

Auditory Processing of Nouns in Persian Using Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

Neda Haghighi Saber 

Linguistics Department, Faculty of Literature, Alzahra University, Tehran, Iran; n.haghighisaber@alzahra.ac.ir

Mandana Nourbakhsh* 

Corresponding author, Linguistics Department, Faculty of Literature, Alzahra University, Tehran, Iran; nourbakhsh@alzahra.ac.ir

Azita Abbasi 

Linguistics Department, Faculty of Literature, Alzahra University, Tehran, Iran; a.abbasi@alzahra.ac.ir

Mahdieh Karami 

Cognitive Linguistics Department, Institute for Cognitive Science Studies (ICSS), Tehran, Iran; karami_m@icss.ac.ir

Abstract

The primary objective of the present study was to identify brain regions activated during the auditory processing of different morphological noun types in Persian and to investigate the role of the plural suffix (-ha/-an) in this process. Two research questions were addressed: (1) Which brain regions are activated during the auditory processing of simple versus non-simple (derived and compound) nouns in Persian? (2) How does the presence or absence of inflectional plural suffixes influence the pattern of activated regions? To this end, a six-block task was designed for fMRI acquisition, with each block comprising 20 seconds of auditory stimulation and 5 seconds of rest. Target words were randomly distributed across blocks and presented in a fixed sequence to 20 native Persian speakers. Structural images were obtained using a 3D T1-weighted MPRAGE sequence, and functional images using an EPI sequence. Statistical analyses were performed using GLM and SPM based on the GLA model. Findings revealed that simple nouns engaged motor regions, derived nouns recruited complex linguistic processing areas, and compound nouns activated affective and cognitive regions. Processing of derived and compound nouns extended over broad neural networks, involving memory-related structures including the amygdala and hippocampus. Moreover, the presence of the Persian plural suffix was found to broaden the extent of activation and enhance its magnitude, with these effects being more prominent in regions associated with linguistic and cognitive functions.

Keywords: auditory processing, noun, plural suffix, Persian language, fMRI



Received: 2026-05-19 ■ Revised: 2026-08-17 ■ Accepted: 2026-08-27



Haghighi Saber, N., Nourbakhsh, M., Abbasi, A., & Karami, M. (2026). Auditory processing of nouns in Persian using functional magnetic resonance imaging (fMRI). *Language Science Studies*, 13(23), 227-252. <https://doi.org/10.22054/ls.2025.88322.1746>



DOI: [10.22054/ls.2025.88322.1746](https://doi.org/10.22054/ls.2025.88322.1746) ■ <https://ls.atu.ac.ir>

Publisher: Allameh Tabataba'i University ■ ISSN: 2423-7728 ■ e-ISSN: 2538-2551



Language Science Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

1. Introduction

One of the practical topics in clinical linguistics and neurolinguistics concerns brain function during speech processing. Speech constitutes a phonetic chain and serves as a vehicle for linguistic messages (Whiteside, 1993). Although these messages are constructed across all languages through the co-occurrence of morphological, syntactic, semantic, phonetic, and phonological components, they exhibit language-specific properties that distinguish them linguistically and typologically. Such distinctions may also be traceable at the cognitive, neurological, and processing levels (Wei et al., 2023). The investigation of these differences can contribute not only to cognitive assessments but also to the diagnosis and treatment of language disorders.

Auditory processing arises from complex interactions among various linguistic domains, including the lexical domain, and enables speakers to comprehend the messages embedded in speech. The noun category ranks among the most pivotal elements in speech processing and constitutes one of the fundamental concepts in linguistic studies, playing an essential role in conveying the meanings inherent in linguistic messages and in identifying the external world (Van der Auwera, 1985).

The study addresses the following questions:

- (1) Which brain regions are activated during the auditory processing of simple versus non-simple (derived and compound) nouns in Persian?
- (2) How does the presence or absence of inflectional plural suffixes influence the pattern of activated regions?

2. Literature Review

The identification of neural correlates underlying speech processing constitutes a fundamental objective in cognitive neuroscience. Early investigations in this domain predominantly centered on pathological populations, examining noun production and processing (Friedmann et al., 2000), semantic lexical distinctions (Bird et al., 2000), the effects of temporal lobe damage on noun processing (Cappa & Perani, 2003; Glosser & Donofrio, 2001), and the role of olfactory lexicon in metaphorical comprehension (Akbarian et al., 2025). More recently, however, research has expanded to encompass language processing in healthy individuals, leading to the identification of several key regions. Foundational studies implicated the frontal cortex and basal ganglia in morphosyntactic rule processing (Ullman, 1998), while subsequent work has highlighted the contribution of the right cerebellum to linguistic functions (Mariën et al., 2014).

A considerable body of evidence consistently points to the involvement of the left temporal lobe, specifically its middle, superior, and inferior subdivisions, in noun processing (Friederici et al., 2006; Gor, 2018; Meykadeh et al., 2021; Momenian et al., 2016; 2018). More recent

neuroimaging research has further extended this network to include the superior temporal gyrus, prefrontal cortex, angular gyrus, anterior temporal cortex, and Broca's and Wernicke's areas (Ranjan & Singh, 2025). Additionally, regions such as the left inferior frontal gyrus, inferior parietal gyrus, insula, and central and precentral areas have been implicated in processing syntactic complexity (Bozic & Schwarz, 2025; Feng et al., 2020; Moseley & Pulvermüller, 2014; Russo et al., 2021; Slioussar et al., 2014). Cross-linguistic studies on affixation indicate that morphological complexity imposes increased cognitive demands (Clahsen, 2006; Lehtonen et al., 2006; Russo et al., 2021), with prefrontal activation intensity correlating positively with derivational complexity (Pliatsikas et al., 2014).

With specific reference to Persian, the inferior frontal lobe demonstrates the greatest activation during morphosyntactic processing, a finding corroborated in bilingual contexts (Meykadeh et al., 2021; Momenian et al., 2016; 2018). Meykadeh and colleagues (2024) further examined cerebellar involvement in bilingual grammatical judgments. Despite these advances, the neural substrates of noun processing under purely auditory stimulation remain insufficiently explored. Elucidating these regions is essential for constructing a comprehensive neural map for Persian speakers and, more broadly, for facilitating cross-linguistic neurolinguistic comparisons across typologically diverse language families.

3. Methodology

This fMRI study was conducted at the National Brain Mapping Laboratory in Tehran during spring and summer 2025. Twenty healthy, right-handed native Persian speakers (14 females, 6 males; age 21–47 years, mean 30.85) with university education and no exposure to other languages before age seven participated after providing written informed consent. The study received ethics approval from Tehran University of Medical Sciences (IR.IUMS.REC.1404.367).

Auditory stimuli comprised 36 target words derived from 18 nouns across three morphological types, simple, derived, and compound, presented in both singular and plural forms (with suffixes *-hā* or *-ān*). Recordings were made by a female native speaker using a Zoom H6 recorder and subsequently processed in Praat and Audacity (noise reduction, normalization, equalization, high-pass filtering below 100 Hz, and dynamic range compression). The task employed a block design with 24 blocks (six analyzed here), each consisting of 20 seconds of auditory stimulation followed by 5 seconds of visual rest. Participants performed passive listening with no behavioral responses.

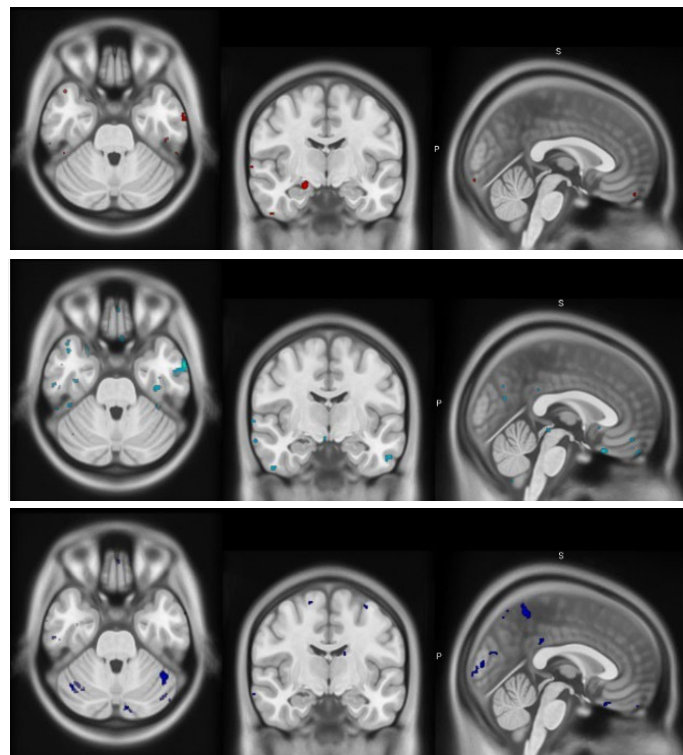
Imaging was performed on a Siemens Prisma 3T scanner. Structural images were acquired using a T1-weighted MPRAGE sequence (1.1 mm³ voxels; TR = 1840 ms; TE = 2.43 ms), and functional images using an EPI sequence (3 × 3 × 3.3 mm³; TR = 2500 ms; TE = 30 ms; 48 slices; 23 volumes). Preprocessing via fMRIPrep included N4 bias correction, skull-stripping, tissue segmentation (FSL FAST), surface reconstruction (FreeSurfer 7.3.2), and nonlinear registration

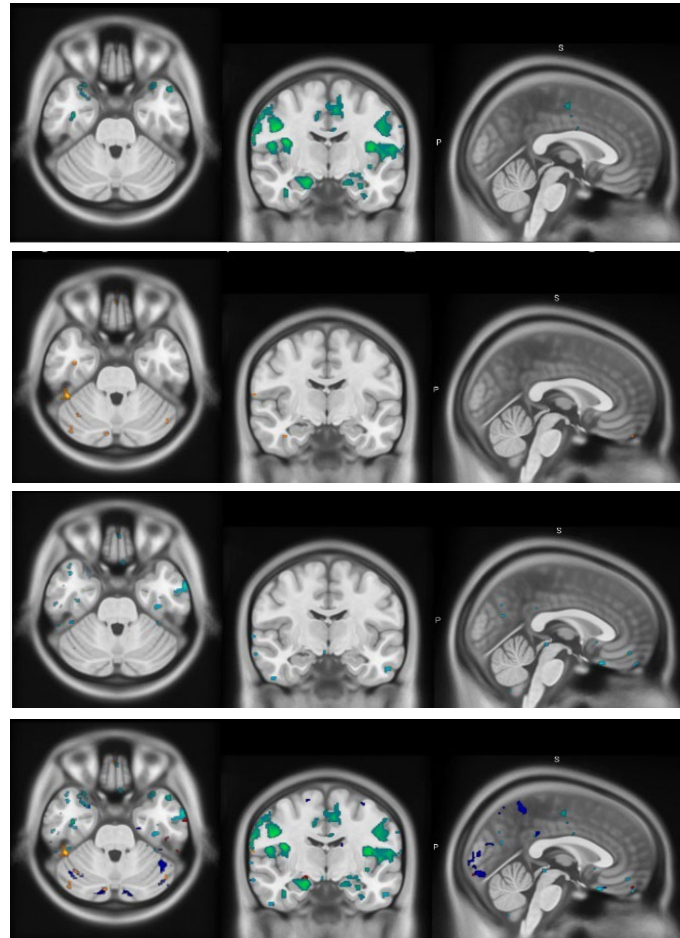
to MNI space. Functional preprocessing involved motion correction, coregistration, nuisance regression (including framewise displacement, DVARS, and CompCor), high-pass filtering (128 s cutoff), and outlier detection. BOLD data were resampled to fsLR surface space (91,000 grayordinates) and MNI subcortical space using cubic B-spline interpolation.

