

NAPREDNE TEHNIKE OBRADNE I ANALIZE SIGNALA

PRIMJENE U ELEKTROTEHNICI I MEDICINI



UNIVERZITET U SARAJEVU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

NAPREDNE TEHNIKE
OBRADE I ANALIZE
SIGNALA

PRIMJENE U ELEKTROTEHNICI I MEDICINI

SAMIR AVDAKOVIĆ
IBRAHIM OMERHODŽIĆ
MAJA MUFTIĆ DEDOVIĆ

SARAJEVO, 2024.

SAMIR AVDAKOVIĆ
IBRAHIM OMERHODŽIĆ
MAJA MUFTIĆ DEDOVIĆ

NAPREDNE TEHNIKE OBRADE I ANALIZE SIGNALA
PRIMJENE U ELEKTROTEHNICI I MEDICINI

Recezeni:

1. Dr. sc. Aljo Mujčić, redovni profesor Univerziteta u Tuzli, Fakultet elektrotehnike, doktor tehničkih nauka, područje: Tehničke nauke, polje: Elektrotehnika, grana/naučna oblast: Telekomunikacije,
2. Dr. sc. Enra Suljić, redovni profesor Univerziteta u Sarajevu, Medicinski fakultet, doktor medicinskih nauka, područje: Medicinske nauke, Naučna oblast: Neurologija,
3. Dr. sc. Adnan Mujezinović, vanredni profesor Univerziteta u Sarajevu, Elektrotehnički fakultet, doktor tehničkih nauka, područje: Tehničke nauke, polje: Elektrotehnika, grana/naučna oblast: Elektroenergetika.

Izdavač : Univerzitet u Sarajevu, Elektrotehnički fakultet.

Za izdavača: Prof. dr. Jasmin Velagić, dekan

Tiraž: 100 primjeraka

Odlukom Senata Univerziteta u Sarajevu broj: 01-8-64/24 od 18.12.2004. godine data je saglasnost da se knjiga *Napredne tehnike obrade i analize signala primjene u elektrotehnici i medicini* objavi kao univerzitetsko izdanje.

CIP - Katalogizacija u publikaciji

Nacionalna i univerzitetska biblioteka Bosne i Hercegovine, Sarajevo

ISBN 978-9926-575-02-1

CIP zapis dostupan u COBISS sistemu Nacionalne i univerzitetske biblioteke BiH pod ID brojem 62733062

Fotokopiranje ili umnožavanje bilo koji način, ili ponovno objavljivanje knjige - u cjelini ili u dijelovima – nije dozvoljeno bez pismene saglasnosti autora.

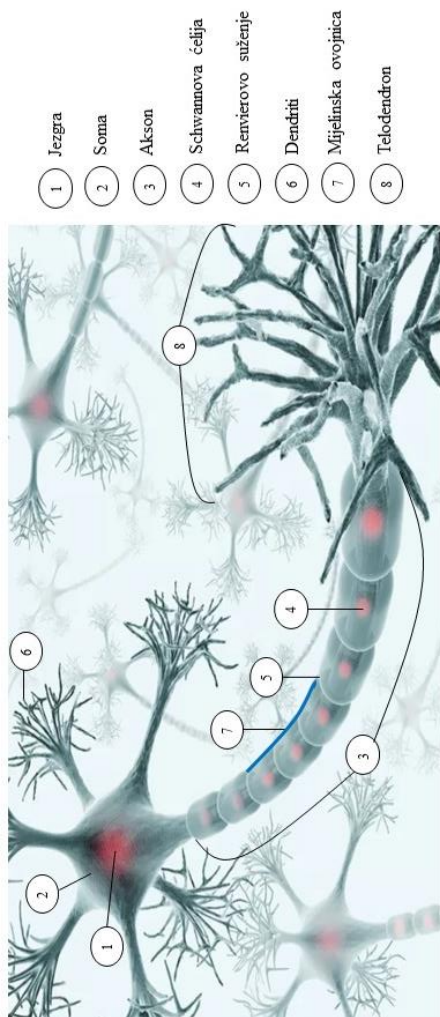
8. Epilepsija – identifikacija i klasifikacija

Epilepsija je bolest koja ima veoma dugu medicinsku historiju i identifikuje se još od početka čovječanstva. Danas predstavlja jednu od najčešćih hroničnih neuroloških bolesti od koje boluje oko 1% ljudi na svijetu. Uz glavobolju je najčešća bolest nervnog sistema. Nije vezana za određenu dob, ali se najčešće očituje prije dvadesete godine života. U svijetu danas od epilepsije boluje oko 50 miliona ljudi dok se procjenjuje da je u BiH oko 35 hiljada oboljelih. Epilepsiju obično karakterizira pojava spazama i epileptičkih napada koji mogu izgledati potpuno različito. Dok kod nekih bolesnika, i u pojedinim slučajevima oni mogu trajati od nekoliko sekundi, u nekim drugim situacijama traju do pola sata, a može se pojaviti i gubitak svijesti. U ovom poglavlju predstavljeni su osnovni pojmovi o epilepsiji, te rezimirani višegodišnji rezultati istraživanja autora koji se odnose na analizu EEG signala zasnovanih na naprednim tehnikama obrade i analize signala prikazanim u Ref. [71-75].

8.1. Uvod – osnove o građi mozga

Procjenjuje se da je mozak građen sa oko 100 milijardi neurona, koji prenose električne impulse, odnosno imaju svojstvo primanja i prenošenja živčanih podražaja sa jednog neurona na drugi uz pomoć

neurotransmitera, odnosno hemijskog prenosnika, prelaze s neurona na neuron.



Slika 8.1. a) Shematski prikaz neurona – osnovne jedinice mozga, sa elementima njegove građe te prikazom interkonekcija sa drugim neuronima (u pozadini) (preuzeto i modificirano sa <https://www.verywellmind.com/>)

Na slici 8.1 dat je šematki prikaz neurona, dok je na slici 8.2 dat prikaz interneuronske konekcije dvije nervne ćelije, bazirano na fotografiji načinjenoj elektronskim mikroskopom. U centralnom dijelu se vidi prenos 'nervnog impulsa' između dendrita jedne i aksonalnog završetka druge ćelije. Nervna stanica (neuron) građena je od dendrita, tijela stanice i aksona (<https://hr.wikipedia.org/wiki/Neuron>):

- ✓ Dendriti – kraći produžeci koji s osjetnih organa ili drugih živčanih stanica dovode živčano uzbuđenje na tijelo stanice. Na završecima se nalazi dendritska spina ili trn radi boljeg sinaptičkog kontakta s drugim neuronima.
- ✓ Tijelo stanice – soma, sastoji se od:
 - jezgra (nucleus) - centar neurona okružen jezgrenom membranom. U njoj se nalaze:
 - kromosomi (nosioci nasljeđa):
 - DNK – deoksiribonukleinska kiselina – "pamćenje vrste", genetski kod
 - RNK – ribonukleinska kiselina – "pamćenje jedinke"
 - jezgrica (nucleolus)
 - proteini - služe kao enzimi, a oni kao katalizatori
 - mitohondriji proizvode ATP (adenozin tri-fosfat) koji je izvor energije u stanici
 - Golgijev aparat:
 - neurofibrile i mikrotubule
 - endoplazmatski retikulum:
 - ❖ hrapavi - (Nisslova tjelešca) sadrži ribosome i služi za sintezu bjelančevina
 - ❖ glatki - služi za transport supstance po tijelu stanice.

Akson je obično duži produžetak neurona, od nekoliko mikrometara do jednog metra. Počinje na tijelu stanice s aksonskim brežuljkom. Funkcija mu je prenositi živčane impulse s tijela stanice na druge živčane stanice ili izvršne organe – mišićna vlakna ili žlijezde. Akson je često obavijen mijelinskom ovojnicom u kojoj su Schwannove stanice. Na aksonu postoje tzv. ranvierova suženja – mjesto prekinuća mijelinske ovojnice (radi skokovite i time brže kondukcije akcijskog potencijala). Na kraju aksona nalaze se teledendroni sa završnim kvržicama u kojima se nalaze vrećice s neurotransmiterima (neuroprenosnicima) (<https://hr.wikipedia.org/wiki/Neuron>).

Nervni impuls je zasebna električna pojava, uzrokovan je nekim posebnim svojstvima nervnog tkiva, vezanim uz njegovu spontanu aktivnost. Električni zapis nervnog impulsa nazvan je akcijski potencijal. Nervni impuls je val depolarizacije što nastaje u aksonskom brežuljku i duž aksona putuje konstantnom brzinom i amplitudom (bez opadanja - nedekrementno vođenje) sve do presinaptičkih završetaka aksona. Čelijska membrana neurona je električno nabijena (u mirovanju je izvana pozitivno nabijena, a iznutra negativno). Električni impulsi koje stvaraju neuroni su izazvani u odgovoru na stimulaciju, koja mijenja potencijal mirovanja membrane.

Električni impuls izazove promjenu električnog naboja membrane neurona koja ovisi o koncentraciji pojedinih iona u ćelijskoj i vanćelijskoj tekućini. Neuroneuralna sinapsa je spoj dva neurona i služi za prijenos električnog impulsa sa jednog neurona na drugi, koji se time podraži. Da bi električni impuls prešao sa jednog neurona na drugi služe nam neurotransmiteri.



Slika 8.2. Shematski prikaz interneuronske konekcije dvije nervne ćelije, bazirano na fotografiji načinjenoj elektronskim mikroskopom. U centralnom dijelu se vidi prenos 'nervnog impulsa' između dendrita jedne i aksonalnog završetka druge ćelije (<https://fineartamerica.com/>)

Neurotransmiteri su tvari prijenosnici električnog impulsa koji se izlučuju u sinapsi iz prvog neurona. Na membrani drugog neurona su tvari prijemnici ili receptori za neurotransmitere. Kada se neurotransmitter 'ulovi' za receptor prenese se električni impuls sa prvog na drugi neuron i on se podraži. Neurotransmiteri su različite tvari kao npr. acetilholin, serotonin, dopamin, noradrenalin i dr. Za svaku vrstu neurotransmitera postoji odgovarajući receptor na membrani drugog neurona u sinapsi.

Međutim, kod pojave epileptičkog napada, električni impulsi se ne odašilju na uobičajen način kao kod osoba koje ne boluju od epilepsije. Epileptička nervna stanica odašilje impulse ubrzano ili u nizovima, za razliku od normalnih koje to čine sporo ili miruju, što je i glavni uzrok pojave epileptičkog napada. Također, mogu se uključiti manje ili veće skupine neurona čija lokalizacija određuje epileptični napad.

Budući da nastaju na taj način, postoje različite vrste epileptičnih napada. Poremećaj kod jedne nervne stanice nije dovoljan da bi izazvao epileptični napad nego do toga dolazi tek kada se poremeti funkcionisanje većeg broja nervnih stanica radi čega dolazi do gubitka kontrole, a što je primijetno na elektroencefalogramu. Isto tako, svaka nervna stanica ili skup nervnih stanica može postati epileptičnom nervnom stanicom i time uzrokovati epileptički napad što dovodi do raznih poremećaja ili prekida aktivnosti radnje za koju je skup nervnih stanica zadužen.

Npr., ako se radi o osjetnim stanicama u trbuhu, može doći do čudnog osjeta u želucu koji se širi do usta. U slučaju da su uključene stanice vezane za pamćenje, dolazi do poremećaja učenja kao i gubitka svijesti koji je praćen pomanjkanjem sjećanja na ono što se dogodilo.

8.2. Definicija epilepsije

Epilepsija je hronični poremećaj uzrokovan nekontrolisanom električnom aktivnošću neurona mozga. Predstavlja jednu od vodećih neuroloških bolesti, a najčešće se javlja u dječijoj dobi. Epilepsija dolazi od grčke riječi i ima iste korijene kao riječ epilambanein, što znači biti zgrabljen, napadnut ili atakiran. Tokom vremena postojali su mnogobrojni nazivi za epilepsiju, a neki od njih su Morbus Commitilais, Morbus Sacer, Mal cadouc, Morbus lunaticus itd., a koji ukazuju na različite hipoteze o porijeklu te bolesti. Historijski zapisi nam ukazuju kako su već nekada davno ljudi bolovali od epilepsije. Tako je u Mezopotamiji oko 2000 godina p.n.e. zabilježen najstariji opis epileptičnog napada na akademskom jeziku. Nadalje, Babilonci su tvrdili da su osobe koje boluju od epilepsije opsjednute zlim duhovima. Nerazumijevanje za ovu bolest moralo se trpjeti stoljećima, od rimskog vjerovanja u njezinu zaraznost pa do sterilizacije ljudi koji su bolovali od epilepsije u nacističkoj Njemačkoj da bi se spriječio njezin prijenos na naredne generacije. John Hughlings Jackson je 1873. godine dao temeljno obrazloženje prema kojem je uzrok epilepsije električno izbijanje u mozgu čija klinička slika ovisi o lokaciji izbijanja. Tek će izumom EEG-a Hans Berger 1929. godine dati konačnu potvrdu njegovog zapažanja.

8.2.1. Definicija

Danas se epilepsija definira na različite načine, a opšteprihvaćena definicija je od *International League Against Epilepsy* (ILAE) koja opisuje epilepsiju kao stanje koje uključuje hronične, ponavljane epileptične napade odnosno preciznije:

- ✓ Najmanje dva neprovocirana (ili refleksna) odvojena napada koji se javljaju u razdoblju dužem od 24 sata.
- ✓ Jedan neprovocirani (ili refleksni) napad i vjerovatnost novih napada, slično generalnom riziku (najmanje

60%), nakon dva neprovocirana napada, u narednih deset godina.

