

BROKINA ZONA – OD GOVORA DO MUZIKE

Ivana P. Arsenić
Dragan M. Pavlović
Nadica Đ. Jovanović Simić

UDK: 616.93.454-069.7

Fakultet za specijalnu edukaciju i rehabilitaciju, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

NAPOMENA
Rad je delom finansiran sredstvima iz projekata broj 179068 i 175033 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Kratak sadržaj

Brokina zona je još 1861. godine nazvana centrom gorovne artikulacije. Smatra da je ona odgovorna za kontrolu pokreta mišića govornog aparata i srodnih pokreta usana, jezika, larinksa i farinksa. Brokina zona ima primarnu ulogu u stvaranju programa gorovne produkcije kao i fonetsko-fonološkim, sintaksičkim i semantičkim aspektima jezika, a takođe omogućava i usvajanje gramatičkih pravila. Osim u proces produkcije, Brokina zona je uključena i u proces razumevanja jezika, kao i u ostvarivanje drugih jezičkih funkcija.

Međutim, postoje različite kontroverze o povezanosti Brokine zone i jezičkih funkcija. Upravo lezije locirane u Brokinoj oblasti ne dovode uvek do Brokine afazije, a osim toga pacijenti sa Brokinom afazijom nemaju uvek leziju u Brokinoj zoni. Takođe, utvrđeno je da neke od funkcija koje su se smatrале primarnim za Brokino polje, ova area ostvaruje u interakciji sa drugim oblastima korteksa, a da se one mogu ostvariti i zahvaljujući aktivaciji nekih subkortikalnih oblasti.

Iako je veliki broj studija pokazao aktivaciju Brokine zone prilikom izvršenja jezičkih zadataka postoje i studije koje su dokazale da se ova zona aktivira i prilikom nelingvističkih zadataka. Tako ona učestvuje u imitaciji pokreta, hvatanju, manipulaciji predmetima, radnoj memoriji, prepoznavanju poznatih mirisa, muzici i drugim kognitivnim funkcijama, pa samim tim savremene studije koje se bave ulogom Brokine zone u ostvarivanju jezika, danas postavljaju pitanje redefinisanja osnovnih funkcija koje su se pripisivale Brokinoj arei.

Ključne reči: Brokina zona, govor, produkcija, lingvistički i nelingvistički aspekti

UVOD

Danas su poznate činjenice o asimetriji mozga i dominantnosti hemisfera. Najstariji pokušaji da se lokalizuje sedište jezika u ljudskom mozgu pripisani su istraživačima iz oblasti frenologije. Oni su utvrdili da lezije locirane u anteriornim oblastima mozga dovode do jezičkih oštećenja pri čemu opšta inteligencija ostaje očuvana. Frenolozi su se bavili proučavanjem obe moždane hemisfere, ali su početkom 19. veka utvrdili da je gubitak jezičkih funkcija češće povezan sa oštećenjima leve hemisfere [1].

Francuski neurolog Pol Broka je 1861. godine opisao slučaj pacijenta sa afazijom i ograničenom lezijom u levoj velikomoždanoj hemisferi [2]. Brokin pacijent, poznatiji kao „gospodin Lebornj (Leborgne)“ ili „Tan“ zato što je to bila jedina reč koju je mogao da izgovori (iako pokreti jezika i usana nisu bili oštećeni) bio je slučaj od istorijskog značaja. Nakon smrti gospodina Lebornja, Broka je izvršio autopsiju njegovog mozga i otkrio oštećenje tkiva u posteriornom delu frontalnog girusa leve hemisfere. Oštećenje levog frontalnog režnja se protezalo od donjeg dela treće frontalne vijuge do insule i striatuma [3]. Broka je utvrdio da je taj deo mozga centar govorne artikulacije i predložio termin „afemija“ koji je bio u skladu sa postojećim oštećenjem jezika. Afemija je termin koji podrazumeva čistu nemost za reči, tačnije označava poremećaj ekspresivnog govora, tj. poremećaj artikulacije jezičkih simbola. Termin koji je Broka predložio nije bio prihvaćen u medicinskoj literaturi i ubrzo je zamenjen terminom „afazija“ koji se odnosi na stečeni poremećaj sim-

boličke komunikacije uzrokovani oštećenjem mozga, koji se manifestuje poremećajem lingvističkih, paralingvističkih i kognitivnih procesa koji se nalaze u osnovi jezika. Mozak pacijenta se i danas čuva u anatomske muzeje u Parizu, pa su kasnija istraživanja, tehnikama sa visokom rezolucijom, otkrila da je oštećenje mozga bilo mnogo dublje nego što je to Broka utvrdio. Ipak, otkriće Pola Broka smatra se trenutkom kada je rođena afaziologija kao nauka i ključnim polazištem za sva istraživanja koja su se bavila lokalizacijom jezika [4].

Upravo studije izvedene na afazičnim pacijentima pokazuju povezanost lezija nekih oblasti kore velikog mozga i pojave jezičkih poremećaja. Sa druge strane, u slučaju oštećenja nekih drugih oblasti korteksa jezičke funkcije ostaju očuvane. Zahvaljujući tim saznanjima utvrđeno je da je leva hemisfera dominantna za govor kod više od 90% ljudi [5].

ANATOMO - FUNKCIONALNE OSNOVE BROKINE ZONE

Brokina zona se nalazi u zadnjem delu donje frontalne vijuge leve hemisfere [44. i 45. polje po Brodmanu (Brodmanova area, (BA))]. Area 44 se na osnovu sastava neurona i receptora deli na dorzalnu i ventralnu oblast i nešto je veća u levoj nego u desnoj hemisferi mozga, a area 45 se deli na prednji (anteriorni deo) i zadnji (posteriorni) deo i približno je iste veličine u obe hemisfere [6]. Brokina area je povezana sa temporalnim korteksom na taj način što je BA 44 povezano dorzalnim putem koji sadrži i fasciculus arcuatus i fasciculus

longitudinalis superior, Brodmanovo polje 45 preko sistema vlakana capsulae extremae, a frontalni operkulum putem fasciculusa uncinatusa sa prednjom temporalnom korom [7]. Oštećenje ove oblasti dovodi do čitave grupe simptoma jezičkog poremećaja koji reprezentuju sindrom Brokine afazije. Brodmanove aree 44 i 45 nalaze se u obe moždane hemisfere, ali skoro svi pacijenti sa ovim tipom afazije imaju lezije u donjem levom frontalnom korteksu [6]. Smatra da Brokina zona ima primarnu ulogu u stvaranju programa govorne produkcije i sintaksičkim aspektima jezika. Takođe, omogućava i usvajanje gramatičkih pravila [8].

Brodmanovo polje 44 (area opercularis) u levoj hemisferi mozga predstavlja deo Brokine zone i odgovorna je za produkciju govora, tačnije povezivanje elemenata govora u smislene sekvenце, izbor informacija između različitih izvora, sintaksu i fonološke aspekte, složenu semantiku i verbalnu radnu memoriju. U ovom polju se stvaraju motorni programi za govornu aktivnost, kontrolu pokreta mišića govornog aparata i srodnih pokreta usana, jezika, larinksa, farsinika. Impuls za usmeni govor ide preko premotorne i motorne oblasti za mišiće govornog aparata i lica [7].

Oštećenje ove aree dovodi do blažih motornih afazičkih smetnji (tzv. „baby“ Broca) [9], ali ako lezija zahvati i dublje delove bele mase i susedne oblasti kore, nastaje klasična Brokina motorna afazija [10]. Brodmanovo polje 45 (area triangularis) takođe čini deo Brokine zone, ali ima složenije funkcije u odnosu na areu 44. Ona ima ulogu u mnogim govornim funkcijama kao što su: govorna

pažnja, produkcija reči, primena gramatike, fluentnost govora, semantičko odlučivanje između konkretnog i apstraktnog, u asocijaciji glagola sa imenicom, u izgovoru glasova tokom čitanja naglas, razumevanju afektivne prozodije [11]. Takođe postoje pretpostavke da ova oblast posreduje i u radnoj memoriji u domenu semantike, neverbalnih informacija i dugoročnom deklarativnom pamćenju [7].

