



Sex Differences in Task-based Functional Connectivity in Balanced Bilinguals

Simin Meykadeh ^{1*}  

1. Department of Linguistics, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

***Corresponding Author:** Ph.D., Department of Linguistics, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Email: a.meykadeh@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 02 Nov 2023

Revised: 28 Nov 2023

Accepted: 06 Feb 2024

Published: 01 Jul 2026

Keywords:

*Balanced Bilinguals,
Functional Connectivity,
Grammaticality Task,
Language Network,
Sex.*

ABSTRACT

Investigating sex-related alterations in task-state functional connectivity (FC) within and between brain networks in balanced bilinguals was the goal of the current applied-fundamental research project. Turkish-Persian bilingual PhD students from prestigious public universities in Tehran made up the current statistical population in 2020. In this study, thirty bilinguals—fifteen males and fifteen females—were chosen using the purposivesample method. Every participant was a native Turkish speaker who started learning Persian when they were seven years old. Initially, the sampling was done in 2020 at Tarbiat Modares University's Linguistics department using working memory tests, L1-L2 assessment interviews, and self-evaluations of L1 and L2. Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) was then used to gather data during an auditory multilingual task. Grammaticality assessments of alternating L1-L2 sentences were required for the job. The language network's target regions were chosen to be the left Pars Opercularis (PO) and the left posterior Superior Temporal Gyrus (pSTG). Additionally chosen as target regions in the language control network were the bilateral Planum Temporale (PT), bilateral Supplementary Motor Area (SMA), and bilateral Precentral Gyrus (PreCG). The CONN-fMRI functional Connectivity toolbox v20.b was used for FC, and SPSS-26 was used for statistical analysis. The findings showed that females had more connection within the language network from the left PO to the left pSTG ($P=0.001$) than males. Accordingly, women outperformed men in terms of intra-network connectivities. When considered collectively, these results suggested that sex differences were consistently connected with the strength of task-state inter-network and intra-network FCs, confirming the notion of a female advantage in language use.

Cite this article: Meykadeh, S. (2026). Sex Differences in Task-based Functional Connectivity in Balanced Bilinguals. *Journal of Applied Psychological Research*, 17(2), 281-300. doi:10.22059/japr.2024.367586.644770



© Author(s) retain the copyright.

DOI: <https://doi.org/10.22059/japr.2024.367586.644770>

Publisher: University of Tehran Press.

Sex Differences in Task-based Functional Connectivity in Balanced Bilinguals

Extended Abstract

Aim

Sex differences in cognitive performance have been extensively investigated; however, they remain a controversial topic. Despite the considerable similarities between the brains of males and females, several studies have reported substantial differences in brain organization and cognitive functioning. Using structural connectome modeling and diffusion tensor imaging (DTI) in a sample of 949 youths (aged 8–22 years; 428 males and 521 females), Ingalhalikar et al. (2014) identified remarkable sex-related differences in anatomical brain connectivity during development. Specifically, males exhibited greater interhemispheric connectivity, together with higher modularity and transitivity across supratentorial regions, whereas females showed stronger intrahemispheric connectivity and greater cross-module participation.

Furthermore, several studies have reported sex differences in resting-state functional connectivity within brain networks involved in cognitive processes, including self-referential processing (Biswal et al., 2010), executive functions (Hjelmervik et al., 2014), attention (Filippi et al., 2013), sensory-motor functions (Allen et al., 2011), as well as neurodevelopmental disorders such as autism (Tavares et al., 2022) and attention-deficit/hyperactivity disorder (Scofield et al., 2019).

However, relatively little is known about the influence of sex on language-specific functional connectivity (FC) during task performance. Therefore, the present reanalysis aimed to investigate sex differences in task-state functional connectivity within and between brain networks in balanced Turkish (L1)-Persian (L2) bilinguals.

Methodology

The present study was a reanalysis of the data reported by Meykadeh et al. (2023) to investigate sex differences in task-state functional connectivity (FC). To achieve a balanced gender distribution, data from six participants were excluded from the original dataset. The final sample consisted of 30 Turkish-Persian bilingual PhD students (15 males and 15 females) selected through purposive sampling from top public universities in Tehran in 2020. All participants were native Turkish speakers who had acquired Persian as their second language at the age of seven. Inclusion criteria included Turkish-speaking background, right-handedness, normal hearing ability, and absence of language, neurological, or psychological disorders. Before fMRI acquisition, participants underwent behavioral assessments of bilingual proficiency, language ability, working memory, and related demographic characteristics.

Functional MRI data were collected during an auditory bilingual grammaticality judgment task. Participants evaluated the grammaticality of Turkish (L1) and Persian (L2) sentences presented in an alternating language paradigm. Imaging data were preprocessed using the standard pipeline of the CONN-fMRI toolbox (version 20.b), including motion correction, normalization, denoising, and removal of potential confounding signals.

Task-based ROI-to-ROI functional connectivity was analyzed using the generalized psychophysiological interaction (gPPI) approach in the CONN toolbox. The left pars opercularis and left posterior superior temporal gyrus were selected as core regions of the language network, while bilateral planum temporale, supplementary motor area, and precentral gyrus were considered as regions of the control network. Statistical analyses were performed using SPSS version 26. Repeated-measures ANOVA with a $2 \times 2 \times 2$ design was conducted to examine the effects of grammaticality, language, and sex on functional connectivity, and Bonferroni correction was applied for multiple comparisons.

Findings

The findings demonstrated significant effects of grammaticality and sex on task-state functional connectivity patterns. In the language network, a significant interaction between grammaticality and sex was observed in the connectivity between the left pars opercularis (L_PO) and left posterior superior temporal gyrus (L_pSTG). Females showed stronger connectivity during the processing of ungrammatical sentences compared with grammatical sentences, whereas no significant difference was observed in males. In addition, connectivity was generally stronger for ungrammatical sentences and the first language (Turkish) compared with grammatical sentences and the second language (Persian).

In the language control network and between-network connections, ungrammatical sentences elicited stronger functional connectivity between language-related regions and control-related areas, indicating increased neural communication during complex grammatical processing. Although some grammaticality-related effects were more pronounced in females, most connectivity patterns were comparable between the two groups. Overall, the findings suggest that sex differences in bilingual language processing are reflected in specific functional connectivity patterns, particularly within the language network, while grammatical processing engages broader interactions between language and control networks.

Conclusion

The present study examined sex-related differences in task-state functional connectivity underlying syntactic processing in highly proficient Turkish–Persian bilinguals. The findings revealed distinct connectivity patterns between females and males, particularly within the language network. Females showed stronger connectivity between the left pars opercularis and left posterior superior temporal gyrus during the processing of ungrammatical sentences, suggesting sex-related differences in the neural organization of bilingual language processing.

Moreover, increased connectivity between language-specific regions and control-related areas, including the planum temporale and supplementary motor area, highlighted the involvement of broader neural networks during complex grammatical processing. These findings support previous evidence regarding sex differences in functional brain organization (Biswal et al., 2010; Hjelmervik et al., 2014; Filippi et al., 2013) and extend resting-state findings by demonstrating task-dependent neural adaptations during bilingual language processing. The differences from some resting-state studies reporting stronger connectivity in males (Ingallhalikar et al., 2014) may be attributed to the dynamic effects of task demands on functional brain organization (Cole et al., 2021).

Overall, this study provides evidence that sex-related differences in bilingual language processing are reflected in specific functional connectivity patterns within language networks and their interactions with control networks. Given the limited sample size and the novelty of examining sex effects on task-based connectivity in bilinguals, future studies with larger and more diverse samples are recommended to further clarify these neural mechanisms.

Keywords: Balanced Bilinguals, Functional Connectivity, Grammaticality Task, Language Network, Sex.

Ethical Considerations

The present study was approved by the Research Ethics Committee of Iran University of Medical Sciences (IR.IUMS.REC.1398.465). All ethical principles were strictly observed, including obtaining written informed consent, ensuring participants' right to withdraw from the study at any stage, protecting privacy and confidentiality, and complying with all approved research protocols.

Acknowledgments and Funding

This work was supported by the Cognitive Sciences and Technologies Council under Grant No. 7401 awarded to the author. The research was also supported by a Doctoral Dissertation Grant from

the Department of Linguistics, Tarbiat Modares University, and a Scholarship Fund (Ph.D. Visiting Scholar Program) from the Iranian Ministry of Science, Research and Technology.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Cite this article: Meykadeh, S. (2026). Sex Differences in Task-based Functional Connectivity in Balanced Bilinguals. *Journal of Applied Psychological Research*, 17(2), 281-300. doi:10.22059/japr.2024.367586.644770



© Author(s) retain the copyright.

DOI: <https://doi.org/10.22059/japr.2024.367586.644770>

Publisher: University of Tehran Press.