- ✓ Dijagnoza epileptičnog sindroma.

Pod epileptičnim napadom se podrazumijeva prolazna pojava simptoma i/ili znakova koji su posljedica nenormalne prekomjerne ili hipersinhronne aktivnosti neurona u mozgu. ILAE klasifikacija epilepsije iz 2017. godine definirala je tri dijagnostička nivoa uključujući tip napada, tip epilepsije i sindrom epilepsije.

Sindromi epilepsije prepoznati su kao različiti elektroklinički entiteti mnogo prije nego što je 1985. godine predložena prva ILAE klasifikacija epilepsija i epileptičnih sindroma.

Višestruki neprovocirani napadi su kriteriji za epilepsiju. Napadi su različite dužine i mogu trajati do pola sata, ali se mogu produžiti i u seriju napada i trajniju formu - *epileptični status*. Epileptični napadi mogu uključivati pojave gubitka svijesti, grčeva tijela, gubitka kontrole sfinktera, i nerijetko neugodna psihička iskustva. Nepredvidljivost pojave napada uzrokuje neprestanu brigu pacijenta, porodice ali i socijalne okoline te samim tim epilepsija ima značajan impakt na njihov socijalni, psihološki, obrazovni i kulturalni život. Ovi faktori, iako se individualno razlikuju, imaju značajan utjecaj na svakodnevnu kvalitetu života pacijenta s epilepsijom.

Oko 1% populacije ima epilepsiju. U Kantonu Sarajevo na godišnjem nivou je 70-80 novodijagnosticirane djece sa epilepsijom. Oko trećina pacijenata sa epilepsijom će razviti medikamentozno rezistentnu epilepsiju – odnosno refraktornu epilepsiju (MRE) otpornu na liječenje lijekovima što znači da pacijenti i dalje imaju napade uprkos uzimanju najmanje dvije različite vrste antiepileptičkih lijekova u adekvatnim dozama. Teške forme epilepsije tokom razvoja štetno utiču na intelektualni i socijalni razvoj. Ponavljani napadi kod djece mogu utjecati na poremećaj ponašanja i kogniciju (mišljenje, pamćenje, pažnja, emocije...).

8.2.2. Prevalencija epilepsije

Učestalost (prevalencija) epilepsije u opštoj populaciji stanovništva iznosi oko 10 na 1000 osoba. Vjerovatnost da osoba tokom života oboli od epilepsije iznosi 2-4%, a da u životu doživi barem jedan epileptični napad oko 8%. Danas od epilepsije boluje oko 1% svjetskog stanovništva, a skoro 80 % slučajeva se javlja u zemljama u razvoju, dok samo u Bosni i Hercegovini oko 35.000 osoba. Učestalost epileptičnih napada i epilepsije kod djece i adolescenata veća je nego u populaciji odraslih i karakteriše se većom učestalošću i pojavama specifičnim samo za rano djetinjstvo ili adolescenciju, te ponekad izrazitom rezistencijom na liječenje pojedinih tipova napada. Uzrok epilepsije može biti gotovo svaka bolest ili oštećenje mozga, prvenstveno ako dovodi do oštećenja kore velikog mozga. Međutim, česti su i slučajevi gdje se ni uz pomoć najsavremenijih metoda u tkivu mozga ne mogu pronaći nikakvi znaci bolesti ili oštećenja. Prosječno trajanje epilepsije je 10 godina, no u 20-30% bolesnika ona je doživotna. Međutim, ako se liječenje na vrijeme započne i odabere idealan antiepileptik, 75% bolesnika može živjeti bez napada i imati kvalitetan život. Dakle, preduslov terapijske uspješnosti je što bolje definisati epileptički sindrom kako bi se odredila optimalna antiepileptična terapija.

8.3. Klasifikacija napada

Epileptični napad je prolazna pojava simptoma i/ili znakova zbog abnormalne prekomjerne ili sinhronne neuronske aktivnosti u mozgu. Napad ne znači nužno da osoba ima epilepsiju, već trebaju biti zadovoljeni kriteriji za dijagnozu epilepsije, obzirom da postoji niz stanja koja se mogu povezati s paroksizmalnim događajima koji mogu oponašati napade odnosno epilepsiju. Epileptični napadi se općenito mogu podijeliti u sljedeće vrste: fokalni napadi, generalizirani napadi te napadi nepoznatog početka.

Fokalni napadi nastaju unutar neuronskih mreža ograničenih na jednu hemisferu. Mogu biti diskretno lokalizirani ili šire raspoređeni. Generalizirani napadi referiraju na situaciju da je cijeli mozak uključen tj. obje hemisfere velikog mozga su uključene istovremeno. U većini slučajeva svijest je izgubljena ili oštećena. Osnovne karakteristike pojedinih vrsta epileptičnih napada su sljedeće:

Fokalni odnosno žarišni napadi (*focal seizures*) - započinju u određenom području mozga i mogu se podijeliti na:

- ✓ Fokalni napadi sa očuvanjem svijesti (*focal aware seizures*) - osoba je budna i svjesna tokom napada, ali doživljava neobične osjećaje ili emocije.
- ✓ Fokalni napadi sa poremećajem svijesti (*focal impaired awareness seizures*) - svijest je oštećena, a osoba može biti nesvjesna svoje okoline ili ne može odgovoriti.

Generalizirani napadi (*generalized seizures*) - zahvaćaju obje strane mozga od samog početka i uključuju:

- ✓ Toničko-klonički napadi (*grand mal*) – karakterizira se ukočenošću (tonička faza) praćena ritmičkim trzajima (klonička faza).
- ✓ Napadi odsutnosti (*petit mal*) - kratke epizode buljenja ili "zoniranja", često bez ikakvih grčeva.
- ✓ Mioklonički napadi - iznenadni, kratki trzaji mišića.
- ✓ Atonični napadi - iznenadni gubitak mišićnog tonusa, što može uzrokovati padove.
- ✓ Tonički napadi - iznenadna ukočenost mišića, koja često dovodi do padova.
- ✓ Napadi s nepoznatim početkom - kada je početak napada nejasan i ne uklapa se u druge kategorije.

Svaka vrsta napada ima različite simptome i implikacije za liječenje.

8.4. Uzroci epilepsije

Postoji nekoliko faktora koji mogu biti uzroci epilepsije:

- ✓ **Makrofaktori** - pojavljuju se rijetko, a u obzir dolaze tumori, apscesi, ciste i hematomi. Dijele se na stacionarne koji su nepromjenjivog oblika i ne rastu (neke ciste, atrofije i dr.) i nestacionarne, koji su promjenjivog oblika i rastu, a u njima se ubrajaju prvenstveno tumori. Oni zahtijevaju operativni zahvat, prema tome liječenje samo antiepilepticima, odnosno konzervativno liječenje je suvišno.
- ✓ **Mikrofaktori** - najčešći su uzrok epilepsije, a pod time podrazumijevamo manja fibrozna i gliozna žarišta, mikroskopski vidljive atrofije, priraslice i slično. Nervne stanice oko takvih žarišta mikro faktora mogu ekscesivno izbiti i dovesti do epileptičnog napada stoga se u tom slučaju za liječenje biraju antiepileptici.
- ✓ **Metaboličke promjene** - javljaju se u dječijoj dobi, te u većini slučajeva ostaju neotkrivene. Za ove slučajeve potrebna je posebna terapija kako bi se uspostavili normalni metabolički uslovi uz eventualnu medikamentnosnu terapiju.

U najvećem broju slučajeva, njih 60-70%, uzrok epilepsije ostaje nepoznat ili tek pretpostavljen, a od poznatih uzroka najčešći su tumori mozga i alkohol.

Poznavanje uzroka ne govori mnogo o samoj prirodi epileptičkog napada ako se na njega ne može djelovati budući da napad može biti uzrokovan i višestrukim faktorima, a da nismo u stanju odrediti koji je od njih važniji.

8.5. Dijagnostički alati

Klasični pristup postavljanju dijagnoze epilepsije podrazumijeva da se uzme anamneza (opis ranijeg zdravstvenog stanja) i traži se od pacijenta i/ili članova porodice ili prijatelja da opišu slijed događaja prije, za vrijeme i nakon napada kako bi se klasificirao tip epilepsije i postavila klinička dijagnoza. Zlatni standard je *elektroencefalografija* (EEG), međutim, daljnji dijagnostički alati mogu biti laboratorijski nalazi i neuroimaging mozga. Da bi se utvrdila etiologija osnovne epilepsije, struktura mozga se precizno analizira pomoću CT (kompjuterizirana tomografija) ili MRI uređaja. Na taj način se može precizno identifikovati lokacija epileptogene zone odnosno električna 'pražnjenja'.

Glavni cilj je utvrditi mjesto početka napada. Nerijetko ipak, neuroimagingom ne možemo naći uzrok problema odnosno potencijalni izvor nenormalnih električnih (epileptogenih) pražnjenja.

Na slici 8.3 dat je primjer EEG očitavanja kod starije djevojčice gdje iktalno pražnjenje karakterizira brza aktivnost niskog napona u desnom središnjem dijelu mozga – parijetalno (strelica 1) i stražnjem dijelu; nakon toga 6-sekundni ritmički theta valovi vidljivi su u istoj regiji (strelica 2), također zahvatajući prednji verteks (strelica 3) i desno središnje temporalno područje. Na EMG kanalu prisutni su žarišni ponavljajući trzaji koji zahvataju lijevu deltoidnu regiju (strelica 4), s EEG dvojnikom koji karakteriziraju kompleksi šiljaka i talasa. Nakon 20s vidljivi su slični trzaji i na desnom deltoidu, koji su bili sinhroni ili asinhroni s kontralateralnim gornjim udom. U ovoj fazi, kompleksi šiljaka i talasa vidljivi su u bilateralnim centralnim i stražnjim regijama mozga u obje hemisfere (strelica 5, lijevo). Nakon oko 70s, napad spontano prestaje, a apneja je vidljiva na respiratornom tragu (strelice 5, desno).

Osim klasičnog čitanja EEG zapisa – personalno, od strane neurologa ili neuropedijatra, uvidom u elektronski digitalni ili printani zapis, danas je u razvoju wavelet bazirana EEG analiza, što su autori ove knjige posvećeno istraživali i svoja istraživanja višestruko publicirali posljednjih 15 godina.

8.6. Identifikacija - dijagnoza epilepsije

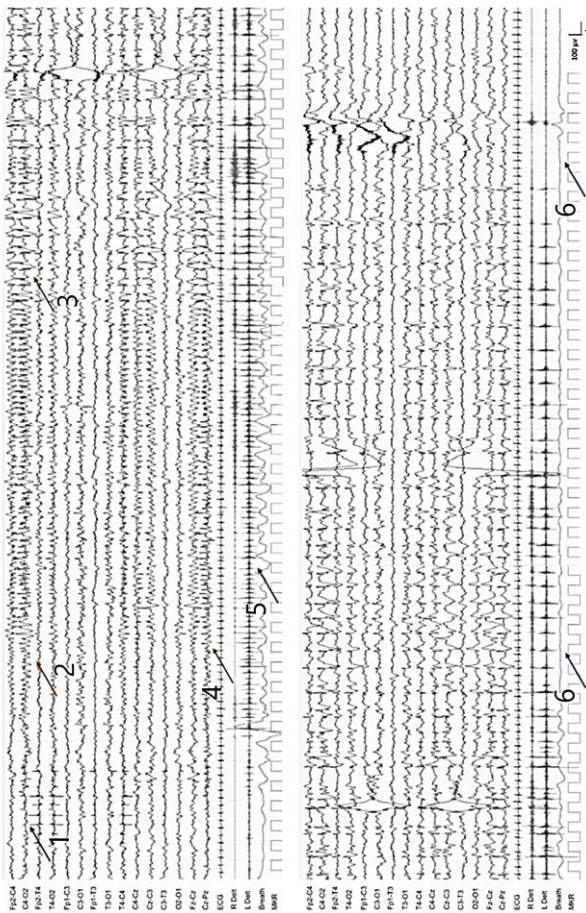
Dijagnoza se određuje po smjernicama internacionalne lige za borbu protiv epilepsije (ILAE) uz abnormalne promjene na EEG-u. Donosi se na temelju anamneze i kliničke slike dok njezina tačnost ovisi o iskustvu ljekara i kvaliteti informacija od svjedoka koji su prisustvovali događaju. Bazira se na kliničkoj dijagnozi, dok ostala dijagnostička ispitivanja koja obuhvataju laboratorijske nalaze, elektroencefalogram i radiološke pretrage glave, trebaju potvrditi ili odbiti sumnju na epilepsiju, pomoći u određivanju etiologije epilepsije, te omogućiti adekvatan oblik liječenja za svakog bolesnika.

U utvrđivanju etiologije epilepsije sve veći značaj imaju metode koje omogućavaju pregled strukture i funkcionisanja mozga, a to su CT i MR. Na taj način se preciznije pronalazi mjesto gdje epileptični napad počinje.

Kratica EEG odnosi se na encefalogram ili elektroencefalografiju, odnosno način bilježenja električne aktivnosti nervnih stanica mozga preko glave koja se odvija u uravnoteženom ritmu bez obzira na brojne električne impulse. Elektroencefalografija (EEG) je grafički prikaz električne aktivnosti mozga, koja se registruje preko elektroda postavljenih na površinu glave.

Pomoću elektroda s kože glave registruje se bioelektrična aktivnost i prenosi na monitor u obliku zapisa na papiru ili digitalnog zapisa. Komponente EEG signala su delta, theta, alfa, beta i gama:

- ✓ delta (0–3,5 Hz),
- ✓ theta (4–7,5 Hz),
- ✓ alpha (8–13 Hz),
- ✓ beta (14–30 Hz), i
- ✓ gamma (31–60 Hz).