Polja 44 i 45 imaju i mnoge zajedničke funkcije, npr. produkciju i razumevanje govora, tematske aspekte govora, ulogu u radnoj i epizodičnoj memoriji, motornoj inhibiciji u sklopu egzekutivnih funkcija, prepoznavanju poznatih mirisa i uživanju u muzici [7]. Smatra se da BA 44 i BA 46 imaju ulogu u fonološkim procesima, 44 i 45 u sintaksičkim procesima i 45 i 47 u semantičkim procesima dok je cela frontalna govorna area u donjem frontalnom girusu mesto integracije [12]. Brokina area posreduje i sekvencijaciju uopšte čak i u vizuospacijskom domenu [7]. Takođe ima ulogu i u ostvarivanju motornih funkcija, npr. hvatanju (area 44) i manipulaciji objektima [13]. Lezija Brokine zone dovodi do ozbiljnih eksprezivnih jezičkih deficitova. Javljuju se i ne-lingvističke poteškoće koje dovode do problema u razumevanju znakova, gestova i pantomime.

GOVOR (SINTAKSIČKI I SEMANTIČKI ASPEKTI)

Rane studije

Neurohirurg Penfield je prvi eksperimentalno pokazao uključenost Brokine zone u govornu produkciju uz pomoć električne stimulacije frontalnog režnja

kod budnih pacijenata u toku operacije mozga [14]. Međutim mnoga kasnija istraživanja su pokazala da su i Brokina i Vernikeova zona uključene i u proces produkcije i u proces razumevanja jezika [15], [16]. Ova istaživanja su pokazala da električno stimulisanje Brokine zone dovodi do deficit govorne produkcije, ali i do deficit u razumevanju jezika. Deficiti u razumevanju su se uglavnom odnosili na poteškoće u davanju odgovora na složene verbalne naloge. Takođe, deficiti u razumevanju su se više ispoljavali na zadacima u kojima se koristio verbalni materijal koji je zahtevao sintaksičko razumevanje. Poređenjem uloge Brokine i Vernikeove zone u jezičkom razumevanju utvrđeno je da se Brokina zona aktivira više prilikom razumevanja sintaksički kompleksnog ili dvostručnog materijala [17].

Prepostavlja se da je Brokina zona odgovorna za stvaranje programa za produkciju jezičkih simbola i izdavanje komandi za primarno motorno polje (Brokina area 4) odakle se šalju impulsi u mišiće larinksa, nepca, jezika i usana, koji omogućavaju procese artikulacije i fonacije [5]. Takođe, ova oblast nema ulogu samo u serijskom slaganju fonema, morfema i fleksivnih nastavaka, već i u sintaksičkom uređivanju rečenice. Karakteristike jezičkih poremećaja koji se javljaju usled lezije Brokine zone, pokazuju da je ona odgovorna za fone-tsko-fonološke i sintaksičke aspekte jezika [5].

Luria je još 1973. godine opisao deficit jezičke produkcije koji su povezani sa sindromima frontalnog režnja, kao „dinamičku afaziju“ smatrajući da jezički deficit dolaze i nestaju kao funkcija

konteksta [18]. Drugi autori navode da lezije ograničene na Brokinu zonu rezultiraju sindromom koji liči na transkortikalnu motornu afaziju, jer se deficiti produkcije primarno uočavaju na zadacima verbalne fluentnosti ili pričanju priča [19]. Takođe postoje dokazi koji ukazuju na to da oštećenja prefrontalnog korteksa (nekada i samo Brokine zone) rezultuju oštećenjem sposobnosti da se pronađe reč, tačnije da se izvrši izbor između alternativa (npr. na zadacima verbalne fluentnosti gde se imenuju životinje, ili navode reči koje počinju na neko slovo) [19].

Međutim, postoje različite kontroverze o povezanosti Brokine zone i jezičkih funkcija. Upravo lezije locirane u Brokinoj oblasti ne dovode uvek do Brokine afazije, a osim toga pacijenti sa Brokinom afazijom nemaju uvek leziju u Brokinoj zoni.

Funkcionalna vizualizacija mozga

Veliki broj studija, u kojima su se koristile metode funkcionalne vizualizacije mozga, pokazao je aktivaciju Brokine zone prilikom izvršenja jezičkih zadataka [20]. Postoje i studije koje su dokazale da se ova zona aktivira i prilikom nelingvističkih zadataka [21]. Pregledom studija koje su koristile funkcionalnu magnetnu rezonancu (fMRI), utvrđeno je da je donji frontalni girus u raznim zadacima bilateralno aktiviran, ali pokazuje levostranu dominantnost u toku zadataka koji zahtevaju imenovanje, fonološke odluke, semantiku i sintaksu [22]. Brokina zona se takođe aktivira prilikom usvajanja gramatičkih pravila, diskriminacije govornih glasova, produkcije reči, procene vremenskih in-

tervala i ponavljanja ritma [22]. Stoga je ova zona izgleda uključena i u procese percepcije i u procese produkcije govora.

Studije o fluentnim govornicima znakovnog jezika su pokazale da Brokina zona igra ključnu ulogu u jezičkoj produkciji, iako se produkcija kod ovih govornika primarno oslanja na upotrebu ruku i šaka [23]. Takođe su Horvic i sar. [24] u svom istraživanju, primenom pozitronske emisione tomografije (PET), utvrdili da se BA 45 u levoj hemisferi mozga aktivira i prilikom oralnog govora i prilikom korišćenja američkog znakovnog jezika (American Sign Language - ASL) kod bilingvalnih govornika koji su fluentni od najranijeg detinjstva i u korišćenju američkog znakovnog jezika i u govornom engleskom jeziku. Ova aktivacija je utvrđena prilikom izvođenja kompleksnih pokreta i zvukova. Sa druge strane je nađena izrazito mala (ako i bilo kakva) aktivacija BA 45 prilikom zadatka motorne kontrole. Za BA 44 je nađena veoma mala kortikalna aktivacija prilikom govora i kod bilingvala i kod monolingvala, a isto tako mala aktivacija i tokom znakovnog jezika, ali je polje 44 bilo izrazito aktivno tokom motornih zadatka u odnosu na ostale, naročito prilikom izvođenja složenih artikulatornih pokreta oralne/laringealne muskulature i pokreta mišića udova [24].

Druge studije su se, takođe, bavile proučavanjem funkcija Brodmanovog polja 44. Tako Binkofski i sar. [21] ukazuju na aktivaciju BA 44 u zadacima koji nemaju lingvističke komponente, kao što su zadaci sa pokretnim slikama. Osim toga, posueriori delovi Brokine zone

uključujući BA 44, aktiviraju se tokom manipulacije predmetima [25], kao i tokom imitacije [26]. U istraživanju u kome su korišćene različite metode funkcionalne moždane vizualizacije [27] pokazala se uključenost BA 44 u govornoj produkciji, prilikom poređenja produkcije rečenice naspram produkcije pojedinačnih reči.

