Зборник радова Факултета техничких наука, НовиСад

**УДК: 61:62**
**ДОИ: https://doi.org/10.24867/35RB02Soknic**

# Мапирање мозга: технике и примена

# *Brain Mapping: Techniques and Applications*

Адријана Сокнић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

**Студијски програм – БИОМЕДИЦИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО**

**Кратак садржај –** *Циљ овог рада је да пружи преглед савремених техника неуроимиџинга и њихове улоге у мапирању можданих функција, са осврtом на клиничку примену и значај приликом дијагностике и рехабилитације..*
**Кључне речи:** *Мапирање мозга, ЕЕГ, фМРИ, ЦТ*

**Abstract** – *The aim of this paper is to provide an overview of modern neuroimaging techniques and their role in mapping brain functions, with a particular focus on their clinical applications and importance in the diagnosis and rehabilitation.*

**Keywords:** *Brain mapping, fMRI, EEG, CT*

---

**НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Платон Совиљ ред. проф.**

## 1. УВОД

Мапирање мозга је скуп техника у неуронаукама које се заснивају на мапирању биолошких количина или својстава на просторне репрезентације људског или животињског мозга, чиме се добијају мапе. Оно се, такође, дефинише као проучавање анатомије и функције мозга или кичмене мождине кроз примену различитих метода. Све неуроимиџинг технике сматрају се делом мапирања мозга. Ове технике често комбинују слике мозга са додатним анализама или подацима, попут параметара понашања пројектованих на одређене регије мозга. Мапирање повезаности можданих кругова је од суштинског значаја за наше разумевање функција људског мозга. Различити неуролошки и ментални поремећаји су повезани са поремећајем повезаности мозга.

## 2. ИСТОРИЈАТ

Током протеклих 30 година, когнитивна неуронаука развила се као важна област у оквиру неуронаука, која је знатно утицала на област мапирања мозга. Ова неуронаука комбинује експерименталне стратегије когнитивне психологије са различитим техникама како би испитала на који начин функције мозга подржавају менталне активности. Главне технике истраживања код здравих људи укључују функционално снимање мозга, попут позитронске емисијске томографије (PET) и функционалне магнетне резонанце (fMRI), као и техника попут електроенцефалографије (EEG), електрокортикографије (ECoG*)*, магнетоенцефалографије (MEG) и у новије време, оптичког снимања блиском инфрацрвеном спектроскопијом (NIRS) [1]. Данас имамо мноштво техника које нам омогућавају да меримо функцију мозга код здравих људи свих узраста, више пута и безбедно, током значајних временских периода. Свака од ових техника има своје безбедносне аспекте и свака има карактеристична ограничења у погледу просторне и временске резолуције. Ипак, оне нам омогућавају да генеришемо податке који су прецизнији и који имају обећање да ће постати знатно бољи у блиској будућности.

## 3. АНАТОМИЈА И ФИЗИОЛОГИЈА МОЗГА

### 3.1. Основна подела мозга и његове функције

Мозак је орган који служи као центар нервног система код свих кичмењака и већине бескичмењака. Састоји се од нервног ткива и смештен је у глави, обично у близини органа за специјалне чулне функције као што су вид, слух и мирис. Као најспецијализованији орган, одговоран је за пријем информација од сензорног нервног система, обраду тих информација (мисли, когниција и интелигенција) и координацију моторне контроле (мишићна активност и ендокрини систем). Сви мозгови кичмењака могу се ембрионално поделити на три дела: предњи мозак, који се даље дели на теленцефалон и диенцефалон, средњи мозак и задњи мозак, који се дели на метенцефалон и миеленцефалон. Кичмена мождина, која директно интерагује са соматским функцијама испод главе, може се сматрати каудалним продужетком миеленцефалона унутар кичменог стуба. Заједно, мозак и кичмена мождина чине централни нервни систем свих кичмењака. Код људи, церебрални кортекс садржи између 14 и 16 милијарди неурона. Сваки неурон је повезан синапсама са неколико хиљада других неурона, обично комуницирајући међусобно путем изданака сличних коренима, који се зову дендрити, и дугих влакнастих изданака који се називају аксони, а који су обично мијелинизовани и носе брзе микро-електричне сигнале, познате као акциони потенцијали, до циљаних ћелија у другим деловима мозга или удаљеним деловима тела. Овај комплексни мрежни систем неурона, са дендритима и аксонима, чини основу за функционалну организацију мозга, при чему сива и бела маса играју кључне улоге. Бела маса се односи на области централног нервног система (CNS) које се углавном састоје од

мијелинизованих аксона, који се такође називају трактовима [2,3].

