مجلهٔ زبانشناسی و گویش‌های خراسان ، سال سیزدهم ، شماره 1، بهار تابستان 1400، شمارهٔ پیاپی 24

DOI: 10.22067/jlkd.2021.71997.1049

پردازش شنیداری واژه‌ها، شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها در مغز فارسی‌زبانان: براساس داده‌های ای‌آرپی[1]

فهیمه نصیب ضرابی (دانشجوی دکتری زبان‌شناسی همگانی، گروه زبان‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران) (نویسنده مسئول)
محمود بی‌جن‌خان (استاد گروه زبان‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران)
حمید سلطانیان‌زاده (استاد قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند، دانشگاه تهران، تهران، ایران)
علی درزی (استاد گروه زبان‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران)

صص: **1-25**

چکیده

مسأله‌ای که در دو دهه‌ی اخیرِ مطالعات عصب‌شناختی زبان بسیار به آن پرداخته شده‌است، چگونگی پردازش واژه‌ها در مغز و تفاوت‌های آن با پردازش واژه‌های ناآشناست. فرآیند دسترسی واژگانی در پردازش شنیداری کلام در همان 200 هزارم ثانیه‌ی ابتدایی پس از شروع واژه، در مغز آغاز می‌شود. اینکه در کجای این مسیر راه واژه‌ها، شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها از هم جدا می‌شود، پرسشی است که سعی در پاسخ‌گویی به آن برای فارسی‌زبانان داشته‌ایم تا به چگونگی فرآیند تشخیص واژه‌ها، پردازش آنها نسبت به دیگر زنجیره‌های آوایی، و نقض قواعد واج‌آرایی پی ببریم. حین یک آزمون تصمیم‌گیری-واژگانی شنیداری، سه نوع محرک هم‌ساخت (واژه، شبه‌واژه، ناواژه) در میان جملاتی با ساختار یکسان به شرکت‌کننده‌ها ارائه شد. فعالیت مغزی آنها در طول آزمون با استفاده از دستگاه الکتروانسفالوگرام یا ای‌ای‌جی (eeg)[2] ثبت شد. داده‌های پتانسیل‌های رخدادی[3]، ای‌آرپی

[1] این مقاله مستخرج از رساله‌ی دکتری است.

2- EEG (electroencephalogram)
3- ERP: event-related potentials

تاریخ دریافت :1400/05/22 تاریخ پذیرش : 1400/07/10

پست الکترونیکی: 1. fahimeh.nasib@ut.ac.ir 2. mbjkhan@ut.ac.ir
3. hszadeh@ut.ac.ir 4. alidarzi@ut.ac.ir

(ERP)، حاکی از آن بود که در نواحی پیشین مغز، در پردازش ناواژه‌ها اثر مؤلفه‌ی مثبت مؤخر (LPC) [1] مشاهده می‌شود که می‌تواند بازتابی از نقض قواعد واج‌آرایی زبان فارسی باشد. به‌علاوه، در نواحی آهیانه، اثر N400 برای ناواژه‌ها و شبه‌واژه‌ها مشهود بود که خبر از فعالیت بیشتر مغز در تلاش برای ایجاد هم‌بستگی معنایی دارد. همچنین، بررسی تأخیر مؤلفه‌ی N400 نشان داد که در نواحی آهیانه این اثر برای شبه‌واژه‌ها زودتر از دیگر محرک‌ها اتفاق می‌افتد. نتایج حاصل، در کنار شباهت‌هایی که با یافته‌های پژوهش‌های انجام‌شده در دیگر زبان‌ها دارد، تفاوت‌هایی را نیز نشان می‌دهد که بیشتر به جایگاه مؤلفه‌های مشاهده‌شده مربوط است.

کلیدواژه‌ها: پردازش صوتی واژه، ای‌آرپی (ERP)، مؤلفه‌ی مثبت مؤخر (LPC)، N400، محدودیت‌های واج‌آرایی

1.مقدمه

برای فهم یک واژه یا یک پاره‌گفتار، اطلاعات زیادی در یک بازه‌ی زمانی بسیار کوتاه در مغز مورد پردازش قرار می‌گیرد تا به مرحله‌ی درک برسیم. اطلاعات آوایی، واجی، صرفی، معنایی، نحوی، بافتی و غیره در کمتر از یک ثانیه پس از شنیدن واژه‌ای، بازیابی می‌شوند. چنین فرآیندی بدون ساختار کنونی مغز انسان، ناممکن می‌بود. مغز در طول سالیان دراز فرگشت[2] یافته و ظرفیت درک و تولید ساخت‌های زبانی پیچیده و گوناگون را برای انسان امروزی فراهم آورده‌است. بخش‌های زیادی از مغز حین پردازش‌های زبانی فعال می‌شود، اما نواحی خاصی از آن ممکن است نقش پررنگ‌تری را در فرآیندهای زبانی گوناگون ایفا کنند.

از زمان محققانی چون بروکا[3] و ورنیکه[4] (نیمه‌ی دوم قرن نوزدهم میلادی)، که با پژوهش‌های خود روحی در کالبد علم عصب-زبان‌شناسی به‌عنوان شاخه‌ای مستقل از علم دمیدند، تا سال‌های اخیر، باور کلی چنین بود که قشر[5] نیم‌کره‌ی چپ، به‌ویژه در حوزه‌های پیشانی[6] و گیجگاهی[7]، تخت‌گاه[1] زبان انسان است. این بخش‌ها شامل نواحی ورنیکه و بروکا

1- Late Positive Component (LPC)
2- evolution
3- Broca
4- Wernicke
5- cortex
6- frontal lobe
7- temporal lobe

می‌شود که به‌ترتیب عهده‌دار فرآیندهای مرتبط با درک و تولید زبان پنداشته می‌شوند. این دو ناحیه خود به‌واسطه‌ی راه کمانی[2] با یک‌دیگر مرتبطند (هگورت[3]، 2016). اما پژوهش‌گران اکنون می‌دانند که نمی‌توان بخش‌های مربوط به درک و تولید زبان را منفک دانست. مشاهدات نشان داده‌است که آسیب به بخش بروکا نه‌تنها در تولید، بلکه در درک زبان هم ایجاد مشکل می‌کند. از سوی دیگر، آسیب به بخش ورنیکه باعث اختلال در فرآیندهای تولید نیز می‌شود (کاراماتسا و زوریف[4]، 1976). اما در سال‌های اخیر، بحث مدارات عصبی[5] به‌عنوان زیرساخت فرآیندهای زبانی مطرح شده‌است. تصویربرداری‌های مغزی که دیرزمانی نیست میسر شده، شاهدی بر این مدعاست (منتنی[6] و هم‌کاران، 2011، سگارت[7] و هم‌کاران، 2012). از این رو، می‌بایست در تمامی مطالعات عصب-زبان‌شناختی همواره این موضوع را در خاطر داشت که به فعالیت‌های مغز بطور فراتری نگریست و تنها بر روی نواحی مطرح‌شده در عصب-زبان‌شناسی سنتی[8] تمرکز نکرد.

در پژوهش حاضر، با استفاده از دستگاه ای‌ای‌جی 64 کاناله توانستیم موج‌های الکتریکی[9] تولید شده در مغز را، حین انجام تکلیف تصمیم-گیری واژگانی[10]، ثبت کنیم. محرک‌ها شامل دسته‌ای از واژه‌ها، شبه‌واژه‌ها (کلماتی بی‌معنا که از قواعد واج‌آرایی فارسی تبعیت می‌کنند) و ناواژه‌ها (کلماتی بی‌معنا که تابع قوانین واج‌آرایی فارسی نیستند) می‌شدند. اکنون، برآنیم تا با تحلیل داده‌های حاصل، نحوه‌ی درک و پردازش واژه‌ها و کلمات ناآشنا (شبه‌واژه و ناواژه) را در مغز فارسی‌زبانان بررسی کنیم. براساس مطالعات انجام‌شده در دیگر زبان‌ها فرضیه زیر مطرح می‌شود:

- پردازش کلمات ناآشنا بار پردازشی بیشتری را بر مغز اعمال می‌کند.