تفاوت های جنسیتی در اتصالات کارکردی تکلیف محور در دوزبانه های متوازن^۱

سیمین میکده^۱ ✉

۱. گروه زبان شناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: دکتری تخصصی، گروه زبان شناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: a.meykadeh@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف پژوهش کاربردی-بنیادی حاضر بررسی تغییرات مبتنی بر جنسیت در اتصالات کارکردی تکلیف محور درون شبکه ای و بینا شبکه ای در دوزبانه های متوازن بود. جامعه آماری پژوهش شامل دانشجویان دوزبانه ترکی-فارسی مقطع دکتری دانشگاه های دولتی برتر شهر تهران در سال ۱۳۹۸ بود. در مطالعه حاضر، ۳۰ فرد دوزبانه (۱۵ زن و ۱۵ مرد) به روش هدفمند انتخاب شدند. همه شرکت کنندگان، سخنگویان بومی ترک زبان بودند که در هفت سالگی و در بدو ورود به مدرسه زبان فارسی را به طور رسمی آموخته بودند. نخست، نمونه گیری بر مبنای خودارزیابی، ارزیابی های رفتاری مصاحبه گر از زبان اول و دوم افراد و نیز سنجش ظرفیت حافظه فعال در گروه زبان شناسی دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد. سپس داده ها به روش تصویربرداری تشدید مغناطیسی کارکردی (fMRI) در حین اجرای یک تکلیف شنیداری دوزبانه در آزمایشگاه ملی نقشه برداری مغز اخذ شدند. تکلیف شامل قضاوت های دستوری بودگی به جملات متناوب زبان اول و دوم بود. نواحی پارس آپرکولاریس و شکنج خلفی-فوقانی-گیجگاهی در نیمکره چپ به عنوان نواحی هدف در شبکه زبان و نواحی پلنیوم گیجگاهی، ناحیه حرکتی تکمیلی و شکنج پیش مرکزی در نیمکره چپ و راست به عنوان نواحی هدف در شبکه کنترل زبان انتخاب شدند. تحلیل اتصالات کارکردی و آماری به ترتیب با استفاده از جعبه ابزار اتصالات کارکردی-CONN-fMRI-20.b و نرم افزار SPSS-26 انجام گرفت. نتایج نشان داد قدرت اتصالات کارکردی در شبکه زبان از پارس آپرکولاریس چپ به شکنج خلفی-فوقانی-گیجگاهی چپ در زنان بیشتر از مردان بود ($P=0.001$). به همین قیاس، زنان در اتصالات بینا شبکه ای نیز بهتر از مردان عمل کردند. به طور کلی، یافته های حاضر حاکی از همبستگی قدرت اتصالات کارکردی تکلیف محور درون شبکه ای نحو-ویژه و بینا شبکه ای با تفاوت های جنسیتی است که ممکن است دال بر برتری زنان در کاربرد زبان باشد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰

کلیدواژه ها:

اتصالات کارکردی،

تکلیف دستوری بودگی،

جنسیت،

دوزبانه های متوازن،

شبکه زبان.

استناد: میکده، س. (۱۴۰۵). تفاوت های جنسیتی در اتصالات کارکردی تکلیف محور در دوزبانه های متوازن. فصل نامه پژوهش های کاربردی روانشناختی، ۱۷(۲)، ۲۸۱-۳۰۰.

doi:10.22059/japr.2024.367586.644770

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران

DOI: <https://doi.org/10.22059/japr.2024.367586.644770>

© نویسندگان.



۱. این مقاله برگرفته از رساله دکتری نگارنده (۱۴۰۰) است و با حمایت مالی ستاد توسعه علوم و فناوری های شناختی (با کد ۷۴۰۱) و وزارت علوم، تحقیقات و فناوری اجرا شد.

۱. مقدمه

تفاوت‌های جنسیتی در عملکردهای شناختی همواره موضوعی بحث‌برانگیز بوده است. با وجود شباهت‌های بسیار در مغز زنان و مردان، امروزه براساس مطالعات فراوانی مشخص شده است که جنسیت^۱ نقش مهمی در آناتومی و عملکرد مغز انسان دارد. اینگالهالیکار و همکارانش^۲ (۲۰۱۴) با بررسی مغز ۹۴۹ فرد سالم (۴۲۸ مرد و ۵۲۱ زن) در حالت استراحت^۳ نشان دادند اتصالات^۴ درون نیمکره‌ای^۵ در مردان و اتصالات بینانیمکره‌ای^۶ در زنان قوی‌تر است. پژوهش‌های متعددی نیز تفاوت در اتصالات کارکردی^۷ حالت استراحت برای شبکه‌های مغزی^۸ دخیل در فرایندهای شناختی از جمله پردازش خودارجاعی^۹ (بیسوال و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۰)، کارکردهای اجرایی^{۱۱} (هلمویک و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۴)، توجه^{۱۳} (فیلیپی و همکاران^{۱۴}، ۲۰۱۳)، کارکردهای حسی-حرکتی^{۱۵} (آلن و همکاران^{۱۶}، ۲۰۱۱)، و همچنین اختلالات عصبی-رشدی^{۱۷} مانند اوتیسم^{۱۸} (تاواریس و همکاران^{۱۹}، ۲۰۲۲) و بیش‌فعالی^{۲۰} (اسکوفیلد و همکاران^{۲۱}، ۲۰۱۹) را در زنان در مقایسه با مردان گزارش کرده‌اند. باین‌حال، اطلاعات اندکی در مورد تأثیر جنسیت بر اتصالات کارکردی زبان-ویژه وجود دارد. مطالعه حاضر بر این موضوع متمرکز است.

اتصالات کارکردی، وابستگی‌های آماری بین فعالیت نواحی مجزای مغز را منعکس می‌کند (لانگ و همکاران^{۲۲}، ۲۰۱۲). مطالعات اتصالات کارکردی با اندازه‌گیری نوسانات سیگنال^{۲۳} مغزی حاصل از روش تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی^{۲۴} بر روابط کارکردی بین نواحی نورونی، چه در حالت استراحت و چه در حالت تکلیف^{۲۵}، دلالت دارند (فاکس و ریچل^{۲۶}، ۲۰۰۷). در افراد دوزبانه، اتصالات کارکردی حالت استراحت، بیش قابل توجهی را در مورد سازمان‌دهی شبکه‌های مغزی فراهم کرده است (ژو و همکاران^{۲۷}، ۲۰۱۲؛ لی و همکاران^{۲۸}، ۲۰۱۵؛ برکن و همکاران^{۲۹}، ۲۰۱۶؛ لیو و همکاران^{۳۰}، ۲۰۱۷؛ گالیفر و همکاران^{۳۱}، ۲۰۱۸؛ دلوکا و همکاران^{۳۲}، ۲۰۱۹؛ سولپیزو و همکاران^{۳۳}، ۲۰۲۰).

1. gender
2. Ingalhalikar et al.
3. resting-state
4. connections
5. interhemispheric
6. intrahemispheric
7. functional connectivity
8. brain network
9. self-referential processing
10. Biswal et al.
11. executive function
12. Hjelmervik et al.
13. attention
14. Filippi et al.
15. sensory-motor functioning
16. Allen et al.
17. neurodevelopmental disorders
18. autism
19. Tavares et al.
20. hyperactivity
21. Scofield et al.
22. Lang et al.
23. signal
24. Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)
25. task state
26. Fox & Raichle
27. Zou et al.
28. Li et al.
29. Berken et al.
30. Liu et al.
31. Gullifer et al.
32. DeLuca et al.
33. Sulpizio et al.

با وجود این، مطالعات حالت استراحت قادر نیستند به‌تنهایی تمام ابعاد اتصالات کارکردی را به تصویر بکشند؛ زیرا پردازش یک تکلیف ممکن است به‌طور پویا تشکیلات شبکه مغز را تغییر دهد و فعالیت عصبی را از حالت استراحت خارج کند (کول و همکاران^۱، ۲۰۲۱). برخی مطالعات نشان داده‌اند سیگنال‌های اتصالات کارکردی حالت استراحت و حالت تکلیف تحت کنترل یک سازوکار فیزیولوژیکی مشترک است و پاسخ‌های حالت استراحت و حالت تکلیف به‌صورت خطی با یکدیگر مرتبطاند (کنرپتی و همکاران^۲، ۲۰۱۲؛ ایوت و همکاران^۳، ۲۰۱۹)، در مقابل، پژوهش‌های دیگری (مانند ژانگ و همکاران^۴، ۲۰۱۶) به این نتیجه رسیده‌اند که تفاوت‌هایی اساسی در الگوهای فعال‌سازی مغز وجود دارد که با پارادایم‌های استراحت و تکلیف ایجاد می‌شوند مانند تنوع شلیک عصبی^۵ (چرچلند و همکاران^۶، ۲۰۱۰) و تغییرات سیگنال بولد^۷ (هی^۸، ۲۰۱۳). در همین راستا، پاپیل و همکاران^۹ (۲۰۲۱) دریافته‌اند این نوع تفاوت‌ها ممکن است به ویژگی‌های فعالیت نورونی مرتبط باشد و نه تغییراتی در معماری زیربنایی نورون^{۱۰}. اما سایر یافته‌ها نشان می‌دهد معماری اصلی مغز در حالت‌های استراحت و تکلیف متغیر است (دی و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۳؛ موسا و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۱؛ بولت و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۷). به‌طور کلی، این یافته‌ها تفاوت‌های کیفی در اتصالات کارکردی برای فعالیت مغزی تکلیف‌محور را در مقایسه با فعالیت مغزی استراحت‌محور نشان می‌دهند. پژوهش حاضر به بررسی نقش جنسیت در اتصالات کارکردی تکلیف‌محور در حین پردازش هم‌زمان زبان اول و دوم می‌پردازد.