Savremene studije koje se bave ulogom Brokine zone u ostvarivanju jezika, danas međutim, postavljaju pitanje redefinisanja osnovnih funkcija koje su se pripisivale Brokinoj zoni. Iako su sup-kortikalne afazije česti neurološki poremećaji, njihova neurološka osnova nije u potpunosti jasna. Između ostalog, smatra se da ovaj tip afazije može nastati kao posledica prekida veze između određenih kortikalnih jezičkih oblasti. Fridrikson i sar. [28] su ukazali na pojavu teškog oblika Brokine afazije bez oštećenja u samoj Brokinoj zoni. Iako je funkcionalna magnetna rezonanca ukazivala na povećanu aktivaciju Brokine zone i levog srednjeg temporalnog režnja kod ovog pacijenta tokom zadatka imenovanja, bilo je jasno da je prekinuta veza između anteriornih i posueriornih jezičkih oblasti. Tačnije, delovi bele mase Brokine zone nisu dosezali do posueriornih jezičkih oblasti preko lučnog snopa (fasciculus arcuatus). Iako je auditivno razumevanje bilo relativno neoštećeno, pacijent je imao tešku eksprezivnu afaziju. Ovaj slučaj je ukazao na to kako prekid veze između kortikalnih jezičkih oblasti može dovesti do teškog oštećenja gororne produkcije i repeticije, i relativno očuvanog jezičkog razumevanja.

Mnoge skorije studije neurovizualizacije potvrđuju ulogu levog frontalnog operkuluma u govornoj produkciji ili fonološkom procesiranju. Međutim Tompson-Šil zajedno sa saradnicom Barde [29] navodi argumente protiv hipoteze da je Brokina zona specijalizovana za fonološko procesiranje. Ovi argumenti su se zasnivali na rezultatima studije u kojoj je korišćena fMRI u kojoj su poređeni čuvanje i manipulacija semantičkim i fonološkim informacijama u odloženom prepoznavanju paradigmе radne memorije. Posmatrana je modulacija aktivnosti u Brookinoj zoni u funkciji obrade zahteva (više aktivnosti kada je subjekat morao da manipuliše informacijom tokom memorijskog odlaganja, u odnosu na to kada je pasivno održavao tu informaciju), ali bez razlike između semantičkog i fonološkog stanja obrade.

Tompson [29] u svom radu navodi mnoga istraživanja koja dovode u pitanje dosadašnja shvatanja o ulozi Brokina zone. Npr., neuropsihološka istraživanja koja su ukazala na činjenice koje ne podržavaju postojanje veze između Brokine zone i procesa artikulacije. U grupi pacijenata koji su kategorisani kao oni sa Brokinom afazijom, oštećenja artikulacije i prozodije i prisustvo fonemskih grešaka bilo je povezano sa lezijama izvan Brokine zone, dok su, sa druge strane, pacijenti sa lezijom ograničenom na Brookino polje imali normalnu artikulaciju [29]. Tompson [29] ističe i studiju Dronkers i saradnika u kojoj je nađena jasna korelacija između lokalizacije lezije i gorovne apraksije koja podrazumeva deficite artikulacije i obično se povezuje sa Brokinom afazijom. Međutim u tom istraživanju sama lokalizacija lezije uopšte

nije bila vezana za Brokinu zonu, već je to pre bio izolovan deo levog precentralnog girusa insule. Tompson navodi i noviju studiju Dronkers i saradnika iz 2000. godine u kojoj je takođe potvrđeno da je Brokin pacijent Lebornj imao obimno supkortikalno oštećenje uključujući i insulu [29].

Brokina zona se smatra sedištem sintakse, ili još preciznije specifičnih sintaksičkih operacija. Ipak, u novijim istraživanjima [30] je navedeno da ovo ne mora biti pravilo jer se slični šabloni aktivacije viđaju u frontalnoj i temporalnoj kori obe hemisfere, a ne samo u Brookinoj zoni. Takođe, do sada se uvek govorilo o aktivaciji prefrontalnog korteksa prilikom funkcija radne memorije, međutim skorašnje studije koje su se bavile pitanjem verbalne radne memorije pokazuju da, za razliku od lezija u temporoparijentalnom korteksu, lezije u prefrontalnom korteksu ne dovode uvek pouzdano do oštećenja kapaciteta radne memorije [31].

Iako je široko prihvaćeno da Brokina zona omogućava ostvarivanje govornog jezika, postavlja se pitanje vremena njenog podsticanja aktivnosti drugih jezičkih oblasti i njene interakcije sa ovim oblastima u toku gorovne produkcije. Flinker i sar. [32] su otkrili da tokom izgovaranja, vremenske kaskade neuralne aktivnosti napreduju od senzornih reprezentacija reči u temporalnom korteksu do njihovih odgovarajućih artikulatornih pokreta u motornom korteksu. Brookino područje je u ovom slučaju medijator ove kaskade kroz recipročne interakcije sa temporalnim i frontalnim motornim neuronima. Suprotno klasičnom shvatanju uloge Bro-

kine zone u govoru, dok je motorni kortex aktiviran u toku davanja usmenih odgovora, Brokina zona je iznenađujuće mirna. Tačnije, kada se produkuju novi nizovi artikulatornih pokreta kao odgovor na neverbalni stimulus, neutralna aktivnost se poboljšava u Brokinoj zoni, ali ne i u motornom kortexu [32]. To dokazuje da Brokina oblast koordinira transformacijom informacija kroz široke oblasti kortikalnih mreža koje su uključene u proces govorne produkcije. Brokina zona formuliše adekvatan artikulatori kod koji se ostvaruje motornim kortexom. Iako ovakvi zadaci zahtevaju različite kognitivne procese (fonološke, sintaksičke i semantičke), oni svi dele zajednički set kortikalnih operacija koji se sastoji od preuzimanja fonološke reprezentacije reči, njenog prevođenja u artikulatori kod, kao i koordinisanje finih motornih pokreta artikulacije [32]. Ipak se i dalje postavlja pitanje o tačnoj ulozi Brokine zone u ovom setu kortikalnih operacija. Neki autori navode da Brokina oblast učestvuje u fonološkoj reprezentaciji reči, a da se zatim takva reprezentacija šalje do motornih regiona gde se transformiše u fonološke (artikulatorne) kodove [33]. Neuropsihološke studije i studije lezija ukazuju na umešanost Brokine zone i drugih regiona, kao što je insula u koordinaciji artikulacije [34]. Ovakvi modeli predviđaju aktivaciju Brokine oblasti u različitim fazama produkcije reči: u toku fonološkog procesiranja (pre artikulacionog enkodiranja), generiranja artikulatornog koda (fonekskog enkodiranja) i koordinisanja artikulatora.

Flinker i sar. [32] su dokazali da se tokom zadatka na kojima se zahteva

produkcija reči, kao što je auditorno ponavljanje reči, neuralne reprezentacije izgovorenih reči prosleđuju od senzornih oblasti do prefrontalnog kortexa, gde Brokina zona povezuje reprezentacije sa artikulatornim kodom koji se zatim sprovodi do motornog kortexa odgovornog za koordinaciju artikulacije. Iako je kod Brokine afazije jedno od najupadljivijih oštećenja deficit motorne produkcije, deluje iznenađujuće da sama Brokina zona nije uključena u proces krajnje artikulacije. Ovo se poklapa sa drugim studijama koje pokazuju da lezije limitirane na Brokinu zonu ne izazivaju Brokinu afaziju, ali rezultiraju prolaznim mutizmom koji se brzo poboljšava. Takođe se insula smatra odgovornom za koordinaciju samih artikulatora. Ipak ovi autori [32] smatraju da je Brokina zona angažovana prilikom artikulatornog enkodiranja. Takođe ovi autori navode da procese fonološke segmentacije, sintaksičkog procesiranja, povezivanja različitih tipova lingvističkih informacija, Brokina zona ostvaruje zahvaljujući vezi sa temporalnim i frontalnim oblastima odgovornim za fonemske i artikulatorne reprezentacije, kao i povezivanjem sa motornim kortexom pre same govorne produkcije. Tako da Brokina zona nije sama po sebi odgovorna za artikulaciju, ali je ključna u manipulisanku i prosleđivanju neuralnih informacija širom kortikalne mreže koja je odgovorna za govornu produkciju.