Slika 8.3. Iktalni EEG u 15-dana starije djevojčice. (*preuzeto iz: Epilepsia, Vol.63, Iss.: 6, pp. 1349-1397.*)

Prenos informacija kroz mozak je elektrohemijske prirode, a električni potencijali koje stvaraju pojedini neuroni izrazito su malih amplituda i udruženo djelovanje većeg broja neurona stvara potencijal dovoljno velik da se može mjeriti sa elektrodama koje se nalaze na površini glave.

Dobiveni signal koji predstavlja aktivnost mozga naziva se elektroencefalogram, a temelji se na postsinaptičkim potencijalima koji traju duže i javljaju se na većoj površini membrane neurona nego akcijski potencijali te je zbog toga veća mogućnost njihove detekcije. Aktivnosti ili amplitude pojedinih komponenti EEG signala mogu biti od velike koristi u smislu jasnije identifikacije određenih stanja pacijenata ili jasnije uspostave određene dijagnoze. Specifičnosti pojedinih komponenti EEG signala moguće kratko opisati kao:

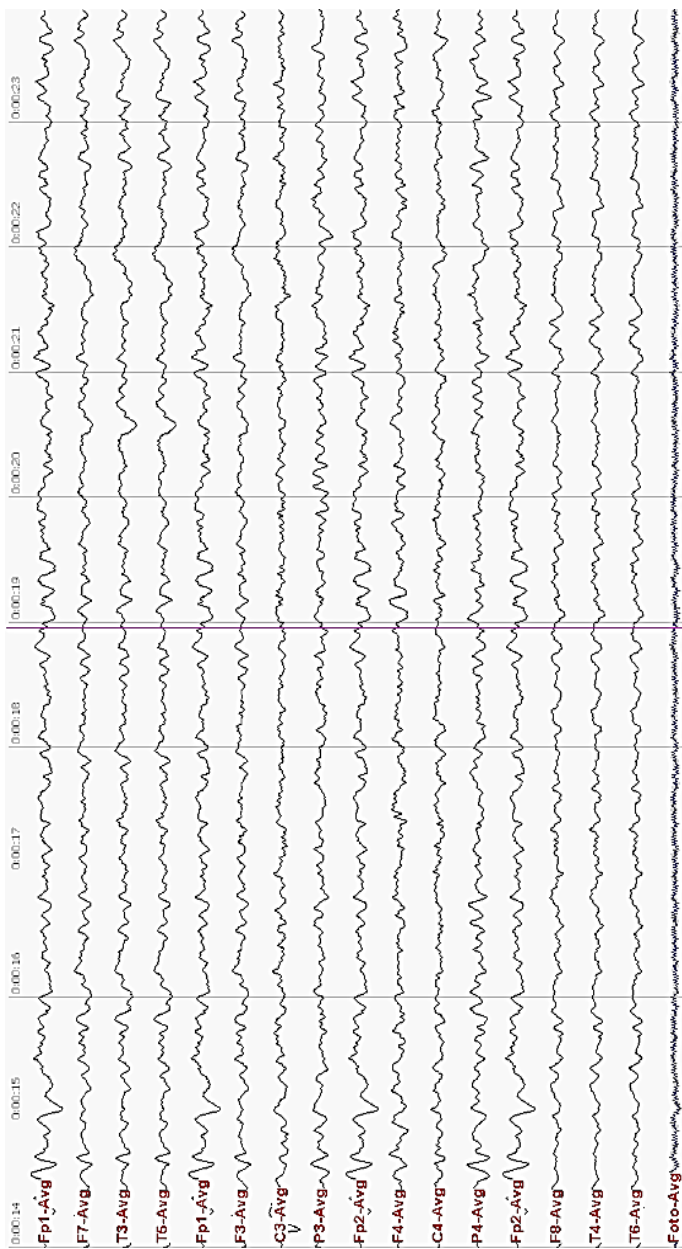
Alfa- u frekventnom opsegu od 8 do 12/13 Hz amplitude oko 20 do 60 μV koje se javljaju tipično u zatiljnom području mozga i specifična je za stanje potpune relaksacije, a početkom mentalne ili fizičke aktivnosti, alfa ritam nestaje.

Beta- u frekventnom opsegu od 13/14 do 30 Hz amplitude oko 2 do 20 μV , karakteristične sa stanjem normalne, zdrave budnosti, povećane koncentracije te intenzivne mentalne aktivnosti.

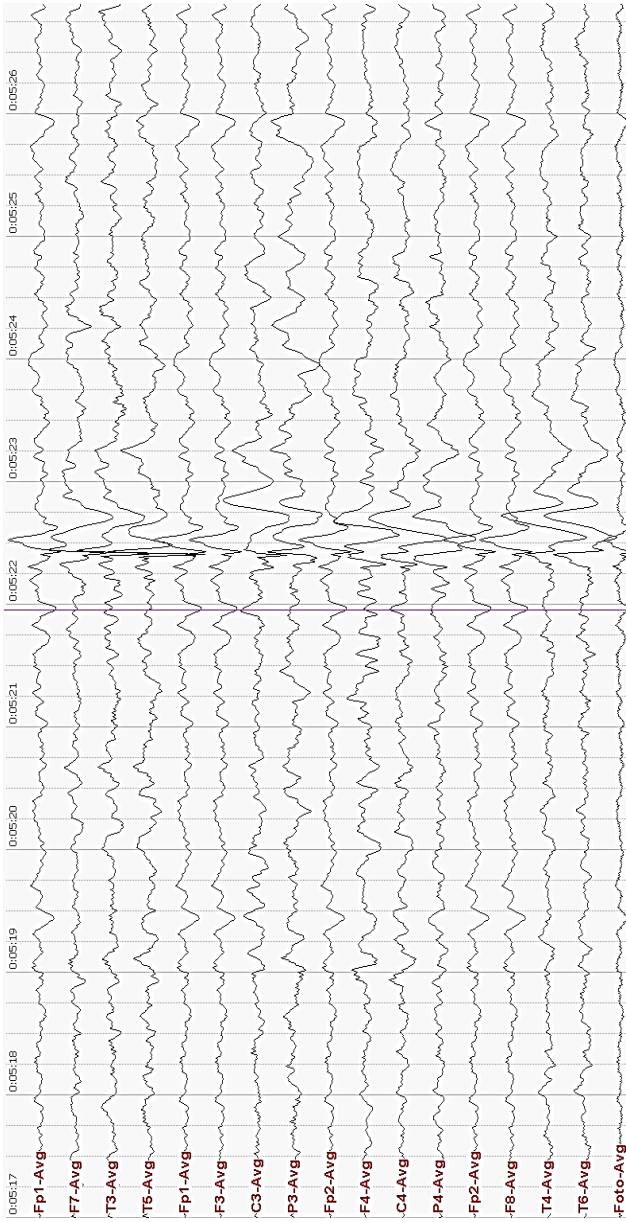
Delta- oscilacije velikih amplituda i niske frekvencije, te amplituda od 20 do 200 μV , dok su amplitude *theta* komponenti u opsegu od 20 do 100 μV .

Frekvencije *gamma* talasa su nešto više (obično oko 40 Hz).

Na slikama 8.4 i 8.5 prikazani su kao ilustrativni primjer EEG zapisi zdravog pacijenta i pacijenta sa epilepsijom, gdje je razlika u izmjenjenim signalima očigledna. Prema abnormalnoj električnoj aktivnosti mozga određuje se potvrda dijagnoze napada, klasifikacija epilepsije i epileptičnih sindroma.



Slika 8.4. EEG zapis zdravog pacijenta,



Slika 8.5. EEG zapis pacijenta sa epilepsijom

Trajanje rutinskog EEG snimanje iznosi 30 minuta, što je prekratko i nalaz bude obično uredan, no to ne isključuje kliničku dijagnozu epilepsije. Zbog toga je potrebno uraditi prolongirano EEG snimanje u trajanju od 90 minuta ili više kada snimanje provodimo u budnosti i spavanju. Klinička elektroencefalografija je pokazala paroksizmalnu prirodu epilepsija i blisku povezanost interiktalnih epileptičnih promjena sa neurokognitivnim i bihevioralnim promjenama.

Važno je dobro utvrđivanje dijagnoze bolesti, a kako bi se isključile mogućnosti postojanja ostalih poremećaja ponekad je potrebno napraviti i dodatne pretrage. Iz razloga npr. što se čak kod 20-30% slučajeva djece s neepileptičnim fenomenima postavlja kriva dijagnoza zato što njihovi simptomi nalikuju epileptičnim fenomenima. I pored valjanog zapisa EEG-a, nedostatak je vještina ljekara u procjeni nalaza EEG-a. Razlog tome može biti nedovoljno iskustvo i uvježbanost ljekara koji interpretira EEG, kao i subjektivnost koja je neminovno uvijek prisutna. Također, normalan nalaz rutinskog EEG-a ne isključuje dijagnozu epilepsije zbog niske do umjerene senzitivnosti u prikazu epileptiformih pražnjenja.

8.7. Baza podataka EEG signala

Skupovi podataka korišteni u prikazanim istraživanjima odabrani su iz centra za epilepsiju u Bonu u Njemačkoj od strane Ralpa Andrzejaka (<http://epileptologie-bonn.de/>). Podaci se sastoje od pet grupa EEG signala kod normalnih osoba i kod pacijenata sa epilepsijom. U ovoj bazi, prve dvije grupe su snimljene kod zdravih ispitanika: otvorenih (A) i zatvorenih očiju (B). Treća i četvrta grupa se snimaju prije napada iz dijela mozga sa sindromom epilepsije (C) i iz suprotne (zdrave) hemisfere mozga (D). Peta grupa (E) snimljena je iz dijela mozga sa sindromom epilepsije tokom napada. U radu su korištena tri skupa označena A, C i E. Svaki set sadrži 100 jednokanalnih EEG segmenata u trajanju od 23,6 sekundi sa

brzinom uzorkovanja od $f_s = 173,61$ Hz. Skup A se sastojao od segmenata uzetih iz površinskih EEG snimaka koji su dobijeni od zdravih osoba koristeći standardizirano postavljanje elektroda. Skup E sadržavao je samo aktivnost epileptičnog napada.

8.8. Identifikacija (DWT) i klasifikacija (WNN) epilepsije

8.8.1. Identifikacija EEG signala

Tri EEG signala su prikazana na slici 8.6. Prvi EEG signal prisutan EEG zdravog pacijenta, drugi EEG signal prisutan EEG pacijenta s epilepsijom u stabilnom stanju i treći EEG signal prisutan EEG pacijenta s epilepsijom tokom napada.

Očigledno je da su veličine EEG signala kod pacijenata sa epilepsijom i tokom napada mnogo veće od druga dva EEG signala. Takođe, komponente EEG signala (δ , θ , α , β i γ) pacijenta sa epilepsijom i tokom napada su mnogo veće veličine od druga dva EEG signala. Veličina EEG signala zdravog pacijenta i EEG signala oboljelog od epilepsije u stabilnom stanju su približno iste vrijednosti. Aktivnost (veličina) komponenti ova dva signala će se odrediti korištenjem DWT-a. Aktivnost komponenti (δ , θ , α , β i γ) EEG signala zdravog pacijenta i EEG signala bolesnika s epilepsijom u stabilnom stanju (signali sa slike 8.6) nakon DWT i MRA i korištenjem *db4* wavelet funkcija je prikazano na slikama 8.7-8.12. Broj nivoa DWT dekompozicije se bira na osnovu dominantnih frekvencijskih komponenti signala. Nivoi se biraju tako da se oni dijelovi signala koji dobro koreliraju sa frekvencijama neophodnim za klasifikaciju signala zadržavaju u talasnim koeficijentima.

Frekvencijski opseg $\left[\frac{f_m}{2} : f_m \right]$ svake skale detalja DWT je

direktno povezan sa brzinom uzorkovanja originalnog signala, koja je data sa:

$$f_m = f_s / 2^{l+1} \quad (8.1)$$

gdje je:

f_s - frekvencija uzorkovanja,
 l - nivo dekompozicije.

Frekvencija uzorkovanja je 173,6 Hz EEG signala. Najviša frekvencija koju bi signal mogao sadržavati, iz Nyquistove teoreme, bila bi $f_s/2$. Frekvencijski pojasevi koji odgovaraju pet nivoa dekompozicije za talasni talas *db4* sa frekvencijom uzorkovanja od 173,6 Hz EEG signala navedeni su u tabeli 8.1. Signali su dekomponovani na detalje D1-D5 i jednu aproksimaciju A5.