### 3.2. Повезивање функције и структуре

Технологије за снимање мозга све чешће се користе за стварање високорезолутивних референтних мапа мождане структуре и функције. Савремена научна открића зависе од упоређивања нових мапа (нпр. активација током задатака, групне структурне разлике) са овим референтним мапама. Иако су недавне иницијативе за дељење података повећале доступност оваквих можданих мапа, подаци се често деле у различитим координатним системима или просторима, што отежава систематична и тачна поређења међу њима. Емпиријске студије су открилe преклапање између структурних и функционалних веза у стању мировања, тј. присуство и структурне и функционалне везе између две регије мозга. Међутим, ово преклапање није савршено, јер функционалне интеракције између можданих регија постоје и у одсуству директних структурних веза, а ни индиректне структурне везе дужине два корака не могу у потпуности објаснити ове функционалне везе. Штавише, преклапање између структурних и функционалних веза зависи и од временске скале која се разматра. Када су функционалне везе процењене из већих временских оквира, оне се снажно преклапају са основним структурним везама. Међутим, за мање временске оквире може доћи до разлика између структурне и функционалне мреже због расподељених кашњења између неуронских популација, што узрокује пролазне фазне десинхронизације [4,5]. Према томе, разумевање односа између функције и структуре мозга захтева примену различитих експерименталних техника које омогућавају увид у мождану активност и повезаност. Не постоји само једна метода која може у потпуности обухватити сложеност можданих мрежа, због чега се у пракси користе комбиновани приступи.

## 4. ТЕХНИКЕ МАПИРАЊА МОЗГА

### 4.1. Функционалне технике

Функционално снимање представља проучавање функције људског мозга на основу анализе података добијених техникама као што су електроенцефалографија, магнетоенцефалографија, функционална магнетна резонанца, позитронска емисиона томографија или оптичко снимање. Циљ је разумевање рада мозга у смислу његове физиологије, функционалне архитектуре и динамике [6].

### 4.2. Електроенцефалографија

Електроенцефалографија (EEG) је далеко најчешћа неинвазивна метода за мерење електричне активности мозга. Она мери потенцијале мозга путем различитих врста електрода, које се постављају на скалп уз помоћ EEG капице. EEG је техника која се показала корисном када је у питању праћење стања или предвиђање развоја болести, као што је нпр. епилепсија. Пароксизмална активност расте како се приближава напад и релативно је тиха у периоду између напада. Антиконвулзивни лекови не спречавају дисритмију, али је до одређене мере смањују. Периодично праћење EEG-а често може открити антиконвулзивно дејство терапијског средства на пацијента. Дисритмија повезана са латентним конвулзивним поремећајима може се детектовати снимањем електроенцефалограма током сна. Код психомоторне епилепсије, шиљци који су потиснути у будном стању појављују се у предњим деловима темпоралних режњева током сна [7,8].

### 4.3. Функционална магнетна резонанца

Функционална магнетна резонанца (fMRI) је широко коришћена техника за испитивање функције мозга, иако механизми на основу којих се производе информације нису у потпуности схваћени. Експеримент fMRI зависи од техника и методологија развијених у различитим дисциплинама, што га чини мултидисциплинарним. За клиничке примене, једноставно мапирање критичних сензорних и моторичких функција може се лако извршити са субјектима који леже у отвору магнета где обављају једноставне задатке или доживљавају сензорне стимулусе у блоковима. Ово је примарни приступ за процену мозга пацијената пре неурохирургије или радиотерапије. У неколико центара развијени су стандардни протоколи који омогућавају ефикасно мапирање слушних, визуелних, моторичких и језичких подручја како би се хирурзи информисали о положајима критичних функционалних подручја. fMRI подаци се лако могу интегрисати са неурохируршким процедурама вођеним сликом [9].