4. Results

fMRI data analysis was performed in three stages using Nilearn and related Python libraries. First, a design matrix was constructed for each participant, modeling the BOLD response with the Glover HRF and a cosine drift model. Second, a General Linear Model was fitted to the preprocessed data in MNI space, and contrasts were computed comparing each experimental block to the rest condition; activation maps were thresholded at $z > 2.3$. Third, a second-level group analysis identified significant activation patterns across all participants at FDR-corrected $p < 0.05$ with a cluster extent threshold of 10 voxels. Activated regions were labeled using the AAL and Brodmann atlases.

Figure 1. Activated regions in the group-level analysis





Note. Simple (red), simple + affix (light blue), derived (dark blue), derived + affix (cyan), compound (orange), and compound + affix (sky blue) blocks, each compared to the rest condition. The final panel displays activated regions across all blocks combined. Each color, according to the aforementioned classification, represents one of the block types.

5. Discussion

fMRI analysis revealed significant activation differences across six experimental blocks (Kruskal–Wallis: $\chi^2 = 44.905$, $p < 0.0001$). The derived and derived + affix blocks exhibited the highest median activation values (-6.0) and widest distribution ranges, while the compound block showed the lowest dispersion. First-level whole-brain analysis identified distinct spatial activation patterns for each block type, with maximum activation values ranging from 4.285 (simple nouns) to 5.413 (derived + affix) in a representative participant. Group-level analysis (FDR-corrected $p < 0.05$, cluster extent ≥ 10 voxels) revealed extensive language-related networks, including temporal, frontal, insular, cerebellar, and limbic regions. Notable peak activations included the left middle

frontal/precentral/postcentral regions for simple nouns ($z = 3.10$), right middle temporal pole for simple + affix ($z = 2.54$), right cerebellum/fusiform for compound nouns ($z = 3.18$), and left Heschl's gyrus/superior temporal for compound + affix ($z = 3.29$). These findings demonstrate differential neural recruitment depending on morphological complexity and number marking.

6. Conclusion

This fMRI study examined auditory processing of simple, derived, and compound Persian nouns in singular and plural forms. Results revealed that affixation increases activation intensity and expands neural networks, particularly in frontal, temporal, and cerebellar regions. Morphological complexity recruited broader language-related and memory-related areas, supporting dual-route models of morphological processing and compositionality theory.

Acknowledgments

The researcher sincerely acknowledges the invaluable cooperation and assistance of Ms. Shaghayegh Karimi Alavijeh and Ms. Neda Mohammadi Mobarakeh.



پردازش شنیداری اسم در زبان فارسی با استفاده از تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی (fMRI)

گروه زبان‌شناسی، دانشکده ادبیات، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران: n.haghighisaber@alzahra.ac.ir

ندا حقیقی صابر 

نویسنده مسئول، گروه زبان‌شناسی، دانشکده ادبیات، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران: nourbakhsh@alzahra.ac.ir

ماندانا نوربخش* 

گروه زبان‌شناسی، دانشکده ادبیات، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران: a.abbasi@alzahra.ac.ir

آریتا عباسی 

گروه زبان‌شناسی شناختی، مؤسسه آموزش عالی علوم شناختی، تهران، ایران: karami_m@icss.ac.ir

مهديه کرمی 

چکیده

مسئله اصلی در پژوهش حاضر، یافتن نواحی فعال مغز هنگام پردازش شنیداری انواع ساخت‌واژی اسم در فارسی و بررسی تأثیر وند جمع (ها/ان) در این فرایند بود. این پژوهش در صدد پاسخ به این دو پرسش بود: هنگام پردازش شنیداری اسم‌های بسیط و غیربسیط (مشتق و مرکب) در زبان فارسی کدام نواحی مغز فعال می‌شوند؟ وجود یا عدم وجود وندهای تصریفی جمع (ها/ان) چه تغییری در نواحی فعال‌شده ایجاد می‌کند؟ در پاسخ به این پرسش‌ها، یک تکلیف شش‌بلوکی برای استفاده در دستگاه تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی (fMRI) طراحی شد. هر بلوک شامل ۲۰ ثانیه محرک شنیداری و پنج ثانیه استراحت بود. توزیع کلمات هدف در هر بلوک تصادفی بود و کلمات با ترتیبی یکسان برای ۲۰ شرکت‌کننده فارسی‌زبان پخش شد. در تصاویر ساختاری از توالی سه‌بعدی T1MPRAGE و در تصاویر عملکردی از تصویربرداری اکو صفحه‌ای (EPI) استفاده شد. تحلیل براساس GLM و SLA با مدل GLA انجام شد. نتایج نشان داد نواحی فعال در اسم بسیط به نواحی حرکتی، در اسم مشتق به نواحی پردازش زبانی پیچیده و در اسم مرکب به نواحی پردازشی احساسی و شناختی پیوند می‌خورد. پردازش داده‌های مربوط به اسم‌های مشتق و مرکب در مناطق وسیعی از مغز دیده می‌شود و نه تنها بخش‌های مربوط به زبان که بخش‌های مربوط به حافظه مانند امیگدال و هیپوکامپ را نیز دربرمی‌گیرد. همچنین، در این پژوهش مشخص می‌شود که وجود وند تصریفی جمع در کنار اسم در فارسی موجب گسترش دامنه فعال‌سازی و افزایش شدت آن می‌شود. این تغییر در نواحی مربوط به پردازش زبانی و شناختی شدیدتر است.

کلیدواژه‌ها: پردازش شنیداری، اسم، پس‌وند جمع، زبان فارسی، fMRI

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹ ■ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۶ ■ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

حقیقی صابر، ندا، نوربخش، ماندانا، عباسی، آریتا و کرمی، مهديه. (۱۴۰۵). پردازش شنیداری اسم در زبان فارسی با استفاده از تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی (fMRI). علم زبان، ۱۳(۲۳)، ۲۵۲-۲۲۷.

<https://doi.org/10.22054/ls.2025.88322.1746>

وبگاه نشریه: <https://ls.atu.ac.ir> ■ DOI: 10.22054/ls.2025.88322.1746

ناشر: دانشگاه علامه طباطبائی ■ شاپا چاپی: ۷۷۲۸-۲۴۲۳ ■ شاپا الکترونیک: ۲۵۳۸-۲۵۵۱



۱. مقدمه

یکی از موضوعات کاربردی در زبان‌شناسی بالینی^۱ و عصب‌زبان‌شناسی، عملکرد مغز هنگام پردازش گفتار است. گفتار زنجیره‌ای آوایی و حامل پیام‌های زبانی است (Whiteside, 1993). گرچه این پیام‌ها در همهٔ زبان‌ها از هم‌نشینی ارکان صرفی، نحوی، معنایی، آوایی و واجی ساخته می‌شوند، دارای ویژگی‌های زبان‌ویژه‌ای^۲ هستند که آنها را از نظر زبان‌شناختی و رده‌شناختی^۳ متمایز می‌کند. چنین تمایزهایی ممکن است در سطوح شناختی، عصب‌شناختی و پردازشی نیز قابل ردیابی باشد (Wei et al., 2023). مطالعهٔ این تمایزها می‌تواند نه‌تنها در ارزیابی‌های شناختی که در تشخیص و درمان اختلالات زبانی نیز نقش داشته باشد.

فرایند پردازش شنیداری حاصل تعاملات پیچیده میان حوزه‌های مختلف زبان از جمله حوزهٔ واژگان است و به‌گوشوران امکان درک پیام‌های مستتر در گفتار را می‌دهد. مقولهٔ اسم از کلیدی‌ترین عناصر پردازش گفتار و یکی از مفاهیم پایه‌ای در مطالعات زبانی است و نقش بنیادینی در انتقال مفاهیم نهفته در پیام‌های زبانی و شناسایی جهان خارج ایفا می‌کند (van der Auwera, 1985). یافتن نواحی فعال در مغز هنگام پردازش و درک این فرایند یکی از جنبه‌های اصلی عملکرد مغز است.

۲. پیشینه پژوهش

پژوهش در این حوزه با تمرکز بر بیماری‌ها و اختلالات آغاز شده است. مطالعهٔ تولید و پردازش اسم (Friedmann et al., 2000)، تفاوت واژگانی از منظر معنایی (Bird et al., 2000)، تغییرات در روند تولید و پردازش اسم ناشی از آسیب در لوب گیجگاهی^۴ (Cappa & Perani, 2003; Glosser & Donofrio, 2001) و پژوهش اکبریان و همکاران^۵ (2025) با تمرکز بر نقش واژگان بویایی در پردازش استعاری^۶ از آن جمله‌اند. با این حال، در سال‌های اخیر پردازش زبانی در افراد سالم نیز مورد توجه قرار گرفته است و برخی نواحی فعال مغز مشخص شده‌اند. در یکی از قدیمی‌ترین مطالعات، قشر پیشانی^۷ و عقده‌های قاعده‌ای^۸ مسئول پردازش قاعده‌های صرفی و نحوی شناخته شده است (Ullman, 1998). در مقالهٔ مروری ماریان^۹ و همکاران (2014) نقش مخچهٔ راست^{۱۰} در پردازش زبان مطالعه شده است. بسیاری از پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که لوب گیجگاهی میانی^{۱۱}، فوقانی^{۱۲} و تحتانی چپ^{۱۳} در پردازش اسم نقش دارند (Friederici et al., 2006; Gor, 2018; Meykadeh et al., 2021; Momenian et al., 2016; Momenian et al., 2018). در یکی از پژوهش‌های اخیر fMRI، از شکنج گیجگاهی فوقانی^{۱۴}

^۱. clinical

^۲. language-specific

^۳. typological

^۴. temporal lobe

^۵. Akbarian, M.

^۶. metaphorical

^۷. frontal cortex

^۸. basal ganglia

^۹. Mariën, P.

^{۱۰}. right cerebellum

^{۱۱}. left medial temporal lobe

^{۱۲}. left superior temporal lobe

^{۱۳}. left inferior temporal lobe

^{۱۴}. superior temporal gyrus

، قشر پیش‌پیشانی^۱، شکنج زاویه‌ای^۲، قشر قدامی گیجگاهی^۳ و نواحی بروکا^۴ و ورنیکه^۵ نیز به‌عنوان نواحی مهم در پردازش ابعاد مختلف اسم و فعل نام برده شده است (Ranjan & Singh, 2025). شکنج پیشانی میانی تحتانی چپ^۶، شکنج آهیانه تحتانی^۷، شکنج گیجگاهی فوقانی چپ^۸، اینسولا^۹ و نواحی مرکزی و پیش‌مرکزی^{۱۰} از دیگر نواحی فعال در پردازش پیچیدگی‌های نحوی اسم و فعل‌اند (Bozic & Schwarz, 2025; Feng et al., 2020; Moseley & Pulvermüller, 2014; Russo et al., 2021; Slioussar et al., 2014). نتایج مطالعات درباره‌ی وند در زبان‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که افزودن این عنصر زبانی موجب بار شناختی^{۱۱} بیشتری می‌شود (Clahsen, 2006; Lehtonen, Vorobyev et al., & Laine, 2006; Russo et al., 2021). برخی مطالعات نیز نشان می‌دهند که شدت فعال‌سازی قشر پیش‌پیشانی در پردازش واژه‌های مشتق نسبت به انواع دیگر بیشتر است و میان این مقدار و میزان پیچیدگی ساخت‌واژی کلمات رابطه‌ی مستقیمی وجود دارد (Pliatsikas et al., 2014).