امروزه نقش یک شبکه گیجگاهی-پیشانی^{۱۴}، متشکل از پارس آپرکولاریس^{۱۵} و شکنج خلفی-فوقانی-گیجگاهی^{۱۶} در نیمکره چپ برای پردازش نحوی تثبیت شده است. نواحی این شبکه که مشخصاً برای پردازش نحوی تخصصی شده‌اند (فردریچی و همکاران^{۱۷}، ۲۰۱۷؛ گوچا و فردریچی^{۱۸}، ۲۰۱۵؛ زاکارلا و همکاران^{۱۹}، ۲۰۱۷) و زیربنای درک جملات پیچیده هستند (فردریچی و همکاران، ۲۰۱۷؛ فردریچی، ۲۰۱۸؛ ویگنو و همکاران^{۲۰}، ۲۰۰۶)، به‌وسیله یک دسته فیبر به یکدیگر متصل شده‌اند. در یک مطالعه fMRI، شبکه نحو-ویژه فوق در افراد دوزبانه با بسندگی زبانی زیاد در حین یک تکلیف نحوی حاوی جملات متناوب زبان اول و دوم نیز شناسایی شد (میکده و همکاران، ۲۰۲۱). افزون بر این، فعالیت نواحی ویژه کنترل زبان از جمله پلنیوم گیجگاهی^{۲۱}، ناحیه حرکتی تکمیلی^{۲۲}، لوبول آهیانه‌ای فوقانی^{۲۳}، شکنج پیشانی فوقانی^{۲۴} و شکنج پیش مرکزی^{۲۵} نیز مشاهده شد. میکده و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی اتصالات کارکردی نواحی فوق پرداختند. یافته‌های این پژوهش مؤید اتصالات کارکردی بین نواحی نحو-ویژه پارس آپرکولاریس و شکنج خلفی-فوقانی-گیجگاهی در شبکه زبان بود. در شبکه کنترل زبان نیز اتصالاتی بین نواحی پلنیوم گیجگاهی چپ و راست از یک طرف و پلنیوم گیجگاهی چپ و ناحیه حرکتی تکمیلی چپ از طرف دیگر

1. Cole et al.
2. Kannurpatti et al.
3. Elliott et al.
4. Zhang et al.
5. neuronal firing
6. Churchland et al.
7. BOLD
8. He
9. Popiel et al.
10. Neuron
11. Di et al.
12. Moussa et al.
13. Bolt et al.
14. fronto-temporal
15. Pars Opercularis (PO)
16. posterior Superior Temporal Gyrus (pSTG)
17. Friederici et al.
18. Goucha & Friederici
19. Zaccarella et al.
20. Vigneau et al.
21. Planum Temporale (PT)
22. Supplementary Motor Area (SMA)
23. Superior Parietal Lobule (SPL)
24. Superior Frontal Gyrus (SFG)
25. Precentral Gyrus (PreCG)

مشاهده شد. در این مقاله نقش جنسیت در اتصالات کارکردی شناسایی شده در مطالعه میکده و همکاران (۲۰۲۳) بررسی می‌شود؛ بنابراین سؤال اصلی بازتحلیل^۱ حاضر این است که آیا قدرت اتصالات کارکردی مبتنی بر تکلیف در نواحی نحو-ویژه^۲ و کنترل زبان در مردان و زنان دوزبانه متوازن^۳ که در هفت‌سالگی زبان دوم را آموخته‌اند یکسان است. از این‌رو، مطالعه حاضر با هدف بررسی تغییرات اتصالات کارکردی تکلیف‌محور در زنان و مردان دوزبانه انجام گرفت. به‌نظر می‌رسد پژوهش حاضر نخستین تلاش برای بررسی اتصالات کارکردی تکلیف‌محور در زنان و مردان دوزبانه است که ضرورت انجام آن را توجیه می‌کند.

۰۲. روش

۲-۱. جامعه، نمونه و روش اجرا

در مطالعه حاضر، داده‌های گزارش شده توسط میکده و همکاران (۲۰۲۳) بازتحلیل شد. به‌منظور بررسی تأثیر عامل جنسیت بر اتصالات کارکردی تکلیف‌محور و رعایت تعداد شرکت‌کنندگان زن و مرد، داده‌های ۶ نفر از شرکت‌کنندگان از مجموعه داده‌های اصلی حذف شد.

۲-۱. جامعه، نمونه و روش نمونه‌گیری

پژوهش حاضر در زمره مطالعات کاربردی-بنیادی قرار دارد. جامعه آماری آن شامل دانشجویان مقطع دکتری دانشگاه‌های برتر شهر تهران در سال ۱۳۹۸ بود که از بین آن‌ها نمونه‌ای متشکل از ۳۰ نفر (۱۵ زن و ۱۵ مرد) به روش هدفمند انتخاب شدند. ملاک‌های ورود شامل زبان مادری ترکی، شروع آموزش رسمی زبان فارسی در هفت‌سالگی، داشتن والدین ترک‌زبان، تولد و سکونت در استان‌های ترک‌زبان ایران تا هفت‌سالگی، حداقل پنج سال سکونت در شهرهای فارسی‌زبان و راست‌دست بودن بود. برخورداری از شنوایی طبیعی و عدم ابتلا به بیماری‌های زبانی-روانی بود. غربالگری اولیه در گروه زبان‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس برگزار شد. براین اساس، همه افراد ملزم به شرکت در جلسه ارزیابی رفتاری بودند. کسب امتیازات لازم در پنج مؤلفه ضروری بود: ۱. خودارزیابی بسندگی زبانی در زبان فارسی و ترکی؛ ۲. سنجش ظرفیت حافظه فعال؛ ۳. موقعیت اجتماعی-اقتصادی افراد براساس شاخص چهارعاملی جایگاه اجتماعی-اقتصادی؛ ۴. میزان تسلط شرکت‌کنندگان به دو زبان اول و دوم؛ و ۵. انجام مصاحبه به هردو زبان فارسی و ترکی. سپس افراد منتخب در نوبت اخذ داده fMRI و حضور در آزمایشگاه ملی نقشه‌برداری مغز قرار می‌گرفتند.

۲-۲. ابزارهای پژوهش و روش اجرا

۲-۲-۱. پرسشنامه دست‌برتری ادینبورگ^۴ (EHI)

پرسشنامه دست‌برتری ادینبورگ توسط (اولفیلد^۵، ۱۹۷۱) برای تشخیص دست‌برتری طراحی شد. این پرسشنامه ده‌سؤالی مؤلفه‌های نوشتن، نقاشی کشیدن، پرتاب کردن (یک شیء مثل توپ)، فیچی کردن، مسواک زدن، بریدن با چاقو (بدون چنگال)، غذا خوردن با قاشق، جارو زدن، روشن کردن کبریت (دستی که چوب‌کبریت را می‌گیرد) و باز کردن درپوش جعبه را شامل می‌شود. اگر آزمودنی از هردو دست خود استفاده می‌کند باید در پرسشنامه علامت «+» و در مواردی که فقط از یک دست (و نه دست دیگر) استفاده می‌کند باید علامت «++» را ثبت کند. انتخاب شش گزینه برای فقط یک دست، نشانه برتری آن دست بر دست دیگر است. اولفیلد (۱۹۷۱) پایایی و روایی پرسشنامه را تأیید و ضریب آلفای کرونباخ آن را ۰/۹۶ گزارش کرد. در جمعیت ایران، آلفای کرونباخ پرسشنامه ده‌گویه‌ای ادینبورگ ۰/۹۷ بود (علیپور و آگاه‌هریس، ۱۳۸۶).

1. reanalysis
2. syntax-specific

۳. دوزبانه متوازن به کسی اطلاق می‌شود که تسلطش به هردو زبان یکسان است (پورمحمد، ۱۳۹۷).

4. Edinburgh Handedness Inventory (EHI)
5. oldfield

۲-۲-۲. تکلیف قضاوت دستوری بودگی^۱ (GJT)

مواد آزمون برگرفته از مطالعه میکده و همکاران (۲۰۲۱) است. هدف این آزمون قضاوت دستوری بودگی شنیداری^۲ و پردازش نحوی سخنگویان دوزبانه است. محرک‌ها متشکل از ۶۴ جمله فارسی و ۶۴ جمله ترکی با ساختار فاعل + مفعول + فعل بود که نیمی از محرک‌ها در هر زبان به لحاظ نحوی درست و سایر محرک‌ها دارای نقض مطابقت فاعل بودند. افعال گذشته ساده (بدون هیچ فعل کمکی) استفاده شد. در محرک‌های درست، فاعل اول و سوم شخص مفرد با افعال اول و سوم شخص مفرد و فاعل اول و سوم شخص جمع با افعال اول و سوم شخص جمع همراه بودند. در مقابل، در شرایط نقض مشخصه‌های شخص و شمار، فاعل اول و سوم شخص مفرد با افعال اول و سوم شخص جمع و فاعل اول و سوم شخص مفرد همراه بودند (جدول ۱) (فهرست کامل محرک‌های آزمون در میکده، گلفام، بتولی و زومر، ۲۰۲۳ الف در دسترس است).