1- seat
2- arcuate fasciculus
3- Hagoort
4- Caramazza & Zurif
5- neural circuitry
6- Menenti
7- Segaert
8- انگاره‌ی عصب-زبان‌شناختی سنتی به انگاره‌ی ورنیکه-لیختایم-گشویند اتلاق می‌شود که، همان‌طور که در متن نیز اشاره شد، زبان را به قشر نیم‌کره‌ی چپ، به ویژه مناطق بروکا و ورنیکه مربوط می‌داند (هگورت، 2016).
9- signals
10- lexical-decision task

یافته‌های حاصل از چنین پژوهش‌هایی در سطح روان‌شناختی به ما کمک می‌کند تا بینش عمیق‌تری نسبت به فرآیند تشخیص و بازیابی واژه‌ها، سازمان‌دهی واژگان ذهنی، و زمان‌بندی درک اطلاعات واژگانی بیابیم و از این رو در طراحی تسک‌های روان‌شناختی زبان و ارائه‌ی انگاره‌های دسترسی واژگانی کاربرد خواهد داشت. در سطح عصب‌شناختی، این یافته‌ها ما را در درک تفاوت‌های پردازشی واژه‌ها نسبت به دیگر زنجیره‌های آوایی یاری می‌کند و به فهم چگونگی پردازش زبان در مغز یک قدم نزدیک‌تر می‌نماید. علاوه‌براین، از آنجایی‌که تفاوت شبه‌واژه‌ها با واژه‌ها تنها در نقض قواعد واج‌آرایی زبان است، نتایج پژوهش می‌تواند روشن سازد که در کدام مرحله از پردازش، مغز نقض قواعد را باز می‌شناسد و این نقض چه پیامدی دارد. هم‌چنین، مشخص می‌کند آیا تفاوت‌های زبانی در این امر مؤثر است یا خیر. چنین اطلاعاتی عصب‌شناسان زبان را در طراحی انگاره‌های عصب‌شناختیِ تولید و درک زبان یاری خواهد کرد. در سطح کاربردی نیز نتایج حاصل از این پژوهش‌ها می‌تواند در هوش مصنوعی و پردازش زبان طبیعی (NLP)[1] به‌کار رود؛ چراکه سعی بر آن است تا با الگوبرداری از پردازش‌های زبانی در مغز، به‌ویژه چگونگی تشخیص، بازیابی و درک واژه‌ها، سامانه‌های رایانه‌ای هرچه بیشتر و بهتر بتوانند اطلاعات زبانی را تولید و درک کنند. و در پایان، در سطح نظری، زبان‌شناسان را یاری می‌کند تا نظریه‌ها را با معیار دقیق‌تری بسنجند و راه را برای تأیید، رد یا بهبود نظریه هم‌وار می‌کند.

در بخش بعد، مطالعات انجام‌شده در خصوص پردازش عصب‌شناختی واژه‌ها و کلمات ناآشنا در دیگر زبان‌ها را مرور می‌کنیم. همچنین، به نقش مؤلفه‌های زبانی در داده‌های ای‌آرپی اشاره خواهیم کرد. در بخش سوم به روش گردآوری داده‌ها می‌پردازیم. سپس، در قسمت پردازش و تحلیل‌داده‌ها، فرضیه‌ی مطرح‌شده در بالا را مورد سنجش قرار می‌دهیم. در بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری و بحث پیرامون آن خواهیم پرداخت.

2. پیشینه‌ی پژوهش

بی‌شک زبان، به‌عنوان یک مهارت شناختی، یکی از مهم‌ترین نقش‌ها را در پیش‌رفت جوامع بشری در طول تاریخ ایفا کرده و این زبان بوده که گونه‌ی انسان را از دیگر موجودات

1- natural language processing

متمایز کرده‌است. از این‌رو، مطالعه‌ی درک و پردازش زبان در مغز، پنجره‌ای به‌وسعت تاریخ بر سازوکار قوه‌ی شناخت آدمی می‌گشاید. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای پرده‌برداری از ماهیت شناسایی و درک واژگان در مغز، بررسی عصب‌شناختی پردازش واژه‌ها و کلمات ناآشنا (به‌خصوص شبه‌واژه‌ها) و مقایسه‌ی آنها بوده‌است. بسیاری از این مطالعات با استفاده از ثبت ای‌ای‌جی انجام گرفته‌است. در ادامه، ابتدا به‌طور مختصر مؤلفه‌های حساس به زبان در داده‌های ای‌آرپی معرفی می‌شوند. سپس، پژوهش‌های مشابه در دیگر زبان‌ها را مرور می‌کنیم.

2-1. مؤلفه‌های ای‌آرپی حساس به زبان

در سال‌های ابتدایی این شاخه از علم، مطالعات عصب-زبان‌شناختی بیشتر بر روی بیمارانِ دچار زبان‌پریشی و عارضه‌ی مغزی انجام می‌گرفت. رفته‌رفته با پیش‌رفت فن‌آوری، دستگاه‌هایی ابداع شد که امکان بررسی فرآیندهای عصب‌شناختی گوناگون را، حتی در افراد سالم، فراهم می‌کرد. یکی از مهم‌ترین آنها، بخصوص در پژوهش‌های عصب-زبان‌شناختی، دستگاه ای‌ای‌جی است. این دستگاه امکان ثبت سیگنال‌های مغزی را حین انجام یک تکلیف زبانی مهیا ساخت. پژوهش‌گران، به‌طور معمول، در یک تکلیف محرک‌هایی را به افراد شرکت‌کننده ارائه می‌کنند و سیگنال‌های مغزی تولیدشده در پاسخ به هر دسته از محرک‌ها را از پیوستار سیگنال‌های ثبت‌شده جدا کرده و میانگین می‌گیرند تا مورد پردازش و تحلیل قرار دهند. چنین داده‌هایی را که از میانگین پاسخ‌های ثبت‌شده به دسته‌ای از محرک‌های خاص و در مدت زمانی معین پس از شروع محرک تولید شده‌است، داده‌های ای‌آرپی می‌نامند. این داده‌ها از دقت زمانی بالایی برخوردارند و می‌توانند با دقت هزارم‌ثانیه تغییرات عمل‌کرد مغز را اندازه‌گیری کنند (کی[1]، 2016). داده‌های ای‌آرپی شامل مؤلفه‌های مشخصی است که ممکن است در محرک‌های مختلف شدت یا زمان ظهور متفاوتی از خود نشان دهند. مؤلفه‌های ای-آرپی، به‌ویژه پس از 200 هزارم‌ثانیه از شروع محرک، بازتاب‌دهنده‌ی فرآیندهای شناختی مغز هستند. از جمله‌ی این فرآیندهای شناختی، می‌توان به پردازش‌های زبانی اشاره کرد. دو مؤلفه‌ی N400 و P600 در مطالعات زبان‌شناختی جایگاه ویژه‌ای دارند.

1- Key

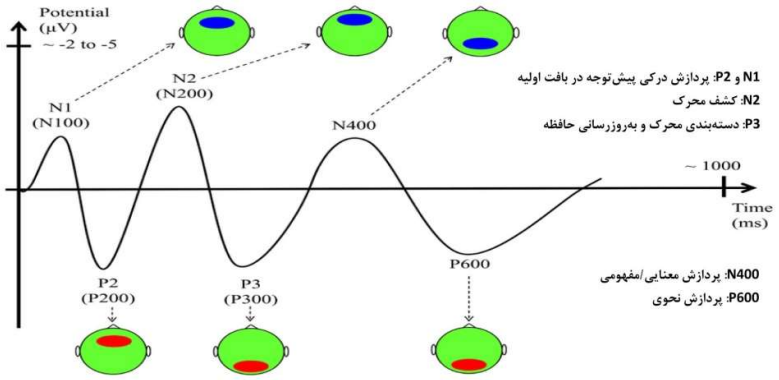
بررسی‌های بی‌شماری بر روی مؤلفه‌ی N400 تاکنون صورت گرفته‌است. کوتاس و هیلیارد[1] در سال 1980 برای اولین بار متوجه یک موج منفی مؤخر در پاسخ به جملاتی شدند که از لحاظ معنایی ناسازگار بودند. این موج منفی که در حدود 400 هزارم‌ثانیه پس از شروع محرک و با توزیع مرکزی-آهیانه[2] ایجاد می‌شود، به پردازش معنایی نسبت داده‌شد. پژوهش‌هایی که به دنبال این تحقیق انجام گرفت، ظهور این مؤلفه را برای دیگر محرک‌های زبانی، مانند کلمات گفتاری، زبان اشاره، و شبه‌واژه‌ها، نیز نمایان کرد (کوتاس و فدرمیر[3]، 2011). پس از آنکه حجم زیادی از مطالعات در مورد مؤلفه‌ی N400 گردآوری شد، پرسش‌های بی‌شماری در مورد ماهیت و نقش این مؤلفه در درک معنا مطرح گردید. کوتاس و فدرمیر (2011) با مروری بر یافته‌های حاصل از 30 سال مطالعه بر روی این مؤلفه و انگاره‌های متفاوت پیشنهادی برای تبیین آن، چنین نتیجه می‌گیرند که درک معنای یک محرک نمی‌تواند در یک نقطه از زمان حاصل شود، بلکه با گذر زمان و رفته‌رفته برملا می‌شود. مؤلفه‌ی N400 تنها مرحله‌ای مهم و تعیین‌کننده از آن است و نمی‌توان آن را پایان فرآیند درک معنا دانست.