در مطالعات مربوط به فارسی نیز، لوب پیشانی تحتانی بیشترین میزان فعالیت را هنگام پردازش مشخصه‌های صرفی - نحوی داشته است. این ناحیه در پژوهش‌های مربوط به دوزبانگی^{۱۲} نیز مسئول پردازش پیچیدگی‌های ساختاری معرفی شده است (Meykadeh, 2016; Momenian et al., 2018; Momenian et al., 2021; et al., 2024). میکده و همکاران^{۱۳} (2024) نقش مخچه را در قضاوت دستوری دوزبان‌ها بررسی کرده‌اند. با این حال، به نظر می‌رسد که شناسایی نواحی فعال در پردازش اسم در مواجهه با محرک‌های صرفاً شنیداری چندان مورد توجه نبوده است. یافتن این نواحی یکی از پازل‌های نقشه مغزی گویشوران هر زبان، از جمله زبان فارسی، است. از این‌رو، چنین مطالعاتی می‌توانند مسیر درک عملکرد مغز گویشوران این زبان را هنگام پردازش گفتار هموار کنند و با ارائه نقشه مغزی زبانی مقایسه عصب‌زبان‌شناختی زبان‌های متعلق به خانواده‌ها و رده‌های مختلف را امکان‌پذیر سازد.

هدف پژوهش حاضر، یافتن نواحی فعال مغز هنگام پردازش شنیداری انواع ساخت‌واژی اسم در فارسی با توجه به مشخصه تصریفی شمار^{۱۴} است. بر این اساس، طرح دو پرسش ضروری به نظر می‌رسد: هنگام پردازش شنیداری اسم‌های بسیط و غیربسیط (مشتق و مرکب) زبان فارسی کدام نواحی مغز فعال می‌شود؟ وجود یا عدم وجود وندهای تصریفی جمع (ها/ان) چه تغییری در نواحی فعال‌شده ایجاد می‌کند؟ در پاسخ به این پرسش‌ها، تکلیفی شش‌بلوکی برای استفاده در دستگاه تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی (fMRI) طراحی شد. علت انتخاب این روش، امکان تصویربرداری و ثبت نواحی فعال مغز با وضوح مکانی

¹. prefrontal cortex

². gyrus angular

³. anterior temporal cortex

⁴. Broca's area

⁵. Wernicke's area

⁶. left middle inferior frontal gyrus

⁷. inferior parietal gyrus

⁸. left superior temporal gyrus

⁹. insula

¹⁰. central and precentral areas

¹¹. cognitive load

¹². bilingualism

¹³. Meykadeh, S.

¹⁴. number

بالا به صورت غیرتهاجمی^۱ (Ogawa et al., 1993) بود. محرک‌های مورد بحث شامل اسم‌های بسیط، مشتق و مرکبی بود که یک بار در حالت مفرد و بار دیگر همراه با وند تصریفی جمع به صورت شنیداری ارائه و به طور تصادفی بین سایر بلوک‌ها توزیع شد.

۳. روش

داده‌های این پژوهش در بهار و تابستان ۱۴۰۴ در آزمایشگاه ملی نقشه‌برداری مغز، واقع در شهر تهران، ثبت شد. در این بخش جزئیات و اطلاعات مربوط به شرکت‌کنندگان، محرک‌های آزمایش و شیوه اجرای آن، ثبت داده‌ها، پروتکل‌های تصویربرداری ساختاری و عملکردی، پیش‌پردازش^۲، پردازش تصاویر و تحلیل آماری شرح داده می‌شود.

۱-۳. شرکت‌کنندگان

شرکت‌کنندگان از طریق فراخوان و با توجه به چند شرط در پژوهش حاضر شرکت کردند. معیارهای ورود^۳ عبارت بود از: سلامت عمومی، بازه سنی ۲۰ تا ۵۰ سال، راست‌دستی، تحصیلات دانشگاهی و زبان مادری فارسی؛ به این معنی که پیش از هفت سالگی در معرض زبانی غیر از زبان فارسی قرار نگرفته باشند (Krashen, 1973). معیارهای خروج^۴ نیز عبارت بود از: وجود فلز در بدن، ترس از فضای بسته، اختلالات شنوایی، زبانی، عصبی و یا روان‌پزشکی. با توجه به غربالگری دقیقی که پیش از شروع آزمایش انجام گرفت، هیچ داده‌ای به دلیل مغایرت با شروط پژوهش حذف نشد.

با توجه به این نکته که حجم نمونه در پژوهش‌های fMRI باید حداقل ۱۵ نفر باشد (Friston, 2012)، داده‌های ۲۱ نفر ثبت شد؛ اما به دلیل اجرا نشدن تکلیف، داده‌های یک نفر حذف و تحلیل نهایی بر اساس داده‌های ۲۰ نفر (۱۴ زن و ۶ مرد) انجام شد. همه شرکت‌کنندگان دانشجوی یا دانش‌آموخته مقاطع تحصیلی کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا بودند و در رده سنی ۲۱ تا ۴۷ سال (میانگین = ۳۰/۸۵ و انحراف معیار = ۷/۷۸) قرار داشتند. همه افراد سالم و فارسی‌زبان بودند و راست‌دستی آنان از طریق کسب ۱۰ امتیاز در آزمون دست‌برتری ادینبورگ^۵ تأیید شد. هیچ یک از آنان، طبق خوداظهاری کتبی، سابقه ابتلا به اختلالات شنوایی، زبانی و بیماری‌های عصبی و روان‌پزشکی نداشتند. گفتنی است که با توجه به همگنی جامعه آماری، اهداف پژوهش و عدم نیاز به گروه کنترل، به گزارش ویژگی‌های مردم‌شناختی^۶ مطرح شده اکتفا شد و ضرورتی برای بررسی آماری شاخص چهارعاملی وضعیت اجتماعی - اقتصادی هالینگزهد^۷ (1975) دیده نشد.

این پژوهش مطابق اعلامیه هلسینکی در کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی تهران با شناسه IR.IUMS.REC.1404.367 تصویب شده است. شرکت‌کنندگان رضایت‌نامه کتبی شرکت در پژوهش را پیش از شروع آزمایش مطالعه و امضا کردند. اطلاعات فردی و بالینی هر فرد از طریق پرسشنامه‌های استاندارد ارائه شده در آزمایشگاه ملی نقشه‌برداری مغز گردآوری و سلامت عمومی آنان نیز از سوی پزشک مستقر در همان مرکز تأیید شد. در پایان، از شرکت‌کنندگان برای مشارکت در پژوهش حاضر قدردانی شد.

1. non-invasive

2. preprocessing

3. inclusion criteria

4. exclusion criteria

5. Edinburgh Handedness Inventory

6. demographic report

7. Hollingshead Four-Factor Index of Socioeconomic Status

۲-۳. محرک‌های آزمایش

برای یافتن نواحی فعال مغز هنگام پردازش شنیداری اسم در زبان فارسی، شرکت‌کنندگان در معرض شش بلوک متشکل از شش گروه محرک شنیداری قرار گرفتند. هر یک از گروه‌ها به یکی از انواع ساخت‌واژی اسم (بسیط، مشتق، مرکب) یک بار در حالت مفرد و بار دیگر در حالت جمع (همراه با پسوند تصریفی‌ها یا ان) اختصاص یافت. مبنای انتخاب کلمات هدف، وضعیت ساخت‌واژی مطرح در پرسش‌های پژوهش و تأثیر مشخصه شمار بود. بر این اساس، ۱۸ کلمه انتخاب شد. با لحاظ کردن دو حالت مفرد و جمع، در نهایت از ۳۶ کلمه هدف، در تکلیف fMRI استفاده شد. این کلمات با صدای یک گویشور زن فارسی‌زبان و با لحن و سرعت طبیعی خوانده و در اتاق آکوستیک آزمایشگاه آواشناسی دانشگاه الزهرا با دستگاه ضبط‌صوت زوم شش (فرمت WAV، با نرخ نمونه‌گیری ۱۶ بیت و ۴۴۰۰۰ هرتز، در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از دهان گوینده) ضبط شد. فایل صوتی حاصل با توجه به تعداد و مدت زمان بلوک‌های تعریف‌شده در تکلیف fMRI در نرم‌افزار پرات^۱ تقطیع و زمان‌بندی شد. سپس، برای بهبود کیفی محرک‌های ضبط‌شده و افزایش سازگاری آنها با دستگاه MRI از نرم‌افزار اوداسیتی^۲ استفاده شد. تنظیمات لازم برای فرایند گفته‌شده به قرار زیر است: کاهش نوفه^۳، نرمال‌سازی^۴ (۱- دسی‌بل)، نرمال‌سازی بلندی^۵ (۲۳-)، برابرسازی (EQ)، کاهش فرکانس‌های کم‌تر از ۱۰۰ هرتز و در نهایت، فشرده‌سازی محدوده دینامیکی^۶ برای افزایش وضوح محرک‌ها در برابر نوفه‌های محیط MRI.

تکلیف fMRI با نرم‌افزار سایکوپای^۷ به صورت بلوکی در ۲۴ بلوک طراحی شد. از این تعداد، با توجه به پرسش‌های پژوهش به تحلیل شش بلوک در مقاله حاضر بسنده می‌شود. هر بلوک شامل ۲۰ ثانیه محرک شنیداری (متشکل از شش کلمه هدف و پنج سکوت) و پنج ثانیه محرک دیداری (یک علامت جمع سیاه‌رنگ در مرکز یک صفحه سفید) به عنوان استراحت است. شیوه طراحی تکلیف با توجه به هدف پژوهش و ماهیت طراحی بلوکی انتخاب شد (Williams et al., 2014). توزیع کلمات هدف در هر بلوک تصادفی بود. کلمات با ترتیبی یکسان برای هر شرکت‌کننده پخش شد. به عنوان مثال، بلوک اول حامل شش اسم بسیط و بلوک دوم حامل شش اسم بسیط + پسوند تصریفی جمع (ها/ان) بود.