جدول ۱. مثال‌هایی از مواد آزمون در زبان‌های ترکی و فارسی با حرف‌نویسی و ترجمه انگلیسی، برگرفته از میکده و همکاران، (۲۰۲۱)

زبان اول	زبان دوم
نقض مطابقت دستوری *بیز ۱. p۱. کیتاب‌لاریمیزی گتیردیم ۱.sg.	*ما ۱. p۱. بدهکاری‌مان را پرداختیم ۱.sg.
*Biz kitâb-lar-i-mizi gatirdim. We book-PL-HI-OBJ-CLT.Def bring-PAST-1SG (We brought our books)	We debt-HI-OBJ-CLT.Def pay.PAST-1SG (We paid our debts.)
مطابقت دستوری من ۱.sg. پالتارمی یودوم ۱.sg.	من ۱.sg. نظرش را پذیرفتم ۱.sg.
Man _{1.sg} pältâr-e-mi yudum _{1.sg} . I cloth-HI-OBJ-CLT.Def wash.PAST-1SG (I washed my cloth.)	Man _{1.sg} nazar-aş râ paziroftam _{1.sg} . I offer-OBJ-CLT.Def accept.PAST-1SG (I accepted her/his offer.)

* جملات غیردستوری. زیر هجای هدف خط کشیده شده است.

۲-۲-۲. روش طراحی و اجرای تکلیف قضاوت دستوری بودگی

آزمون دستوری بودگی شنیداری با نرم‌افزار سایکوپای^۳ طراحی و از طریق هدفون ارائه شد. شرکت‌کنندگان باید بر مبنای دستوری یا نادستوری بودن محرک‌ها پاسخ خود را ثبت می‌کردند. در آزمون حاضر از الگوی تحریک وابسته به رویداد^۴، شامل چهار بلوک^۵ جملات شنیداری و چهار بازه استراحت^۶ استفاده شد. هر بلوک متشکل از ۳۲ بخش^۷ است. برای ثبت پاسخ همودینامیکی^۸ نیز بازه‌های زمانی استراحت ۳۰ ثانیه‌ای قبل و بعد از آن تعبیه شد که طی آن هیچ تحریکی ارائه نشد. مدت هر بلوک ۳۱۸ ثانیه بود. هر بخش شامل یک بوق هشدار ۱ ثانیه‌ای، یک جمله ۳ ثانیه‌ای و مرحله پاسخ ۴، ۵ یا ۶ ثانیه‌ای بود. برای ارائه محرک‌ها پارادایم زبان‌گردانی جایگزین^۹ به کار گرفته شد. به عبارت دیگر در هر بلوک، جملات دو زبان به‌طور پیوسته تغییر می‌کرد (برای مثال، زبان اول، زبان دوم، زبان اول، زبان دوم و ...). درحالی‌که محرک‌های دستوری نادستوری به‌طور تصادفی توزیع شدند. مدت آزمون با احتساب مرحله آماده‌سازی حدود ۳۵ دقیقه بود (برای جزئیات بیشتر میکده و زومر ۱۴۰۲؛ میکده، زومر و بتولی، ۱۴۰۲؛ میکده، زومر و بتولی (۱۴۰۳) را ببینید).

۲-۲-۳. تصویربرداری تشدید مغناطیسی کارکردی (fMRI)

۲-۳-۱. پروتکل تصویربرداری

1. Grammaticality Judgement Task (GJT)
2. auditory
3. psychoPy
4. event-related design
5. block
6. resting period
7. run
8. hemodynamic baseline
9. alternating language switching paradigm

همه داده‌های تصویری در میدان مغناطیس ۳ تسلا با کویل سر ۲۰ کاناله^۱ در آزمایشگاه ملی نقشه‌برداری مغز به‌دست آمده‌اند. از هر شرکت‌کننده یک تصویر ساختاری و یک تصویر عملکردی در حالت استراحت در یک جلسه گرفته شد. تصویر ساختاری با قدرت تفکیک بالا با استفاده از توالی سه‌بعدی اکو گرادینت سریع مغناطش آماده‌شده^۲ (به‌صورت اسلایس‌های ساجیتال، TE = 3.53 ms, TR = 1800 ms، زاویه فلیپ ۷ درجه، ضخامت اسلایس ۱ میلی‌متر، اندازه وکسل ۱×۱×۱ میلی‌متر مکعب، اندازه ماتریس ۲۵۶×۲۵۶، زاویه دید ۲۵۶ میلی‌متر مربع و دیرش ۵ دقیقه) و تصویر عملکردی در حالت استراحت به روش EPI (TE = 30 ms, TR = 3000 ms، زاویه فلیپ ۹۰ درجه، ضخامت اسلایس ۳ میلی‌متر، اندازه وکسل ۳×۳×۳ میلی‌متر مکعب، اندازه ماتریس ۶۴×۶۴، زاویه دید ۱۹۲ میلی‌متر مربع، دیرش ۱۲۹۰ ثانیه، ۴۳۰ والیوم^۳، هر والیوم ۴۵ اسلایس) اخذ شد.

۲-۳-۲-۲. پیش‌پردازش تصاویر^۴

پیش‌پردازش داده‌های ساختاری^۵ و کارکردی با استفاده از دستورالعمل پیش‌پردازش پیش‌فرض در جعبه‌ابزار اتصالات کارکردی CONN-fMRI v20.b^۶ انجام گرفت. نقاط زمانی با تغییرات سیگنال BOLD که انحراف معیار بالاتر از ۵ و جابه‌جایی سر بیشتر از ۱ میلی‌متر داشتند، به‌عنوان نقاط پرت^۷ بالقوه علامت‌گذاری شدند. تصحیح زمان‌بندی برش‌ها^۸، قطعه‌بندی^۹ و نرمال‌سازی^{۱۰} تصاویر کارکردی در فضای MNI انجام گرفت. تصاویر ساختاری نیز با رویکرد قطعه‌بندی-نرمال‌سازی یکپارچه^{۱۱} که مبنای آن جداسازی ماده خاکستری^{۱۲}، ماده سفید^{۱۳} و مایع مغزی-نخاعی^{۱۴} است، قطعه‌بندی و نرمالیزه شدند. تصاویر با فیلتر گوسی با پهناهای کامل در نیمه بیشینه^{۱۵} ۶ میلی‌متر هموار شدند. والیوم‌های پرت از آنالیزهای آماری بعدی حذف شدند. متغیرهای سطح اول شامل پاکسازی^{۱۶}، بازتنظیم^{۱۷} و تضمین کیفیت^{۱۸} به‌طور خودکار در طول مراحل پیش‌پردازش ایجاد شدند و به‌عنوان رگرسورهای مخدوش‌کننده^{۱۹} بالقوه در مرحله نوین‌زدایی در جعبه‌ابزار CONN وارد شدند. سیگنال بولد ماده سفید و ماسک‌های مایع مغزی-نخاعی، اسکن‌های پرت، اثرات وضعیت‌های^{۲۰} تکلیف، پارامترهای بازتنظیم و اسکن‌های پرت بالقوه به‌عنوان متغیرهای نویزی به روش رگرسیون خطی با استفاده از رویکرد اصلاح مؤلفه‌محور آناتومیکی^{۲۱} (بهزادی و همکاران^{۲۲}، ۲۰۰۷) حذف شدند تا یک سیگنال تمیز به‌دست دهند. برای حذف نویز سری‌های زمانی نواحی مورد نظر از الگوریتم detrend استفاده شد. درنهایت، سری‌های زمانی در بازه 0.001-Inf هرترز فیلتر شدند.

۲-۳-۲-۲. روش آنالیز اتصالات کارکردی

1. 20-channel head coil
2. Three-Dimension Magnetization-Prepared Rapid Gradient-Echo (MP-RAGE) Sequence
3. volume
4. image preprocessing
5. structural data
6. <https://web.conn-toolbox.org/home>
7. outliers
8. slice-timing corrected
9. segmentation
10. normalization
11. unified segmentation-normalization approach
12. Gray Matter (GM)
13. White Matter (WM)
14. Cerebrospinal Fluid (CSF)
15. Full-Width at Half-Maximum (FWHM) Gaussian Kernel
16. scrubbing
17. realignment
18. quality assurance
19. confound regressors
20. conditions
21. Anatomical CompCor approach
22. Behzadi et al.