Također, prema Parsevalovom teoremu, energija signala može se podijeliti na različite nivoe dekompozicije. Matematički se ovo može predstaviti kao:

$$ED_i = \sum_{j=1}^N |D_{ij}|^2, i = 1, 2, \dots, j \quad (8.2)$$

$$EA_i = \sum_{j=1}^N |A_{ij}|^2 \quad (8.3)$$

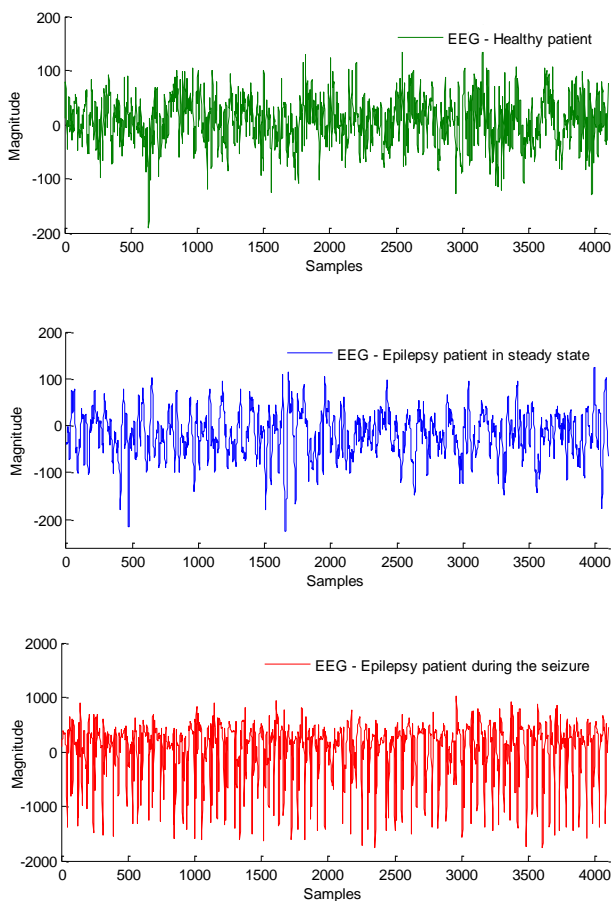
gdje je:

$i = 1, 2, \dots, l$ predstavlja nivoe dekompozicije od nivoa 1 do nivoa l .

N je broj koeficijenata detalja i aproksimacije na svakom nivou dekompozicije.

ED_i je energija detalja na nivou dekompozicije i , a

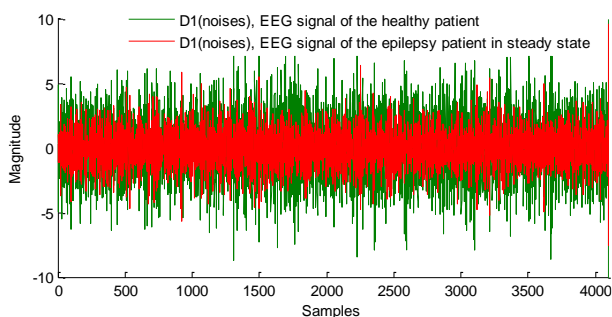
EA_i je energija signala aproksimacije na nivou dekompozicije l .



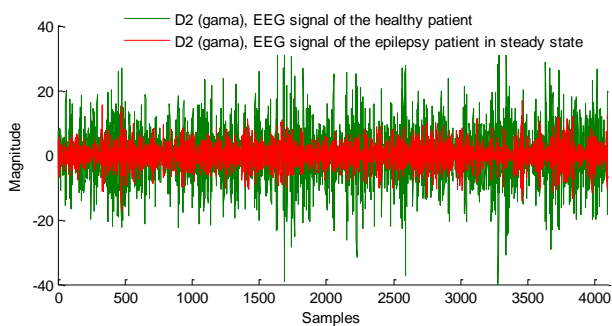
Slika 8.7. EEG signali (zdrava osoba, pacijent sa epilepsijom bez napada i pacijent sa epilepsijom tokom napada)

Tabela 8.1. Frekventni opsezi različitih nivoa DWT dekompozicije

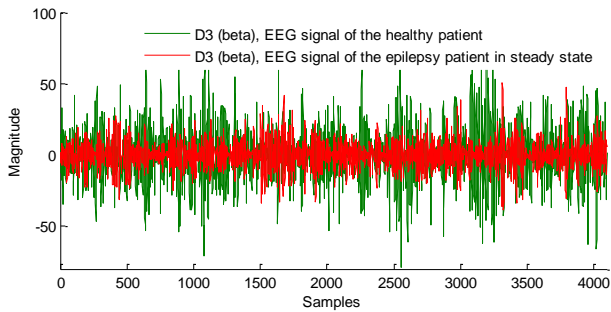
Komponenta signala	Frekventni opseg [Hz]	Nivo dekompozicije
D1	43.4-86.8	1 (noises)
D2	21.7-43.4	2 (gama)
D3	10.8-21.7	3 (beta)
D4	5.40-10.8	4 (alpha)
D5	2.70-5.40	5 (theta)
A5	0.00-2.70	5 (delta)



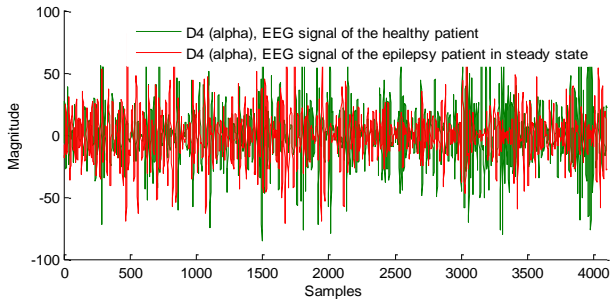
Slika 8.8. Identifikacija komponenti EEG signala (signal zdrave osobe i osobe sa epilepsijom bez napada) (noises)



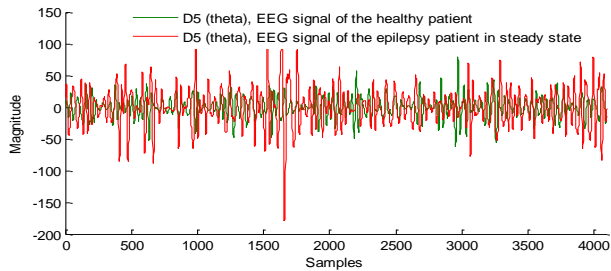
Slika 8.9. Identifikacija komponenti EEG signala (signal zdrave osobe i osobe sa epilepsijom bez napada) (gama)



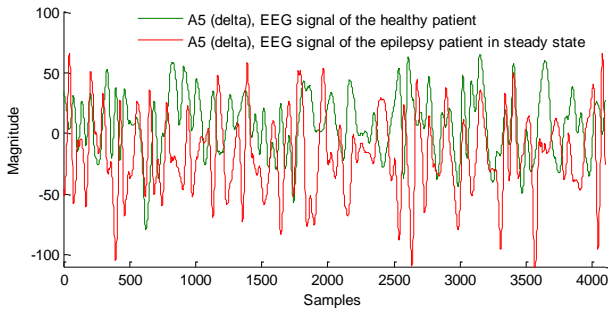
Slika 8.10. Identifikacija komponenti EEG signala (signal zdrave osobe i osobe sa epilepsijom bez napada) (beta)



Slika 8.11. Identifikacija komponenti EEG signala (signal zdrave osobe i osobe sa epilepsijom bez napada) (alpha)

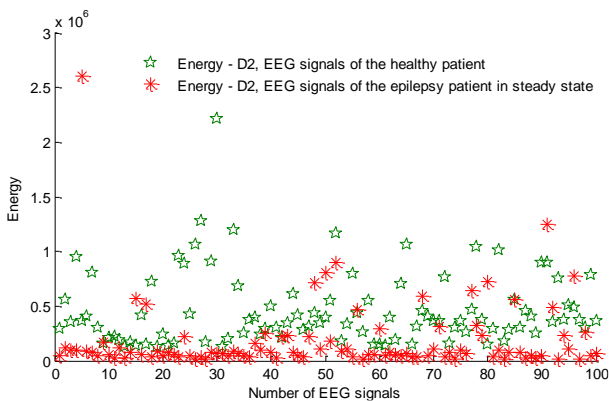


Slika 8.12. Identifikacija komponenti EEG signala (signal zdrave osobe i osobe sa epilepsijom bez napada) (theta)

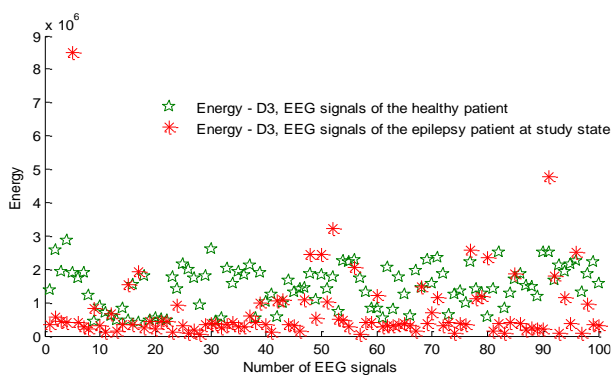


Slika 8.13. Identifikacija komponenti EEG signala (signal zdrave osobe i osobe sa epilepsijom bez napada) (delta)

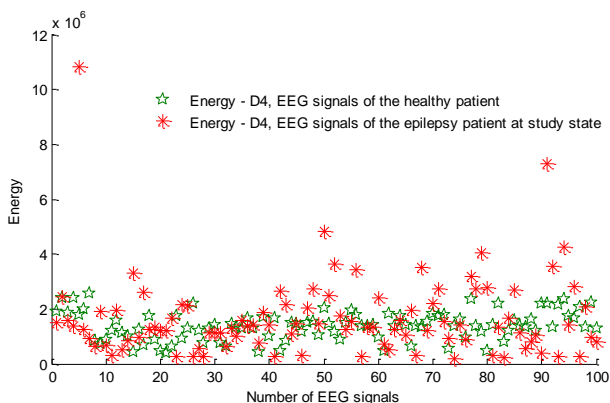
Nakon DWT analize signala sa slike 8.3 identifikuju se karakteristične komponente EEG signala (slike 8.7-8.12). Očigledno je da je veličina EEG signala oboljelog od epilepsije u stabilnom stanju u frekventnim opsezima [21,7-43,4] Hz i [10,8-21,7] Hz (γ i β talasi) mnogo manja od veličine EEG signala zdravog pacijenta.



Slika 8.14. Dijagram raspodjele energije EEG signala: poređenje A i C skupova (A set-100 EEG signala zdravog pacijenta i C set-100 EEG signala pacijenata s epilepsijom u stabilnom stanju) (gama)



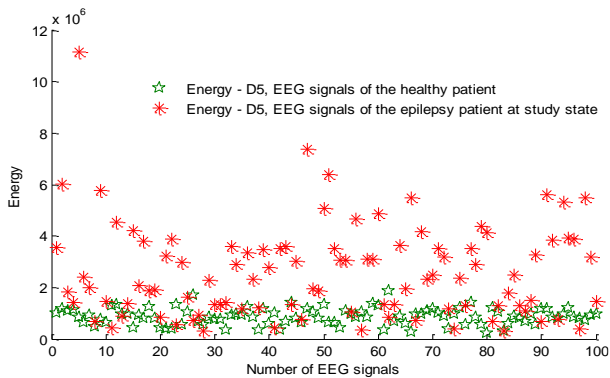
Slika 8.15. Dijagram raspodjele energije EEG signala: poređenje A i C skupova (A set-100 EEG signala zdravog pacijenta i C set-100 EEG signala pacijenata s epilepsijom u stabilnom stanju) (beta)



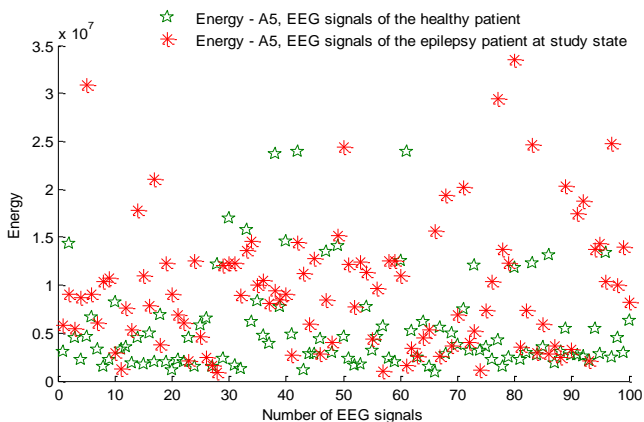
Slika 8.16. Dijagram raspodjele energije EEG signala: poređenje A i C skupova (A set-100 EEG signala zdravog pacijenta i C set-100 EEG signala pacijenata s epilepsijom u stabilnom stanju) (alpha)

Amplitude signala u frekventnom opsegu [5,40-10,8] Hz (α talasi) imaju približno iste karakteristike, dok je veličina EEG signala oboljelog od epilepsije u stabilnom stanju u frekventnim opsezima [2,70-5,40] Hz (θ talas) mnogo veća od veličine EEG signala zdravog pacijenta. Amplituda EEG signala oboljelog od epilepsije u stabilnom stanju u frekventnom opsegu i [0,00-2,70]

Hz (δ talasi) ima nešto veću vrijednost od EEG signala zdravog pacijenta.



Slika 8.17. Dijagram raspodjele energije EEG signala: poređenje A i C skupova (A set-100 EEG signala zdravog pacijenta i C set-100 EEG signala pacijenata s epilepsijom u stabilnom stanju) (theta)



Slika 8.18. Dijagram raspodjele energije EEG signala: poređenje A i C skupova (A set-100 EEG signala zdravog pacijenta i C set-100 EEG signala pacijenata s epilepsijom u stabilnom stanju) (delta)

U nastavku su na isti način, koristeći MRA-DWT i Db4 wavelet funkciju, dva skupa EEG signala (A set-100 EEG signali zdravog pacijenta i C set-100 EEG signali pacijenta s epilepsijom u stabilnom stanju) podijeljeni na pet nivoa rezolucije. Nakon toga su određene energetske vrijednosti komponenti EEG signala korištenjem Parsevalove teoreme. Na slikama 8.14-8.18 prikazane su energetske vrijednosti pojedinih komponenti EEG signala za skup A i C.