۳-۳. شیوه اجرای آزمایش

در این آزمایش از یک تکلیف ذهنی^۸ استفاده شد. به بیان دیگر، طی اجرای تکلیف نیازی نبود شرکت‌کنندگان با فشار دادن دکمه یا انجام کاری به محرک‌ها پاسخ دهند. از این‌رو، هیچ‌گونه پاسخ رفتاری مستقیمی دریافت و ثبت نشد. جهت انجام آزمایش به صورت دوسو ناشناس^۹، دستورالعمل‌ها به گونه‌ای ارائه شد که هدف اصلی مطالعه برای شرکت‌کنندگان نامشخص باشد. سپس، شرکت‌کنندگان وارد دستگاه MRI شدند و از طریق یک هدفون روگوشی در معرض محرک‌های شنیداری تکلیف fMRI قرار

^۱. Praat

^۲. Audacity

^۳. noise

^۴. normalization

^۵. loudness normalization

^۶. dynamic range compression

^۷. PsychoPy

^۸. mental task

^۹. double-blind

گرفتند. از آنان درخواست شد بدون حرکت و با چشمان باز در دستگاه قرار گیرند و هنگام پخش محرک‌ها، به آنچه می‌شنوند بادقت گوش کنند و بر آن متمرکز شوند. افزون‌بر این، قرار شد به محض مشاهده یک علامت جمع سیاه‌رنگ در مرکز یک صفحه سفید، دیگر به محرک‌های قبلی فکر نکنند و به ذهن خود استراحت دهند. درنهایت، به آنان اطمینان داده شد که در صورت بروز هرگونه احساس ناراحتی یا اضطراب می‌توانند با فشار دادن دکمه اضطراری با اپراتور ارتباط برقرار کنند و درخواست توقف تصویربرداری و خروج از دستگاه را داشته باشند. هر شرکت‌کننده یک بار در آزمایش شرکت کرد. هر جلسه حدود ۴۵ دقیقه به طول انجامید. ۲۵ دقیقه از این بازه زمانی به ویزیت پزشک، ارائه دستورالعمل و آماده شدن شرکت‌کننده برای ورود به دستگاه و حدود ۲۰ دقیقه از آن به تصویربرداری ساختاری و اجرای کامل تکلیف اختصاص داشت.

۴-۳. پروتکل تصویربرداری

پروتکل‌های تصویربرداری با توجه به پژوهش‌های پیشین و توصیه کارشناسان بخش MRI آزمایشگاه ملی نقشه‌برداری مغز تعیین شد. تصویربرداری و ثبت داده‌های fMRI با اسکنر MRI سه تسلا زیمنس مدل پرزما^۱، کوئل سر ۲۰کاناله^۲، هدفون روگوشی و دکمه اضطراری در آن آزمایشگاه ثبت شد. طبق پروتکل (جدول ۱)، تصویربرداری ساختاری با وضوح بالا و تصویربرداری عملکردی در حالت استراحت انجام گرفت. در تصاویر ساختاری از توالی سه‌بعدی T1MPRAGE و در تصاویر عملکردی^۳ از تصویربرداری اکو صفحه‌ای^۴ (EPI) استفاده شد. تصویربرداری عملکردی (با ۲۳ والیوم و زمان تکرار ۲۵۰۰ هزارم ثانیه) حدود ۵۷۵ هزارم ثانیه ادامه یافت. هر والیوم شامل ۴۸ برش بود (جدول ۱).

جدول ۱. پروتکل تصویربرداری

تصویر	ساختاری	عملکردی
پروتکل	T1_mprage_tra	Ep2d_Main (Bold fMRI)
وکسل	۱/۱ × ۱/۱ × ۱/۱ میلی‌متر مکعب	۳ × ۳ × ۳/۳ میلی‌متر مکعب
ماتریس	۲۲۴ × ۲۲۴	۷۶ × ۷۶
اکو	۲/۴۳ میلی‌ثانیه	۳۰ میلی‌ثانیه
تکرار	۱۸۴۰ میلی‌ثانیه	۲۵۰۰ میلی‌ثانیه
برش	۱ میلی‌متر	۳ میلی‌متر
میدان دید	۲۲۴ میلی‌متر	۲۳۰ میلی‌متر
چرخش	۸ درجه	۹۰ درجه

^۱. Siemens Magnetom Prisma 3T MRI system

^۲. 20-channel head coil

^۳. functional images

^۴. Echo-Planar Imaging (EPI)

۵-۳. پیش‌پردازش داده‌های ساختاری

تصاویر ساختاری برای هر یک از شرکت‌کنندگان از مجموعه داده BIDS (Esteban et al., 2019) استخراج و با fMRIPre 25.0.0 طی چند مراحل پردازش شد. ابتدا نبود یک‌نواختی شدت نور با الگوریتم N4BiasFieldCorrection اصلاح شد. از تصاویر به دست آمده در مراحل بعدی به عنوان مرجع T1w استفاده شد. با به کارگیری اسکریپت اصلاح شده antsBrainExtraction.sh در قالب نیپایپ^۱، مجموعه از تصویر مرجع حذف شد. با استفاده از FAST در بسته نرم‌افزاری FSL بافت‌های مغزی شامل ماده خاکستری، ماده سفید و مایع نخاعی بر روی نسخه بدون مجموعه T1w تقسیم‌بندی شد. سپس دو سطح قشری و زیرقشری در نرم‌افزار FreeSurfer 7.3.2 با استفاده از دستور recon-all بازسازی شد. ماسک مغزی حاصل از مراحل پیشین در این مرحله برای افزایش میزان دقت به کار رفت. برای نرمال‌سازی مکانی از ابزار antsRegistration استفاده و ثبت غیرخطی تصویر T1w در فضای استاندارد انجام شد. قالب MNI152NLin2009cAsym از مخزن TemplateFlow نسخه ۲/۲/۲۴ فراخوانی و به عنوان فضای استاندارد به کار گرفته شد.

۶-۳. پیش‌پردازش داده‌های عملکردی

پیش‌پردازش هریک از ثبت‌های بولد^۲ (هر ثبت برای هر شرکت‌کننده) با نرم‌افزار fMRIPrep 25.0.0 در چند مرحله انجام شد. برای تصحیح حرکات سر، یک حجم مربع از داده‌های بولد با روش اختصاصی fMRIPre تولید شد. پیش از اعمال هرگونه فیلترگذاری زمانی یا مکانی، شش پارامتر مربوط به چرخش و جابه‌جایی و ماتریس‌های تبدیل (پارامترهای حرکت سر) با استفاده از mcflit با تقریب محاسبه شد. سپس، حجم مرجع بولد با استفاده از ابزار bregister در تصویر مرجع ساختاری به صورت ثبت مبتنی بر مرز و با شش درجه آزادی^۳ انجام گرفت. با محاسبه چند سری زمانی مزاحم از روی داده‌های بولد که پیش‌پردازش شده بودند، کنترل نوفه از طریق جابه‌جایی قاب به قاب^۴ (FD) صورت گرفت و نوسانات مشتق از سیگنال (DVARs) و سیگنال‌های جهانی در نواحی ماده سفید و مایع مغزی و در کل مغز اعمال شد. برای حذف نوفه‌های فیزیولوژیک نیز رگرسیون نوفه‌ای^۵ با روش CompCor استخراج شد. مؤلفه‌های اصلی در دو نسخه زمانی (استخراج مؤلفه‌ها از ۲٪ بالاترین وکسل‌های^۶ متغیر در ماسک مغز^۷) و ساختاری (تولید ماسک‌های WM، CSF و WM + CSF) بعد از فیلتر بالاگذر با فیلتر کسینوسی گسسته با آستانه قطع ۱۲۸ ثانیه تخمین زده شد. پارامتر جابه‌جایی سر در مرحله تصحیح به دست آمد و در فایل‌های confound درج شد. سری‌های زمانی مزاحم مورد بحث با مشتقات زمانی و ضریب‌های درجه دو گسترده شدند. قاب‌هایی با مقدار FD بیشتر از ۰/۵ میلی‌متر یا مقدار DVARs استاندارد شده بیشتر از ۱/۵ به عنوان فریم‌های پر حرکت علامت‌گذاری شدند. دیگر سری زمانی مزاحم نیز با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی سیگنال موجود در یک نوار باریک از وکسل‌ها در لبه مغز استخراج شد. در نهایت، باز نمونه برداری داده‌های بولد به فضای قالب متقارن چپ/راست fsLR با استفاده از Glasser Connectome Workbench

^۱. Nipype workflow

^۲. Blood Oxygenation Level Dependent (BOLD)

^۳. degree of freedom

^۴. Frame-Wise Displacement (FD)

^۵. noise regressors

^۶. voxels

^۷. brain mask

(et al., 2013) انجام شد. فایل‌های grayordinates با ۹۱۰۰۰ نمونه ایجاد شد و بدین ترتیب، امکان نگاشت داده‌های سطحی به فضای fsLR و داده‌های زیرقشری به فضای MNI152Nlin6Asym با وضوح ۲ میلی‌متری فراهم شد. گفتنی است که ترکیب همه تبدیل‌ها به صورت یک مرحله درونیابی^۱ واحد با بازنمونه برداری حجمی با nitransforms و درونیابی cubic B-spline انجام شد.

۴. یافته‌ها

تحلیل داده‌های fMRI با کتابخانه‌های nibabel، nilearn، numpy و pandas در پایتون نسخه ۳/۱۱/۶ و با استفاده از داده‌های پیش‌پردازش شده در فضای MNI و ماسک ماده خاکستری در سه مرحله انجام شد.

در مرحله اول برای هر شرکت کننده با توجه به بلوک‌های آزمایش یک ماتریس طراحی و با استفاده از نوع Glover مدل HRF و نوع Cosine مدل drift مدل‌سازی انجام شد.

در مرحله دوم برازش^۲ مدل خطی عمومی^۳ (GLM) با سیگنال‌های پیش‌پردازش شده همسو در قالب فضای استاندارد^۴ (MNI) انجام شد و سه نوع کنتراست برای هر شرکت کننده محاسبه گردید: هر بلوک در مقایسه با زمان استراحت، بلوک دیگر (جفتی) و همه بلوک‌ها. در مقاله حاضر، کنتراست سه گزارش نمی‌شود. جدول ۲ نتایج آزمایش یکی از شرکت کنندگان را نشان می‌دهد که در آن هر یک از بلوک‌ها با حالت استراحت مقایسه شده است. مختصات مکانی دقیق نشان می‌دهد که بیشترین مقدار فعال‌سازی برای هر بلوک در کدام وکسل رخ داده است. سپس، نقشه‌های نواحی فعال استخراج و در نقشه خودکار ساختار مغز^۵ (AAL) و اطلس برودمن^۶ ارائه شد. برای حفظ معنی داری نواحی فعال، مقدار ثابت ۲/۳ در نظر گرفته شد و مقادیر کم‌تر حذف گردید.

جدول ۲. مختصات مکانی مقدار فعال‌سازی بیشینه (max_z) برای هر بلوک در داده ثبت شده از شرکت کننده سوم

بلوک	مقدار فعال‌سازی بیشینه	محور x	محور y	محور z
اسم بسیط	۴/۲۸۵۰۸۳	۵۵	۵۷	۲۸
اسم بسیط + وند	۴/۳۵۵۵۲۶	۶۱	۶۶	۶۵
اسم مشتق	۴/۹۳۶۹۱۵	۳۲	۲۵	۲۵
اسم مشتق + وند	۵/۴۱۳۴۴۷	۳۷	۲۲	۳۵
اسم مرکب	۵/۳۴۴۸۹۹	۶۳	۲۳	۴۰
اسم مرکب + وند	۵/۱۵۲۵۰۵	۳۹	۷۵	۲۸

^۱. interpolation

^۲. fitting

^۳. General Linear Model (GLM)

^۴. Montreal Neurological Institute (MNI) standard space

^۵. Automated Anatomical Labeling (AAL) map

^۶. Brodmann atlas

در مرحله سوم، روش سطح دوم^۱ برای تحلیل گروهی داده‌های fMRI به کار رفت تا الگوهای فعال‌سازی معنی‌دار همه شرکت‌کنندگان مشخص شود. در این مرحله، مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) در SecondLevelModel کتابخانه Nilearn به کار برده شد. سپس مدل آماری گروهی ایجاد و میزان معنی‌داری نواحی فعال‌شده تعیین گردید. در نهایت، نواحی ساختاری شناسایی‌شده در نقشه خودکار ساختار مغز (Rolls et al., 2020) مطابق با اطلس برودمن (Zilles, 2018) نیز برچسب‌گذاری شد (جدول ۳). گفتنی است که همه نواحی ثبت‌شده در جدول موردنظر به لحاظ آماری معنی‌دارند ($p < 0.05$).