آنالیز اتصالات کارکردی ROI-to-ROI با رویکرد تعامل سایکوفیزیولوژیکی تعمیم‌یافته^۱ در جعبه‌ابزار CONN انجام شد. محرک‌های آزمون شامل دو وضعیت دستوری (۶۴ جمله) و نادستوری (۶۴ جمله) برای هر زبان بود. سیگنال اتصالات متشکل از محرک‌های ۳ ثانیه‌ای و زمان پاسخ ۵ ثانیه‌ای (به‌طور میانگین) بود. ضرایب رگرسیون بین همه جفت‌های ROI به‌صورت سری‌های زمانی میانگین از والیوم‌های ناهموار در فضای MNI محاسبه شد تا از آلودگی سیگنال‌های مورد نظر توسط سیگنال مناطق مجاور اجتناب شود. در آنالیز ROI، مقادیر اتصالات ROI-to-ROI برای هر شرکت‌کننده زن و مرد بین ROI مبدأ و ROI هدف استخراج شد. آنالیز اتصالات کارکردی ROI-to-ROI در مطالعه حاضر بر مبنای یک فرضیه پیشین انجام گرفت که دخالت دو شبکه و نواحی زبان-ویژه را در پردازش صرفی-نحوی در افراد دوزبانه نشان داده بود (میکده و همکاران، ۲۰۲۱) تا اثرات دوزبانگی و دستوری‌بودگی بر اتصالات کارکردی درون‌شبکه‌ای و بین‌شبکه‌ای در دو گروه زنان و مردان شناسایی شود. نواحی پارس آپرکولاریس چپ و شکنج خلفی-فوقانی-گیجگاهی چپ به‌عنوان هسته شبکه زبان در نظر گرفته شدند. بر مبنای فعالیت کل-مغز و در راستای مطالعه قبلی نویسندگان (میکده و همکاران، ۲۰۲۱) مناطق مغزی زیر برای بررسی شبکه کنترل انتخاب شدند: پلنیوم گیجگاهی دوجانبه^۲، ناحیه حرکتی تکمیلی دوجانبه، شکنج پیش مرکزی^۳ دوجانبه، شکنج فوقانی-پیشانی^۴ دوجانبه، لوبول آهیانه‌ای فوقانی^۵ دوجانبه. همه نواحی مورد نظر از ماسک‌های از پیش تعریف‌شده در CONN انتخاب شدند. به‌علت نبود اتصالات کارکردی معنادار بین SPL/SFG از یک سو و سایر نواحی از سوی دیگر، این دو ناحیه از چرخه آنالیز حذف شدند.

۳-۲. روش تجزیه و تحلیل آماری اطلاعات

تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ اجرا شد. به‌منظور ارزیابی تفاوت‌های درون‌شبکه‌ای^۶ و بین‌شبکه‌ای^۷ در حین پردازش دستوری‌بودگی زبان اول و دوم در بین زنان و مردان دوزبانه، آزمون استنباطی تحلیل واریانس^۸ با اندازه‌گیری‌های مکرر^۹ ۲×۲×۲ انجام گرفت. قدرت اتصالات به‌عنوان متغیر وابسته و دستوری‌بودگی (دستوری، نادستوری)، زبان (زبان اول: ترکی، زبان دوم: فارسی) و جنسیت (زن و مرد) به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. شبکه‌های مورد نظر شامل شبکه زبان و شبکه کنترل بود که نیازهای ویژه پردازش زبان در افراد دوزبانه را تأمین می‌کنند. اتصالات درون‌شبکه‌ای شامل اتصالات درون‌نیمکره‌ای (L_PT-to-R_PT; L_SMA-to-R_SMA; L_PreCG-to-R_PreCG) و بین‌نیمکره‌ای (L_PT-to-R_PT; R_SMA-to-L_PreCG; L_PT-to-L_PreCG; L_SMA-to-L_PreCG; R_PT-to-L_PreCG; R_PT-to-R_SMA) است. به‌منظور اصلاح مقایسه‌های چندگانه، آزمون بونفرونی اعمال و سطح معناداری برای شبکه زبان، شبکه کنترل و بین‌شبکه‌ای به ترتیب $p = 0.025$ ، $p = 0.055$ و $p = 0.041$ تعیین شد.

۳. یافته‌ها

۳-۱. توصیف جمعیت‌شناختی

ویژگی‌های جمعیت‌شناختی نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. توصیف آماری ویژگی‌های جمعیت‌شناختی نمونه پژوهش

جنسیت	تعداد	میانگین سنی (انحراف معیار)	محدوده سنی (سال)	سطح تحصیلات (سال)	وضعیت شغلی
زن	۱۵	۲۷/۴۷ (۳/۱۸)	۲۲-۳۴	۱۹	محصل در مقطع دکتری*
مرد	۱۵	۲۶/۸۷ (۲/۹۷)	۲۴-۳۳	۲۰	محصل در مقطع دکتری

* فقط یک نفر در مقطع کارشناسی ارشد در حال تحصیل بود.

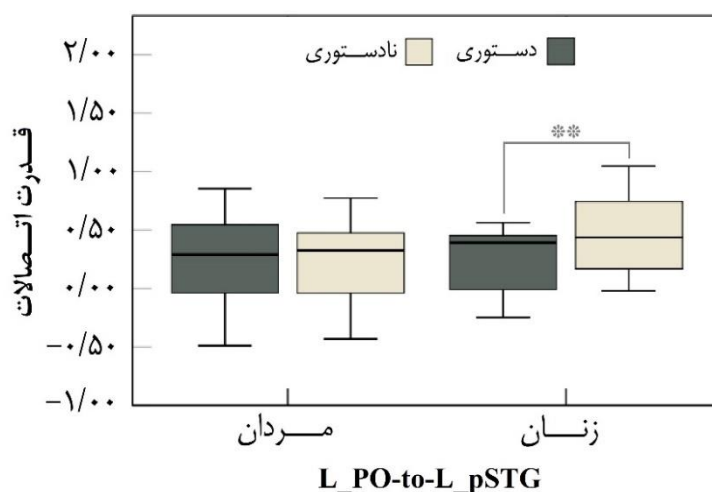
1. Generalized Psychophysiological Interaction (gPPI)
2. Bilateral Planum Temporale (PT)
3. Precentral Gyrus (PreCG)
4. Superior Frontal Gyrus (SFG)
5. Superior Parietal Lobule (SPL)
6. internetwrok
7. intranetwork
8. analysis of variance
9. repeated measures

۳-۲. اتصالات کارکردی در شبکه زبان

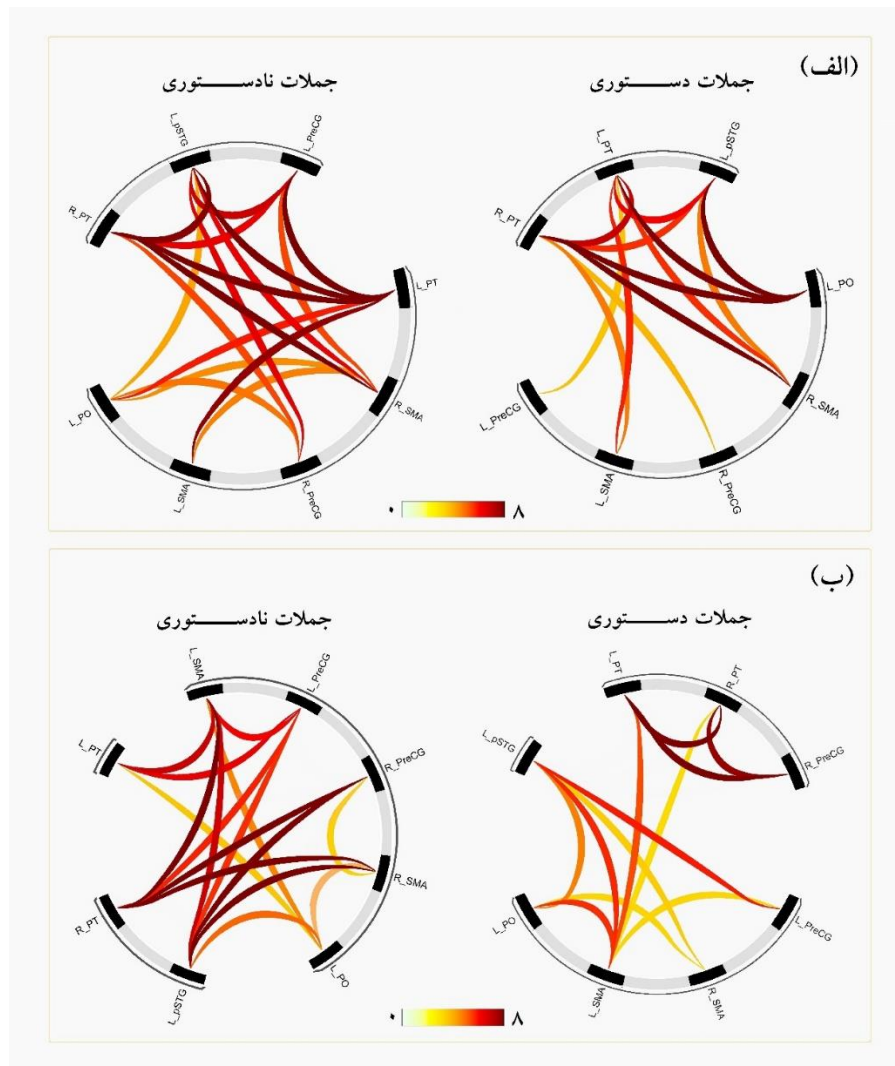
همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد، برای اتصال L_PO-to-L_pSTG، عامل اصلی دستوری‌بودگی به سطح معناداری رسید. مشخصاً اتصالات محرک‌های غیردستوری (۰/۳۷۳) قوی‌تر از محرک‌های دستوری (۰/۲۶۹) بود. عامل اصلی زبان نیز با میزان اتصالات قوی‌تر برای زبان اول (۰/۳۹۷) نسبت به زبان دوم (۰/۲۴۵) معنادار بود. اثر تعاملی دستوری‌بودگی × جنسیت نیز معنادار بود. با در نظر گرفتن عامل دستوری‌بودگی مشاهده شد که در زنان جملات نادرستی (۰/۴۴۹) در مقایسه با جملات دستوری (۰/۲۴۱) اتصال قوی‌تری را ایجاد کردند ($p = ۰/۰۰۱$; $t_{(۱۴)} = ۴/۴۳۲$)، اما در گروه مردان هیچ اختلاف معناداری بین قدرت اتصالات جملات نادرستی (۰/۲۹۷) در مقایسه با جملات دستوری (۰/۲۹۷) مشاهده نشد ($p = ۰/۹۹۰$; $t_{(۱۴)} = -۰/۰۱۳$) (شکل ۱). با در نظر گرفتن عامل جنسیت، مشاهده شد که در اتصالات جملات نادرستی، اختلاف معناداری بین زنان (۰/۴۴۹) و مردان (۰/۲۹۷) مشاهده نشد ($p = ۰/۳۷۶$; $t_{(۱۴)} = ۰/۹۱۵$)، به‌طور مشابه، در اتصالات جملات دستوری اختلاف معناداری بین زنان (۰/۲۴۱) و مردان (۰/۲۹۷) دیده نشد ($p = ۰/۷۳۳$; $t_{(۱۴)} = -۰/۳۴۸$).