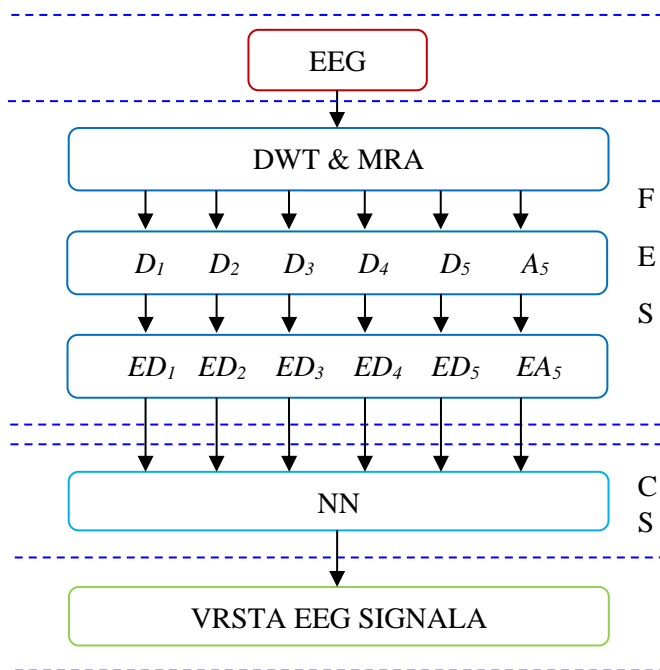
Može se primijetiti da su kod pacijenata s dijagnozom epilepsije komponente aktivnosti D2 (γ talasi) prilično male i u prosjeku su 58,26% niže od EEG signala zdravog pacijenta. Komponenta aktivnosti D3 (β talasi), izračunata na ovaj način, je u prosjeku niža za 48,22%, dok je aktivnost D4 komponente (α talasi) prilično slična sa EEG signalima zdravih pacijenta. Aktivnost D5 komponente (θ talasi) je oko 200% veća od EEG signala zdravog pacijenta, a aktivnost A5 komponenti (δ talasa) je u proseku veća za oko 77,32%. U prosjeku, prema analiziranim signalima, energetska vrijednost skupa C (bolesnici s epilepsijom) je 82% veća nego u setu A (zdrave osobe).

8.8.2. Klasifikacija EEG signala

Blok dijagram klasifikatora EEG signala prikazan je na slici 8.19. Struktura algoritma zasniva se na dvije faze: fazi ekstrakcije karakteristike (eng. feature extraction stage (FES)) i fazi klasifikacije (eng. classification stage CS). Ulaz CS-a je prethodno obrađen signal.

U ovom slučaju, EEG signal u vremenskom domenu se transformiše u wavelet domen prije nego što se primjeni kao ulaz u CS. Ekstrakcija karakteristika je ključ za EEG signal. Ekstraktor karakteristika treba da smanji vektor uzorka (tj. originalni talasni oblik) na nižu dimenziju, koja sadrži većinu korisnih informacija iz originalnog vektora.

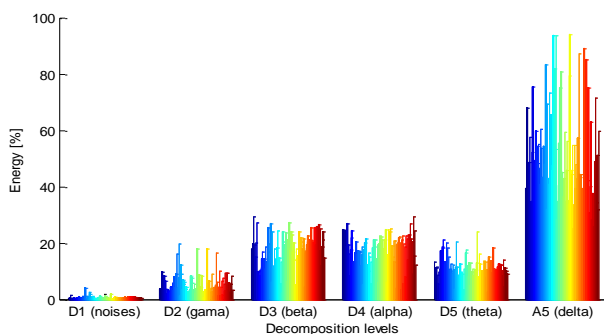
U ovom algoritmu, nakon realizacije FES-a (preprocesiranja), korištenjem koeficijenata detaljnosti i aproksimacije na svakom nivou dekompozicije dobijenom iz WT i MRA, CS (obrada) se implementira korištenjem neuronske mreže (NN). Klasifikacija EEG signala zahtijeva korištenje neke od tehnika pogodnih za ove vrste zadataka. Prepoznavanje uzorka je proces opažanja uzorka datog objekta na osnovu znanja koje već posjeduje. Dakle, za automatsko prepoznavanje i klasifikaciju uzoraka koriste se različite tehnike umjetne inteligencije kao što su fuzzy logika (FL), umjetne neuronske mreže (ANN) illi adaptivna fuzzy logika (AFL).



Slika 8.19. Blok dijagram klasifikatora EEG signala [67]

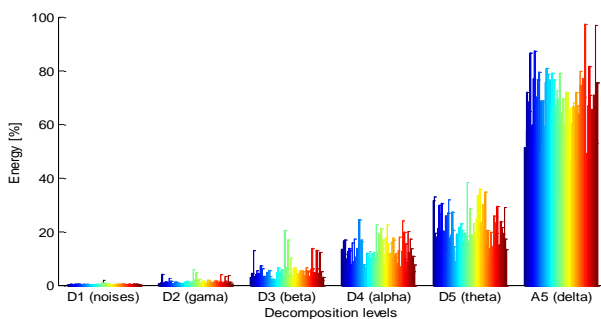
Umjetna neuronska mreža (*eng.* Artificial Neural Network (ANN)) je zbir umjetnih-vještački napravljenih neurona koji su međusobno povezani i interaktivni kroz operacije obrade signala. Filozofija rada

umjetne neuronske mreže je uređena po uzoru na ljudski mozak. Mreža može imati niz ili jedan ulaz i uvijek jedan izlaz, između kojih se nalazi jedan ili više tzv. skrivenih slojeva (tzv. višeslojne mreže). Pojedinačni neuroni su, kao i slojevi, međusobno spojeni vezama kroz koje idu signali. Veze među njima se aktiviraju ako je zadovoljen uslov postavljen tzv. aktivacijskom funkcijom. ANN su posebno korisne za složene zadatke prepoznavanja i klasifikacije. ANN se široko koriste u biomedicinskom polju za modeliranje, analizu podataka i dijagnostičku klasifikaciju. Najčešći algoritam obuke u klasifikacionim problemima je algoritam back-propagation (BP), koji je korišten i u klasifikatoru prikazanom na slici 8.19. Postoji mnogo različitih tipova i arhitektura neuronskih mreža koje se fundamentalno razlikuju po načinu učenja i koji nisu testirani na prikazanom klasifikatoru. Razlika među mrežama je u arhitekturi, u načinu učenja i signalima (tzv. limiterima).

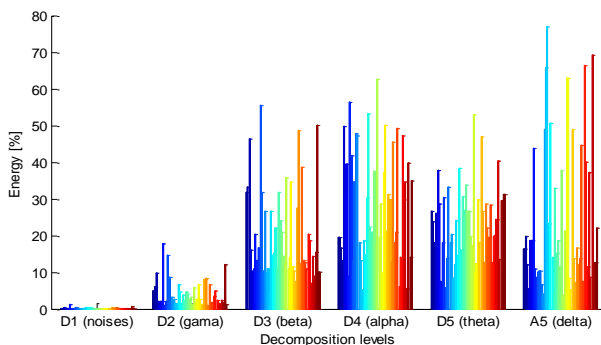


Slika 8.20. Energetska (%) distribucija EEG signala: a) A set-100 EEG signala zdravih osoba

Arhitektura se dijeli na mreže s vezama koje uvijek idu isključivo prema sljedećem sloju, ali nisu zatvorene, pa čak nemaju i jednostruke veze (*eng.* Feedforward ANN (FFNN)), odnosno neuron može biti povezan s više njih u sljedećem sloju. Druga vrsta su povratne (*eng.* recurrent NN), odnosno mreže gdje su veze zatvorene na način da se rezultat analize vraća na početak i uvježbavanje ponavlja s ciljem minimiziranja pogreške.



Slika 8.21. Energetska (%) distribucija EEG signala: C set-100 EEG signala pacijenata sa epilepsijom bez napada



Slika 8.22. Energetska (%) distribucija EEG signala: E set-100 EEG signala pacijenata sa epilepsijom i napadom

U fazi klasifikacije EEG signala, predložene karakteristike distribucije (procentualne) energije se primjenjuju kao ulaz za NN. Definiše se kao softverski algoritmi koji se mogu osposobiti da nauče odnose koji postoje između ulaznih i izlaznih podataka, uključujući nelinearne odnose. FFNN je korištena mreža za klasifikaciju različitih EEG signala prikazanog klasifikatora.

Koristeći ranije opisanu bazu podataka o EEG signalima, urađena je analiza istih i na slikama 8.20, 8.21 i 8.22 prikazana je procentualna raspodjela energije signala po nivoima dekompozicije za tri grupa:

grupa EEG signala zdravih osoba, EEG signala pacijenata sa epilepsijom bez napada i EEG signala pacijenata sa epilepsijom i napadom.

Za razliku od procentualne energetske distribucije EEG signala zdravih ispitanika, energetska distribucija signala pacijenata sa epilepsijskim sindromom je očigledno drugačija. U poređenju sa EEG signalima zdravih ispitanika, komponenti D2, D3 i D4 EEG signala, ukupna energetska distribucija EEG signala uključena je u značajno nižim procentima, dok su vrijednosti D5 i A5 signala znatno veće. Energetska distribucija EEG signala u kojima se registruje epileptični napad značajno se razlikuje od prva dva slučaja. Dominantne su komponente energetske aktivnosti D3, D4 i D5, dok su nešto manje vrijednosti komponente delta talasa (A5) (slika 8.22).

Procentulna distribucija energije u prikazanom klasifikatoru se koristiti za klasifikaciju EEG signala. Izbor broja skrivenih slojeva i broja neurona u svakom sloju NN mreže jedan je od najkritičnijih problema u izgradnji neuronske arhitekture. Da bi se pronašla optimalna mrežna arhitektura, potrebno je procijeniti nekoliko kombinacija. Ove kombinacije uključuju mreže s različitim brojem skrivenih slojeva, različitim brojem jedinica u svakom sloju i različitim tipovima prenosnih funkcija. FFNN model je u ovom slučaju realiziran u Matlabu.

NN sa propagacijom signala unaprijed (FF – feed forward) se sastoje od dva ili više slojeva, ili grupa neurona. Izlaz svakog neurona predstavlja ulaz u jedan ili više drugih neurona koji su grupisani u slojeve kao: ulazni, skriveni i izlazni. U FFNN ulazni sloj prima ulazne podatke iz vanjske okoline i šalje ih u (jedan ili više neurona) skriveni sloj. Informacije se u skrivenom sloju obrađuju i šalju u neurone sljedećeg skrivenog ili izlaznog sloja. U najčešće korištenom načinu 'učenja', odnosno određivanju parametara neuronske mreže, signali se propagiraju unazad kroz mrežu, a vrijednosti težina i ostalih parametara prilagođavaju prema željenom

izlazu. Ovakav se proces ponavlja onoliko koraka koliko je potrebno za dostizanje zahtjevanog izlaza sa određenom tačnošću. Učenje NN u osnovi predstavlja proces kojim se određuju vrijednosti težina veza među neuronima i njeni ostali parametri. Nakon dizajniranja mreže dobija se njena arhitektura i parametri koja podrazumijeva broj slojeva, tip veze između neurona, vezu između ulaznih i izlaznih podataka, ulazne i prenosne funkcije, tip učenja, itd. Vrijednost ulaza neurona koji prima izlaz iz prethodnog sloja računa se prema sinaptičkim težinama i ulaznoj sumacijskoj funkciji. Nakon što primi ulaz prema sumacijskoj funkciji, neuron šalje svoj izlaz drugim neuronima s kojima je povezan, obično neuronima u narednom sloju. Izlaz neurona računa se prema tzv. prenosnoj, pobudnoj ili aktivacijskoj funkciji. Nekoliko najčešće korištenih aktivacijskih funkcija su funkcija koraka (step funkcija), signum funkcija, sigmoidna funkcija, hiperboličko-tangentna funkcija, linearna funkcija, linearna funkcija s pragom itd.

Tabela 8.2. NN arhitektura i parametri treninga

Arhitektura	
Broj slojeva	3
Broj neurona u slojevima	[6, 5, 1]
Aktivacijska funkcija	Tangent sigmoid
Parametri treninga	
Učenje	Levenberg–Marquardt Back-Propagation
Mean-Squared Error	1E-01

Na osnovu ekstrakcije karakteristika signala, konstruisani su 6-dimenzionalni skupovi karakteristika (D1, D2, D3, D4, D5 i A5) za podatke za obuku i testiranje. Dimenzije ovdje opisuju različite karakteristike koje proizlaze iz wavelet transformacije, to jest, ukupna veličina podataka za obuku ili skupa podataka za testiranje je 6×300 . Uzimajući u obzir performanse klasifikacije ove metode, ovaj ulazni vektor se primjenjuje kao ulaz u WNN strukturu. Parametri treninga i struktura WNN korišteni u ovoj studiji prikazani su u tabeli 8.2. Analizirano je nekoliko različitih varijanti

tragajući za najboljim performansama, kao što su broj skrivenih slojeva, veličina skrivenih slojeva, vrijednost trenutne konstante i brzina učenja, te tip aktivacijskih funkcija.

Podaci za svaki eksperiment se biraju nasumično. U tabeli 8.3 prikazani su rezultati klasifikacije WNN algoritma gdje je 250 skupova podataka korišteno za obuku NN modela, a 50 skupova podataka korišteno je za proces testiranja. Klasifikator je ispravno identifikovao 47 od 50 različitih EEG signala u setu za testiranje, kao što je prikazano u tabeli 8.3. Klasifikovana stopa tačnosti EEG signala predloženog pristupa bila je 94,0 %. Za normalne EEG signale dobija se 100% tačnost klasifikacije.