پژوهش‌های اخیر بیشتر بر روی تعیین نقش مؤلفه‌ی N400 در پردازش معنا متمرکز شده‌اند. یک باور رایج این است که این مؤلفه، بازتابی از فرآیند دسترسی واژگانی و نگاشت صورت محرک به معنای آن است که با توجه به بافت اتفاق می‌افتد. از این منظر، هرچه دسترسی تسهیل شده‌باشد (برای مثال توسط بافت)، N400 شدت کمتری خواهد داشت. در مقابل، دیدگاه هم‌بستگی، مؤلفه‌ی N400 را نمایه‌ای می‌داند از تلاش برای تلفیق معنای واژه (که پیش‌تر بازیابی شده) با اطلاعات حاصل از بافت برای تولید یک تعبیر مناسب از پاره‌گفتار. در این دیدگاه، هرچه فرآیند تلفیق و هم‌بستگی این اطلاعات دشوارتر باشد، مؤلفه‌ی N400 بزرگتر خواهد بود (دیلوگ و هم‌کاران[4]، 2019). علاوه‌براین، نوعی دیدگاه پیوندی[5] پیشنهاد شده که ترکیبی از دو باور پیشین است. طبق این نظر، N400 نمایان‌گر تلاش برای دسترسی واژگانی و هم‌بستگی معنایی بر طبق بافت است (نوولند[6] و هم‌کاران، 2020). از منظر عصب-

1- Kutas and Hillyard
2- centro-parietal distribution
3- Federmeier
4- Delogu
5- hybrid
6- Nieuwland

زیست‌شناختی[1] نیز باجیو[2] و هگورت (2011) معتقدند که شروع و خیز N400 جریان‌های پساسیناپسی[3] تولیدشده در قشر حوزه‌ی گیجگاهی را حین بازیابی واژه از حافظه‌ی بلندمدت منعکس می‌کند. در ادامه، این جریان‌ها به سوی شکنج زیرین پیشین[4] گسترش پیدا می‌کنند؛ جایی‌که بازنمایی بافت ایجاد و حفظ می‌گردد. قله‌ی موج N400 نیز هم‌زمان با تکمیل این دوره و بازگشت جریان‌ها به‌سوی قشر گیج‌گاهیست. بنابراین، به‌نظر می‌رسد انگاره‌ی عصب-زیست‌شناختی، دیدگاه پیوندی از N400 را تأیید می‌کند.

دیگر مؤلفه‌ی حساس به پردازش‌های زبانی در ای‌آرپی، P600 نامیده می‌شود. همان‌طور که از عنوان آن نیز برمی‌آید، P600 یک موج مؤخر مثبت است که به ساخت‌های صرفی و نحوی حساس است. در واقع، باور کلی چنین است که دشواری در هم‌بستگی نحوی یا صرفی باعث ایجاد P600 بزرگتر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی تحلیل و پردازش دوباره‌ی یک ساخت زبانی است. این دشواری ممکن است به‌دلایل مختلف، از جمله عدم تطابق میان فعل و فاعل، به‌وجود آید. با این‌حال، مطالعاتی انجام‌شده که بیان می‌دارد این مؤلفه ممکن‌است نمایه‌ای از هم‌بستگی معنایی یا کاربردشناختی[5] نیز باشد (نوولند و هم‌کاران، 2020). تصویر 1، شکل موج نمادین ای‌آرپی را به‌همراه مؤلفه‌های اصلی و جایگاه نسبی آنها در مغز نشان می‌دهد.



شکل 1- شکل موج ای‌آرپی (برگرفته از دالتروتسو و کانوی*، 2014)

***Daltrozzo and Conway**

1- neuro-biology
2- Baggio
3- post-synaptic
4- inferior prefrontal gyrus
5- pragmatic

2-2. پردازش واژه‌ها و کلمات ناآشنا در دیگر زبان‌ها

بررسی عصب‌شناختی تفاوت در پردازش واژه‌ها و شبه‌واژه‌ها به‌منظورهای مختلف و با روش‌های متنوع انجام‌گرفته‌است. بسیاری از این مطالعات در جهت طراحی انگاره‌های عصب‌شناختی از فرآیند خواندن است. این دست از پژوهش‌ها از تفاوت‌های پردازشی فاحشی میان خواندن واژه‌ها و خواندن ناواژه‌ها حکایت دارد تابدانجا که حتی ادعا می‌شود پردازش این دو در بخش‌های مختلفی از مغز صورت می‌گیرد (ویس و بوث[1]، 2017). اما فرآیند درک شنیداری زبان با درک از طریق خواندن متفاوت است. البته، به احتمال فراوان، ویژگی‌های معنایی یک واژه، فارغ از چگونگی عرضه‌ی آن، یکسان است (روجرز[2] و هم‌کاران، 2004). اما نوع ارائه‌ی درونداد (دیداری یا شنیداری) که به فعال شدن معنای واژه ختم می‌شود، باعث ایجاد تفاوت‌های پردازشی میان این دو نوع عرضه‌ی محرک می‌گردد. علاوه‌براین، فرآیند خواندن پس از سوادآموزی حادث می‌شود، حال آنکه، تحقیقات بر روی زبان آلمانی نشان می‌دهد پردازش شنیداری زبان حتی در سن 6 ماهگی به قواعد واج‌آرایی زبان حساس است (ابریگ[3] و هم‌کاران، 2017). برای کودکان 18 ماهه نیز توسط استبر و روسی[4] (2020) آزمایشی طراحی شد که نشان داد شبه‌واژه‌ها اثر N400 بزرگتری نسبت به ناواژه‌ها در مورد زبان آلمانی تولید می‌کنند.

در پژوهشی که بر روی واژه‌ها و شبه‌واژه‌های اسپانیایی انجام شده‌است، زونینی[5] و هم‌کاران (2020) محرک‌ها را به سه روش مختلف، شنیداری، دیداری و شنیداری-دیداری، به آزمودنی‌ها ارائه کردند. نتایج ای‌آرپی حاکی از امواج منفی‌تر در تمامی انواع عرضه‌ی محرک‌ها برای شبه‌واژه‌ها بود. با این‌حال، تفاوت‌های پردازشی نیز میان محرک‌های شنیداری و دیداری مشخص بود. تفاوت در شکل موج ای‌آرپی میان واژه‌ها و شبه‌واژه‌ها، که به اثر واژگانی[6] معروف است، در محرک‌های دیداری از حدود 300 هزارم‌ثانیه پس از شروع محرک آشکار شد. اما برای محرک‌های شنیداری این واگرایی از حدود 700 هزارم‌ثانیه پس از شروع محرک مشهود بود. علت می‌تواند این‌گونه باشد که درونداد دیداری به یک‌باره در اختیار آزمودنی قرار

1- Weiss and Booth
2- Rogers
3- Obrig
4- Steber and Rossi
5- Zunini
6- lexical effect

می‌گیرد و زودتر تشخیص داده می‌شود، اما درونداد شنیداری ماهیت دنباله‌ای[1] دارد و در طول زمان آشکار می‌شود.

بررسی و مقایسه‌ی تفاوت‌های پردازشی در سه نوع محرک شنیداری واژه، شبه‌واژه و ناواژه در زبان آلمانی نیز انجام شده‌است. دوماس[2] و هم‌کاران (2009) در داده‌های ای‌آرپی حاصل از آزمون خود مشاهده کردند که صورت‌های ناآشنا (شبه‌واژه و ناواژه) اثر N400 بزرگتری نسبت به واژه‌های آلمانی ایجاد می‌کنند که حاکی از بار پردازشی تحمیل‌شده بر مغز جهت انجام هم‌بستگی واژگانی است. علاوه براین، مؤلفه‌ی مثبت مؤخر یا LPC در ناحیه‌ی آهیانه برای ناواژه‌ها مشهود بود که در حدود 1230 هزارم‌ثانیه پس از شروع محرک به اوج می‌رسید. آنان مدعی شدند که این اثر مثبت مؤخر به دلیل نقض محدودیت‌های واج‌آرایی[3] زبان آلمانی ایجاد شده‌است. از این‌رو، چنین نتیجه گرفتند که، حتی در شرایطی که فرد تشخیص داده‌است که محرک یک ناواژه است، نقض محدودیت‌های واج‌آرایی بر مراحل پایانی پردازش شناختی تأثیرگذار است.

ایلینن[4] و هم‌کاران (2016) با استفاده از داده‌های ای‌آرپی بر روی نقض محدودیت واجی هم‌آیی واکه‌ای در زبان فنلاندی مطالعه کردند. آنها در داده‌های حاصل اثر MMN[5] بزرگتری برای ناواژه‌ها نسبت به شبه‌واژه‌ها مشاهده کردند. MMN یک موج منفی‌رو است که در بازه‌ی زمانی 150 تا 250 هزارم‌ثانیه پس از شروع محرک رخ می‌دهد. این اثر در واقع زمانی ایجاد می‌شود که قاعده‌ای در محرک نقض شود؛ در حالی‌که این قاعده در اکثر محرک‌ها رعایت شده‌است. دیگر یافته‌ی این پژوهش نشان داد که مؤلفه‌ی P300 در پردازش ناواژه‌ها نسبت به شبه‌واژه‌ها بزرگتر بود. مؤلفه‌ی P300 یک موج مثبت است که در حدود 300 هزارم‌ثانیه پس از شروع محرک ایجاد می‌شود. به‌طور معمول این مؤلفه به دسته‌بندی و قضاوت محرک از جانب آزمودنی مربوط می‌شود.

بررسی چگونگی پردازش واژه‌ها و کلمات ناآشنا تنها به زبان‌های موجود ختم نمی‌شود. مورکنتول[6] و هم‌کاران (2018) با ساختن یک زبان مصنوعی و آموزش آن به آزمودنی‌ها، سعی

1- sequential
2- Domahs
3- phonotactic constraints
4- Ylinen
5- MMN: mismatch negativity
6- Moore-Cantwell

در شناسایی تفاوت‌های پردازشی میان واژه‌ها، شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها در آن زبان مصنوعی را داشتند. نتایج نشان داد که حتی در یک زبان مصنوعی نیز ناواژه‌ها باعث ایجاد مؤلفه‌ی الپی-سی می‌شوند. علاوه‌براین، همان‌طور که انتظار می‌رفت، در داده‌های حاصل از پردازش شبه-واژه‌ها، N400 بزرگتری نسبت به واژه‌ها به‌چشم می‌خورد. آنها هم‌چنین گزارش کردند که مؤلفه‌ی P300 در واژه‌ها و ناواژه‌ها هم‌سان بوده‌است، اما نتوانستند توجیهی برای این مشاهده ارائه کنند.