جدول ۳. تحلیل واریانس آمیخته برای اتصال L_PO-to-L_pSTG

منبع تغییرات	مقدار F	درجه آزادی	معناداری	مجذور اتا
دستوری‌بودگی	۱۰/۵۳۳	۱	۰/۰۰۶	۰/۴۲۹
زبان	۹/۴۸۱	۱	۰/۰۰۸	۰/۴۰۴
جنسیت	۰/۰۹۰	۱	۰/۷۶۸	۰/۰۰۶
دستوری‌بودگی × زبان	۰/۷۵۴	۱	۰/۴۰۳	۰/۰۵۱
دستوری‌بودگی × جنسیت	۸/۰۲۲	۱	۰/۰۱۳	۰/۳۶۴
زبان × جنسیت	۰/۰۵۷	۱	۰/۸۱۴	۰/۰۰۴
دستوری‌بودگی × زبان × جنسیت	۰/۲۱۷	۱	۰/۶۴۹	۰/۰۱۵



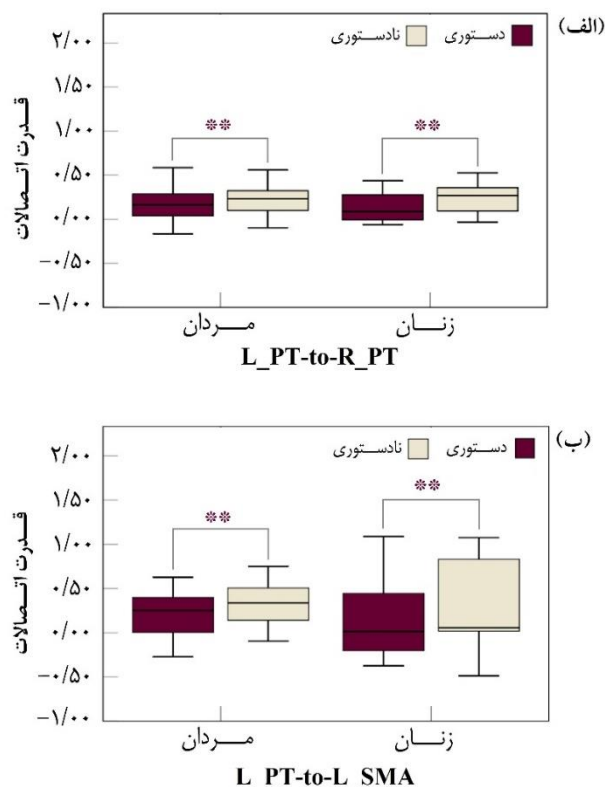
شکل ۱. نمودار جعبه‌ای قدرت اتصال بین نواحی نحو-ویژه پارس آپر کولاریس و شکنج خلفی-گیجگاهی فوقانی در نیمکره چپ مغز در زنان و مردان؛ علامت * نشانه معناداری است.



شکل ۲. نمودار کانکتوم رینگ، اتصالات معنادار بین پنج ناحیه مغزی مورد نظر (ROIs) را در دو گروه (الف) زنان و (ب) مردان نشان می‌دهد (p -FDR < 0.05 (corrected)) (جملات دستوری و نادستوری به ترتیب در سمت راست و چپ تصویر قرار دارند).

۳-۳. اتصالات کارکردی در شبکه کنترل زبان

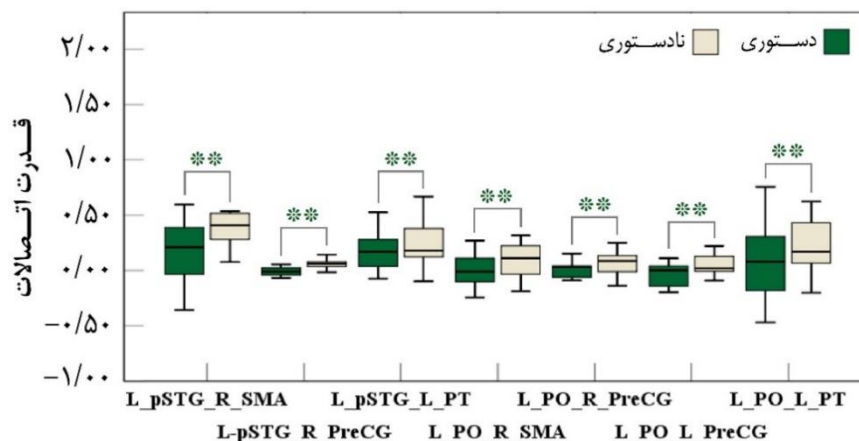
در ارتباط با اتصالات بین‌نیمکره‌ای، برای اتصال L_PT -to- R_PT ، عامل اصلی دستوری‌بودگی به سطح معناداری رسید ($F_{(1,14)} = 20/081$ ، $p = 0/001$ ، $\eta_p^2 = 0/589$) مشخصاً جملات نادستوری (0/261) اتصالات قوی‌تری را در مقایسه با جملات دستوری (0/159) نشان دادند. عامل اصلی زبان بعد از اصلاح بونفرونی معناداری خود را از دست داد. عامل اصلی جنسیت و تعامل آن با سایر عامل‌ها معنادار نبود. در ارتباط با اتصالات درون‌نیمکره‌ای، برای اتصال L_PT -to- L_SMA ، عامل اصلی دستوری‌بودگی با اتصالات قوی‌تر جملات نادستوری (0/261) در مقایسه با جملات دستوری (0/159) به سطح معناداری رسید ($F_{(1,14)} = 20/556$ ؛ $p \leq 0/001$ ؛ $\eta_p^2 = 0/595$) اما عامل اصلی دستوری‌بودگی و جنسیت در تعامل نبودند. عامل اصلی دستوری‌بودگی برای سایر اتصالات (L_PreCG -to- R_PreCG ، L_SMA -to- R_SMA ، L_SMA -to- L_PreCG ،) نیز به سطح معناداری نرسید. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، عامل دستوری‌بودگی در هر دو گروه زنان و مردان برای اتصالات L_PT -to- R_PT و L_PT -to- R_PT معنادار بود، اما تفاوتی بین دو جنسیت دیده نشد.



شکل ۳. نمودار جعبه‌ای قدرت اتصالات کارکردی برای اثر دستوری‌بودگی برای هردو گروه زنان و مردان در نواحی شبکه کنترل زبان شامل (الف) L_PT-to-R_PT و (ب) L_PT-to-L_SMA؛ علامت * نشانه معناداری است.