Tabela 8.3. Rezultati EEG klasifikacije

Klasa	Zdravi	Sa sindromom epilepsije bez napada	Sa epilepsijom i napadom	Tačnost [%]
Zdravi	16	0	0	100.0
Sa sindromom epilepsije bez napada	2	17	0	88.2
Sa epilepsijom i napadom	0	1	14	92.9
Ukupno				94.0

Na kraju, treba istaći da su epileptički napadi manifestacije epilepsije. Detekcija epileptiformnih pražnjenja u EEG-u važna je komponenta u dijagnozi epilepsije. Kako su EEG signali nestacionarni, konvencionalne metode frekventne analize nije najpogodnija u dijagnostičkoj klasifikaciji. U predloženom klasifikatoru EEG signala korištena je kombinacija DWT-MRA i NN. DWT sa MRA se primenjuje za dekomponovanje EEG signala

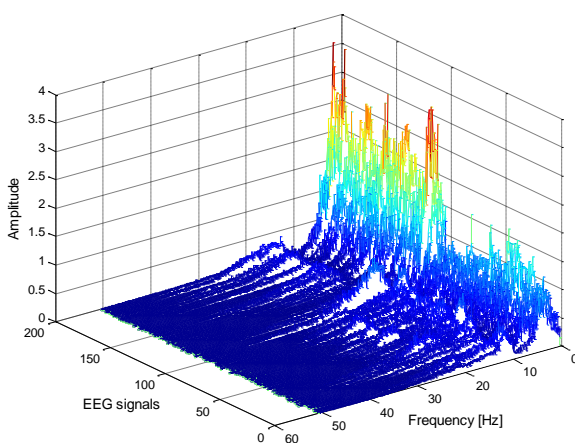
na nivoima rezolucije komponenti EEG signala i za izdvajanje procentualne distribucije energetske karakteristike EEG signala na različitim nivoima rezolucije. FFNN klasifikuje ove izdvojene karakteristike da identifikuje tip EEG-a prema procentualnoj distribuciji energetske karakteristike. Rezultati su pokazali da predloženi klasifikator ima sposobnost efikasnog prepoznavanja i klasifikacije EEG signala. Najvažnija prednost predložene metode je smanjenje veličine podataka kao i ukazivanje i prepoznavanje glavnih karakteristika signala. Nadalje, može smanjiti memorijski prostor, skratiti potrebu za predobradom, veličinu mreže i povećati brzinu računanja za klasifikaciju EEG signala.

8.9. Identifikacija epilepsije korištenjem HMS i GWS

U ovom dijelu predstavljene su rezultati primjena Hilbert Huang-ove transformacije (HHT), odnosno Hilbert-ov marginalni spektar (HMS) i globalni wavelet spektar (GWS) u analizi EEG signala, a radi lakšeg uspostavljanja dijagnoze epilepsije. Kao što je naprijed objašnjeno, HHT sastoji se od empirijske dekompozicije signala (EMD) i Hilbertove analize, a Hilbert-ov marginalni spektar predstavlja raspodjelu amplitude (energije) u zavisnosti od frekvencije. Korištenjem ovog pristupa urađena je analiza nad 200 EEG signala, pri čemu je pola signala od zdravih osoba, a druga polovina od osoba sa sindromom epilepsije ali ne u trenutku napada. Svi prikazani rezultati se odnose na signale iz naprijed definisane baze podataka.

Vizuelnim pregledom dva analizirana EEG signala teško je ili skoro nemoguće uočiti jasne razlike ili u konačnici utvrditi iz ovakvog signala sindrom epilepsije. Međutim, korištenjem Hilbert-ovog marginalnog spektra moguće i GWS moguće je jasno identificirati različite amplitude pojedinih komponenti EEG signala, što je prikazano na slikama 8.23 i 8.24.

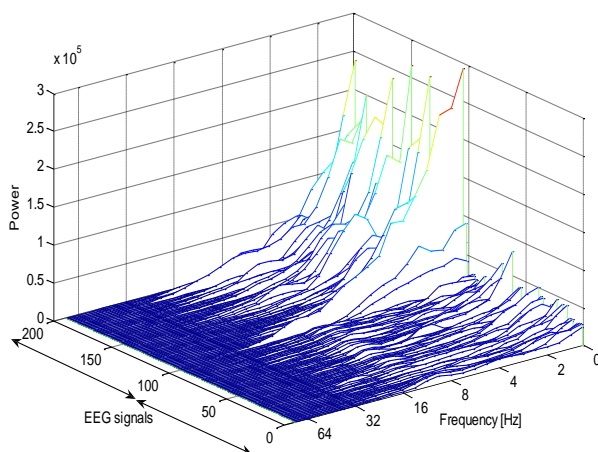
Na slikama su prikazani Hilber-tov marginalni spektar EEG signala zdravih osoba (prvih 100 signala) i osoba sa sindromom epilepsije (drugih 100 signala) i Globalni wavelet spektar EEG signala zdravih osoba (prvih 100 signala) i osoba sa sindromom epilepsije (drugih 100 signala). Sa slika je očita diferencijacija EEG signala dvije analizirane kategorije.



Slika 8.23. Hilber-tov marginalni spektar EEG signala zdravih osoba (prvih 100 signala) i osoba sa epilepsijom (drugih 100 signala) [73], [75]

Rezultati jasno ukazuju na različite aktivnosti pojedinih komponenti EEG signala kod zdravih osoba i osoba sa sindromom epilepsije. Značajno veće amplitude identifikuju se kod osoba sa sindromom epilepsije u području do 10 Hz (delta i theta talasi), a komparacijom sa globalnim wavelet spektrom uočava se da oba metoda ili pristupa daju jasno razdvajanje EEG signala iz analiziranih grupa. Dalje, određene amplitude u području alfa talasa identifikovane su kod obje grupe, dok se za određene signale iz grupe zdravih osoba korištenjem Hilbert-ovog marginalnog spektra identifikuju značajne amplitude u frekventnom opsegu od 20-30 Hz.

Ono što je možda i najvažniji zaključak koji se može izvući je jasno diferenciranje između dvije grupe EEG signala. Ovakvim pristupima, tj. ovim načinom obrade signala pored toga što se jasno identifikuju određene komponente EEG signala, prezentacija putem spektra (marginalnog Hilbert-ovog ili globalnog wavelet) zadržavaju se određene osobine vezane za amplitude pojedinih komponenti i smanjuje se broj uzoraka (odnosno numeričkih vrijednosti), što je odlična osnova za razvoj jednostavnih automatiziranih klasifikatora EEG signala.



Slika 8.24. Globalni wavelet spektar EEG signala zdravih osoba (prvih 100 signala) i osoba sa epilepsijom (drugih 100 signala) [73], [75]

Isto tako, pokazano je da je primjena ovih pristupa uspješna, te da omogućava uspostavljanje jasne razlike u vizualizaciji EEG signala zdravih i bolesnih osoba, što može pomoći u jasnoj identifikaciji osoba sa sindromom epilepsije. Također, ovakav pristup može biti podloga za razvoj jednostavnih automatiziranih klasifikatora EEG signala sa aspekta identifikacije osoba sa epilepsijom i pronaći svoje mjesto u uobičajenoj kliničkoj praksi.

9. Klinička prezentacija i opcije liječenja epilepsije

Epilepsija kao neurološki poremećaj izazvan nekontrolisanom električnom aktivnošću neurona u mozgu je relativno česta pojava i obuhvata oko 1% populacije. Epileptični napadi mogu se klasifikovati kao fokalni - započinju u jednoj hemisferi mozga ili generalizirani - zahvataju obje hemisfere. Epilepsija je kompleksan poremećaj i zahtijeva individualizirani pristup liječenju. Kroz pravilan dijagnostički proces i sveobuhvatan plan liječenja, mnogi pacijenti mogu postići bolju kontrolu nad svojim napadima i poboljšati kvalitetu života. Prva linija liječenja su antiepileptički lijekovi. Ako lijekovi ne daju rezultate, razmatraju se hirurške opcije. U ovom poglavlju su predstavljene osnovne opcije liječenja epilepsije.

9.1. Liječenje

Prva linija liječenja epilepsije su antiepileptički lijekovi. Postoje različite vrste i ispituju se u određenom vremenskom okviru da se vidi ima li poboljšanja. Međutim, ako antiepileptici ne pomažu u liječenju onda se razmatra operacija. Krucijalno je važno utvrditi tačnu lokaciju početka napada kako bi se mogao izmjeriti omjer rizika i koristi za pacijenta eventualnom hirurškom intervencijom.

Krajnji cilj bi bio smanjenje broja napada i poboljšanje kvalitete života pacijenata, odnosno, u idealnoj situaciji - izlječenje.

Antiepileptični lijekovi (eng. antiepileptic drugs, AED) djeluju na različite načine i na različite vrste napada. Neke od glavnih klasaantiepileptičnih lijekova uključuju sljedeće:

- ✓ Benzodiazepini (npr. lorazepam, diazepam) - često se koriste za kratkotrajnu kontrolu napada,
- ✓ Hidantoini (npr. fenitoin) - koriste se za toničko-kloničke i parcijalne napade,
- ✓ Karboksilne kiseline (npr. valproat) – potentan je za različite vrste napada,
- ✓ Sukcinimidi (npr. etosuksimid) - prvenstveno se koriste za absansne napadaje,
- ✓ Noviji AED (npr. lamotrigin, levetiracetam, topiramet) - često se koriste kao dodatna terapija ili kada su tradicionalni lijekovi neefikasni.

Izbor lijeka ovisi o različitim faktorima kao što su vrsta napada, dob pacijenta, nuspojave i općenito zdravstveno stanje. Uglavnom je za svakog pacijenta potrebna personalizirana opcija liječenja. Neki od lijekova koji se danas koriste kao prva linija u liječenju epilepsije su levetiracetam (Kepra), valproična kiselina (Depakine), carbamazepin (Tegretol) te u BiH dobro prihvaćen okskarbazepin (Exmal, Bosnalijek). Okskarbazepin npr. djeluje tako što stabilizira električnu aktivnost u mozgu. Utvrđeno je da je okskarbazepin efikasan u liječenju različitih tipova epilepsije, uključujući parcijalne napade, generalizirane toničko-kloničke napade i mješovite napade. Okskarbazepin se općenito smatra sigurnim i dobro se podnosi. Pacijenti sa tumorima mozga često kao jedan od vodećih simptoma imaju epileptične napade. Nedavna studija provedena u našoj zemlji pokazala je dobru efikasnost i sigurnost Exmala na prevenciju i liječenje epi napada kod pacijenata sa supratentorialnim tumorima mozga.

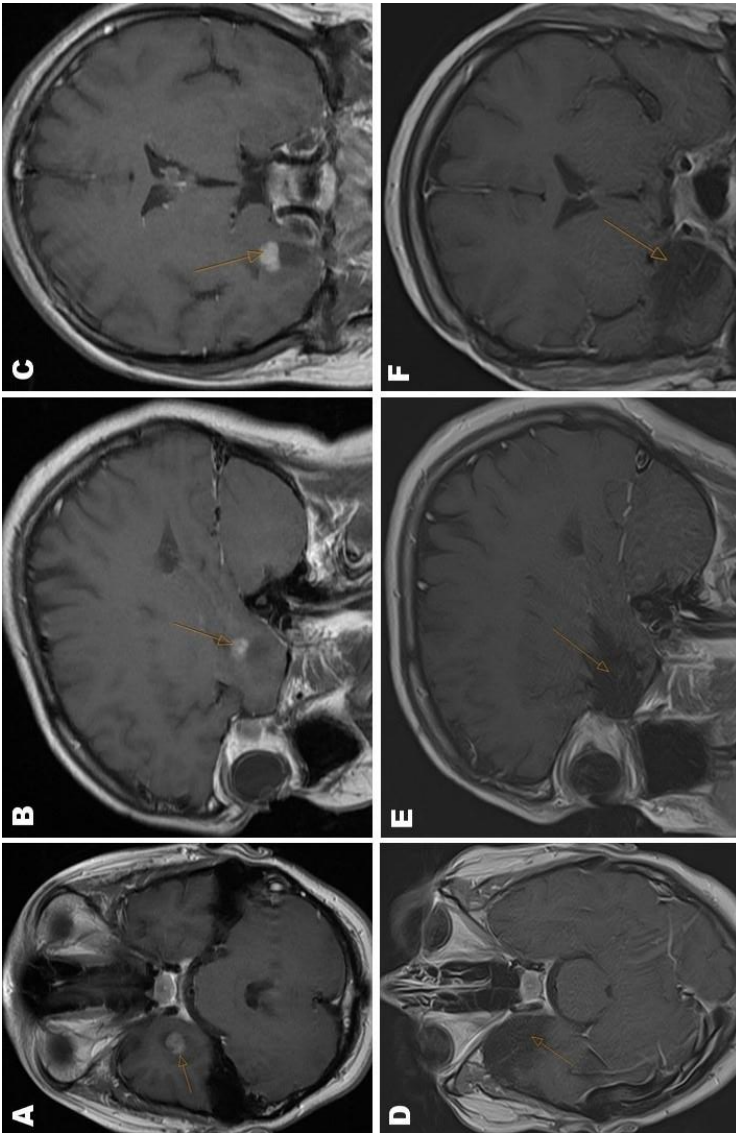
9.2. Hirurške opcije

Ukoliko liječenje kombinacijom lijekova kroz duže vrijeme (dvije i više godina) ne daje rezultat, razmatraju se druge opcije, a na prvom mjestu neurohirurški operativni zahvati (duboka moždana stimulacija (DBS)), resektivna neurohirurgija, laserska ablacija, implantacija vagus nerv stimulatora (VNS) i zračenje. Općenito, hirurške opcije se mogu klasificirati u tri kategorije: operacije koje uključuju lezionektomiju, operacije diskonekcije i implantate. Prednja temporalna lobektomija (uklanjanje dijela sljepoočnog riježnja mozga) npr. smanjuje broj napada kod pacijenata sa složenim parcijalnim napadom. Kalosotomija je metoda presijecanja spojnice (*corpus calosum*) između dvije moždane hemisfere i opcija je za pacijente s generaliziranim napadima, atoničnim napadima praćenih padom ili napadima „odsutnosti“ (absansi). U nekim slučajevima dovoljno je odvojiti male komadiće trakta bijele tvari ('moždani putevi') kroz koje se abnormalna aktivnost širi. S druge strane, treba imati na umu da nije svaki pacijent kandidat za operaciju. Radiohirurgija je efikasan i bezbjedan tretman za medicinski teško izlječivu epilepsiju uzrokovanu mezijalnom temporalnom sklerozom, kavernoznim malformacijama i hamartomima hipotalamusa. Uključuje primjenu fokusiranog zračenja na diskretno ciljno područje mozga, prethodno određeno magnetnom rezonancom (MRI). Strukturne abnormalnosti u medijalnom sljepoočnom rježnju mozga (npr. temporomezijalna skleroza) mogu dovesti do složenih parcijalnih napada (CPS), i obično je u ovakvim slučajevima kontrola napada lijekovima slaba. Prednja temporalna lobektomija smanjuje količinu napada kod pacijenata sa CPS. Rizik od značajnih postoperativnih neuroloških komplikacija je nizak. Kada pacijenti imaju generalizirane napade, atonične napade praćene padom ili pojavom 'odsutnosti', gdje EEG najčešće pokazuje obostrano koordinirana patološka kortikalna pražnjenja koja ne reaguju na AED terapiju, oni su kandidati za operaciju kalozotomije korpusa. Fokalni ili parcijalni napadi mogu se razviti do te mjere da se mogu proširiti kroz *corpus callosum* do