ما نیز با استفاده از روشی مشابه، پردازش واژه‌ها، شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها را در مغز فارسی-زبانان آزمایش کردیم تا تفاوت‌های پردازشی احتمالی موجود برای سخن‌گویان زبان فارسی را مشخص کنیم. در ادامه به شرح روش و سپس نتایج حاصل می‌پردازیم.

3.روش پژوهش

برای ثبت سیگنال‌های مغزی و تصویربرداری از مغز، چندین دستگاه وجود دارد که هر یک نقاط قوت و ضعفی دارد. پژوهش‌گران می‌بایست با توجه به موضوع تحقیق خود و فرضیه‌های آن متناسب‌ترین دستگاه را برای جمع‌آوری داده برگزینند. دستگاه ای‌ای‌جی به‌دلیل بهره‌مندی از دقت زمانی بالا، در میان زبان‌شناسان بسیار محبوب است؛ چراکه امکان نمایش تأثیرات آنی محرک‌های زبانی بر امواج مغزی را به‌خوبی فراهم آورده‌است. دیگر مزیت این دستگاه، غیرتهاجمی بودن آن است و فرد بدون هیچ‌گونه نگرانی از عواقب آزمون، می‌تواند در پژوهش شرکت کند.

3-1. آزمودنی‌ها

تعداد 20 نفر از دانشجویان تحصیلات تکمیلی دانشگاه تهران از رشته‌های مختلف در این آزمون شرکت کردند. تمامی آنان در خوداظهاری اعلام کردند که راست‌دست هستند، زبان مادری آنها فارسی است، و سابقه‌ی عارضه‌ی مغزی یا مصرف داروهای روانی ندارند. بازه‌ی سنی آنها بین 22 تا 42 سال بود (میانگین: 29.2، انحراف معیار: 6.4). از این تعداد 5 نفر

مرد بودند[1]. پیش از ورود به آزمایشگاه ای‌ای‌جی، تمامی آزمودنیها توسط پزشک معاینه شدند تا از مناسب بودن وضعیت بالینی آنها و آمادگی برای شرکت در آزمون اطمینان حاصل شود. هم‌چنین، آزمودنی‌ها رضایت‌نامه‌ی کتبی خود را هنگام ورود به آزمایشگاه ارائه کردند. لازم به‌ذکر است، گواهی اخلاق برای آزمون این پژوهش از طرف «کمیته‌ی اخلاق در پژوهش دانشگاه علوم‌پزشکی ایران» صادر گردید[2].

3-2. طراحی و مواد آزمون

برای هر یک از انواع محرک (واژه، شبه‌واژه، ناواژه) شش نمونه در نظر گرفته شده‌بود. این 18 محرک هدف که ساختاری تک‌هجایی داشتند، در میان 60 محرک دیگر با ساختاری متفاوت قرار گرفته‌بودند. از این تعداد 18 مورد واژه، 18 مورد شبه‌واژه، و باقی ناواژه بودند. ساختار محرک‌های هدف در واژه‌ها و شبه‌واژه‌ها CVCC و در ناواژه‌ها CCVC بود تا بیشترین شباهت ساختی را به لحاظ تعداد واج‌ها و نقض محدودیت‌های واجی داشته باشند. در واقع، قواعد واج‌آرایی زبان فارسی این امکان را برای ما فراهم کرد تا محرک‌های بسیار مشابه را در آزمون به‌کار گیریم، مشخصه‌ای که در پژوهش‌های پیشین کمتر دیده می‌شود. در تابلوی زیر که طبق نظریه‌ی واج‌شناسی بهینگی (پرینس و اسمولنسکی[3]، 1993) ترسیم شده، محدودیت‌های واجی نقض‌شده توسط محرک‌های هدف مشهود است. محدودیت *COMPLEX-ONSET ناظر بر عدم وجود آغازه‌ی پیچیده است، و محدودیت *COMPLEX-CODA وجود بیشتر از یک همخوان در پایانه‌ی هجا را جریمه می‌کند. مهم‌ترین تفاوت میان واژه‌ها/شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌های آزمون در نقض *COMPLEX-ONEST است که در زبان فارسی از محدودیت‌های غیرقابل نقض به‌شمار می‌رود. از این رو، ساخت هجایی CCVC در فارسی مجاز نیست. محدودیت دیگری که بر روی این ساخت‌ها فعال است، محدودیت NO-CODA است که ناظر بر عدم وجود پایانه در هجاست و به دو شکل تعریف می‌شود. طبق تعریف بالا به پایین، این محدودیت هر دو ساخت زیر را تنها یک مرتبه جریمه می‌کند. اما طبق تعریف پایین به بالا، ساخت CVCC را به‌علت وجود دو

1- از آنجایی‌که در مطالعات پیشین، جنسیت به‌عنوان متغیر در نظر گرفته‌نشده‌است، ما نیز این مشخصه را متغیر محسوب نکردیم.

2- کد مصوبه‌ی اخلاق: IR.IUMS.REC.1398.871

3- Prince and Smolensky

هم‌خوان در پایانه، دو بار جریمه می‌کند. از آنجایی‌که این محدودیت در بحث خوش‌ساختی و بدساختی محرک‌ها تعیین‌کننده نیست، آن را در نظر نگرفتیم.

تابلوی 1. چگونگی نقض محدودیت‌های واجی در محرک‌های هدف

Input	*COMPLEX-ONSET	*COMPLEX-CODA
➡ CVCC		*
CCVC	*W	L

تمامی محرک‌ها در جمله‌ی حامل «او/آن .... بود» ارائه می‌شدند. جمله‌ی حامل طوری انتخاب شد که فاقد بافت خاصی باشد و باعث تسهیل پردازش محرک نشود. در حین پخش صوتی جمله، علامت جمع (+) در وسط صفحه‌ی نمایش ظاهر می‌شد. از آزمودنی‌ها خواسته می‌شد که حین گوش کردن به جملات به آن علامت نگاه کنند تا از بروز امواج مغزی نامرتبط با تکلیف تا حد امکان جلوگیری شود. از آنجایی‌که تکلیف تصمیم‌گیری واژگانی را به‌کار بستیم، پس از اتمام جمله، صفحه‌ای برای امتیاز دادن به محرک پیش چشمان آزمودنی‌ها ظاهر می‌شد. از آنها خواسته شده‌بود که به محرک‌ها امتیازی از 1 تا 4 براساس شباهت آنها به کلمات فارسی بدهند (1 کمترین شباهت و 4 بیشترین شباهت). به منظور کاهش اثرات ناشی از تولید پاسخ به محرک‌ها در مغز، به آزمودنی‌ها زمان کافی برای فکر کردن و ثبت پاسخ پس از اتمام هر جمله داده شده‌بود (زونینی و همکاران، 2020). آنها فرصت داشتند پس از چند ثانیه از اتمام جمله پاسخ خود را با استفاده از اعداد صفحه‌کلید ثبت کنند. جهت آشنایی بیشتر آزمودنی با روند تکلیف، در ابتدا یک مرحله‌ی آزمایشی را در حضور پژوهش‌گر می‌گذراندند. این آزمون به‌طور میانگین 15 دقیقه به‌طول می‌انجامید که حین آن دو بار استراحت یک‌دقیقه‌ای در نظر گرفته شده‌بود. در زیر چند نمونه از محرک‌ها را می‌توان دید.

- واژه‌ها: «آن اسب بود.» ، «آن گرم بود.»
- شبه‌واژه‌ها: «آن شِرپ بود.» ، «او نَلف بود.»
- ناواژه‌ها: «او فریپ بود.» ، «آن سپوش بود.» (خوشه‌ی هم‌خوان در آغازه‌ی هجا)

محرک‌های شبه‌واژه و ناواژه توسط پژوهش‌گران طبق ساخت‌های بالا به‌گونه‌ای تولید شده‌بودند که محدودیت دیگری نقض نشود. جملات مورد استفاده نیز با صدای گوینده‌ی زن

فارسی‌زبان در یک اتاق ساکت با کیفیت 16 بیت[1] و نرخ نمونه‌برداری 44 کیلوهرتز ضبط شده‌بود. گوینده به‌لحاظ واج‌شناختی آموزش دیده‌بود. جملات به‌طور میانگین حدود 3.5 ثانیه طول می‌کشیدند. جهت یک‌دست‌سازی، جملات حامل در تمامی محرک‌ها هم‌واره یکسان بود و تنها محرک در میان جمله، با استفاده از نرم‌افزار پرت[2] (بورزما و وینینک[3]، 2019) ، ویرایش 6.1، جای‌گذاری شده‌بود. علاوه‌براین، جهت جلوگیری از هرگونه تداخل در پردازش واژه‌های جمله، کلمات به‌صورت شمرده‌شمرده و با فاصله‌ی زمانی ادا شده‌بودند. محرک‌ها هم‌واره پس از گذشت یک ثانیه از شروع جمله، آغاز می‌شدند. این یکسان‌سازی برای پردازش و تحلیل داده‌های ای‌آرپی حاصل، ضروری است.