PERCEPCIJA GOVORA

Iako je sama Brokina zona identifikovana kao sedište fonologije, gramatike, pa čak i specifičnih gramatičkih operacija,

studije funkcionalne vizuelizacije mozga je povezuju sa čitavim nizom lingvističkih i nelinguističkih procesa [35]. Takođe se dugo smatralo da je uloga Brokine zone ograničena više na jezičku produkciju, nego na jezičko razumevanje, ali savremena istraživanja pokazuju da Brokina area igra značajnu ulogu u razumevanju jezika, isto onoliko koliko i u jezičkoj produkciji [35].

Mnogi autori navode i aktivaciju Brokine zone u percepciji i diskriminaciji govora sagovornika u kome se javljaju brze tranzicije formanata kod konsonanta [36]. Miler i sar. [37] su pokazali, u studiji u kojoj je korišćena fMRI, da se levi donji frontalni girus i levi temporalni režanj aktiviraju prilikom percepcije brezih neverbalnih promena frekvencije (30-40 ms), dok se za sporije prelaze (100 ms) aktivirao desni auditorni kor-teks. Ovo istraživanje je takođe pokazalo da levi donji frontalni girus učestvuje i u procesima koji se odvijaju izvan jezika, tačnije van njegovih osnovnih funkcija u produkciji reči, semantičkom odlučivanju i sintaksičkom razumevanju. Ali i pored toga smatraju da postoji veza između neverbalne auditorne diskriminacije i lingvističkih procesa, tj. da su formantni prelazi koji su analogni promenama frekvencija, a korišćeni u ovom radu, važni za fonemsку diskriminaciju. Promene frekvencije se mogu porebiti sa promenama formanata u slogovima i rečima isto kao i u suprasegmentnim prozodijskim informacijama koje prave razliku između upitne i izjavne rečenice [37].

U studijama u kojima su korišćene metode funkcionalne vizualizacije i transkranijalna magnetna stimulacija (TMS)

utvrđena je aktivaciju girusa triangularisa (BA 45) u obe hemisfere tokom semantičke obrade u toku jezičkog razumevanja. Tačnije uloga se odnosila na kontrolisano pronalaženje semantičkih saznanja ili u izboru između konkurentnih alternativa semantičke interpretacije [38]. Ako je BA 45 uključena u semantičko pronalaženje ili selekciju, onda sledi da je izrazito aktivna i u toku leksičke ili rečenične dvosmislenosti. Rod i sar. [39] su takođe utvrdili, uz pomoć istraživanja fMRI, da se Brodmanovo polje 45 aktivira tokom slušanja rečenica koje imaju visoku sematičku dvosmislenost.

BROKINA AFAZIJA

Brokina afazija koja nastaje kao posledica oštećenja Brokine zone u trećoj frontalnoj vijuzi leve hemisfere naziva se još i motorna afazija, eferentna motorna afazija i ekspresivna afazija. Pavlović i Pavlović [7] opisuju dva glavna varijeteta Brokine afazije: veliku i malu. Velika Brokina afazija nastaje kao posledica lezije frontalnog operkuluma dominantne hemisfere sa širenjem u dublje partie mozga zahvatajući i bazalne ganglike i često počinje kao globalna afazija i evoluiše u klasični tip. Mala Brokina afazija (afazija Brokine oblasti) ima benigniji tok i obično od mutizma evoluiše u fluentniju varijantu sa manjim pojavama oklevanja, agramatizma i disprozodije, pri čemu je razumevanje složenih sintaksičkih struktura otežano.

Kada je Broka sproveo istraživanje 1861. godine, koje je smatrano polazištem u istraživanjima o jezičkoj lokalizaciji, Brokina afazija je opisana kao sindrom

koga karakteriše izrazito naporna govorna produkcija, oštećenje melodije i artikulacije, semantičke i fonemske parafazije, produkcija telegrafskih rečenica, redukovana i abnormalna gramatička forma [19]. Prema Bensonu [40] Brokinu afaziju karakteriše nefluentan govor, retke literarne parafazije, loša repeticija, dobro razumevanje i loše imenovanje.

Vuković [41] navodi osnovne karakteristike Brokine afazije i to su: nefluentan, kolebljiv spontani govor, koji se karakteriše nepotpunim i sintakksički pojednostavljenim i agramatičnim rečenicama, redukovanim dužinom fraze (do četiri reči), izmenjenom prozodijom i otežanom artikulacijom. Takođe navodi da su poremećaji verbalne produkcije često praćeni apraksijom govora i agramatizmom, a da pacijenti sa Brokinom afazijom znatno variraju u pogledu konstelacije simptoma i očuvanih verbalnih sposobnosti (neki od njih ostvaruju produkciju od jedne do dve reči, dok drugi pokazuju samo relativno blagi poremećaj fluentnosti govora).

Pavlović i Pavlović [7] navode da su osnovne karakteristike ovog tipa afazije nefluentan govor, otežana artikulacija, oštećena prozodija i agramatizam. Mogu se ispoljavati i fonetsko-fonološki deficiti, verbalne perseveracije i verbalna apraksija. Pisanje je takođe otežano uz gramatičke i sintakksičke smetnje i disnomiju. Razumevanje je relativno očuvano, a očuvan je i uvid u sopstveno stanje pa je moguća i pojava depresije. Kod ovih osoba može biti očuvana sposobnost pevanja što se objašnjava neoštećenošću desne hemisfere.

OSTALI NEUROPSIHOLOŠKI POREMEĆAJI KOD OŠTEĆENJA BROKINE AREE

Jedna od potvrda da donji levi frontalni girus učestvuje i u neverbalnim procesima je studija Kramsa i sar. [37] gde se pokazuje aktivacija BA 44 u levoj hemisferi kada se osoba sprema da pomeri prst desne ruke kao odgovor na vizuelni stimulus. Takođe se aktivacija BA 44 i BA 45 leve hemisfere vezuje za aktivnosti koje uključuju verbalnu radnu memoriju [37] koristeći stimuluse u vidu slova, lica i oblika.

Dokazano je da je BA 44 u obe hemisfere uključeno u integraciju ili upravljanje akustičkih i/ili vizuelnih informacija o pokretima usana sa motornim planovima za produkciju tih pokreta [38]. Tačnije, zbog svega prethodno navedenog, smatra se da BA 44 ima ulogu u fonetskom procesiranju, preciznije da ovo polje i druge motorne oblasti doprinose poboljšanju prepoznavanja glasova kada se posmatraju pokreti usana prilikom gorovne produkcije. Pars triangularis i pars opercularis u obe hemisfere imaju funkcionalnu ulogu u prepoznavanju, imitaciji i produkciji aktivnosti. Takođe postoje prepostavke da su im uloge u procesiranju aktivnosti funkcionalno drugačije. Veliki broj studija nalazi vezu između uključenosti Brokine zone u jezičko procesiranje i procesiranje aktivnosti [42], [6].

Interesantna je prepostavka da Brokina zona ima ulogu i u kogniciji glasa. U srednjem i prednjem delu temporalnog sulkusa nalazi se area za glas i ona se aktivira prilikom opažanja govornih i negovornih glasova [43]. Međutim

osim temporalnog, za kogniciju glasa važan je i donji prefrontalni režanj obe hemisfere, a Brokina zona predstavlja mesto auditivne radne memorije, integracije multimodalnih senzornih informacija, afektivne prozodije i drugih paralingvisičkih aspekata glasa i govora [7].

