraju značajnu kognitivnu angažovanost u izvođenju ovog tipa zadatka. Ono što rezultati takođe pokazuju jeste da je praćenjem moždane aktivnosti u kontinuitetu omogućeno mapiranje mozga, što omogućava da se identifikuje kada i gde se svaki od ovih tipova talasa javlja. U zavisnosti od vremenske sekvence koja se analizira moguće je pratiti sve promene koje se događaju u zavisnosti od uspešnosti izvođenja zadatka, uslova izlaganja stimulusa (da li su kongruentni ili nekongruentni, pa postoji interferencija), pa čak i

redosleda izlaganja stimulusa koji mogu ukazivati na efekat uvežbavanja.



Slika 1 Slika mapiranja mozga nad celim signalom



Slika 2 Slika mapiranja mozga na intervalu od 130 do 140 sekundi



Slika 3 Rezultati strupovog eksperimenta i kognitivnih stanja ispitanika

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu trenutno dobijenih rezultata, može se zaključiti da razvijena aplikacija predstavlja koristan alat u polju analize neurofizioloških podataka. Njena primena otvara nove mogućnosti za integraciju u različite sisteme koji se koriste u neurologiji, eksperimentalnoj psihologiji i psihijatriji. Posebno je važno istaći da su rezultati dobijeni analizom kratkotrajnih vremenskih prozora EEG signala pružili uvid u dinamične promene moždane aktivnosti koje ranije nisu bile dovoljno istražene ili dokumentovane.

Ovo otkriće nagoveštava potencijal za dublje razumevanje kompleksnih kognitivnih procesa koji se odvijaju na brzim vremenskim skalama. U budućim istraživanjima, planira se detaljnije proučavanje ovih fenomena kroz multidisciplinarni pristup koji kombinuje tehnike elektrofiziološkog merenja, psihološke analize i principa biomedicinskog inženjerstva. Cilj ovih istraživanja će biti ne samo bolje razumevanje dinamike moždane aktivnosti, već i razvoj novih metoda i alata koji mogu doprineti unapređenju dijagnostičkih i terapijskih pristupa u kliničkoj praksi. „Brain Mapper“ stoga predstavlja važan korak u težnji ka sveobuhvatnijem i preciznijem razumevanju moždane funkcije, što otvara put za nove inovacije u neuroznanosti i srodnim disciplinama.

5. REFERENCE

- [1] I. Zyma *et al.*, "Electroencephalograms during mental arithmetic task performance," *Data*, vol. 4, no. 1, p. 14, 2019.
- [2] C. M. MacLeod, "Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review," *Psychological bulletin*, vol. 109, no. 2, p. 163, 1991.
- [3] A. Galván, "Neural plasticity of development and learning," *Human brain mapping*, vol. 31, no. 6, pp. 879-890, 2010.
- [4] R. T. Schirrneister *et al.*, "Deep learning with convolutional neural networks for EEG decoding and visualization," *Human brain mapping*, vol. 38, no. 11, pp. 5391-5420, 2017.
- [5] Emotiv. "Emotiv Insight Technical Specifications." <https://emotiv.gitbook.io/insight-manual/introduction/technical-specifications> (accessed).
- [6] CustomTkinter. (2023). <https://github.com/TomSchimansky/CustomTkinter?tab=MIT-1-ov-file>. [Online]. Available: <https://customtkinter.tomschimansky.com/>
- [7] Emotiv. "EmotivPRO User Manual." <https://emotiv.gitbook.io/emotivpro-v3/> (accessed).
- [8] R. Atchley, D. Klee, and B. Oken, "EEG frequency changes prior to making errors in an easy stroop task," *Frontiers in human neuroscience*, vol. 11, p. 521, 2017.