۳-۴. اتصالات کارکردی بین شبکه زبان و شبکه کنترل زبان

در همه اتصالات بین‌شبکه‌ای، جملات نادرستی در مقایسه با جملات دستوری اتصال قوی‌تری را ایجاد کردند (شکل ۳). در اتصال L_PO-to-L_PT، عامل اصلی دستوری‌بودگی با اتصالات قوی‌تر جملات نادرستی (۰/۲۱۶) در مقایسه با جملات دستوری (۰/۰۸۹) به سطح معناداری رسید ($F_{(1,14)} = 10/016$; $p \leq 0/003$; $\eta_p^2 = 0/253$). در اتصال L_PO-to-L_PreCG، عامل اصلی دستوری‌بودگی با اتصالات قوی‌تر جملات نادرستی (۰/۰۵۰) در مقایسه با جملات دستوری (۰/۰۳۷) معنادار بود ($F_{(1,14)} = 15/126$; $p = 0/001$; $\eta_p^2 = 0/351$). در اتصال L_PO-to-R_PreCG، عامل اصلی دستوری‌بودگی با اتصالات قوی‌تر جملات نادرستی (۰/۰۶۴) در مقایسه با جملات دستوری (۰/۰۰۲) دیده شد ($F_{(1,14)} = 36/252$; $p \leq 0/001$; $\eta_p^2 = 0/721$). در اتصال L_PO-to-R_SMA، عامل اصلی دستوری‌بودگی با اتصالات قوی‌تر جملات نادرستی (۰/۰۸۶) در مقایسه با جملات دستوری (۰/۰۰۳) معنادار بود ($F_{(1,14)} = 13/988$; $p = 0/001$; $\eta_p^2 = 0/333$). در اتصال L_pSTG-to-L_PT، عامل اصلی دستوری‌بودگی با اتصالات قوی‌تر جملات نادرستی (۰/۲۴۸) در مقایسه با جملات دستوری (۰/۱۷۷) معنادار بود ($F_{(1,14)} = 10/834$; $p = 0/003$; $\eta_p^2 = 0/279$). در اتصال L_pSTG-to-R_PreCG، عامل اصلی دستوری‌بودگی با اتصالات قوی‌تر جملات نادرستی (۰/۰۶۳) در مقایسه با جملات دستوری (۰/۰۰۸) معنادار بود ($F_{(1,14)} = 74/49$; $p < 0/001$; $\eta_p^2 = 0/727$). در نهایت، در اتصال L_pSTG-to-R_SMA، عامل اصلی دستوری‌بودگی با اتصالات قوی‌تر جملات نادرستی (۰/۴۴۲) در مقایسه با جملات دستوری (۰/۲۴۶) مشاهده شد ($F_{(1,14)} = 10/096$; $p = 0/0036$; $\eta_p^2 = 0/265$). سایر عوامل معنادار نبود ($F_{(1,14)} < 1$).



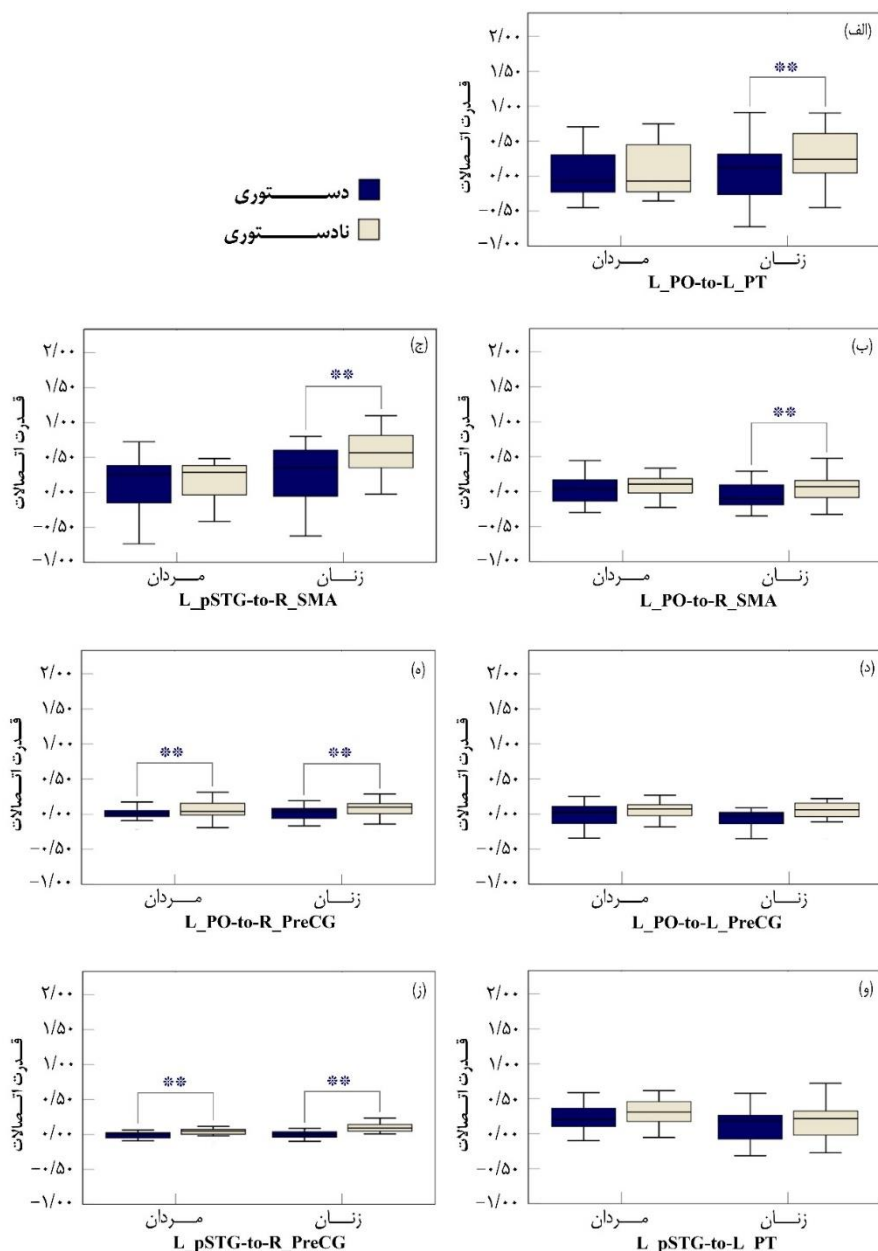
شکل ۴. نمودار جعبه‌ای قدرت اتصالات بین‌شبکه‌ای برای اثر دستوری‌بودگی؛ علامت * نشانه معناداری است.

به‌منظور شناسایی اثر دستوری‌بودگی در دو گروه زنان و مردان آزمون تعقیبی تی زوجی برای هر یک از اتصالات معنادار فوق اجرا شد. نتایج این آزمون که در جدول ۴ ارائه شد، نشان می‌دهد معناداری عامل دستوری‌بودگی برای سه اتصال L_PO-to-L_PT، L_PO-to-R_SMA و L_pSTG-to-R_SMA محدود به گروه زنان و برای سایر اتصالات (L_PO-to-L_PreCG، L_PO-to-R_PreCG، L_pSTG-to-L_PT و L_pSTG-to-R_PreCG) متأثر از عامل جنسیت نبود.

جدول ۴. نتایج آزمون‌های تی زوجی اتصالات کارکردی برای عامل دستوری‌بودگی به تفکیک هر جنسیت

معناداری	مقدار t	میانگین قدرت اتصالات (انحراف معیار)	جنسیت	اتصالات کارکردی
۰/۰۰۱۷*	۳/۹۳۴	(۰/۱۶) ۰/۲۲۷	زن	L_PO-to-L_PT
۰/۵۲۷	۰/۶۴۹	(۰/۲۹) ۰/۰۲۷	مرد	L_PO-to-L_PT
۰/۰۰۱*	۴/۰۲۰	(۰/۱۱) ۰/۱۱۱	زن	L_PO-to-R_SMA
۰/۱۰۶	۱/۷۲۷	(۰/۱۵) ۰/۰۶۷	مرد	L_PO-to-R_SMA
۰/۰۰۱۹*	۳/۸۵۶	(۰/۳۱) ۰/۳۰۰	زن	L_pSTG-to-R_SMA
۰/۳۴۱	۰/۹۸۵	(۰/۳۶) ۰/۰۹۲	مرد	L_pSTG-to-R_SMA
۰/۰۰۹	۳/۰۳۴	(۰/۱۱) ۰/۱۰۳	زن	L_PO-to-L_PreCG
۰/۰۲۹	۲/۴۳۷	(۰/۱۳) ۰/۰۷۱	مرد	L_PO-to-L_PreCG
<۰/۰۰۱	۴/۹۴۴	(۰/۰۶) ۰/۰۶۵	زن	L_PO-to-R_PreCG
۰/۰۰۱	۴/۰۰۹	(۰/۰۵) ۰/۰۵۹	مرد	L_PO-to-R_PreCG
۰/۰۳۳	۲/۳۶۴	(۰/۱۳) ۰/۰۷۷	زن	L_pSTG-to-L_PT
۰/۰۳۸	۲/۳۹۶	(۰/۱۱) ۰/۰۶۶	مرد	L_pSTG-to-L_PT
<۰/۰۰۱	۷/۴۱۵	(۰/۰۵) ۰/۰۹۷	زن	L_pSTG-to-R_PreCG
<۰/۰۰۱	۴/۵۱۰	(۰/۰۳) ۰/۰۴۵	مرد	L_pSTG-to-R_PreCG

* $p < ۰/۰۰۲۰$ (آزمون تی زوجی دودنباله با اصلاح بونفرونی)



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای قدرت اتصالات بین‌شبکه‌ای برای اثر دستوری بودگی به تفکیک هر جنسیت؛ علامت * نشانه معناداری است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر، بررسی اتصالات کارکردی شبکه‌های دخیل در پردازش نحوی در زنان و مردان دوزبانه‌ای است که از هفت‌سالگی زبان دوم را به‌طور رسمی در مدرسه آموخته بودند. تمرکز اصلی روی اتصالات کارکردی در شبکه زبان (پارس آپرکولاریس و شکنج خلفی-فوقانی-گیجگاهی)، شبکه کنترل زبان (پلنیوم گیجگاهی، ناحیه حرکتی تکمیلی و شکنج پیش‌مرکزی) و اتصالات کارکردی بین‌شبکه‌ای بود. فعالیت این نواحی در مطالعه میکده و همکاران (۲۰۲۱) و قدرت اتصالات کارکردی آن‌ها در مطالعه میکده و همکاران (۲۰۲۳ب) شناسایی شده بود. در این بخش نتایج اتصالات کارکردی در زنان و مردان توضیح داده می‌شود.