SISTEM OGLEDALSKIH NEURONA

Za razliku od drugih vrsta, ljudi imaju sposobnost da uče putem imitacije. Smatra se da neuropsihološki mehanizam „ogledalski neuroni“ ima ključnu ulogu kako u razumevanju tako i u imitaciji. Direktnih dokaza o postojanju ogledalskih neurona kod ljudi nema baš puno, ali velika količina podataka ipak indirektno pokazuje da ogledalski neuroni postoje kod naše vrste [44]. Ti dokazi najčešće dolaze iz neuropsiholoških eksperimenata i eksperimenata koji podrazumevaju snimanje mozga. Ova istraživanja pokazuju da se dok pojedinac posmatra akciju koju izvršava drugi pojedinac aktivira njegov motorni korteks bez obzira što ne postoji nikakva očigledna akcija koju izvršava pojedinac koji posmatra [44].

Ogledalski neuroni su posebna vrsta vizuomotornih neurona, koji su prvenstveno otkriveni u arei F5 u premotornom korteksu majmuna, koja se aktivira i prilikom određenih akcija i prilikom posmatranja sličnih akcija koje izvršavaju drugi, bilo ljudi, bilo majmuni [44]. Neuroni koji se aktiviraju prilikom posmatranja akcija drugih nisu prisutni samo u arei F5, već i u superiornom temporalnom sulkusu [45]. Ranije studije

o ogledalskim neuronima su razmatrale gornje sektore aree F5 u kojima su najčešće predstavljene akcije vezane za pokrete ruku, dok novije studije ističu svojstva neurona lociranih u lateralnom delu aree F5 koji je vezan za pokrete usana [46].

Jezički aspekti

Studije su pokazale da posmatranje akcija koje izvode drugi, kod čoveka podrazumeva aktivaciju složene mreže koju formiraju okcipitalne, temporalne i parijetalne vizuelne oblasti i dva kortikalna regionala čije su funkcije fundamentalno i predominantno motorne (rostralni deo donjeg perijetalnog režnja i donji deo precentralnog girusa, kao i posteriorni deo donjeg frontalnog girusa) [47]. Smatra se da ovi regioni formiraju jezgro ljudskog sistema ogledalskih neurona.

Prepostavlja se da ogledalski neuroni mogu biti ključni za gestovnu komunikaciju. Upravo je intrigantno da se audiovizuelni ogledalski neuroni uočavaju u oblasti koja je homologna ljudskoj Brokinoj arei (tačnije BA 44). Postoje dokazi da je ludska motorna govorna oblast rezultat dugog procesa evolucije, koji je otpočeo kod primata [48]. Otkriće o lokaciji audiovizuelnih ogledalskih neurona može rasvetliti evoluciju govornog jezika iz dva razloga: kao prvo ovi neuroni imaju sposobnost da predstavljaju akcione kontekste, a kao drugo imaju auditivni pristup ovim kontekstima koji su upravo karakteristika ljudskog jezika [48].

Takođe, Brokina zona je motorna zona govora i učenje putem imitacije igra ključnu ulogu u usvajanju jezika.

Osim toga percepcija jezika bi trebalo da se bazira na direktnom sparivanju između lingvističkog materijala i motornih akcija odgovornih za njegovu produkciju, a Brokina zona je najverovatnije mesto gde se može naći ovaj mehanizam uklapanja [48].

Neka istraživanja dokazuju da je Brokina zona uključena u razumevanje jezika naročito prilikom semantičkog traženja i pravljenja izbora [49], [50]. Takođe je uključena u prepoznavanje pokreta usta i ruku, uz skorašnje dokaze da ima ključnu ulogu u prepoznavanju aktivnosti kao deo „ogledalskog sistema“ ili sistema „sparivanja posmatranja sa izvršenjem“ [51], [52]. Pitanje je da li Brokina zona procesuira gestove povezane sa govorom kao deo sistema jezičkog razumevanja (naročito uključujući semantičko traženje i pravljenje izbora) ili je deo sistema prepoznavanja akcija. Takođe je zaključeno da aree 44 i 45 koje čine Brokinu zonu imaju različite uloge u jezičkom razumevanju i prepoznavanju ili razumevanju akcija. Uprkos funkcionalnim svojstvima ove dve aree u obe hemisfere razmatrana je njihova uključenost u integraciju ili uklapanje akustičkih i/ili vizuelnih informacija o pokretima usana sa motornim planom za produkciju ovih pokreta [53]. Upravo se smatra da BA 44 ima važnu ulogu u fonetskom procesiranju, a da naročito sa drugim motornim oblastima doprinosi poboljšanju fonetskog prepoznavanja prilikom posmatranja pokreta usta tokom percepcije govora [54]. Zaključuje se da je BA 45 aktivnija kada se povećaju zahtevi semantičkog izbora ili pronalaženja, a da je BA 44 aktivnija prilikom zahteva da se integrišu po-

smatrani pokreti usta u proces govorne percepcije. Aree 44 i 45 bilateralno imaju važnu ulogu u prepoznavanju, imitaciji i produkciji akcija [6].

Nejezički aspekti

Grupa autora [55] je otkrila da levi frontalni operkulum (area 44) i desni anteriforni parijetalni korteks imaju mehanizam za imitaciju. Ovi autori smatraju da imitacija pokreta ruku mora da uključuje Brokinu zonu (tačnije BA 44), zato što je ova oblast jedna od onih, kod ljudi, u kojoj se reprezentuju distalni pokreti i zato što se smatra da je area 44 homologna arei F5 kod majmuna u kojoj se nalazi sistem za uklapanje posmatrane akcije sa izvršenjem iste.

Kasnija fMRI studija [56] o imitaciji pokreta prstiju je ponovo pokazala da dve kortikalne oblasti kod čoveka imaju predvidljiv šablon aktivnosti [pars opercularis donjeg frontalnog girusa (area 44, unutar Brokine zone, kao veoma važne jezičke oblasti) i rostralni posteriorni parijetalni korteks] i da lokalizacija ovih oblasti odgovara lokalizaciji oblasti ogledalskih neurona kod majmuna. Osim toga, fMRI signal koji je kompatibilan sa aktivnošću ogledalskih neurona u Brokinoj zoni podržava hipoteze da su ogledalski neuroni verovatno bili, kroz evoluciju, preteča nervnih mehanizama za jezik. Autori prepostavljaju da je moguće da aktivnost tokom bilo koje vrste zadatka u jezičkoj oblasti kod ljudi možda jednostavno odražava prikrivenu verbalizaciju. Ali i pored toga hipoteze o prikrivenoj verbalizaciji ne mogu u potpunosti da objasne sveukupni šablon aktivnosti koji je izmeren u Brokinoj zoni tokom imi-

tacije, izvršenja i posmatranja akcije. Ovo autori ipak jasno ukazuju na ključnu ulogu posteriorne Brokine zone u imitaciji. Važnost pars operkularisa donjeg frontalnog girusa tokom imitacije su pokazali i Hajzer i saradnici [57]. Rezultati su pokazali da stimulacija i leve i desne zone u kojoj se nalazi Brokina oblast učestvuje u imitaciji pokreta prstiju.

Eksperimenti sprovedeni PET kod ljudi su pokazali da postoje različiti obrasci aktivacije kada ispitanici posmatraju pantomime složenih akcija kako bi razumeli njihovo značenje, a sa druge strane potpuno različiti prilikom pamćenja i ponavljanja istih. U prvom slučaju postoji aktivacija levog donjeg frontalnog režnja, najviše aree 45, ali kasnije je aktivacija predominantno parijetalna, više izražena na desnoj strani [58]. Postavlja se pitanje koja je razlika između aktivacije u parijetalnoj i aktivacije u Brokinoj oblasti. Pretpostavlja se da donja frontalna oblast opisuje posmatranu akciju u smislu njenog motornog cilja (npr., podizanje prsta) bez definisanja jasnih detalja pokreta. Suprotно tome, oblast parijetalnog režnja kodira precizne kinestetičke apsekte pokreta (npr., koliko bi trebalo podići prst). Ovo se bazira na podacima koji pokazuju da F5 neuroni kodiraju opšti cilj pokreta, ali ne i precizne detalje istog. Stoga, iako obe oblasti sarađuju u procesu imitacije, veći uticaj levog frontalnog korteksa biće u toku izvođenja zadatka ili veći uticaj desnog parijetalnog korteksa prilikom ponavljanja određenog pokreta, prema zahtevima zadatka.