علاوه بر ملاحظات بالا، به پیروی از روش دوماس و هم‌کاران (2009)، به‌منظور رفع برخی عوامل آواشناختی و واژگانی که ممکن است بر شکل موج ای‌آرپی مؤثر باشند، محرک‌های هدف را به لحاظ مدت‌زمان، شدت[4]، بسامد پایه[5]، و اندازه‌ی مجاورت واجی[6] مقایسه کردیم. نتایج آماری حاصل را در جدول‌های 1 و 2 می‌توان مشاهده کرد. جدول 1 مربوط به ویژگی‌های آواشناختی است. آزمون تی مستقل که بر روی داده‌ها اعمال شد، نشان می‌دهد که محرک‌ها از لحاظ مدت‌زمان تفاوت معناداری با یک‌دیگر ندارند. در مورد بسامد پایه نیز تنها تفاوت میان واژه‌ها و ناواژه‌ها معنادار است. با این‌حال، تفاوت میانگین این دو دسته تنها 10 هرتز است که طبق مطالعات انجام‌شده بر روی درک شنیداری آواهای زبان، گوش انسان توانایی تشخیص تغییرات بسامدی زیر 12 هرتز برای میانگین بسامد 220 هرتز را ندارد (نوتبوم[7]، 1997). بنابراین، این اختلاف تأثیری بر شکل موج ای‌آرپی نخواهد داشت. دیگر مشخصه‌ی آواشناختی، یعنی شدت صوت، برخلاف اختلاف ناچیز بین میانگین‌ها، از لحاظ آماری بین تمامی دسته‌محرک‌ها تفاوت معنادار دارد. تغییرات شدت صوت بر ای‌آرپی مؤثر است. اثرات ناشی از ویژگی‌های آواشناختی کلام، معمولا در همان 200 هزارم‌ثانیه‌ی ابتدایی پس از شروع محرک، مشاهده می‌شوند و بر مؤلفه‌های مربوط به فرآیندهای شناختی تأثیرگذار

1- 44 KHz sampling rate
2- Praat, doing phonetics by computer (6.1)
3- Boesrma & Weenink
4- intensity
5- fundamental frequency (F0)
6- phonological neighborhood size
7- Nooteboom

نیستند. پایوا[1] و هم‌کاران (2016) مطالعه‌ای بر روی تأثیر شدت صوت بر مؤلفه‌های ای‌آرپی انجام داده‌اند، و همچون مطالعات پیش از خود، به این نتیجه می‌رسند که مؤلفه‌های N100 و P200، که به‌ترتیب در بازه‌ی زمانی 60 تا 150 و 150 تا 250 هزارم‌ثانیه پس از آغاز محرک ظهور می‌کنند، به شدت صوت حساس‌اند.

اما یکی از محدودیت‌ها در آزمون‌های روان‌شناختی و عصب‌شناختی زبان، مسأله‌ی اندازه‌ی مجاورت واجی محرک‌هاست، که به‌مفهوم تعداد کلماتی‌است که با یک تغییر کمینه‌ی واجی از محرک ایجاد می‌شوند؛ برای مثال «بَرگ» و «مَرگ». این تغییر می‌تواند طی فرآیندهای حذف، جایگزینی و اضافه اعمال شود. گفته می‌شود این مشخصه‌ی واژگانی بر پردازش محرک تأثیرگذار است. هلکامب[2] و هم‌کاران (2002) در مطالعه‌ی خود که بر روی مجاورین واجی[3] در محرک‌های دیداری انجام گرفت، چنین نتیجه گرفتند که هرچه اندازه‌ی مجاورت واجی محرک کوچکتر باشد، N400 نیز کوچکتر خواهد بود. در جدول 2 نتایج حاصل از مقایسه‌ی محرک‌ها برای این ویژگی واژگانی آورده شده‌است.

جدول 1. مقایسه‌ی دسته‌محرک‌های هدف به‌لحاظ ویژگی‌های آواشناختی (موارد علامت‌گذاری شده با * معنادار هستند)

نوع محرک	میانگین± انحراف‌معیار بسامد پایه	میانگین± انحراف‌معیار شدت	میانگین± انحراف‌معیار مدت‌زمان
واژه (تعداد: 6)	256 ± 4.4 هرتز[4]	76 ± 0.81 دسیبل[5]	640 ± 144 هزارم‌ثانیه
شبه‌واژه (تعداد: 6)	261 ± 6.8 هرتز	75 ± 0.86 دسیبل	710 ± 110 هزارم‌ثانیه
ناواژه (تعداد: 6)	266 ± 8.3 هرتز	73 ± 1.89 دسیبل	737 ± 232 هزارم‌ثانیه
مقایسه‌ی واژه–شبه–واژه	t(12)= -1.461 p > 0.175	t(12)= 3.371 p < 0.007*	t(12)= -0.938 p > 0.370
مقایسه‌ی واژه–ناواژه	t(12)= -2.556 p< 0.035*	t(12)= 4.38 p < 0.001*	t(12)= -0.869 p > 0.405

1- Paiva
2- Holcomb
3- phonological neighbors
4- Hz
5- dB

مقایسه‌ی شبه‌واژه- ناواژه	t(12)= -1.138 p > 0.281	t(12)= 2.335 p < 0.042*	t(12)= 260 p> 0.800

طبیعتا اندازه‌ی مجاورت واجی برای ناواژه‌ها که قواعد واج‌آرایی را نقض می‌کنند کمتر از واژه‌ها و حتی شبه‌واژه‌ها خواهد بود. طبق آزمون آماری انجام‌شده، در جدول 2، تفاوت میان واژه‌ها با شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها معنادار است. در بخش تحلیل داده‌ها درباره‌ی تأثیرات احتمالی این ویژگی بر نتایج حاصل بحث خواهیم کرد.

جدول 2. مقایسه‌ی دسته‌محرک‌های هدف به‌لحاظ مشخصه‌ی اندازه‌ی مجاورت واجی (موارد علامت‌گذاری شده با * معنادار هستند)

نوع محرک	میانگین اندازه‌ی مجاورت واجی (گونه[1])	آزمون آماری مان-ویتنی[2]
واژه شبه‌واژه	2.6 ± 7.1 2.1 ± 3	Z = -2.266 p< 0.026*
واژه ناواژه	2.6 ± 7.1 0.8 ± 1.3	Z = -2.950 p< 0.002*
شبه‌واژه ناواژه	2.1 ± 3 0.8 ± 1.3	Z = -1.432 p> 0.240

نکته‌ی پایانی این‌که، پیش از شروع ثبت، یک جلسه‌ی ثبت آزمایشی برای آزمون انجام شد و پس از اصلاحاتی جزئی، ثبت داده‌های ای‌ای‌جی را آغاز کردیم .

3-3. ثبت ای‌ای‌جی و پردازش داده‌ها

برای ثبت سیگنال‌های مغزی در حین این آزمون از ای‌ای‌جی 64 کاناله در سیستم 10-20 استفاده کردیم که گوش راست به‌عنوان الکترود مرجع برگزیده شده‌بود. این کار با نرخ نمونه‌برداری 512 هرتز انجام گرفت. سیگنال‌های مغزی در طول آزمون بطور مداوم ثبت شدند.

1- type
2- Mann-Whitney

داده‌های ای‌آرپی نیز برای هر یک از آزمودنی‌ها و هر یک از دسته‌های محرک‌های هدف محاسبه شدند. الکترودهای مورد بررسی شامل F3, Fz, F4 برای بخش پیشین، C3, Cz, C4 برای بخش مرکزی، و P3, Pz, P4 برای بخش آهیانه بودند. در مرحله‌ی پیش‌پردازش، ابتدا صافی میان‌گذر[1] 0.5 تا 20 هرتز بر داده‌های حاصل اعمال شد. براین اساس، تمامی سیگنال‌های زیر 0.5 هرتز و بالاتر از 20 هرتز حذف شدند. پس از این صافی و حذف کانال‌هایی که نویز زیادی داشتند، با استفاده از الگوریتم ICA، مؤلفه‌های مغزی به‌دست آمدند. سپس، مؤلفه‌های مداخله‌گر مربوط به عوامل حرکتی[2] و پلک زدن[3] حذف گردیدند و کانال‌هایی که پیش‌تر حذف‌شده بودند، درون‌یابی[4] شدند. پس از این پیش‌پردازش، بازه‌ی هر ای‌آرپی از شروع محرک تا 1500 هزارم‌ثانیه پس از آن تعیین شد و میزان سیگنال‌های مغزی در 100 هزارم‌ثانیه پیش از شروع محرک، به‌عنوان حالت پایه در نظر گرفته‌شد. لازم به‌ذکر است که تمامی مراحل پیش‌پردازش و پردازش سیگنال با استفاده از نرم‌افزارهای ای‌ای‌جی لب[5] و متلب[6]، ویرایش a2019، انجام شد.

4. تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های حاصل از آزمایش را می‌توان در دو دسته‌ی رفتاری و ای‌آرپی قرار داد. داده‌های رفتاری در نتیجه‌ی پاسخ‌هایی‌است که آزمودنی‌ها به محرک داده‌اند و داده‌های ای‌آرپی امواج مغزی حاصل در پاسخ به هر محرک است.