kontralateralne hemisfere, te uzrokovati generalizirani napad, što znači gubitak svijesti. Hirurška transekcija glavne konekcije između moždanih hemisfera (*corpus callosum*) prekida ili značajno sprječava ovo širenje između hemisfera. Danas se hirurške opcije fokusiraju samo na resekciju prednje polovine ili dvije trećine kalozuma. Stimulacija vagusnog nerva je manje invazivna, a generator VNS električnog impulsa se postavlja ispod kože na grudima i povezuje se sa vagusnim živcem (10-ti moždani živac, *nervus vagus*) pomoću električnog vodiča. Hirurške opcije liječenja uključuju određene rizike za pacijenta kao što su infekcija, intrakranijalno krvarenje, meningitis (upala moždanih ovojnica), curenje cerebrospinalne tekućine (likvora), neurološki deficiti (npr. pad verbalne memorije, hemipareza tj. slabost ekstremiteta, oštećenje vida i dr.) ovisno o mjestu operacije, te opšte komplikacije povezane s anestezijom, pa čak i smrt.

9.3. Resekcija

Svrha operacije resekcije je ekscizija područja gdje je izvor napada i smanjenje ili uklanjanje njegove aktivnosti. Vrste resekcionih operacija uključuju: resekciju lezija i nelezionih epileptogenih zona, lobektomiju i hemisferektomiju. Lezionektomija se koristi za uklanjanje jedne ili više definisanih lezija koje uzrokuju napade. U resekciji bez lezija, identificirano epileptično žarište se uklanja bez jasno definisane anatomske patologije. Na slici 9.1. prikazan je autentičan primjer kako uklanjanje epileptogene lezije (dobročudni tumor mozga), može istovremeno izliječiti pacijenta od dvije ozbiljne bolesti – benignog tumora i epilepsije.

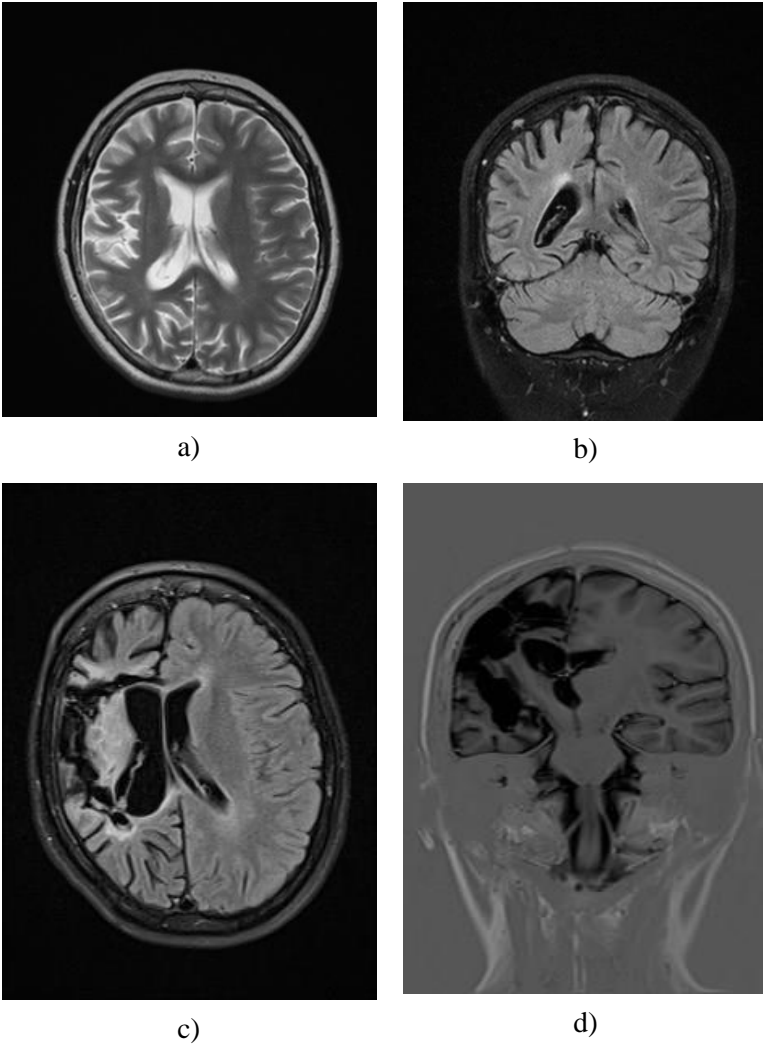


Slika 9.1. Snimak magnetne rezonance 28-godišnje pacijentice, majke dvoje malodobne djece, čije se zdravstveno stanje naglo pogoršalo tokom dojenja drugog djeteta, kada je dobila učestale epileptične napade. Inicijalna terapija lijekovima za epilepsiju nije dala očekivani rezultat. Učinjeno je MRI snimanje sa kontrastom,

te je otkrivena lezija u desnom temporalnom riježnju mozga (označeno strjelicama na slikama A, B i C). Pacijentica je operirana na Klinici za neurohirurgiju Kliničkog centra Univerziteta u Sarajevu, pri čemu je mikrohirurškom tehnikom radikalno uklonjen tumor. Patohistološki nalaz je pokazao da se radi o gangliogliomu – dobroćudnom tumoru mozga. Pacijentica je praktično operacijom izliječena i od tumora i od epilepsije. Kontrolni postoperativni follow up MRI snimak šest godina nakon operacije (slike D, E i F, kontrastna serija) pokazuje čistu zonu na mjestu ranijeg tumora, bez znaka recidiva. Pacijentica je uz saglasnost svojih ljekara pet godina nakon operacije rodila i treće dijete. (Skenovi iz arhive KCU Sarajevo - personalna serija autora, uz dozvolu pacijetice i operatera).

Lobektomija je uklanjanje rjeznja mozga koji sadrži žarište napada. Hemisferektomija je resekcija cijele hemisfere. Operacija se uglavnom primjenjuje kod pacijenata kod kojih teško oštećenje jedne hemisfere uzrokuje česte napade.

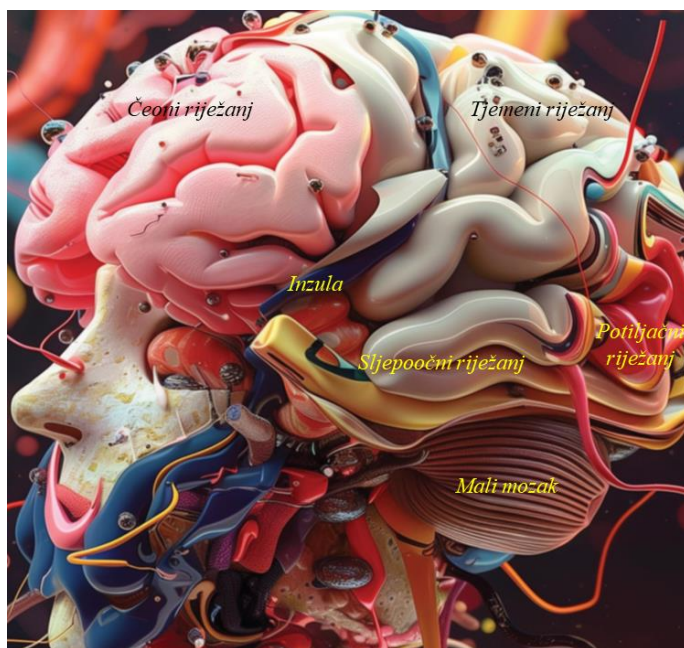
Razlozi zbog kojih pacijenti imaju jednostrano oštećenje na hemisferi tako jako mogu biti urođene ili stečene lezije mozga. Ovaj pristup se zamjenjuje manje invazivnom funkcionalnom hemisferektomijom kao na slici 9.2, u kojoj se jedna hemisfera odvaja, a manji dio hemisfere, epileptogeno područje uklonja.



Slika 9.2. Hirurški tretman kompleksne refrakterne epilepsije mladog pacijenta. a) i b): Preoperativni MRI mozga, aksijalni T2 i koronarni presjek, (2017 godine) ukazuje na naznačenu hemiatrofiju desne cerebralne hemisfere uz vrlo diskretne maglušave zone izmjenjenog intenziteta signala desno u centrum semiovale po tipu Rasmussenovog encefalitisa. Pacijentica je imala serije epileptičnih napada, koji se nisu mogli kupirati lijekovima (i

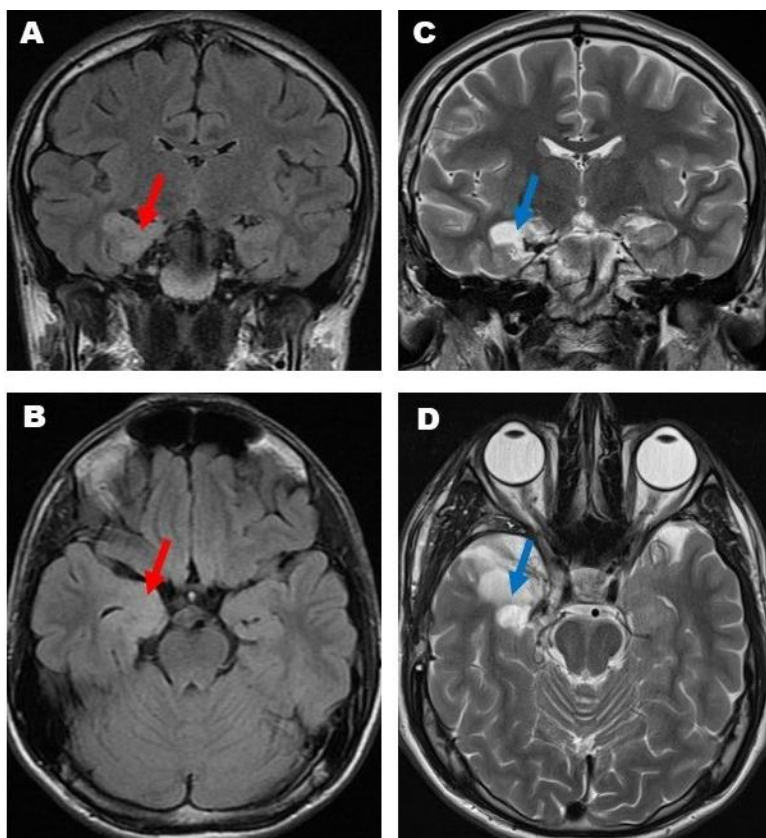
do 200 napada na dan). c) i d): Učinjena je kompleksna neurohirurška operacija tretmana epilepsije (funkcionalna hemisferektomija, 2017. god) na neurohirurškoj klinici u Sarajevu, nakon koje je zaostala monopareza lijeve ruke, ali su epileptični napadi praktično potpuno prestali. Slika pokazuje postoperativni nalaz dvije godine poslije operacije. Pacijentica je svjesna, samostalno pokretna. (Iz personalne serije operisanih pacijenata autora - IO, uz dozvolu)

Za ove operacije je ekstremno važno dobro poznavanje anatomije mozga. Na slici 9.3 slikovito je prikazana osnova građe mozga.



Slika 9.3. Riježnjevi velikog mozga – slikoviti prikaz: čeonu (frontalni) riježanj, tjemenu (parijetalni) riježanj, sljepoočni (temporalni) riježanj, potiljačni (okcipitalni) riježanj, inzula i mali mozak

Prednja temporalna lobektomija je primjer operacije resekcije i ovdje se uklanja kompletan dio prednjeg dijela temporalnog riježnja kako bi se liječio nastanak napada u kojem je prethodni medicinski tretman bio neuspješan. To je jedna od najčešćih operacija epilepsije zato što se kompleksni parcijalni napadi koji se ovdje javljaju mogu u značajnom procentu izliječiti. Na slici 9.4. prikazana je parcijalna temporomezijalna lobektomija (amigdalohipokampektomija).