### 4.4. Магнетоенцефалографија

Магнетоенцефалографија (MEG) је неинвазивна техника која може прецизно да сними динамичке просторно-временске обрасце мозга мерењем магнетних поља која настају услед неуронске активности у милисекундама. Посматрања динамике мозга коришћена су у когнитивној неуронауци, дијагнози неуролошких болести и интерфејсу мозак-рачунар (BCI) [10].

### 4.5. Структурне технике

Поделу између структурног и функционалног снимања је тешко направити јер су структура и функција често нераскидиво испреплетене у мозгу. Дефиниције функционалног снимања су различите и често широке и увек ће бити произвољне до одређене мере. На основу биолошких разматрања, функционално снимање се може сматрати методом која пружа динамичке физиолошке информације, док структурно снимање пружа статичке анатомске информације [11].

### 4.6. Компјутерска томографија

Током последњих деценија, сведоци смо сталног раста броја прегледа компјутеризованом томографијом (CT). Нови технолошки развој, шира доступност потребног хардвера и софтвера, као и захтеви лекара и пацијената, главни су разлози за повећану клиничку примену CT-а. Иако се магнетна резонанца изузетно развила током последњих деценија, посебно за снимање главе, и постала је доступнија, CT је и даље основна метода снимања главе за вишеструке индикације, укључујући CT без контраста (NCCT) код церебралне исхемије и можданог удара, процену

интракранијалног крварења (ICH), главобоље или акутне неуролошке дефиците, као и за дијагностику прве линије код губитка свести и процене трауме у хитним случајевима. Стога је CT главе неопходан за брзу и тачну дијагнозу, оптимизовано управљање пацијентима и лечење. Поред магнетне резонанце, која се генерално користи у мање акутним клиничким условима, компјутерска томографија чини велики део дневног неурорадиолошког оптерећења у снимању главе [12].

### 4.7. Иновативне и хибридне методе

Тим са Станфорд универзитета развио је нови алгоритам вештачке интелигенције – топографску дубоку вештачку неуронску мрежу (TDANN) – која користи само два правила: натуралистичке сензорне улазе и просторне услове на везама. За разлику од конвенционалних неуронских мрежа, TDANN укључује просторне услове, распоређујући своје виртуалне неуроне на дводимензионалном "кортикалном листу" и захтевајући да суседни неурони деле сличне одговоре на сензорне улазе. Како је модел учио да процесуира слике, ова топографска структура је довела до формирања просторних мапа, реплицирајући начин на који се неурони у мозгу организују као одговор на визуелне стимулансе [13].

## 5. КЛИНИЧКЕ ПРИМЕНЕ

Мапирање мозга отворило је важне перспективе за неурофизиолошку евалуацију пацијената, дискриминацију ефеката лекова на мозак и проучавање односа између мозга и понашања. У последњим годинама, уз појаву рачунарске анализе EEG-а, појавила се нова технологија која обећава да ће променити области неурологије, психијатрије, психофармакологије и неуропсихијатрије: мапирање мозга.

### 5.1. Епилепсија

Епилепсија је хронични неуролошки поремећај дефинисан појавом најмање два непровоцирана напада у размаку од више од 24 сата, који су резултат абнормалне прекомерне или синхроне неуронске активности у мозгу. У хитним случајевима, када пацијент има новонастале нападе, CT главе без контраста је погодан за дијагнозу или брзо искључивање неколико животно угрожавајућих стања, као што су епидурални хематом или субарахноидално крварење. *MRI* захтева више времена и стога је мање погодан за ове патологије у акутном стању. fMRI се углавном користи у преоперативној евалуацији пацијената са епилепсијом отпорном на лекове како би се локализовале елоквентне области мозга, као што су језик и моторни кортекси [14].

### 5.2. Артериовенозне малформације

Артериовенска малформација (AVM) је абнормални сплет проширених крвних судова који ствара директну везу између артерија и вена, заобилазећи капиларну мрежу и реметећи нормалан проток крви. Конвенционална церебрална ангиографија је златни стандард у процени ангиоархитектуре AVM, док друге методе снимања које се користе за процену симптома који нису специфични за AVM укључују CT, CT ангиографију, MRI и магнетну резонантну ангиографију. Свака техника снимања нуди своју јединствену снагу: CT пружа боље васкуларне детаље AVM, док магнетна резонанца пружа бољу визуелизацију околних структура поред нидуса. Штавише, MRI може да детектује тромбозиране крвне судове као хиперинтензивне сигнале и покаже свако повезано крварење у различитим фазама еволуције [15].