4-1. داده‌های رفتاری

همان‌طور که در بخش 3-2 ذکر شد، به‌منظور جلوگیری از تداخل فرآیند پاسخ‌دهی در امواج مغزی مورد نظر، تکلیف مورد استفاده یک تصمیم‌گیری واژگانی غیرسرعتی بود که طی آن به آزمودنی‌ها زمان کافی داده‌شد تا به محرک امتیازی از 1 تا 4، برحسب شباهت محرک به یک واژه‌ی فارسی، بدهند. غیرسرعتی بودن این تکلیف باعث شد که زمان پاسخ‌گویی اهمیتی

1- bandpass
2- EMG
3- EOG
4- interpolate
5- EEGLAB
6- MATLAB

نداشته‌باشد، از این‌رو، مدت زمان واکنش بررسی نشد. اما پاسخ‌های آزمودنی‌ها به هریک از محرک‌های هدف بررسی شد. پیش از تحلیل، حدود 3٪ از داده‌ها حذف شدند؛ چراکه پاسخ آزمودنی به محرک با آن هم‌خوانی نداشت. برای مثال مواردی که در آن به یک واژه امتیازی کمتر از 3 داده‌شده‌بود[1].

درصد خطاها (امتیازهای کمتر از 3 برای واژه‌ها و بیشتر از 2 برای ناواژه‌ها) در پاسخ‌دهی به محرک‌های هدف برای واژه‌ها و ناواژه‌ها محاسبه شد. درصد خطا برای واژه‌ها 1.2٪ و برای ناواژه‌ها 2.5٪ بود. این درصد خطای پایین به این دلیل است که آزمودنی‌ها زمان کافی برای پاسخ‌گویی در اختیار داشته‌اند. برای دسته‌ی شبه‌واژه‌ها نمی‌توان خطایی در نظر گرفت؛ چراکه آزمودنی‌ها می‌بایست براساس شباهت محرک به یک واژه‌ی فارسی پاسخ می‌دادند و این پاسخ‌ها در نظر شرکت‌کنندگان مختلف، متفاوت است. 46.6٪ از پاسخ‌ها به محرک‌های شبه-واژه امتیاز 1 بوده‌است. 2.5٪ از پاسخ‌ها نیز به امتیاز 4 اختصاص یافته و باقی پاسخ‌ها امتیازات بینابینی 2 و 3 بوده‌است. به‌طور کلی، هدف اصلی از امتیازدهی به محرک‌ها، جلب توجه آزمودنی‌ها بوده‌است.

4-2. داده‌های ای‌آرپی

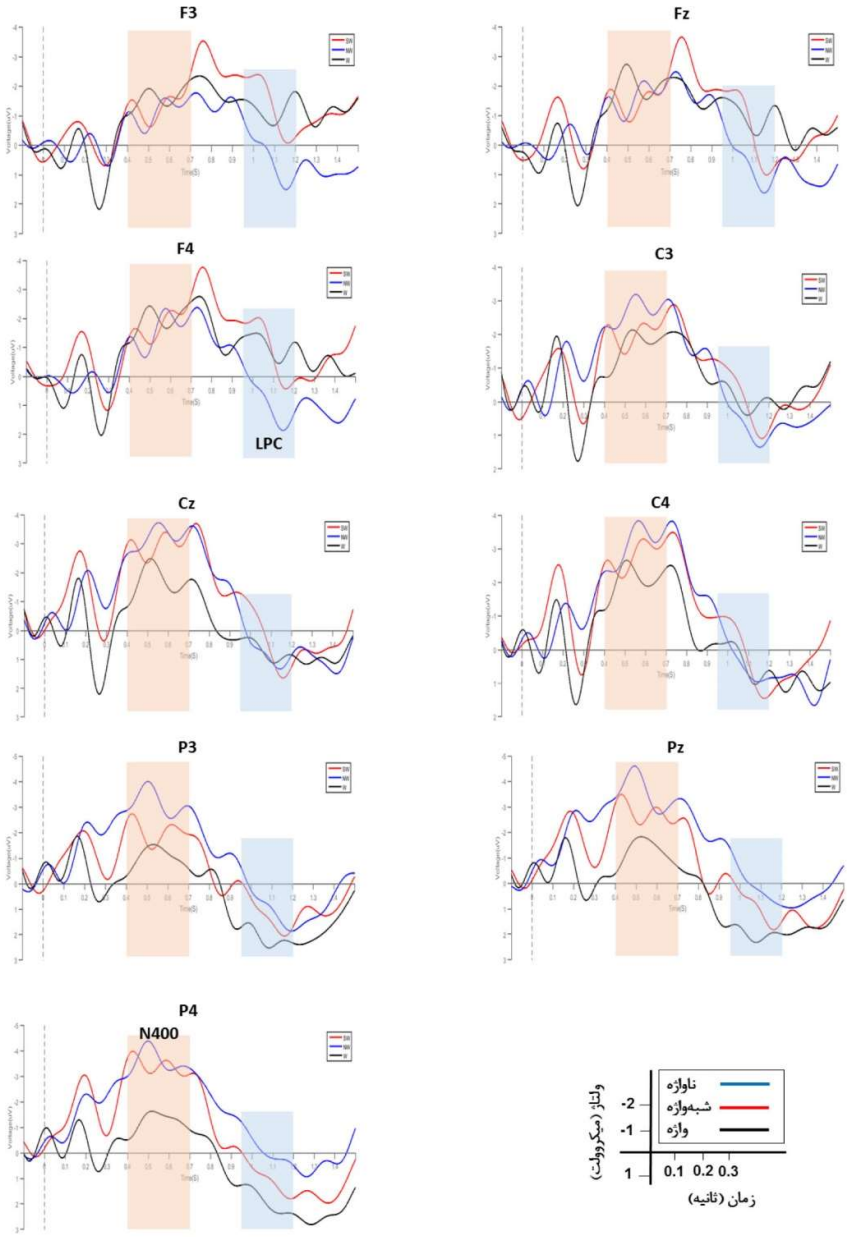
پس از پردازش داده‌ها، به‌منظور ردیابی تأثیرات احتمالی محرک‌ها بر مؤلفه‌های N400 و LPC، میانگین دامنه‌ی موج‌های الکتریکی در دو بازه‌ی زمانی 400-700 هزارم‌ثانیه برای N400 و 950-1200 هزارم‌ثانیه برای LPC محاسبه شد. سپس بر روی داده‌های حاصل آزمون آماری تی نمونه‌های جفتی[2] اعمال گردید تا تفاوت‌های مشاهده‌شده در میانگین دامنه‌های مربوط به واژه‌ها، شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها را از لحاظ معناداری بررسی کنیم. شکل 2 میانگین کل داده‌های ای‌آرپی برای کانال‌های مربوط به نواحی پیشین، مرکزی و آهیانه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل قابل مشاهده‌است، در نواحی پیشین، تفاوت چشم‌گیری میان واژه‌ها و شبه‌واژه‌ها نمی‌توان دید. با این حال، اثر LPC برای ناواژه‌ها، به‌ویژه در نیم‌کره‌ی راست

1- در دقیقه‌ی پایانی آزمون برای یکی از آزمودنی‌ها، صدای آژیر ضد حریق آزمایشگاه ایجاد تداخل کرد که باعث حذف داده‌های مربوطه شد.

2- paired-sample t-test

(F4) کاملا مشهود است که به‌طور معناداری از شبه‌واژه‌ها (t=2.605، p<0.017) و واژه‌ها (t=2.377، p<0.028) جدا شده‌است.



شکل 2. میانگین کل داده‌های ای‌آرپی. اثر N400 برای ناواژه‌ها و شبه‌واژه‌ها در کانال‌های مربوط به ناحیه‌ی آهیانه، به‌ویژه در نیم‌کره‌ی راست، قابل مشاهده است. هم‌چنین، اثر LPC برای ناواژه‌ها در ناحیه‌ی پیشین، به‌ویژه در نیم‌کره‌ی راست، دیده می‌شود. (برای مشاهده‌ی نمودارها بهتر است به نسخه‌ی الکترونیکی مراجعه شود.)

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مؤلفه‌ی LPC را به نقض محدودیت‌های واج‌آرایی نسبت می‌دهند (دوماس و هم‌کاران، 2009؛ مورکنتول و هم‌کاران، 2018). در نواحی مرکزی و آهیانه، تفاوت معناداری در بازه‌ی منسوب به LPC میان سه دسته‌ی محرک‌ها مشاهده نشد.

به‌علاوه، در نواحی آهیانه، به‌ویژه در نیم‌کره‌ی راست (P4)، اثر N400 شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها را از واژه‌ها متمایز می‌کند ($t=2.383$، $p<0.028$؛ $t=-2.174$، $p<0.043$). با بررسی ای‌آرپی مربوط به کانال‌های P8 و P7 دریافتیم که این تمایز معنادار آماری تنها در نیم‌کره‌ی راست مشهود است ($t=-3.391$، $p<0.003$؛ $t=-2.245$، $p<0.037$). با توجه به اینکه اثر N400 در نتیجه‌ی تلاش مغز برای ایجاد هم‌بستگی معنایی (نوولند و هم‌کاران، 2020) حاصل می‌شود، تفاوت شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها با واژه‌ها در این مؤلفه دور از ذهن نیست.

گذشته از بحث دامنه، بررسی آماری تأخیر مؤلفه‌ی N400 نشان داد که در نواحی آهیانه، به‌ویژه در نیم‌کره‌ی راست، مؤلفه‌ی N400 برای شبه‌واژه‌ها به‌طور معناداری زودتر از واژه‌ها و ناواژه‌ها ($t=-4.963$، $p<0.000$؛ $t=2.111$، $p<0.048$) اتفاق می‌افتد.