Slika 9.4. Selektirani skenovi magnetne rezonance mozga (MRI) 21-godišnjeg mladića koji je u anamnezi imao epileptične napade 7 godina, a koji se nisu mogli kontrolisati kombinacijom i visokim dozama različitih antiepileptičnih lijekova. Učinjeno je snimanje magnetne rezonance koje je pokazalo tipičnu sliku

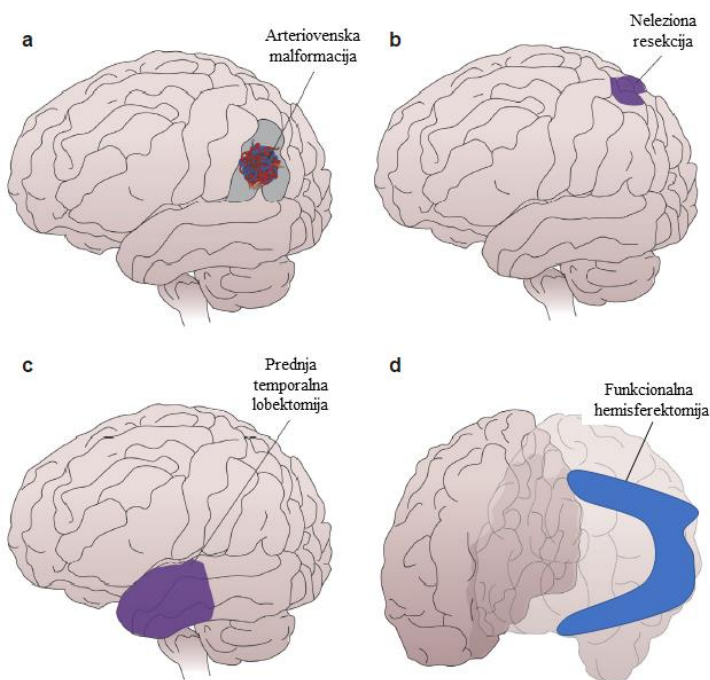
temporomezijalne skleroze desno. Učinjen je operativni zahvat resekcije epileptogene zone gdje su nakon hirurške intervencije epileptični napadi potpuno prestali. A. Koronarni T1 sken pokazuje zonu temporomezijalne skleroze desnog sljepoočnog (temporalnog) riježnja mozga. B. Aksijalni MRI sken istog pacijenta; Crvene strjelice pokazuju promijenjenu epileptogenu, patološku zonu odgovornu za nenormalna električna pražnjenja koja izazivaju početak epileptičnog napada. C. Koronarni kontrolni T2 MRI sken pacijenta, 4 mjeseca nakon operativnog zahvata. D. Aksijalni snimak istog pacijenta poslije operacije; Plave strjelice označavaju zonu likvora na mjestu hirurški uklonjene patološke sklerotične zone mozga. (Iz personalne arhive autora, IO, uz dozvolu).

Neke od resekcionih hirurških opcija prikazane su na slici 9.5.

7.1. Transekcija

Postupci transekcije (npr. kalosotomija korpusa, višestruka subprijalna transekcija) sprječavaju širenje aktivnosti napada s jednog područja mozga na drugo bez značajnog poremećaja i oštećenja funkcije mozga. *Višestruka subprijalna transekcija* je metoda kojom se paralelni redovi 4-5 mm dubokih kortikalnih incizija zasijecaju (oru) okomito na površinu korteksa. Cilj je prekinuti lateralnu regrutaciju neurona. Teorijska pozadina je da prekid u transekcijama presijeca horizontalne kortikalne veze kako bi se spriječilo širenje sinhronizovanih epileptičnih električnih pražnjenja i samim tim prekinuo 'strujni tok'. Ovaj hirurški zahvat se izvodi zbog velike prednosti kada je elokventni korteks uključen u epileptogene zone. Elokventni korteks (moždana kora, odgovorna za funkciju govora i važne motorne radnje npr.) opisuje područja korteksa koja, kada se uklone, rezultiraju lingvističkim, neurološkim deficitima ili paralizom. Pacijenti s epilepsijom kod kojih epileptogena zona uključuje na primjer jezik, primarni ili senzorni

motorni korteks su dobri kandidati za višestruku subpijalnu transekciju.



Slika 9.5. Vrste resekcijskih zahvata u hiruriji epilepsije: a) resekcija lezije koja prikazuje arteriovensku malformaciju, b) nelezijska ili MRI 'negativna' lezija, c) parcijalna lobektomija, d) hemisferektomija (uklanjanje velikog dijela hemisfere mozga)

Korpusna kalostomija se uglavnom primjenjuje kod pacijenata koji pokazuju simptome teške sekundarno generalizirane epilepsije. Ova grupa pacijenata ima uporne napade sa padom, koji uzrokuju povrede i kod kojih terapija antiepileptičkim lijekovima nije dovoljna, a druge hirurške procedure nisu moguće. Ova grupa pacijenata također pokazuje atonične napade, kao i teške smetnje u učenju. Nažalost, ishod za pacijente nije predvidljiv, a rizici ponekad nadmašuju potencijalne benefite za pacijente. Zbog ovih razloga

zahvat se ne izvodi često i uglavnom se posmatra kao palijativna operacija.

7.2. Neurostimulacija

Tehnike neurostimulacije uključuju: duboku moždanu stimulaciju, stimulaciju vagusnog nerva i responzivnu neurostimulaciju. *Duboka moždana stimulacija* (eng. deep brain stimulation – DBS) uključuje: prednju talamičku stimulaciju i responzivnu neurostimulaciju. Prednja talamička stimulacija je stimulacija radnog ciklusa gdje se postavljene elektrode stimulacije primjenjuju kontinuirano, potiskujući pojavu napada. Responzivni neurostimulacijski sistem (RNS) je paradigma stimulacije. Implantirani uređaj može otkriti početak napada s elektroda u blizini žarišta napada, a zatim isporučiti niz stimulansa koji će potisnuti napad u njegovoj evoluciji, što rezultira 'otkazivanjem', odgađanjem odnosno blokadom napada. *Stimulacija vagusnog nerva* je postupak u kojem se stimulator tj. pulsni generator, hirurški implementira na zid grudnog koša pacijenta, a potom se bipolarne elektrode omotavaju oko lijevog vagusnog živca. VNS terapija je efikasni neurofiziološki tretman za pacijente koji imaju refraktornu epilepsiju, a za koje drugi hirurški zahvati nisu prva opcija ili za pacijente koji nisu imali benefita od ranijih neurohirurških tretmana. Koristi se lijevi vagusni nerv jer kod većine pacijenata desni vagusni nerv kontroliše srčanu funkciju. Generator VNS pulsa šalje impulse u područja mozga povezana sa napadima. Cilj VNS terapije je spriječiti napade prije nego što počnu i zaustaviti ih ako počnu. Polovina pacijenata ima koristi od ovog uređaja smanjenjem učestalosti napada za oko 50-70%, te je moguće i reducirati količinu lijekova. Efekat VNS terapije je dugotrajan, te se povećava vremenom smanjujući učestalost i težinu napada, a samim tim se poboljšava kvalitet života pacijenta ali i smanjuju troškovi liječenja. Rani tretman sa VNS-om je od izrazitog značaja za pacijente (djecu i odrasle) sa medikamentozno rezistentnom epilepsijom.

7.3. Termalna ablacija

Termalna ablacija je također poznata kao laserska intersticijska termalna terapija ili LITT. To je manje invazivna operacija za precizno selektirane osobe s epilepsijom. Ne zahtijeva otvaranje lobanje. LITT koristi lasersku tehnologiju za ciljanje određene regije mozga s unaprijed određenom količinom energije. Laserska energija se pretvara u toplotu tj. toplotnu energiju. Ovo ima potencijal da ukloni ili uništi moždane stanice koje uzrokuju napade tj. žarište napada. Postupak se izvodi termalnom laserskom ablacijom vođenom magnetsnom rezonancom koja uzrokuje koagulaciju tkiva. Takođe, magnetna rezonanca (MRI) se koristi tokom procedure kako bi se pratila toplota i osiguralo da je ona usmjerena ka tačnom dijelu mozga koji se 'ablatira' ili uklanja. Dakle, uništava se fokus napada koristeći temperature oko 54°C. Najčešće indikacije su mezijalna temporalna skleroza (MTS) ili lezije koje su dobro ograničene. Temperatura na kojoj je sonda postavljena snima se kompjuterskim programom. Na ovaj način se štiti moždano tkivo koje okružuje žarište napada. U poređenju sa otvorenim hirurškim pristupima, laserska intersticijska termalna terapija ima manje postinterventnih komplikacija, a time i kraći boravak u bolnici. Korisna je metoda u liječenju epilepsije uzrokovane hamartomima hipotalamusa, fokalnom kortikalnom displazijom, mezijalnom temporalnom sklerozom i tuberoznom sklerozom.

7.4. Procedure zračenja

Radiohirurgija je precizna upotreba fokusiranog zračenja na manji volumen mozga identificiran pomoću MRI, uz minimalan rizik po neurološke funkcije. Radiohirurgija se danas koristi na različite načine, kao što su linearni akcelerator (LINAC), gama nož (*eng.* Gamma Knife) i stereotaktička radiohirurgija protonskim snopom (*eng.* Proton Beam).

7.5. AI u dijagnostici i liječenju epilepsije

AI algoritmi mogu analizirati ogromne skupove podataka iz različitih izvora kao što su EEG, MRI i historija pacijenata. Modeli mašinskog učenja mogu obraditi EEG podatke kako bi otkrili obrasce koji ukazuju na epileptičku aktivnost. Ovi sistemi mogu identificirati suptilne promjene ili anomalije koje ljudi mogu propustiti, omogućavajući raniju intervenciju. Tehnike obrade slike vođene umjetnom inteligencijom mogu analizirati snimak MRI kako bi se identificirale strukturne abnormalnosti u mozgu, kao što su lezije ili kortikalna displazija, koje su povezane s epilepsijom, što može značajno poboljšati dijagnostičku tačnost. Jedan od najznačajnijih izazova za osobe s epilepsijom je nepredvidljivost napada. AI u predviđanju napada:

- ✓ Prediktivni algoritmi: Istraživanja su pokazala da tehnike mašinskog učenja mogu iskoristiti podatke sa nosivih uređaja i EEG snimaka kako bi se predvidjeli predstojeći napadi. Identificiranjem specifičnih biomarkera i obrazaca prije napada, AI modeli mogu upozoriti pacijente i njegovatelje, dajući im vremena da preuzmu mjere predostrožnosti.
- ✓ Kombinacija podataka: Kombinovanje podataka iz više izvora poput otkucaja srca, temperature kože i senzora pokreta sa EEG podacima može poboljšati tačnost predviđanja, pružajući sveobuhvatan prikaz potencijalnih pokretača napada.

7.5.1. Personalizirani planovi liječenja

AI može pomoći u kreiranju individualiziranih planova liječenja za pacijente s epilepsijom:

- ✓ Farmakogenomika: Analizom genetskih informacija pacijenta uz njihov odgovor na različite lijekove, AI alati mogu preporučiti najefikasnije antiepileptičke lijekove, minimizirajući pristupe pokušaja i pogreške.
- ✓ Životni stil i analiza okidača: Aplikacije vođene umjetnom inteligencijom mogu analizirati faktore načina života, obrasce spavanja i druge lične podatke kako bi identificirali potencijalne okidače napada kod pojedinaca, pomažući u usmjeravanju modifikacija životnog stila.

7.5.2. Monitoring i upravljanje

Kontinuirano praćenje pacijenata sa epilepsijom je ključno za efikasno upravljanje, a AI nudi inovativna rješenja:

- ✓ Nosiva tehnologija: Nosivi uređaji sa AI mogu kontinuirano pratiti fiziološke parametre, pružajući podatke u realnom vremenu koji se mogu koristiti za praćenje aktivnosti napada i ukupnog zdravstvenog stanja. Ovi uređaji mogu upozoriti pružaoce zdravstvenih usluga na značajne promjene.
- ✓ Integracija telemedicine: Alati sa AI mogu olakšati daljinsko praćenje, omogućavajući zdravstvenim radnicima da procijene napredak pacijenata i pravovremeno prilagode planove liječenja bez potrebe za ličnim posjetama.

7.5.3. Budući pravci i izazovi

Iako integracija AI u dijagnostiku i liječenje epilepsije predstavlja uzbudljive mogućnosti, ostaje nekoliko izazova:

- ✓ Privatnost podataka : Upotreba ličnih zdravstvenih podataka u AI algoritmima izaziva zabrinutost u pogledu sigurnosti podataka i privatnosti pacijenata. Osiguranje usklađenosti sa propisima kao što je HIPAA je od suštinskog značaja.

- ✓ Generalizacija: Modeli mašinskog učenja zahtevaju opsežne podatke o obuci da bi se efikasno generalizovali među različitim populacijama. Osiguravanje da su AI sistemi obučeni na različitim skupovima podataka je ključno kako bi se izbjegle pristranosti i poboljšala pouzdanost.
- ✓ Klinička integracija : Da bi AI bila zaista uticajna, mora biti neprimjetno integrisana u kliničke tokove rada. Ovo zahtijeva saradnju između naučnika, neurologa i zdravstvenih radnika kako bi razvili alate prilagođene korisniku kojima kliničari mogu vjerovati.

AI pomjera paradigmu dijagnostike epilepsije i predviđanja bolesti, nudeći alate koji poboljšavaju otkrivanje, povećavaju preciznost predviđanja i personaliziraju planove liječenja. Iako postoje izazovi, kontinuirani napredak u AI obećava značajno poboljšanje kvaliteta života za osobe koje žive s epilepsijom. Kako istraživanje napreduje, usvajanje AI u kliničkim okruženjima će vjerovatno jasnije definisati put za efikasnije upravljanje i bolje ishode za pacijente s ovim složenim neurološkim poremećajem.