جدول ۳. نتایج معنی‌دار نواحی مغزی در آستانه FDR (تصحیح‌شده) با $p < 0.05$ و آستانه گستردگی ۱۰ و کسل

کنتراست	خوشه	نواحی فعال	برودمن	مختصات			بیشینه مقدار	سطح معنی‌داری
				x	y	z		
بسیط < استراحت	۷۸	پیشانی میانی، پیش‌مرکزی و پس‌مرکزی چپ	۶، ۴، ۳	-۵۰	-۴	۵۴	۳/۱۰۰۸۱	۰/۰۰۱۹۳
	۳۹	لوب پیشانی میانی و مثلثی چپ	۴۶، ۱۰	-۴۴	۴۴	۲۰	۲/۷۴۵۵۲	۰/۰۰۶۰۴
	۵۲	لوب پیشانی میانی و فوقانی چپ	۱۰، ۹	-۳۴	۴۶	۲۸	۲/۹۲۶۲۴	۰/۰۰۳۴۳
	۱۳	شکنج دوکی‌شکل و لوب گیجگاهی تحتانی چپ	۲۰	-۳۲	-۱۲	-۴۰	۲/۶۱۲۲۲	۰/۰۰۰۹
	۶۳	کروس ۲ و لوبول ۷ مخچه چپ	-	-۲۴	-۸۶	-۴۴	۲/۸۶۵۵۲	۰/۰۰۴۱۶
	۱۷	قطب‌های میانی و فوقانی لوب گیجگاهی چپ	۳۸	-۲۴	۲۰	-۳۶	۲/۴۷۵۸۲	۰/۰۱۳۲۹
	۱۳	لوب پیشانی فوقانی چپ	۱۰	-۲۴	۵۴	۰	۳/۷۸۹۰۸	۰/۰۱۵۴۳
	۱۶	هیپوکامپ و پاراهیپوکامپ چپ	۳۴، ۲۸	-۱۸	-۱۲	-۲۰	۲/۹۱۶۶۶	۰/۰۰۳۵۴
	۱۲	آمیگدال و هیپوکامپ چپ	آمیگدال	-۱۸	-۶	-۱۲	۲/۸۹۶۳۶	۰/۰۰۳۷۸
	۵۴	سینگوله میانی راست، نواحی حرکتی مکمل راست و چپ	۳۲، ۸، ۶	۸	۱۲	۵۲	۲/۸۵۴۵۳	۰/۰۰۴۳۱
	۱۶	کروس ۱ و ۲ مخچه راست	-	۱۸	-۷۴	-۳۲	۲/۵۰۱۱۸	۰/۰۱۲۳۸
	۳۸	آمیگدال، هیپوکامپ و پاراهیپوکامپ راست	آمیگدال، ۳۴	۲۴	-۶	-۱۲	۲/۸۷۶۶۳	۰/۰۰۴۰۲
	۱۷	لوب پیشانی میانی و فوقانی راست	۱۰	۳۰	۵۸	۶	۲/۶۶۲۷	۰/۰۰۷۷۵
	۱۵	بخش پیش‌مرکزی و لوب پیشانی میانی راست	۹، ۶	۴۲	۲	۴۰	۲/۵۵۲۲۷	۰/۰۱۰۷
	۱۷	اینسولا و لوب گیجگاهی فوقانی راست	۱۳	۴۶	۲	-۱۴	۲/۸۷۳۷۲	۰/۰۰۴۰۶
	۱۴	شکنج دوکی‌شکل، کروس ۱ مخچه و لوب گیجگاهی تحتانی راست	۳۷، ۳۶	۵۲	-۴۰	-۲۴	۲/۷۳۱۲۲	۰/۰۰۶۳۱
بسیط + وند < استراحت	۹۶	لوب گیجگاهی میانی و فوقانی چپ	۲۲، ۲۱	-۶۴	-۶	-۲	۲/۸۲۴۷۶۴	۰/۰۰۴۷۳۲
	۲۲	لوب گیجگاهی میانی چپ	۲۲	-۶۲	-۳۸	۴	۲/۸۰۴۰۹۹	۰/۰۰۵۰۴۶

^۱. Second Level Analysis (SLA)

کنتراست	خوشه	نواحی فعال	برودمن	مختصات			بیشینه مقدار	سطح معنی داری
				x	y	z		
	۲۸	اینسولای چپ	۱۳، ۴۷	-۳۲	۱۸	-۱۰	۲/۷۴۱۱۰۹	۰/۰۰۶۱۲۳
	۲۴	مخچه و شکنج دوکی شکل راست	-	۳۲	-۳۶	-۳۰	۳/۱۸۴۴۷	۰/۰۰۱۴۵
	۱۸	قطب میانی لوب گیجگاهی راست	۳۸، ۲۱	۴۶	۱۲	-۳۴	۲/۵۴۰۹۰۳	۰/۰۱۱۰۵۷
	۲۰	لوب گیجگاهی تحتانی راست	۳۷، ۲۰	۵۲	-۴۲	-۲۴	۲/۹۸۲۳۶۵	۰/۰۰۲۸۶
	۵۵	لوب گیجگاهی فوقانی و میانی راست	۲۲، ۲۱	۷۰	-۲۶	۰	۲/۷۶۳۳۸۶	۰/۰۰۵۷۲۱
مشتق < استراحت	۱۳	لوب پیشانی تحتانی (اپراتور) و مثلثی چپ	-	-۵۲	۱۶	۲	۲/۷۱۱۹۳۱	۰/۰۰۶۶۸۹
	۱۰	لوب گیجگاهی تحتانی و شکنج دوکی شکل چپ	-	-۳۶	-۲	۲	۲/۷۳۹۳۳۴	۰/۰۰۶۱۵۶
	۸۵	اینسولای چپ	۱۳، ۴۷، ۴۵	-۳۲	۲۰	-۸	۳/۰۵۷۷۷	۰/۰۰۲۲۳
	۱۰	هیپوکامپ و پاراهیپوکامپ چپ	-	-۳۰	-۲۶	-۱۶	۲/۴۶۱۹۸۹	۰/۰۱۳۸۱۷
	۳۴	بخش پیش مرکزی و لوب پیشانی میانی راست	۶	۲۸	-۶	۵۰	۲/۶۸۰۰۵۷	۰/۰۰۷۳۶۱
	۱۰	اوربیتوفرونتال جانبی و لوب پیشانی میانی راست	-	۳۸	۴۸	-۱۲	۲/۵۵۰۸۲۶	۰/۰۱۰۷۴۷
	۵۳	لوب پیشانی تحتانی (اپراتور) و مثلثی راست	۴۵، ۴۴	۵۲	۱۴	۱۴	۲/۷۲۹۳۳۳	۰/۰۰۶۳۴۶
مشتق + وند < استراحت	۲۴	لوب گیجگاهی میانی و فوقانی چپ	۲۱	-۵۶	-۱۶	-۴	۲/۸۶۱۵۰۸	۰/۰۰۴۲۱۶
	۱۱	ناحیه کنار حاشیه چپ، بخش های رولاندیک (اپراتور) و سوپرامارجینال چپ	۴۰	-۵۰	-۲۶	۲۰	۲/۹۷۲۴۲۸	۰/۰۰۲۹۵۵
	۲۶	مخچه ۲، ۷ و ۸ راست	-	۲۲	-۷۶	-۴۸	۲/۵۳۰۶۷۸	۰/۰۱۱۳۸۴
	۱۰	بخش های فوقانی لوب آهیانه ای و پس مرکزی راست	۷	۱۴	-۵۰	۷۶	۲/۹۰۷۱۸۳	۰/۰۰۳۶۴۷
	۱۳	لوب پس سری فوقانی راست	۱۹	۱۸	-۹۲	۲۸	۲/۶۴۰۹۰۴	۰/۰۰۸۲۶۹
	۲۵	بخش های زاویه ای و سوپرامارجینال راست	-	۵۰	-۴۶	۳۰	۲/۵۳۳۷۴۳	۰/۰۱۱۲۸۵
	۲۶	لوب گیجگاهی میانی و فوقانی راست	۲۲، ۲۱	۵۴	-۳۰	۲	۲/۸۷۵۴۰۲	۰/۰۰۴۰۳۵
مرکب < استراحت	۹۶	لوب گیجگاهی میانی و فوقانی چپ	۲۲، ۲۱	-۶۴	-۶	-۲	۲/۸۲۴۷۶۴	۰/۰۰۴۷۳۲
	۲۸	اینسولای چپ	۴۷، ۱۳	-۳۲	۱۸	-۱۰	۲/۷۴۱۱۰۹	۰/۰۰۶۱۲۳
	۲۴	مخچه ۴، ۵ و ۶ و شکنج دوکی شکل راست	-	۳۲	-۳۶	-۳۰	۳/۱۸۴۴۷	۰/۰۰۱۴۵
	۱۸	لوب گیجگاهی میانی راست	۳۸، ۲۱	۴۶	۱۲	-۳۴	۲/۵۴۰۹۰۳	۰/۰۱۱۰۵۷
	۱۳	بخش میانی قطب و تحتانی لوب گیجگاهی راست	۲۱	۵۰	۱۲	-۴۰	۲/۵۹۸۶۰۵	۰/۰۰۹۳۶
	۲۰	لوب گیجگاهی تحتانی راست	۳۷، ۲۰	۵۲	-۴۲	-۲۴	۲/۹۸۲۳۶۵	۲/۰۰۲۸۶
	۵۵	لوب گیجگاهی میانی و فوقانی راست	۲۲، ۲۱	۷۰	-۲۶	۰	۲/۷۶۳۳۸۶	۰/۰۰۵۷۲۱

کنتراست	خوشه	نواحی فعال	برودمن	مختصات			بیشینه مقدار	سطح معنی داری
				x	y	z		
مرکب + وند < استراحت	۲۲۲	هاچل و فوقانی لوب گیجگاهی میانی و فوقانی چپ	۴۲، ۲۲، ۲۱	-۶۲	-۱۰	۰	۳/۲۹۹۲۲۸	۰/۰۰۰۹۷
۴۹		لوب گیجگاهی فوقانی و سوپرامارجینال چپ	۴۲، ۴۱، ۱۳	-۴۶	-۴۰	۲۰	۲/۷۳۳۵۱۱	۰/۰۰۶۲۶۶
۱۷		لوب پیشانی مثلثی چپ	۹	-۵۰	۱۶	۲۸	۲/۶۶۴۵۳۷	۰/۰۰۷۷۰۹
۲۸		لوب گیجگاهی میانی و فوقانی چپ	-	-۴۸	-۱۸	-۶	۲/۶۹۷۵۱۲	۰/۰۰۶۹۸۶
۱۶		مخچه ۶ و کروس ۱ و شکنج دوکی شکل چپ	۳۷	-۴۰	-۵۶	-۲۴	۲/۶۵۹۲۹۱	۰/۰۰۷۸۳۱
۳۳		شکنج دوکی شکل، لوب گیجگاهی تحتانی و مخچه ۶ راست	۲۰، ۳۶، ۳۷	۵۰	-۴۲	-۲۴	۲/۶۳۲۲۵۲	۰/۰۰۸۴۸۲
۱۹		لوب پیشانی تحتانی (اپراتور) و مثلثی راست	-	۴۶	۱۲	۱۸	۲/۶۱۷۱۲۱	۰/۰۰۸۸۶۷
۱۸		لوب گیجگاهی میانی و فوقانی راست	۲۲، ۲۱	۶۸	-۲۴	-۲	۲/۶۰۲۰۶۴	۰/۰۰۹۲۶۶

۱-۴. یافته‌های fMRI

در ادامه، شاخص توصیفی آماری بلوک‌ها، نتایج تحلیل سطح - اول (FLA) و نتایج تحلیل سطح - دوم (SLA) به ترتیب ارائه می‌شود.