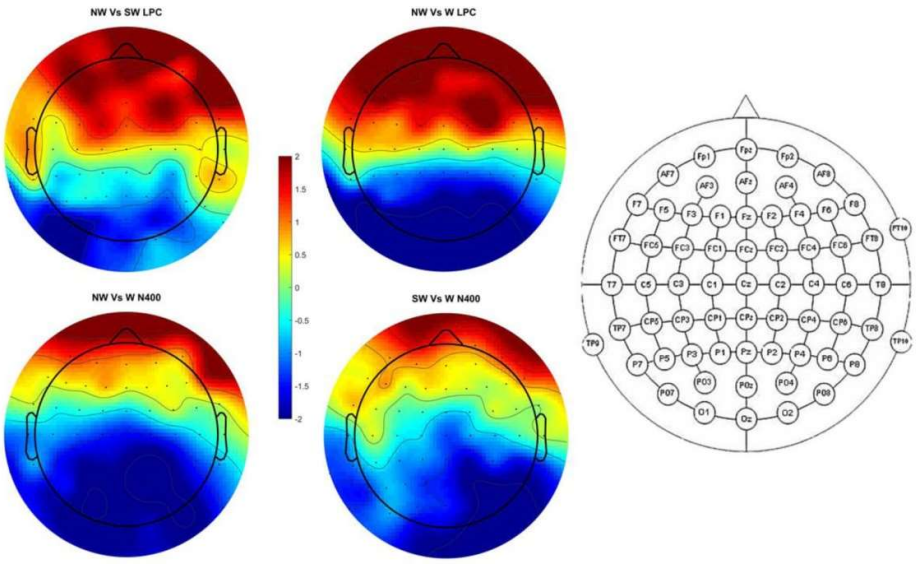
در شکل 3 نیز می‌توان نقشه‌ی توپوگرافی[1] حاصل از اختلاف میانگین دامنه‌ی دسته‌های ناواژه و شبه‌واژه و ناواژه و واژه را در ردیف بالا مشاهده کرد. این اختلاف مربوط به بازه‌ی زمانی 950–1200 هزارم‌ثانیه است که اثر LPC مربوط به دسته‌ی ناواژه‌ها را نسبت به واژه‌ها و شبه‌واژه‌ها در نواحی پیشین، به‌ویژه نیم‌کره‌ی راست، به‌وضوح نمایش می‌دهد. در ردیف دوم نیز می‌توان اثر N400 را مشاهده کرد که در بازه‌ی زمانی 400–700 هزارم‌ثانیه برای دسته‌های ناواژه و شبه‌واژه نسبت به واژه‌ها در نواحی آهیانه، به‌ویژه در نیم‌کره‌ی راست، رخ داده‌است.

پیش از این درباره‌ی تأثیر اندازه‌ی مجاورت واجی بر شکل موج ای‌آرپی سخن گفتیم. همان‌طور که اشاره شد، این مشخصه می‌تواند بر روی مؤلفه‌ی N400 مؤثر باشد، به‌طوری‌که

1- topography map

هرچه اندازه‌ی مجاورت بزرگتر باشد، فعالیت مغز برای هم‌بستگی معنایی بیشتر می‌شود و در نتیجه، N400 بزرگتری حاصل می‌گردد (هلکامب و هم‌کاران، 2002) . با این حال، نتایج نشان داد که واژه‌ها با وجود اندازه‌ی مجاورت واجی بزرگتر نسبت به ناواژه‌ها و شبه‌واژه‌ها، N400 به‌مراتب کوچک‌تری را به‌نمایش گذاشتند. همین موضوع، البته با شدت کمتری، برای شبه‌واژه‌ها در مقایسه با ناواژه‌ها نیز صدق می‌کند. بنابراین، به‌نظر می‌رسد مسأله‌ی اندازه‌ی مجاورت واجی در تحلیل‌های ما موضوعیت ندارد.

براین‌اساس، نتایج حاصل فرضیه‌ی صفر را مبنی بر عدم وجود تفاوت میان پردازش واژه‌ها و کلمات ناآشنا رد می‌کند. طبق تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان یافته‌ها را چنین خلاصه کرد که تفاوت پردازشی میان گروه‌های ناواژه و شبه‌واژه، بیشتر در بخش پیشین و در بازه‌ی زمانی مربوط به LPC دیده می‌شود. با این حال، در بخش آهیانه نیز اثر N400 برای شبه‌واژه‌ها زودتر رخ می‌دهد. به‌علاوه، تفاوت میان شبه‌واژه‌ها و واژه‌ها بیشتر در نواحی آهیانه و در اثر N400 حاصل از پردازش شبه‌واژه‌ها مشهود است. در مقابل، پردازش واژه‌ها و ناواژه‌ها هم در نواحی پیشین و هم در نواحی آهیانه باهم اختلاف دارند. در نواحی پیشین اثر LPC و در نواحی آهیانه اثر N400 برای ناواژه‌ها، شاهدی بر این مدعاست.



شکل 3. توپوپلات‌ها اختلاف میانگین دامنه را در بازه‌های زمان LPC (ردیف بالا) و N400 (ردیف پایین) نمایش می‌دهند. ولتاژهای مثبت مربوط به اثر LPC ناواژه‌ها در بخش پیشین و ولتاژهای منفی مربوط به اثر N400 شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها در نواحی آهیانه مشهود است. در سمت راست نیز جایگاه 64 کانال ای‌ای‌جی بر روی سر دیده می‌شود. (جهت دیدن تصویر رنگی، به نسخه‌ی الکترونیکی مراجعه شود.)

5. نتیجه‌گیری

برای یافتن شباهت‌ها و تفاوت‌های احتمالی در پردازش کلمات ناآشنا و واژه‌های زبان فارسی، یک تکلیف تصمیم‌گیری واژگانی به آزمودنی‌ها ارائه شد. محرک‌ها شامل سه گروه واژه‌ها، شبه‌واژه‌ها و ناواژه‌ها می‌شدند که ساخت مشابهی داشتند. حین انجام این تکلیف، سیگنال‌های مغزی آزمودنی‌ها با استفاده از دستگاه ای‌ای‌جی 64 کاناله ثبت شد و داده‌های حاصل پس از طی مراحل پیش‌پردازش و استخراج ای‌آرپی‌های مد نظر، مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. این تحلیل‌ها نشان داد که برای ناواژه‌ها و شبه‌واژه‌ها در نواحی آهیانه می‌شود اثر N400 را مشاهده کرد. علاوه‌براین، ناواژه‌ها باعث ایجاد اثر LPC در نواحی پیشین نیز می‌شدند.

با وجود اینکه مشاهده‌ی اثر N400 و LPC طبق یافته‌های پیشین در دیگر زبان‌ها، دور از انتظار نبود، اما تفاوت‌هایی نیز به‌چشم می‌خورد. همان‌طور که در پیشینه‌ی پژوهش اشاره کردیم، زونینی و هم‌کاران (2020) بر روی تفاوت‌های پردازشی واژه‌ها و شبه‌واژه‌ها در زبان اسپانیایی تمرکز کردند تا اطلاعاتی درمورد زمان رویداد اثر واژگانی کسب کنند. مشاهدات آنها حاکی از رویداد اثر واژگانی در حدود 700 هزارم‌ثانیه پس از شروع محرک شنیداری بود. این اثر در یافته‌های پژوهش حاضر در نواحی آهیانه در حدود 400 هزارم‌ثانیه دیده می‌شود که یک واگرایی میان واژه‌ها و شبه‌واژه‌ها اتفاق می‌افتد و منتج به اثر N400 برای شبه‌واژه‌ها (و ناواژه‌ها) می‌شود. اگرچه با نگاهی بر شکل 2، در نواحی پیشین می‌توان منفی‌تر بودن شبه‌واژه‌ها را در حدود 700 هزارم‌ثانیه مشاهده کرد، اما آزمون‌های آماری، تفاوت معناداری را نشان ندادند.

در پژوهش دوماس و هم‌کاران (2009)، که بارها به آن ارجاع داده‌ایم، اثر N400 برای هر دو گروه کلمات ناآشنا برای زبان آلمانی مشهود بود. در پژوهش ما نیز این اثر به وضوح در

نواحی آهیانه برای هر دو دسته‌ی ناواژه‌ها و شبه‌واژه‌ها دیده می‌شود. با این حال، نکته‌ی قابل توجه آنست که آنها این اثر را در نواحی پیشین یافتند و نواحی آهیانه اثری از N400 نشان نمی‌داد. این در حالیست‌که، تفاوت‌ها در بازه‌ی N400 برای داده‌های ما از نواحی مرکزی شروع می‌شوند و در نواحی آهیانه به اوج می‌رسند. آنها همچنین شاهد اثر LPC برای ناواژه‌ها بودند که در نواحی آهیانه رخ می‌داد. این برخلاف یافته‌ی ماست که اثر LPC برای ناواژه‌ها در مناطق پیشین مشاهده می‌شود. به‌علاوه، در پژوهش مورکنتول و همکاران (2018) که بر روی یک زبان مصنوعی انجام‌شده بود، اثر LPC در نواحی پسین و اثر N400 در نواحی مرکزی برای ناواژه‌ها قابل تشخیص بود.