### 5.3. Тумори

Тумор на мозгу је раст абнормалних ћелија у ткивима мозга, које могу бити бенигне (неканцерозне) или малигне (канцерозне). У стварној клиничкој пракси, конвенционална магнетна резонанција је први тест за пацијенте са сумњом на глиом. MRI пружа прелиминарне информације о тумору, укључујући локацију, величину и границе тумора. PET-CT снимање је од виталног значаја за функционално снимање у дијагнози глиома. У комбинацији са анатомским информацијама које пружа конвенционална магнетна резонанца, PET-CT пружа важну основу за осетљивији третман глиома. Међутим, осетљивост на CT прегледу за мале туморе је прилично ниска [16].

### 5.4. Неуродегенеративне болести

Неуродегенеративне болести су хетерогена група хроничних, прогресивних поремећаја које карактерише постепени губитак структуре или функције неурона, са последичном дисфункцијом нервног система. Најчешће неуродегенеративне болести укључују алцхајмерову болест, паркинсонову болест, амиотрофичну латералну склерозу (ALS) и хантингтонову болест, а свака од њих укључује селективну рањивост специфичних популација неурона. Нова технологија у снимању донела је велику промену у снимању мозга и била је корисна у раном откривању, као и праћењу неуродегенеративних болести. Међу техникама, позитронска емисиона томографија, функционална магнетна резонанца и дифузионо тензорско снимање (DTI) могу се сматрати најнапреднијим. Све ове технике пружају информације о структурној и функционалној организацији мозга и помажу у откривању раних промена које се јављају пре манифестације болести [17].

## 6. ИЗАЗОВИ И ОГРАНИЧЕЊА

Упркос брзом развоју техника снимања структура мозга високе резолуције и велике запремине, бројна методолошка и техничка ограничења и даље представљају значајне изазове за поуздано аутоматизовано мапирање мозга. Код микроскопије и метода снимања високе резолуције, чак и мање разлике у припреми ткива, бојењу, сечењу и подешавањима инструмената могу довести до значајних варијација у квалитету слике, артефаката и губитка релевантних региона од интереса. Ови фактори чине примену аутоматизованих алгоритама посебно тешком и смањују тачност класификације и анализе. Још један проблем је ограничено видно поље код снимања високе резолуције, што често резултира непотпуним

покривањем запремине мозга и компликује регистрацију узорака са референтним мозговима. Иако постоје методе интерполације и импутације недостајућих података, оне уносе додатне неизвесности у анализу. Код функционалног неуроимиџинга, посебно код функционалне магнетне резонанце (fMRI), артефакти покрета су значајан извор грешака, посебно код пацијената са неуролошком дисфункцијом који имају потешкоћа да остану мирни или поуздано обављају задатке током снимања.

## 7. БУДУЋНОСТ

Како се приближава ера великих података (*big data*), један све већи фокус је на хармонизацији неуроимиџинга, когнитивних и клиничких мера у различитим институцијама, истраживачким групама и узорцима. Један важан циљ је повећање разумевања начина на који повезаност можданих мрежа подржава когнитивне процесе, међутим, способност да се обједине подаци из различитих узорака како би се спровеле анализе у стилу великих података је ограничена ако метод за процену когниције није стандардизован у свим студијама. Са растућим прихватањем RDoC приступа, уложени су напори да се идентификују специфични неурокогнитивни задаци који испитују когнитивне домене од интереса [18]. Биолошки фактори могу имати дубок утицај на развојне студије и важно је размотрити како се могу укључити у будуће студије деце и адолесцената.

## 8. ЗАКЉУЧАК

Крајњи закључак овог рада је да се мапирање мозга не може схватити као статички процес, нити се може једноставно повезати са функцијом са одређеним можданим регионима. Већина можданих функција је резултат интеракције дистрибуираних мрежа, чија организација варира у зависности од задатка, стања и индивидуалних разлика. Стога, без одговарајућег теоријског оквира, чак ни технике са високом просторном или временском резолуцијом не могу гарантовати свеобухватније разумевање можданих процеса.