Rizolati i sar. [44] su u svom radu naveli autore koji pokazuju aktivaciju

Brokine zone kao dela sistema ogledalskih neurona. Tako navode da su Koski i sar. [59] potvrdili značaj Brokine zone naročito kada akcija koja se imitira ima specifičan cilj. Takođe navode i druge autore koji su dobili slične rezultate, ali samo u slučaju kada su pojedinci imitirali pantomimu [60]. Isto tako Nišitani i Hari [44] potvrđuju važnost levog donjeg frontalnog girusa (Brokine zone) u imitaciji pokreta hvatanja i facijalnih pokreta. Isti autori navode studiju u kojoj su od ispitanika zahtevali da posmatraju zamrznute slike verbalnih i neverbalnih oblika usana (grimase) i da ih odmah imitiraju nakon što ih vide, ili da spontano naprave sličan oblik usana. Prilikom posmatranja položaja usana kortikalna aktivacija je napredovala od okcipitalnog korteksa do gornjeg temporalnog regiona, donjeg parijetalnog režnja, Brokine zone i na kraju do primarnog motornog korteksa. Dok su učesnici izvodili spontano položaj usana samo su Brokina zona i motorni korteks bili aktivirani.

Na kraju je potrebno istaći da se, uprkos preklapanju funkcionalnih uloga Brokine zone u jeziku i procesiranju akcija, većina neuroimaging studija vezanih za ljudski „ogledalski sistem“ fokusira na akcije koje je lakše posmatrati i nisu komunikativne (npr. posmatranje jednostavnih pokreta prsta ili ruke, manipulacije objektima, pantomima, čitanje sa usana ili posmatranje pokreta lica izolovano od govornog jezika).

Poremećaji sistema ogledalskih neurona

Sistem ogledalskih neurona je uključen u različite više kognitivne procese za koje je poznato da su oštećeni kod osoba sa autističnim spektrom poreme-

ćaja, uključujući imitaciju, jezik, teoriju uma i empatiju [61]. Dok je imitacija nešto što je uvek prisutno kada su ljudi i drugi primati u interakciji, osobe sa autizmom pokazuju značajne deficitne imitacije. Takođe se pretpostavlja da je deficit teorije uma ključan kod osoba sa autizmom što rezultira nesposobnošću da se razumeju tuđa ponašanja i misli. Isto je i sa empatijom koja podrazumeva sposobnost da se razume mentalno stanje druge osobe. Smatra se da je jedan od glavnih dijagnostičkih kriterijuma za autistični poremećaj upravo jezičko oštećenje. Sistem ogledalskih neurona omogućava proces posmatranja i izvršenja pa je samim tim odgovoran za razvoj jezika, što je i potkrepljeno otkrivénim da je area F5 kod primata homologna Brokinoj zoni koja je odgovorna za govornu produkciju [61].

Deca sa autizmom prepoznatljiva su po tome što imaju poteškoće u imitaciji, naročito facijalnoj, ali ipak pokazuju i prekomernu imitaciju u formi eholalija ili stereotipnog govora [62]. Oni nekada imitiraju govor bukvalno, čak i uz ponavljanje tonova i intonacije [63]. Međutim retko uspevaju da imitiraju istovremeno audio-vizuelnu integriranu formu. Takođe njihova socijalna komunikacija je karakteristična zbog govora koga ne prate odgovarajući gestovi ili neverbalna komunikacija. Čak i kada doslovno imitiraju aktivnost, ne imitiraju i zvukove koji je prate [64]. Tako da se smatra da deficitne imitacije koji se javljaju kod osoba sa autizmom nastaju kao posledica neintegriranja auditivnih i vizuelnih informacija, pa se pretpostavlja da je to takođe povezano sa abnormal-

nom funkcijom sistema ogledalskih neurona [65].

Osim osoba koje imaju autizam i osobe sa šizofrenijom često imaju poteškoće prilikom procesiranja socijalnih informacija i ti socijalni kognitivni deficitne uključuju oštećenu teoriju uma i teškoće procesiranja facijalnih emocija [66], [67]. Iako neuralna osnova oštećene socijalne kognicije kod osoba sa šizofrenijom nije još uvek u potpunosti razjašnjena, skorija teorijska razmatranja pretpostavljaju da je odgovoran sistem ogledalskih neurona [44]. Smatra se da kod osoba sa šizofrenijom oštećen ovaj sistem, tačnije da je redukovana aktivacija ogledalskih neurona tokom posmatranja ponašanja.

BROKINA ZONA I MUZIKA

Otkriće sistema ogledalskih neurona kod majmuna podstaklo je sprovođenje studija o auditivnim svojstvima ljudskog sistema ogledalskih neurona. Smatra se da ovaj mehanizam mapira akustičke reprezentacije akcija u motorne planove neophodne za produkciju tih akcija. Zvuci povezani sa akcijom aktiviraju, pored gornjeg temporalnog girusa i donji frontalni girus. Zvukovi koji se izvode rukama ili ustima aktiviraju premotorne oblasti kod ljudi [19].

Postoje studije koje su ispitivale aktivaciju moždanih oblasti kod složenijih, sa akcijom povezanih zvukova, kao što je muzika. Otkriveno je da kod stručnjaka za muziku (muzičara) motorne i premotorne aktivnosti mogu biti izazvane pasivnim slušanjem poznatih melodija. Npr., aktivnost motornih centara se pojačala kod profesionalnih pijanista tokom slušanja muzičkog dela za klavir [68].

Druga fMRI studija je ispitivala postojanje zajedničkih aktivacija prilikom percepције i produkcije muzičkih dela [69] i potvrdila je postojanje složene moždane mreže koja uključuje motorne, premotorne i suplementarne motorne oblasti, donji parijetalni režanj i gornji temporalni girus. Takođe je interesantna paralela između jezika i muzike i suštinski slične kompleksnosti muzičkih i jezičkih struktura. Smatra se da postoji mnogo više homologija između ove dve oblasti, nego što se to očekuje na osnovu dominantnih teorija o muzičkoj i lingvističkoj kogniciji - od senzornih mehanizama koji enkodiraju zvukovne strukture, do apstraktnih procesa uključenih u integraciju reči ili muzičkih tonova u sintaktičke strukture [70].

U jednoj od studija [71] locirano je sedište muzičke sintakse i to u donjem frontalnom girusu bilateralno. U drugim studijama su predviđljivost harmonika i osnovna muzička pravila poređeni sa jezičkom sintaksom [70]. Studija u kojoj je korišćena fMRI dokazuje da moždana mreža kod čoveka, koja je uključena u procesiranje muzičkih informacija, ima velike sličnosti sa onom koja omogućava obradu jezika [72]. Ovi autori su utvrdili da su Brokina i Vernikeova zona, gornji temporalni sulkus, Hešlova vijuga, kao i druge kortikalne oblasti bile aktivirane dok je ispitanik slušao neočekivane muzičke akorde.