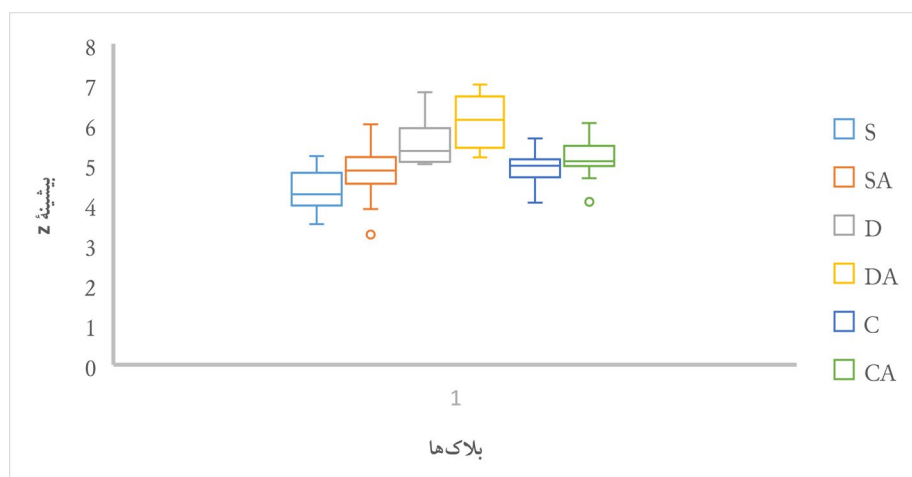
۱-۱-۴. شاخص توصیفی آماری بلوک‌ها

نمودار ۱ مقدار بیشینه فعال‌سازی در هر بلوک را نشان می‌دهد. میانگین، انحراف معیار و واریانس حاصل به تفکیک گروه‌ها به شرح زیر است: بسیط (۰/۱۱۵۴۲، ۰/۵۱۶۱۹)؛ بسیط + وند (۴/۸۰۰۵، ۰/۱۲۸۴۶، ۰/۵۷۴۵۰)؛ مشتق (۵/۵۸۱۰، ۰/۵۹۹۴۴، ۰/۳۵۹)؛ مشتق + وند (۶/۱۱۲۵، ۰/۱۳۸۳۸، ۰/۶۱۸۸۵)؛ مرکب (۴/۸۹۰۰، ۰/۴۲۵۴۹، ۰/۱۸۱) و مرکب + وند (۵/۱۵۲۰، ۰/۴۳۹۴۹، ۰/۱۸۱) و مرکب + وند (۵/۱۵۲۰، ۰/۴۳۹۴۹، ۰/۱۹۳). با توجه به نتیجه آزمون شاپیرو - ویلک^۱، توزیع داده‌ها نرمال نبود. بنابراین، سطح معنی‌داری کل با آزمون کروسکال - والیس^۲ محاسبه شد. طبق نتایج حاصل، تفاوت‌ها بین بلوک‌ها (آماره ۴۴/۹۰۵ و مقدار احتمال ۰/۰۰۰۱) معنی‌دار است.

بلوک اسم مشتق + وند و اسم مشتق بیشترین میانه (حدود ۰/۶) و وسیعترین دامنه توزیع (در بازه تقریبی ۵ تا ۷) را داراست (نمودار ۱). از این رو به نظر می‌رسد شدت فعال‌سازی در این دو بلوک در مقایسه با سایر بلوک‌ها بیشتر بوده است. مقدار میانه در سایر بلوک‌ها کمتر است و در بازه ۴ تا ۵ قرار می‌گیرد. در بلوک اسم بسیط + وند، برخی داده‌ها خارج از روند معمول است و پراکندگی بیشتری وجود دارد. کمترین میزان پراکندگی و میانه متعلق به بلوک مرکب است.

^۱. Shapiro-Wilk test

^۲. Kruskal-Wallis test



نمودار ۱. مقدار بیشینه فعال‌سازی در هر بلوک (بسیط = S، بسیط + وند = SA، مشتق = D،

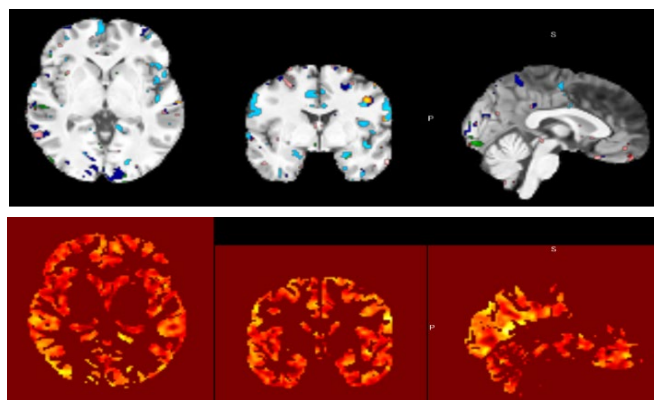
مشتق + وند = DA، مرکب = C، مرکب + وند = CA)

۲-۴. نتایج تحلیل سطح - اول

تحلیل سطح - اول (FLA) با رویکرد کل - مغز^۱ انجام شد. به این صورت که مختصات مکانی مقدار فعال‌سازی بیشینه در هر بلوک (در مقایسه با وضعیت استراحت) برای هر شرکت‌کننده به دست آمد. برای نمونه، جدول ۲ این مقدار را در مغز یکی از شرکت‌کنندگان نشان می‌دهد. مختصات براساس MNI ارائه شده و هر عدد یک موقعیت مکانی را نشان می‌دهد. مقدار مثبت محورهای X، Y و Z به ترتیب نواحی راست، قدامی و فوقانی مغز را نشان می‌دهد. ویژگی مختصات فعال در هر بلوک عبارت است از: فعالیت ناحیه مرکزی و فوقانی راست (بسیط)؛ فعال‌سازی گسترده در نواحی فوقانی و احتمالاً قشر پیش‌پیشانی (بسیط + وند)؛ بخش جلو و میانی راست (مشتق)؛ ناحیه‌ای بالاتر و قدامی‌تر از بلوک قبلی (مشتق + وند)؛ ناحیه بالاتر و جلوتر در سمت راست نسبت به بلوک‌های مشتق (مرکب)؛ و ناحیه‌ای کاملاً قدامی در سمت راست (مرکب + وند).

برای این فرد، کمترین میزان فعال‌سازی برابر با ۴/۲۸۵۰۸۳ و در پردازش اسم‌های بسیط و بیشترین میزان برابر با ۵/۴۱۳۴۴۷ و مربوط به پردازش اسم مشتق + وند جمع بوده است (جدول ۲). شکل ۱ نواحی فعال در مغز همان فرد را هنگام پردازش شش بلوک تکلیف نشان می‌دهد. در تصویر پائین همان شکل از نقشه فعال‌سازی نیز استفاده شده است.

^۱. whole-brain approach



شکل ۱. نواحی فعال شده در بلوک‌های یک شرکت کننده با گستردگی ۱۰ وکسل (بالا) و نواحی فعال شده بیشینه در بلوک‌های در همان فرد با گستردگی ۱۰ وکسل (پائین)؛ توضیحات تصویر اول: قرمز (بسیط)، سبز (مركب)، آبی تیره (مشتق)، صورتی (بسیط + وند)، آبی روشن (مشتق + وند)، زرد (مركب + وند)

۴-۳. تحلیل سطح - دوم

نواحی فعال هر بلوک در جدول ۳ خلاصه شده است. نتایج ارائه شده در آستانه FDR (تصحیح شده) با $p < 0.05$ و آستانه گستردگی ۱۰ وکسل^۱ معنی دار است که در ادامه شرح داده می شود. در بخش گزارش نواحی فعال، عمدتاً بخش‌های مرتبط با زبان ارائه شده است. اعداد داخل پرانتز نیز همان نواحی را در برودمن نشان می دهند.

- **بسیط < استراحت.** ۳۷ خوشه^۲ فعال با توزیع ساختاری پراکنده در هشل^۳ چپ (۴۱)، اینسولای چپ (۱۳ و ۱۴) و راست، هیپوکامپ^۴ و پاراهیپوکامپ^۵ چپ و راست، لوب گیجگاهی میانی و لوب گیجگاهی فوقانی چپ و راست (۲۱ و ۲۲)، لوب گیجگاهی تحتانی (۳۷)، مخچه^۶ چپ و راست، لوب پیشانی تحتانی، میانی و فوقانی چپ (۸، ۹، ۴۶، ۱۰، ۴۴ و ۴۵)، کنار حاشیه^۶ چپ (۲۴، ۳۲ و ۳۳)، شکنج دوکی شکل^۶ چپ (۳۷)، نواحی پیش مرکزی و پس مرکزی چپ (۳، ۴، ۶). بیشترین مقدار فعال سازی در این بلوک به قشر پیشانی میانی و نواحی پیش مرکزی و پس مرکزی چپ با مقدار عددی ۳/۱۰۰۸۱ تعلق دارد.
- **بسیط + وند < استراحت.** ۱۰ خوشه^۲ فعال در لوب گیجگاهی میانی و فوقانی چپ (۲۱ و ۲۲)؛ اینسولای چپ (۴۷ و ۱۳)؛ مخچه^۶ راست، شکنج دوکی شکل راست، لوب گیجگاهی تحتانی و لوب گیجگاهی میانی راست (۳۸، ۲۱، ۳۷، ۲۰ و ۲۲). بیشترین میزان فعال سازی در قطب میانی لوب گیجگاهی راست با مقدار عددی ۲/۵۴۰۹۰۳ دیده می شود.