برای توجیه تفاوت‌های مشهود در نتایج پژوهش‌ها در زبان‌های مختلف می‌توان به دو دلیل محتمل اشاره کرد: اول ویژگی‌های خاص هر زبان و سخن‌گویان آن است و دوم چگونگی تکلیف و مواد آزمون. برای مثال، در زبان آلمانی برخی پژوهش‌ها (استبر و روسی، 2020؛ روسی، 2011) N400 بزرگتری برای شبه‌واژه‌ها نسبت به ناواژه‌ها گزارش کرده‌اند اما دوماس و هم‌کاران (2009) چنین تفاوتی را مشاهده نکردند. با این حال، پژوهش‌های بیشتری در این زمینه نیاز است انجام شود تا دلایل پشت پرده‌ی این تفاوت‌ها را نمایان کند.

یکی دیگر از پیشنهادات ما برای پژوهش‌های آتی، بررسی تأخیر مؤلفه‌ی N400 در شبه‌واژه‌ها نسبت به ناواژه‌ها و واژه‌هاست. یافته‌های ما نشان داد که در نواحی آهیانه، این مؤلفه برای شبه‌واژه‌ها زودتر اتفاق می‌افتد. حال‌آنکه، انتظار می‌رفت دیرتر از ناواژه‌ها و واژه‌ها رخ دهد، چراکه هم‌بستگی معنایی برای شبه‌واژه‌ها به‌دلیل بی‌معنا بودن باید سخت‌تر از واژه‌ها باشد، اگرچه این امر در اثر N400 شبه‌واژه‌ها نسبت به واژه‌ها بازتاب یافته‌است. از طرف دیگر، طبق ادعای پژوهش‌هایی چون استبر و روسی (2020) و روسی و هم‌کاران (2011)، انتظار می‌رود ناواژه‌ها به‌دلیل نقض قواعد واج‌آرایی زودتر از شبه‌واژه‌ها از دور مرحله‌ی بازیابی واژه خارج شوند و مرحله‌ی هم‌بستگی معنایی را سریع‌تر سپری کنند، و در نتیجه N400 کوچکتری را ایجاد کنند. بنابر ملاحظات بالا، پژوهش‌هایی از جنس پژوهش حاضر نیاز است بر روی زبان فارسی انجام گیرد تا شباهت‌ها و تفاوت‌های پردازشیِ سخن‌گویان فارسی با دیگر زبان‌ها رفته‌رفته آشکار گردد.

منابع

1- Baggio, G., & Hagoort, P. (2011). The balance between memory and unification in semantics: A dynamic account of the N400. *Language and Cognitive Processes*, *26*(9), 1338-1367.
2- Boersma, P., & Weenink, D. (2019). Praat (Version 6.1) [Computer software]. Retrieved from http://www.praat.org/
3- Caramazza, A., & Zurif, E. B. (1976). Dissociation of algorithmic and heuristic processes in language comprehension: Evidence from aphasia. *Brain and language*, *3*(4), 572-582.
4- Daltrozzo, J., & Conway, C. M. (2014). Neurocognitive mechanisms of statistical-sequential learning: what do event-related potentials tell us? *Frontiers in human neuroscience*, 8, 437.
5- Delogu, F., Brouwer, H., & Crocker, M. W. (2019). Event-related potentials index lexical retrieval (N400) and integration (P600) during language comprehension. *Brain and cognition*, 135, 103-569.
6- Domahs, U., Kehrein, W., Knaus, J., Wiese, R., & Schlesewsky, M. (2009). Event-related potentials reflecting the processing of phonological constraint violations. *Language and Speech***,** *52*(4), 415-435.
7- Hagoort, P. (2016). MUC (Memory, Unification, Control): A model on the neurobiology of language beyond single word processing. *Neurobiology of language* (pp. 339-347). Academic Press.
8- Holcomb, Ph. J., Grainger, J., & O'rourke, T. (2002). An electrophysiological study of the effects of orthographic neighborhood size on printed word perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(6), 938-950.
9- Key, A. P. (2016). Human Auditory Processing: Insights from Cortical Event-related Potentials. *AIMS Neuroscience*, *3*(2), 141-162.
10- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual review of psychology*, 62, 621-647.
11- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science***,** *207*(4427), 203-205.
12- Menenti, L., Gierhan, S. M., Segaert, K., & Hagoort, P. (2011). Shared language: overlap and segregation of the neuronal infrastructure for speaking and listening revealed by functional MRI. *Psychological science*, *22*(9), 1173-1182.
13- Moore-Cantwell, C., Pater, J., Staubs, R., Zobel, B., & Sanders, L. (2018). Event-related potential evidence of abstract phonological learning in the laboratory. *Unpublished ms., University of Massachusetts*. {PDF} Retrieved from http://www. clairemoorecantwell.org/phonolearn/moore-cantwell-et-al-2018-ERP-ALL. pdf.
14- Nieuwland, M., S., Barr, Dale J., Bartolozzi, F., Busch-Moreno, S., Darley, E., Donaldson, D. I., Ferguson, H. J., et al. (2020). Dissociable effects of prediction and integration during language comprehension: Evidence from a large-scale study using brain potentials. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *375*(1791). doi: 10.1098/rstb.2018.0522.

15- Nooteboom, Sieb (1997). The prosody of speech: melody and rhythm. *The handbook of phonetic sciences***,** 5, 640-673.
16- Obrig, H., Mock, J., Stephan, F., Richter, M., Vignotto, M., & Rossi, S. (2017). Impact of associative word learning on phonotactic processing in 6-month-old infants: A combined EEG and fNIRS study. *Developmental cognitive neuroscience*, 25, 185-197.
17- Paiva, T., Almeida, P., Ferreira-Santos, F., Vieira, J., Silveira, C., Chaves, P., Barbosa, F., & Marques-Teixeira, J. (2016). Similar sound intensity dependence of the N1 and P2 components of the auditory ERP: Averaged and single trial evidence. *Clinical Neurophysiology***,** *127*(1), 499-508.
18- Rogers, T., Lambon Ralph, M. A., Garrard, P., Bozeat, S., McClelland, J., Hodges, J., & Patterson, K. (2004). Structure and deterioration of semantic memory: a neuropsychological and computational investigation. *Psychological review***,** *111*(1), 205.
19- Rossi, S., Jürgenson, Ina B., Hanulíková, A., Telkemeyer, S., Wartenburger, I. & Obrig, H. (2011). Implicit processing of phonotactic cues: evidence from electrophysiological and vascular responses. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(7), 1752-1764.
20- Segaert, K., Menenti, L., Weber, K., Petersson, K., & Hagoort, P. (2012). Shared syntax in language production and language comprehension—an fMRI study. *Cerebral Cortex*, *22*(7), 1662-1670.
21- Smolensky, P., & Prince, A. (1993). *Optimality Theory: Constraint interaction in generative grammar*. Massachusetts: MIT Press.
22- Steber, S. & Rossi, S. (2020). So young, yet so mature? Electrophysiological and vascular correlates of phonotactic processing in 18-month-olds. *Developmental cognitive neuroscience*, 43, 100-784.
23- Weiss, Y., & Booth, J. R. (2017). Neural correlates of the lexicality effect in children. *Brain and language***,** 175, 64-70.
24- Ylinen, S., Huuskonen, M., Mikkola, K., Saure, E., Sinkkonen, T., & Paavilainen, P., (2016). Predictive coding of phonological rules in auditory cortex: A mismatch negativity study. *Brain and language***,** 162, 72-80.
25- Zunini, R.A. L., Baart, M., Samuel, A. G., & Armstrong, B. C. (2020). Lexical access versus lexical decision processes for auditory, visual, and audiovisual items: Insights from behavioral and neural measures. *Neuropsychologia*, 137, 107-305.

Auditory Processing of Farsi words, Pseudowords and Nonwords

Fahimeh Nasib Zaraby (Corresponding Author)[1]
PhD Student in General Linguistics, Department of Linguistics, University of Tehran, Tehran, Iran

Mahmoud BijanKhan
Full Professor, Department of Linguistics, University of Tehran, Tehran, Iran

Hamid SoltanianZadeh
Professor of Intelligent Control and Processing Scientific Center, University of Tehran, Tehran, Iran

Ali Darzi
Full Professor, Department of Linguistics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received:13/08/2021 Accepted:02/10/2021

Abstract

During the recent two decades, the subject of processing well-formed and ill-formed words have been exploited in the literature for different languages and different purposes. Lexical retrieval for auditory inputs has been proved to start as soon as 200 ms after the stimulus onset. However, the questions of when and how well-formed and ill-formed words change their processing paths have yet to be answered for Farsi speakers. In this study, Farsi speakers did a lexical decision task while their brain activity was being recorded by a 64 channel EEG. The stimuli included Farsi words, pseudowords and nonwords, which were very similar in structure and were consistent in terms of fundamental frequency, intensity and duration. The ERP data showed an LPC for nonwords in frontal regions, which is known to be an indicator of violating phonotactic constraints. In addition, nonwords and pseudowords showed almost equal N400 effects in parietal regions, which can reflect a more effortful semantic integration compared with words. Finally, the peak latency analysis revealed an earlier N400 peak for pseudowords as opposed to words and nonwords. The regions where N400 and LPC were identified differed from some studies in the literature.

Keywords: auditory, word processing, ERP, LPC, N400, phonotactic constraints

1- fahimeh.nasib@ut.ac.ir