ZAKLJUČAK

Brokina zona je sastavljena iz BA 44 i 45 koje učestvuju u ostvarivanju govorno jezičkih funkcija, pri čemu osim različitih uloga, ova dva polja imaju i mnoge zajedničke funkcije. Značaj Brokine aree je veliki pa tako ona ima primarnu ulogu u stvaranju programa govorne produkcije, fonetsko-fonološkim, sintaksičkim i semantičkim aspektima jezika, a takođe omogućava i usvajanje gramatičkih pravila. Osim toga, ova zona učestvuje u procesu percepције i razumevanja jezika, kao i u ostvarivanju drugih jezičkih funkcija. Savremene studije postavljaju pitanje redefinisanja osnovnih funkcija koje su se pripisivale Brokinoj arei, jer je otkriveno da, pored dobro poznatih lingvističkih procesa, Brokina zona učestvuje i u mnogim nelingvističkim procesima kao što su radna memorija, računanje, različite motorne funkcije, imitacija i muzika, a važna je i za adekvatno funkcionisanje sistema ogledalskih neurona koji omogućava učenje putem imitacije. Oštećenje Brokine zone najčešće dovodi do pojave sindroma Brokine afazije koji podrazumeva poremećaj jezičkog funkcionisanja, ali posledice se upravo mogu videti i u neadekvatnom ostvarivanju mnogobrojnih nelingvističkih procesa u kojima Brokina area ima nezamenjivu ulogu.

BROCA'S AREA – FROM SPEECH TO MUSIC

Ivana P. Arsenić
Dragan M. Pavlović
Nadica Đ. Jovanović Simić

Faculty for Special Education and Rehabilitation, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

Summary

Since 1861, Broca's area was considered as an anatomic region of brain endued for speech articulation. It is believed that it is responsible for controlling motor speech movements and related movements of the lips, tongue, larynx and pharynx. Broca's area has a primary role in speech motor programming, as well as in the phonetic, phonological, syntactic and semantic aspects of language, but it is also considered as a cortical region underling the aquisition of grammatical rules. In addition to the production process, Broca's area is involved in the process of understanding a language, as well as in achievement of other language functions.

However, there are various controversies about the connection between Broca's area and language functions. The lesions of this area do not always lead to Broca's aphasia, and in addition, patients with Broca's aphasia do not always have a lesion of Broca's area. Also, it was found that some of language functions, that were earlier considered to be controlled only by the activity of Broca's area, are realized through the interaction of this area with other areas of the cortex, and activated by certain subcortical areas.

Although a number of studies showed the activation of Broca's area during the performance of language tasks, there are studies that have shown that this area is also activate during non-linguistic tasks. Thus, this area has a certain role in imitation of the movement, capturing, manipulating objects, working memory, recognizing familiar smells, music and other cognitive functions. Therefore, recent studies, researching the role of Broca's area in language acquisition, raise the question of redefining the basic functions that have been attributed to Broca's area.

Keywords: Broca's area, speech, production, linguistic and nonlinguistic aspects

Literatura / Bibliography

1. McManus C. Right Hand, Left Hand. The Origins of Asymmetry in Brains, Bodies, and Atoms. Harvard University Press 2002; Cambridge, MA.
2. Diamantis AG. Paul Broca (1824-1880): founder of anthropology pioneer of neurology and oncology. Jurnal of the Balkan Union of Oncology 2007;12(4):557-564.
3. Dronkers NF et al. Paul Broca's historic cases: high resolution MR imaging of the brains of Leborgne and Lelong. Brain 2007;130:1432–1441.
4. Domanski C. Mysterious „Monsieur Leborgne”: The Mystery of the Famous Patient in the History of Neuropsychology is Explained, Journal of the History of the Neurosciences 2013;22:47–52.
5. Vuković M. Afaziologija. Beograd, Srbija: SD Public 2002.
6. Nishitani N, Schurmann M, Amunts K, Hari R. Broca's region: From action to language. Physiology (Bethesda) 2005;20:60–69.
7. Pavlović DM, Pavlović AM. Više kotirkalne funkcije. Beograd, Srbija: Orion Art 2016.
8. Tettamanti M, Alkadhi H, Moro A, Perani D, Kollias S, Weniger D. Neural correlates for the acquisition of natural language syntax. Neuroimage 2002;17:700-709.
9. Mohr JP. Revision of Broca aphasia and the syndrome of Broca's area infarction and its implications in aphasia theory. Clinical Aphasiology: Proceedings of the Conference, BRK Publishers, 1980.
10. Miller BL, Cummings JL (eds). The Human Frontal Lobes: Functions and Disorders, Second Edition - New York, NY: The Guilford Press, 2007.
11. Trans Cranial Technologies. Cortical Functions. Reference. Wanchai, Hong Kong: Trans Cranial Technologies, 2012.
12. Hagoort P. On Broca, brain, and binding: a new framework. Trends Cogn Sci 2005;9(9):416-423.
13. Gerlach C, Law I & Paulson OB. When action turns into words: activation of motor-based knowledge during categorization of manipulable objects. J. Cogn. Neurosci. 2002;1230–1239.
14. Penfield W, Boldrey E. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. Brain 1937;60:389-443.
15. Ojemann G et al. Cortical language localization in left, dominant hemisphere: an electrical stimulation mapping investigation in 117 patients. J. Neurosurg 1989;71:316–326.
16. Schaffler L et al. Comprehension deficits elicited by electrical stimulation of Broca's area. Brain 1993;116:695–715.
17. Fiebach CJ, Vos SH & Friederici AD. Neural correlates of syntactic ambiguity in sentence comprehension for low and high span readers. J. Cogn. Neurosci. 2004;16:1562–1575.
18. Luria AR. The frontal lobes and the regulation of behavior. Psychophysiology of the frontal lobes, 1973, 332: 3-26.
19. Fadiga L, Craighero L, D'Ausilio A. Broca's Area in Language, Action and Music, The Neurosciences and Music III—Disorders and Plasticity: Ann. N.Y. Acad. Sci. 2009; 1169:448–458.
20. Caplan D, Alpert N, Waters G & Olivieri A. Activation of Broca's area by syntactic processing under conditions of concurrent articulation. Human Brain Mapping 2000;9:65–71.
21. Binkofski F, Amunts K, Stephan KM, Posse S, Schormann T, Freund HJ, Zilles K & Seitz RJ. Broca's area subserves imagery of motion: A combined cytoarchitectonic and fMRI study. Human Brain Mapping 2000;11:273–285.

22. Bookheimer S. Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annu Rev Neurosci* 2002;25:151–188.
23. Braun AR, Guillemin A, Hosey L & Varga M. The neural organization of discourse: An H215O-PET study of narrative production in English and American sign language. *Brain* 2001;124:2028–2044.
24. Horwitz B, Amunts K, Bhattacharyya R, Patkin D, Jeffries K, Zilles K, Braun A. Activation of Broca's area during the production of spoken and signed language: a combined cytoarchitectonic mapping and PET analysis. *Neuropsychologia* 2003;41:1868–1876.
25. Binkofski F, Buccino G, Posse S, Seitz RJ, Rizzolatti G & Freund H. A fronto-parietal circuit for object manipulation in man: Evidence from an fMRI-study. *European Journal of Neuroscience* 1999;11:3276–3286.
26. Iacoboni M, Woods RP, Brass M, Bekkering H, Mazziotta JC & Rizzolatti G. Cortical mechanisms of human imitation. *Science* 1999;286:2526–2528.
27. Indefrey P, Brown CM, Hellwig F, Amunts K, Herzog H, Seitz RJ & Hagoort P. A neural correlate of syntactic encoding during speech production. *Proceedings National Academy of Sciences USA* 2001;98:5933–5936.
28. Fridriksson J, Bonilha L & Rorden C. Severe Broca's aphasia without Broca's area damage, Case Report. *Behavioural Neurology* 2007;18:237–238.
29. Thompson-Schill SL. Dissecting the language organ: A new look at the role of Broca's area in language processing. *Twenty-first century psycholinguistics: Four cornerstones* 2005:173–190.
30. Kaan E & Swaab TY. The brain circuitry of syntactic comprehension. *Trends in Cognitive Science* 2002;6:350–356.
31. D'Esposito M & Postle BR. The dependence of span and delayed response performance on prefrontal cortex. *Neuropsychologia* 1999;37:1303–1315.
32. Flinker A, Korzeniewska A, Shestyuk A, Franaszczuk P, Dronkers N, Knight R, Crone N. Redefining the role of Broca's area in speech. *National Acad Sciences* 2015;vol. 112, no. 9: 2871–2875.
33. Indefrey P, Levelt WJ. The spatial and temporal signatures of word production components. *Cognition* 2004;92(1–2):101–144
34. Trupe LA et al. Chronic apraxia of speech and Broca's area. *Stroke* 2013;44(3):740–744
35. Vigneau M, Beaucousin V, Herve PY, Dufau H, Crivello F, Houde O et al. Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *Neuroimage* 2006;30(4):1414–1432.
36. Fiez JA, Tallal P, Raichle ME, Miezin FM, Katz WF & Petersen SE. PET studies of auditory and phonological processing: Effects of stimulus characteristics and task demands. *Journal of Cognitive Neuroscience* 1995;7:357–375.
37. Muller RA, Kleinhans NM, Courchesne E. RAPID COMMUNICATION, Broca's Area and the Discrimination of Frequency Transitions: A Functional MRI Study. *Brain and Language* 2001;76:70–76.
38. Skipper J, Goldin-Meadow S, Nusbaum C, Small S. Speech-associated gestures, Broca's area, and the human mirror system. *Brain Lang.* 2007;101(3):260–277.
39. Rodd J, Davis M, Johnsrude I. The neural mechanisms of speech comprehension: fMRI studies of semantic ambiguity. *Cereb Cortex* 2005;15(8):1261–1269.
40. Benson DF. Aphasia: In Heilman KM, Valenstein E (eds). *Clinical neuropsychology*. New York: Oxford University Press 1993.
41. Vuković M. Afaziologija. Beograd, Srbija: Arhipelag 2010.