^۱. voxel

^۲. cluster

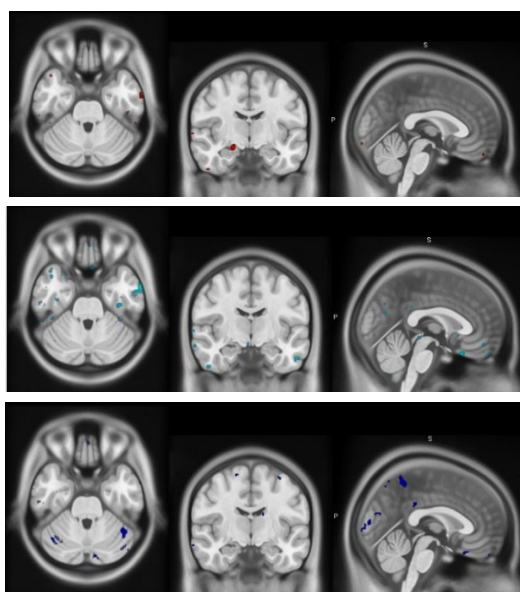
^۳. Heschl

^۴. hippocampus

^۵. para-hippocampus

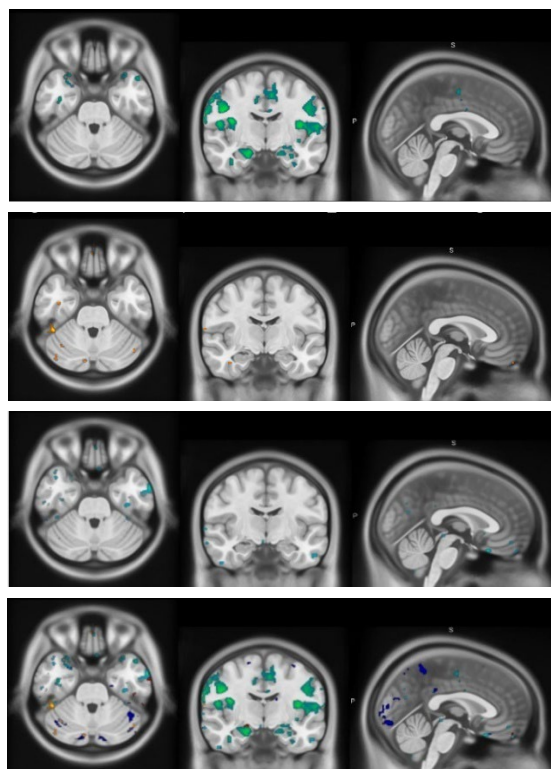
^۶. fusiform

- **مشتق < استراحت.** هفت خوشه در پیشانی تحتانی چپ، بخش تحتانی لوب گیجگاهی چپ، شکنج دوکی شکل چپ، اینسولای (۱۳، ۴۷ و ۴۵)، هیپوکامپ و پاراهیپوکامپ چپ، بخش پیش مرکزی راست، پیشانی میانی، تحتانی و فوقانی راست (۶، ۴۴ و ۴۵) و بخش جانبی اوربیتوفرونتال^۱ راست. شدت فعال سازی در لوب گیجگاهی تحتانی و شکنج دوکی شکل برابر با ۲/۷۳۹۳۳۴ و بیشتر از سایر نواحی است.
- **مشتق + وند < استراحت.** ۸ خوشه فعال در لوب گیجگاهی میانی و فوقانی چپ و راست (۲۱ و ۴۰)، کنار حاشیه چپ، کورتکس حرکتی پیرامون حاشیه (۴۰)، مخچه راست، بخش پس مرکزی راست (ناحیه ۷)، لوب آهیانه فوقانی و زاویه ای راست (۷)، لوب پس سری فوقانی^۲ راست (۱۹). لوب آهیانه ای فوقانی و بخش پس مرکزی راست در این بلوک با مقدار ۲/۹۰۷۱۸۳ بیشترین شدت فعال سازی را نشان می دهد.
- **مرکب < استراحت.** ۱۰ خوشه فعال در لوب گیجگاهی میانی و فوقانی چپ (۲۱ و ۲۲)، اینسولای چپ (۱۳ و ۴۷)، مخچه راست، شکنج دوکی شکل راست، قطب لوب گیجگاهی میانی راست (۲۱ و ۳۸)، لوب گیجگاهی تحتانی، فوقانی و میانی راست (۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۳۷ برودمن). شدت فعال سازی در نواحی مخچه ۴، ۵ و ۶ و شکنج دوکی شکل راست با مقدار ۳/۱۸۴۴۷ از سایر نواحی بیشتر است.
- **اسم مرکب + وند < استراحت.** ۱۲ خوشه فعال در لوب گیجگاهی میانی و فوقانی چپ (۲۱، ۲۲، ۴۲، ۱۳، ۴۰ و ۴۱)، هاچل چپ (۴۱)، کنار حاشیه چپ (۴۰)، بخش سه گوش تحتانی پیشانی چپ (۹)، شکنج دوکی شکل و مخچه چپ و راست (۳۷، ۲۰ و ۳۶)، لوب گیجگاهی تحتانی، میانی و فوقانی راست (۲۱ و ۲۲) و پیشانی تحتانی راست. بیشترین میزان فعال سازی در این بلوک با مقدار ۳/۲۹۹۲۲۸ به هاچل و لوب گیجگاهی فوقانی اختصاص دارد.



^۱. lateral orbitofrontal cortex

^۲. superior occipital lobe



شکل ۲. نواحی فعال شده در تحلیل گروهی که به ترتیب از بالا به پایین بلوک‌های بسیط (قرمز)، بسیط + وند (آبی کم‌رنگ)، مشتق (آبی پررنگ)، مشتق + وند (سبزآبی)، مرکب (نارنجی) و مرکب + وند (آبی آسمانی) را در مقایسه با وضعیت استراحت نشان می‌دهد. تصویر آخر نواحی فعال در همه بلوک‌هاست. هر رنگ، طبق تقسیم‌بندی گفته شده، نشان‌دهنده یکی از بلوک‌هاست.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

مسئله اصلی این پژوهش یافتن نواحی فعال مغز هنگام پردازش شنیداری اسم‌های بسیط، مشتق و مرکب مفرد و جمع زبان فارسی (ها/ان) بود. در این راستا، یک تکلیف بیست و چهار بلوکی برای استفاده در fMRI طراحی شد و هر بلوک آن به یکی از انواع اسم اختصاص پیدا کرد. با لحاظ کردن وند تصریفی جمع، مجموعاً شش بلوک برای پاسخ به پرسش‌های طرح شده در این مقاله انتخاب شد تا سه هدف برآورده شود: مقایسه مقدار بیشینه فعال‌سازی بلوک‌ها؛ دستیابی به مختصات مکانی مقدار فعال‌سازی بیشینه در هر بلوک (نسبت به وضعیت استراحت) یک بار برای هر شرکت‌کننده (تحلیل سطح - اول) و بار دیگر برای تمام شرکت‌کنندگان (تحلیل سطح - دوم)؛ و در نهایت تعیین نواحی فعال در هر بلوک.

طبق نتایج مقایسه مقدار بیشینه فعال‌سازی بلوک‌ها، شدت فعال‌سازی به ترتیب در مشتق + وند و مشتق نسبت به سایر بلوک‌ها است. در نتایج تحلیل سطح - اول کمترین میزان فعال‌سازی در پردازش اسم‌های بسیط و بیشترین میزان مربوط به پردازش اسم مشتق

+ وند جمع بوده است. با توجه به توزیع فعال و شدت فعال سازی، تفاوت های معنی دار پردازشی به این گونه صورت بندی می شود: نواحی فعال در اسم بسیط (+وند) به پردازش زبان یا درک کلمات، در اسم مشتق (+وند) به پردازش پیچیدگی های صرفی و در اسم مرکب (+وند) به پردازش واحدهای معنایی یا نحوی پیچیده تر مربوط اند. اضافه شدن وند جمع می تواند به جابه جایی مکانی نواحی به سمت بخش های بالایی و قدامی منجر شود. مقایسه همه کنتراست ها با حالت استراحت در هر دو تحلیل سطح - اول و سطح - دوم نواحی فعال در تکلیف fMRI را نشان می دهد. فعالیت لوب پیشانی، به عنوان منطقه ای مهم در پردازش زبان، در همه بلوک ها دیده می شود. فعالیت بیشتر لوب گیجگاهی^۱ چپ و راست و نیز شکنج دوکی شکل در بلوک های مشتق و مرکب می تواند به دلیل اهمیت این نواحی در پردازش کلمات پیچیده باشد. فعالیت بارز مخچه در بلوک های مرکب ممکن است حاکی از پردازش شناختی پیچیده این نوع اسم باشد.

خلاصه تفاوت های معنی دار کلمات هدف در تحلیل سطح - دوم به این شرح است: نواحی فعال در اسم بسیط به نواحی حرکتی، در اسم مشتق به نواحی پردازش زبانی پیچیده و در اسم مرکب به نواحی پردازشی احساسی و شناختی پیوند می خورد. پردازش داده های اسم های مشتق و مرکب در مناطق وسیعی از مغز دیده می شود و نه تنها بخش های مربوط به زبان که بخش های مربوط به حافظه مانند آمیگدال^۲ و هیپوکامپ را دربرمی گیرد. به نظر می رسد زبان در مغز یک شبکه انتزاعی گسترده است که بخش های گوناگون شناخت، حافظه، احساس و حرکت را به یکدیگر و به نواحی فعال در پردازش زبانی متصل می کند.

وجود وند تغییراتی را در نواحی فعال شده نشان می دهد. این تغییرات به شرح زیر است:

- **بسیط + وند < استراحت:** در نواحی پیشانی میانی، پیش مرکزی و پس مرکزی چپ (۳، ۴ و ۶) یک خوشه بزرگ ۷۸ وکسلی دیده می شود که در مقایسه با بسیط < استراحت بسیار برجسته است. بنابراین، به نظر می رسد که وجود وند در کنار این نوع اسم ها شدت فعال سازی در نواحی حسی اولیه و حرکتی را افزایش می دهد.
- **مشتق + وند < استراحت:** میزان فعالیت لوب پیشانی میانی و فوقانی چپ (۹ و ۱۰) در این کنتراست (خوشه ۵۲) در مقایسه با کنتراست مشتق > استراحت (خوشه ۳۹) بیشتر است. در نتیجه، پیچیدگی صرفی و ساختاری مانند وجود وند می تواند شدت فعال سازی را افزایش دهد.
- **مرکب + وند < استراحت:** افزون بر نواحی فعال در کنتراست مرکب < استراحت، بخش هایی از مخچه (کروس ۲ و لوبول ۷ب) چپ نیز فعال شده اند. این بخش ها در بلوک مرکب غیرفعال اند یا فعالیت کمتری دارند. این تفاوت می تواند نقش مخچه را در پردازش های پیچیدگی های صرفی/تصرفی زبان برجسته کند.
- **تغییر شدت فعال سازی:** مقدار بیشینه Z در خوشه های متعلق به کنتراست های دارای وند، به طور خاص در دو گروه مشتق + وند و مرکب + وند، بیشتر از خوشه های کنتراست های بدون وند است. برای نمونه، این مقدار در مشتق + وند حدود ۹/۲۶ است که بیشتر از ۷/۴۵ گروه مشتق است.