## 9. ЛИТЕРАТУРА


[1] R. A. Poldrack, J. A. Mumford and T. E. Nichols, Handbook of Functional MRI Data Analysis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.

[2] R. D. Fields, “White matter matters,” Scientific American, vol. 298, no. 3, pp. 54–61, 2008.

[3] A. M. Helmenstine, “Parts of the brain and their functions,” ScienceNotes.org, https://sciencenotes.org. [Приступљено Dec. 23, 2025].

[4] R. D. Markello, J. I. Hansen and Z.-Q. Liu, “Neuromaps: Structural and functional interpretation of brain maps,” bioRxiv, 2022.

[5] J. Maier, P. Tewarie, A. Hillebrand, L. Douw, B. W. van Dijk, S. M. Stufflebeam and P. Van Mieghem, “Mapping the structural core of human brain networks to functional connectivity,” Brain Connectivity, vol. 6, no. 4, pp. 298–311, 2016.

[6] O. Gosseries, A. Demertzi, Q. Noirhomme, J. Tshibanda, M. Boly, M. Op de Beeck, R. Hustinx, P. Maquet, E. Salmon, G. Moonen, A. Luxen, S. Laureys and X. De Tiège, “Functional neuroimaging (fMRI, PET and MEG): What do we measure?” Revue Médicale de Liège, vol. 63, no. 5–6, pp. 231–237, 2008.

[7] G. R. Müller-Putz, “Electroencephalography,” in Handbook of Brain–Computer Interfaces. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018, pp. xxx–xxx.

[8] A. B. Bindman, A. Chattopadhyay, D. H. Osmond, W. Huen and P. Bacchetti, “Effect of managed care on preventable hospitalization rates in California,” Health Services Research, vol. 40, no. 1, pp. 19–38, 2005.

[9] N. K. Logothetis, “Principles and applications of functional magnetic resonance imaging in the human brain,” Journal of Clinical Investigation, vol. 125, no. 3, pp. 123–132, 2015.

[10] A. L. Fred et al., “A concise introduction to magnetoencephalography (MEG) and its clinical applications,” Brain Sciences, vol. 12, no. 6, Art. no. 756, 2022.

[11] J. Ashburner and K. J. Friston, “Unified segmentation,” NeuroImage, vol. 26, no. 3, pp. 839–851, 2005.

[12] M. Dickmeier, N. Sollmann, K. Kupfer et al., “Computed tomography of the head,” Clinical Neuroradiology, vol. 33, pp. 591–610, 2023.

[13] V. Ramachandran, “Neuroscientists use artificial intelligence to simulate how the brain understands the visual world,” Stanford Neurosciences Institute, May 28, 2024.

[14] A. M. Goodman and J. P. Szaflarski, “Recent advances in neuroimaging of epilepsy,” Neurotherapeutics, vol. 18, no. 2, pp. 811–826, 2021.

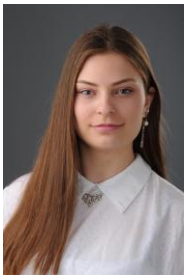
[15] N. Ajiboye et al., “Cerebral arteriovenous malformations: Evaluation and management,” Scientific World Journal, vol. 2014, Art. no. 649036, 2014.

[16] A. A. Pruitt, “Brain metastases: Neuroimaging,” in Handbook of Clinical Neurology, vol. 149. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018, pp. 89–112.

[17] S. K. Chandrasekar et al., “Advanced imaging techniques (PET, fMRI, DTI) in early detection of neurodegenerative diseases: A systematic review,” Health Science Reports, early access, 2025.

[18] L. Q. Uddin and K. H. Karlsgodt, “Future directions for examining brain networks in neurodevelopmental disorders,” Journal of Clinical Child & Adolescent Psychology, vol. 47, no. 3, pp. 483–497, 2018.


**Кратка биографија:**




**Адријана Сокнић** рођена је у Новом Саду 2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Биомедицинског инжењерства – Мозак-рачунар интерфејс одбранила је 2026. год.
**Контакт**: adrijanasoknic9@gmail.com