42. Iacoboni M. Understanding others: Imitation, language, empathy. In: Hurley S, Chater N, editors. *Perspectives on imitation: From cognitive neuroscience to social science, Vol. 1: Mechanisms of Imitation and Imitation in Animals*. Cambridge, MA: MIT Press 2005;pp. 77–99.
43. Benninger MS, Abitbol J. Voice: dysphonia and the aging voice. *Geriatric Care Otolaryngology*. Alexandria: AAO-HNSF, 2006. p.67-81
44. Rizzolatti G & Craighero L. The mirror-neuron system, *Neuroscience* 2004;Vol. 27:169–92.
45. Jellema T, Baker CI, Oram MW, Perrett DI. Cell populations in the banks of the superior temporal sulcus of the macaque monkey and imitation. See Meltzoff & Prinz 2002, pp. 267–90.
46. Ferrari PF, Gallese V, Rizzolatti G, Fogassi L. Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex. *European Journal of Neuroscience* 2003;Vol. 17:1703–1714.
47. Manthey S, Schubotz RI, von Cramon DY. Premotor cortex in observing erroneous action: an fMRI study. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 2003;15:296–307.
48. Kohler E, Keysers C, Umiltà MA, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G. Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science* 2002; Vol. 297: 846–848
49. Gough PM, Nobre AC, Devlin JT. Dissociating linguistic processes in the left inferior frontal cortex with transcranial magnetic stimulation. *Journal of Neuroscience* 2005;25(35):8010–8016
50. Moss HE, Abdallah S, Fletcher P, Bright P, Pilgrim L, Acres K, Tyler LK. Selecting Among Competing Alternatives: Selection and Retrieval in the Left Inferior Frontal Gyrus. *Cereb Cortex* 2005;15(11):1723-1735
51. Buccino G, Binkofski F, Fink GR, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V et al. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: An fMRI study. *European Journal of Neuroscience* 2001;13(2):400–404.
52. Buccino G, Binkofski F, Riggio L. The mirror neuron system and action recognition. *Brain and Language* 2004;89(2):370–376.
53. Skipper JL, van Wassenhove V, Nusbaum HC, Small SL. Hearing lips and seeing voices: How cortical areas supporting speech production mediate audiovisual speech perception. *Cerebral Cortex*. 2007 doi:10.1093/cercor/bhl147
54. Skipper JL, Nusbaum HC, Small SL. Lending a helping hand to hearing: Another motor theory of speech perception. In: Arbib MA, editor. *Action to language via the mirror neuron system*. Cambridge, MA: Cambridge University Press; 2006.
55. Iacoboni M et al. Cortical Mechanisms of Human Imitation, *Science* 1999; Vol. 286, Issue 5449, pp. 2526-2528.
56. Iacoboni M & Dapretto M. The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nature Reviews Neuroscience* 2006; Vol. 7:942-951.
57. Heiser M, Iacoboni M, Maeda F, Marcus J, Mazziotta JC. The essential role of Broca's area in imitation. *Eur. J. Neurosci.* 2003;17:1123–28.
58. Decety J et al. Brain activity during observation of actions Influence of action content and subject's strategy. *Brain* 1997;120:1763.
59. Koski L, Wohlschlager A, Bekkering H, Woods RP, Dubeau MC. Modulation of motor and premotor activity during imitation of target-directed actions. *Cereb. Cortex* 2002;12:847–55.

60. Grezes J, Armony JL, Rowe J, Passingham RE. Activations related to „mirror” and „canonical” neurones in the human brain: An fMRI study. *Neuroimage* 2003;18(4):928–937.
61. Oberman LM, Hubbard EM, McCleery JP, Altschuler EL, Ramachandran VS, Pineda JA. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Cognitive Brain Research* 2005;24:190–198.
62. Lord C, Rutter M, Le Couteur A. Autism Diagnostic Interview—Revised: A revised version of a diagnostic interview for caregivers of individuals with possible pervasive developmental disorders. *Journal of Autism Developmental Disorders* 1994;24:659–685.
63. Williams JHG, Waiter GD, Perrett DI, Murray AM, Gilchrist A, Whiten A. Imitation in autism: A systematic review and a neuroimaging study. Symposium on Imitation and Autism, Tampa, Florida. Biennial Meeting. Society for Research in Child Development. 2004.
64. Lord C, Risi S, Lambrecht L, Cook EH, Jr, Leventhal BL, DiLavore PC et al. The autism diagnostic observation schedule-generic: A standard measure of social and communication deficits associated with the spectrum of autism. *Journal of Autism Developmental Disorders* 2000;30:205–223.
65. Williams, JHG, Whiten A, Suddendorf T, Perrett DI. Imitation, mirror neurons and autism. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 2001;25:287–295.
66. Harrington L, Siegert RJ, McClure J. Theory of mind in schizophrenia: a critical review. *Cogn. Neuropsychiatry* 2005;10:249–286.
67. Shamay-Tsoory SG, Shur S, Barcaï Goodman L, Medlovich S, Harari H, Levkovitz Y. Dissociation of cognitive from affective components of theory of mind in schizophrenia. *Psychiatr. Res.* 2007;149:11–23.
68. Haueisen J & Knosche TR. Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *J.Cogn. Neurosci.* 2001;13:786–792.
69. Bangert M & Altenmuller EO. Mapping perception to action in piano practice: a longitudinal DC-EEG study. *BMC Neurosci.* 2003;4:26.
70. Patel AD. Language, music, syntax and the brain. *Nat. Neurosci.* 2003;6:674–681.
71. Maess B et al. Musical syntax is processed in Broca’s area: an MEG study. *Nat. Neurosci.* 2001;4:540–545.
72. Koelsch S et al. Bach speaks: a cortical „language-network” serves the processing of music. *NeuroImage* 2002;17:956–966.

Dragan M. Pavlović
Fakultet za specijalnu edukaciju
i rehabilitaciju
Univerzitet u Beogradu
Visokog Stevana 2, 11000 Beograd
E-mail: dpavlovic53@hotmail.com