یافته های این پژوهش نتایج مطالعات پیشین را تأیید می کنند. نتایج مقایسه مقدار بیشینه فعال سازی بلوک ها، افزون بر تأیید مراحل یک و دو تحلیل، با مطالعاتی همسویی دارد که بیشترین میزان فعال سازی را در لوب پیشانی، لوب گیجگاهی، مخچه و اینسولا

^۱. temporal lobe

^۲. amygdala

گزارش داده‌اند (Feng et al., 2020; Meykadeh & Sommer, 2024; Momenian et al., 2018; Moseley & Ullman, 1998; Pulvermüller, 2014; Ranjan & Singh, 2025; Russo et al., 2021). براساس نتایج مربوط به کنتراست‌های اسم مشتق، پیچیدگی ساختوازی کلمات مشتق می‌تواند شدت فعال‌سازی را افزایش دهد (Pliatsikas et al., 2014). یافته‌های مربوط به کنتراست مرکب + وند < استراحت نتایج مطالعه‌ای را تأیید می‌کند که بر روی اسم در زبان ایتالیایی انجام شده است (Russo et al., 2021). افزایش مقدار z در کنتراست‌های دارای وند با نتایج پژوهشی درباره‌ی زبان فنلاندی همسو است (Lehtonen et al., 2006; Pliatsikas et al., 2014) و نشان می‌دهد که وند به‌عنوان واحد پردازشی مستقل بار شناختی بیشتری ایجاد می‌کند. این یافته با مدل دومسیره ساخت‌واژه^۱ (Clahsen, 2006) قابل توضیح است. در این مدل، واژه‌های بسیط و ذخیره‌شده به پردازش کمتری نیاز دارند، اما واژه‌های دارای پسوند نیازمند فعال‌سازی مسیر قاعده‌محورند^۲ که موجب افزایش شدت و گستره‌ی فعالیت نورونی می‌شود. افزون‌بر این، وجود وند در کنار اسم‌های بسیط، مشتق و مرکب باعث گسترش دامنه‌ی شبکه‌های فعال مغزی (از قشر حسی - حرکتی تا مخچه و قشر پیشانی) و نیز افزایش شدت فعال‌سازی می‌شود. طبق این الگو، پردازش وند در زبان فارسی تنها یک عملیات صرفی ساده نیست، بلکه فرایندی شناختی، ترکیبی و قابل پیش‌بینی است که به تعامل شبکه‌های اجرایی، حسی - حرکتی و مخچه‌ای نیاز دارد (Kim et al., 2024). چنین نتیجه‌ای با نظریه‌ی ترکیب‌پذیری^۳، مدل دومسیره در صرف و مدل بازنامایی صرفی قابل پیش‌بینی^۴ همسویی دارد (Brooks & Cid de Garcia, 2015; Kim et al., 2024).

در مجموع، یافته‌های هر سه مرحله در پژوهش حاضر با یکدیگر و با مطالعات پیشین همخوانی دارد. با استناد به نتایج این پژوهش می‌توان گفت که وجود وند تصرفی جمع در کنار اسم در فارسی موجب گسترش دامنه‌ی فعال‌سازی و افزایش شدت آن می‌شود. این تغییر در نواحی مربوط به پردازش زبانی و شناختی شدیدتر است.

تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

سپاسگزاری

پژوهشگر صمیمانه قدردان همراهی ارزشمند خانم‌ها شقایق کریمی علویجه و ندا محمدی مبارکه است.

References

- Akbarian, M., Purmohammad, M., Talesh Jafadide, A. R., & Khosrowabadi, R. (2025). Neural representation of olfactory vocabulary in women's brain processing of conceptual metaphors based on functional magnetic resonance imaging data. *Advances in Cognitive Sciences*, 27(1), 91-104. <https://doi.org/10.30514/icss.27.1.91>

¹. Dual-Route Model of Morphology

². rule-based

³. compositionality

⁴. Predictive Morphological Representation Model

- Bird, H., Howard, D., & Franklin, S. (2000). Why Is a verb Like an inanimate object? Grammatical category and semantic category deficits. *Brain and Language*, 72(3), 246-309. <https://doi.org/10.1006/brln.2000.2292>
- Bozic, M., & Schwarz, J. (2025). fMRI in morphology research. In *Reference module in social sciences*. Elsevier.
- Brooks, T. L., & Cid de Garcia, D. (2015). Evidence for morphological composition in compound words using MEG. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, Article 215. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00215>
- Cappa, S. F., & Perani, D. (2003). The neural correlates of noun and verb processing. *Journal of Neurolinguistics*, 16(2-3), 183-189. [https://doi.org/10.1016/S0911-6044\(02\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S0911-6044(02)00013-1)
- Clahsen, H. (2006). Dual-mechanism morphology. *Encyclopedia of language and linguistics* (2nd ed., Vol. 4, pp. 1-5). Elsevier.
- Esteban, O., Markiewicz, C. J., Blair, R. W., Moodie, C. A., Isik, A. I., Erramuzpe, A., ... Gorgolewski, K. J. (2019). fMRIPrep: A robust preprocessing pipeline for functional MRI. *Nature Methods*, 16(1), 111-116. <https://doi.org/10.1038/s41592-018-0235-4>
- Feng, S., Qi, R., Yang, J., Yu, A., & Yang, Y. (2020). Neural correlates for nouns and verbs in phrases during syntactic and semantic processing: An fMRI study. *Journal of Neurolinguistics*, 53, Article 100860. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2019.100860>
- Friederici, A. D., Fiebach, C. J., Schlesewsky, M., Bornkessel, I. D., & von Cramon, D. Y. (2006). Processing linguistic complexity and grammaticality in the left frontal cortex. *Cerebral Cortex*, 16(12), 1709-1717. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhj106>
- Friedmann, N., Wenkert-Olenik, D., & Gil, M. (2000). From theory to practice: Treatment of agrammatic production in Hebrew based on the Tree Pruning Hypothesis. *Journal of Neurolinguistics*, 13(4), 250-254. http://language-brain.com/dl.php?f=Friedmann_Wenkert_Gil_2000_treatment.pdf
- Friston, K. (2012). Ten ironic rules for non-statistical reviewers. *Neuroimage*, 61(4), 1300-1310. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.04.018>
- Glasser, M. F., Sotiropoulos, S. N., Wilson, J. A., Coalson, T. S., Fischl, B., Andersson, J. L., ... Jenkinson, M. (2013). The minimal preprocessing pipelines for the Human Connectome Project. *NeuroImage*, 80, 105-124. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.04.127>
- Glosser, G., & Donofrio, N. (2001). Differences between nouns and verbs after anterior temporal lobectomy. *Neuropsychology*, 15(1), 39-47. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.15.1.39>
- Gor, K. (2018). The neural correlates of case and inflection in the processing of morphologically complex words: An fMRI study of Russian nouns. *International Journal of Psychophysiology*, 131, S12. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.07.038>

- Kim, J., Kim, S., & Nam, K. (2024). Neural dynamics of processing inflectional morphology: an fMRI study on Korean inflected verbs. *Brain Sciences*, 14(8), 752. <https://doi.org/10.3390/brainsci14080752>
- Krashen, S. D. (1973). Lateralization, language learning, and the critical period: Some new evidence. *Language Learning*, 23(1), 63-74.
- Lehtonen, M., Vorobyev, V. A., Hugdahl, K., Tuokkola, T., & Laine, M. (2006). Neural correlates of morphological decomposition in a morphologically rich language: An fMRI study. *Brain and Language*, 98(2), 182-193. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2006.04.011>
- Mariën, P., Ackermann, H., Adamaszek, M., Barwood, C. H. S., Beaton, A., Desmond, J., ... Ziegler, W. (2014). Consensus paper: Language and the cerebellum: An ongoing enigma. *The Cerebellum*, 13(3), 386-410. <https://doi.org/10.1007/s12311-013-0540-5>
- Meykadeh, S., Golfam, A., Batouli, S. A. H., & Sommer, W. (2021). Overlapping but language-specific mechanisms in morphosyntactic processing in highly competent L2 acquired at school entry: fMRI evidence from an alternating language switching task. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, Article 728549. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.728549>
- Meykadeh, S., & Sommer, W. (2024). The auditory sentence processing and the planum temporale: Evidence from functional magnetic resonance mapping in bilinguals. *Advances in Cognitive Sciences*, 26(2), 31-46. <https://doi.org/10.30514/icss.26.2.31>
- Meykadeh, S., Sommer, W., & Batouli, S. A. H. (2024). The cerebellum and grammatical agreement in bilinguals: Evidence from grammaticality judgments using fMRI. *Language Science*, 10(18), 309-342. <https://doi.org/10.22054/lis.2023.74871.1591>
- Momenian, M., Nilipour, R., Samar, R. G., Oghabian, M. A., & Cappa, S. (2016). Neural correlates of verb and noun processing: An fMRI study of Persian. *Journal of Neurolinguistics*, 37, 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2015.07.003>
- Momenian, M., Nilipour, R., Samar, R. G., Cappa, S. F., & Golestani, N. (2018). Morpho-syntactic complexity modulates brain activation in Persian-English bilinguals: An fMRI study. *Brain and Language*, 185, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2018.07.001>
- Moseley, R. L., & Pulvermüller, F. (2014). Nouns, verbs, objects, actions, and abstractions: Local fMRI activity indexes semantics, not lexical categories. *Brain and Language*, 132, 28-42. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2014.03.001>
- Ogawa, S., Menon, R. S., Tank, D. W., Kim, S. G., Merkle, H., Ellermann, J. M., & Ugurbil, K. (1993). Functional brain mapping by blood oxygenation level-dependent contrast magnetic resonance imaging. A comparison of signal characteristics with a biophysical model. *Biophysical Journal*, 64(3), 803-812. [https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(93\)81441-3](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(93)81441-3)

- Pliatsikas, C., Wheeldon, L., Lahiri, A., & Hansen, P. C. (2014). Processing of zero-derived words in English: An fMRI investigation. *Neuropsychologia*, 53, 47-53. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.11.003>
- Ranjan, A., & Singh, V. P. (2025). Chapter Ten - Language processing in the brain: An fMRI study. In A. Gupta, B. C. Neelapu, & S. S. Rana (Eds.), *Advances in Computers* (Vol. 136) (pp. 493-564): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2024.03.003>
- Rolls, E. T., Huang, C. C., Lin, C. P., Feng, J., & Joliot, M. (2020). Automated anatomical labelling atlas 3. *Neuroimage*, 206, Article 116189. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116189>
- Russo, A. G., Esposito, F., Laudanna, A., Mancuso, A., Di Salle, F., Elia, A., & De Martino, M. (2021). The neural substrate of noun morphological inflection: A rapid event-related fMRI study in Italian. *Neuropsychologia*, 151, Article 107699. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107699>
- Slioussar, N., Kireev, M. V., Chernigovskaya, T. V., Kataeva, G. V., Korotkov, A. D., & Medvedev, S. V. (2014). An ER-fMRI study of Russian inflectional morphology. *Brain and Language*, 130, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2014.01.006>
- Ullman, M. T. (1998). Evidence that lexical memory is part of the temporal lobe declarative memory, and that grammatical rules are processed by the frontal/basal-ganglia procedural system. *Brain and Language*, 1-65.
- van der Auwera, J. (1985). [Review of the book *Syntax: A functional-typological introduction* (Vol. I), by T. Givón]. *Journal of Linguistics*, 21(2), 503-509. <https://doi.org/10.1017/S0022226700010434>
- Wei, X., Adamson, H., Schwendemann, M., Goucha, T., Friederici, A. D., & Anwender, A. (2023). Native language differences in the structural connectome of the human brain. *Neuroimage*, 270, Article 119955. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.119955>
- Whiteside, S. P. (1993). [Review of the book *The speech chain: The physics and biology of spoken language* by P. B. Denes & E. N. Pinson (2nd ed)]. *Journal of the International Phonetic Association*, 23(2), 98-101. <https://doi.org/10.1017/S0025100300004904>
- Williams, R. J., McMahon, K. L., Hocking, J., & Reutens, D. C. (2014). Comparison of block and event-related experimental designs in diffusion-weighted functional MRI. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 40(2), 367-375. <https://doi.org/10.1002/jmri.24353>
- Zilles, K. (2018). Brodmann: a pioneer of human brain mapping-his impact on concepts of cortical organization. *Brain*, 141(11), 3262-3278. <https://doi.org/10.1093/brain/awy273>