نخستین دستاورد پژوهش حاضر -صرف‌نظر از نوع زبان مورد پردازش- معناداری اثر دستوری بودگی برای اتصال L_PO-to-L_pSTG در شبکه زبان در حین پردازش یک تکلیف نحوی در زنان بود. نواحی پارس آپرکولاریس و شکنج خلفی-فوقانی-

گیجگاهی که به لحاظ ساختاری و کارکردی توسط فیبرهای خلفی به هم متصل شده‌اند (سور و همکاران^۱، ۲۰۰۸؛ فردریچی و همکاران، ۲۰۱۷)، به عنوان بخشی از مسیر ویژه زبان در انسان تثبیت شده است (جولی و همکاران^۲، ۲۰۱۲؛ فردریچی و همکاران، ۲۰۱۷). در واقع، این مدار نورونی برای قوه نحوی انسان در هسته زبان کاملاً ضروری و بنیادین قلمداد می‌شود (فردریچی، ۲۰۱۸). اگرچه اتصال کارکردی این دو ناحیه در مطالعات اتصالات کارکردی در حالت استراحت در افراد تک‌زبان بزرگسال پیش‌تر مشاهده شد (شیائو و همکاران^۳، ۲۰۱۶)، نبود مطالعات کافی در زمینه اتصالات کارکردی تکلیف‌محور و به‌ویژه در افراد دوزبانه امکان مقایسه و تجزیه و تحلیل این یافته پژوهش را تقریباً دشوار می‌کند. در تبیین اثر معنادار دستوری‌بودگی زنان که در راستای مطالعات اتصالات کارکردی حالت استراحت در سایر فرایندهای شناختی است (بیسوال و همکاران، ۲۰۱۰؛ آلن و همکاران، ۲۰۱۱؛ فیلیپی و همکاران، ۲۰۱۳؛ هلمویک و همکاران، ۲۰۱۴؛ اسکوفیلد و همکاران، ۲۰۱۹ و تاواریس و همکاران، ۲۰۲۲)، می‌توان پیشنهاد کرد که (دست‌کم بر مبنای داده‌های حاضر) زنان در اتصالات کارکردی زبان-ویژه بهتر از مردان عمل می‌کنند. از سوی دیگر، نتایج فعلی با یافته‌های اینگالهاالیکار و همکاران (۲۰۱۴) که گزارش کردند در حالت استراحت مردان در اتصالات درون‌نیمکره‌ای قوی‌تر از زنان هستند، همخوانی ندارند. دلیل این ناهمخوانی این می‌تواند باشد که همان‌طور که کول و همکاران (۲۰۲۱) مطرح کردند، پردازش یک تکلیف، تغییر سازمان‌دهی شبکه‌های مغز را ممکن می‌سازد و قادر است تا فعالیت نورونی را از حالت استراحت خارج کند. پر واضح است که مطالعات اتصالات کارکردی مبتنی بر تکلیف می‌تواند مسیر یافته‌های موجود را تغییر دهد. کما اینکه مطالعاتی وجود دارند که نشان می‌دهند تنوعات شلیک عصبی (چرچلند و همکاران، ۲۰۱۰) و تغییرات سیگنال بولد (هی، ۲۰۱۳) حاصل از پارادایم‌های مبتنی بر تکلیف می‌توانند تمایزات قابل توجهی را در الگوهای فعال‌سازی مغز ایجاد کنند. افزون بر این، اتصال معنادار L_PO-to-L_pSTG مؤید یک‌سویه‌شدگی^۴ نیمکره چپ در پردازش نحوی است. این یافته در راستای نتایج مطالعه سولپیزو و همکارانش (۲۰۲۰) است که نشان دادند اتصالات زبان-ویژه در حالت استراحت نیز محدود به نیمکره چپ بوده است.

دست‌آورد دیگر پژوهش حاضر مبتنی بر اتصالات نواحی نحو-ویژه و موتورهای محاسباتی مسئول پردازش شنیداری زبان از جمله پلنیوم گیجگاهی و ناحیه حرکتی تکمیلی است که بر مبنای نتایج فعلی زنان عملکرد بهتری از مردان داشتند (جدول ۴ و شکل ۵). مشخصاً سه اتصال کلیدی L_PO-to-L_PT، L_PO-to-R_SMA و L_pSTG-to-R_SMA در زنان قوی‌تر بود. در ادامه، این مشاهدات تشریح می‌شود.

اتصال نخست مربوط به دو ناحیه پارس آپرکولاریس (که در پاراگراف اول به ساختار و عملکرد آن پرداخته شد) و پلنیوم گیجگاهی در نیمکره چپ مغز است. پلنیوم گیجگاهی ناحیه‌ای مثلثی شکل است که روی سطح شکنج خلفی-فوقانی-گیجگاهی در نیمکره چپ واقع شده است. این ناحیه مغزی به عنوان نیروی محرکه مکانیسم‌های پردازش شنیداری زبان-ویژه عمل می‌کند (گریفیت و وارن^۵، ۲۰۰۲) و رمزگشایی موفق گفتار در نواحی قشر شنیداری موجب تنظیم محاسبات زبان-ویژه در شکنج پیشانی تحتانی^۶ (که پارس آپرکولاریس به آن تعلق دارد) می‌شود (آبلسر و کتس^۷، ۲۰۰۹). از نظر کالبدشناختی نیز مطالعات بسیاری نشان داده‌اند پلنیوم گیجگاهی نقش مهمی در یک‌سویه‌شدگی کارکردی در پردازش زبان ایفا می‌کند (گسویند و لویتسکی^۸، ۱۹۶۸؛ فونداس و همکاران^۹، ۱۹۹۴؛ مافیت و همکاران^{۱۰}، ۱۹۹۸). به این ترتیب، به نظر می‌رسد در مطالعه حاضر نیز پلنیوم گیجگاهی به عنوان یک مرکز محاسباتی عمل کرده و در جداسازی الگوهای صوتی ورودی و تبادل اطلاعات با ناحیه پارس آپرکولاریس برای پردازش بیشتر دخالت داشته و این عملکرد در زنان بارزتر بوده است. اتصال دوم و سوم مربوط به اتصالات نواحی

1. Saur et al.
2. Joly et al.
3. Xiao et al.
4. lateralization
5. Griffiths & Warren
6. Inferior Frontal Gyrus (IFG)
7. Obleser & Kotz
8. Geschwind & Levitsky
9. Foundas et al.
10. Moffat et al.

پارس آپرکولاریس و شکنج خلفی-فوقانی-گیجگاهی در نیمکره چپ با ناحیه حرکتی تکمیلی در نیمکره راست است. ناحیه حرکتی تکمیلی، پیش‌تر به‌عنوان کانونی برای اجرا و برنامه‌ریزی حرکتی شناخته شده بود (ماکوشیو همکاران^۱، ۲۰۱۱). مطالعات بعدی، فعالیت این ناحیه مغزی را در حین ادراک گفتار و زبان گزارش کردند (هتربیک و همکاران^۲، ۲۰۲۰). اخیراً نیز مشارکت ناحیه حرکتی تکمیلی در پردازش شنوایی، تصویرسازی شنیداری و در فرایندهای حسی-حرکتی که ادراک شنوایی را هدایت می‌کند، مشاهده شده است (ولنیارز و همکاران^۳، ۲۰۱۹). افزون بر این‌ها، کنا و سمنزا^۴ (۲۰۱۷) بر این باورند که ناحیه حرکتی تکمیلی به‌عنوان یک مرکز عمومی برای ادغام عناصر منفرد (بدون توجه به ماهیت چنین عناصری مانند حرکتی، زمانی، مکانی، عددی، زبانی، عددی) به‌منظور بازنمایی‌های سطح بالاتر عمل می‌کند که به‌نظر می‌رسد این پیشنهاد با دخالت این ناحیه در محاسبات دستور زبان در افراد تک‌زبانه و دوزبانه هم مطابقت دارد. هیچ مدرکی دال بر این شواهد در زمینه مطالعات حالت استراحت برای اتصالات فوق یافت نشد. اینک می‌توان استدلال کرد که یافته‌های مبتنی بر اتصالات بیناشبکه‌ای در پژوهش حاضر بر فعالیت غالب نیمکره راست مغز برای کنترل زبان در زنان دوزبانه صحه می‌گذارد که مؤید یافته‌های میکده و همکاران (۲۰۲۱) است. براین‌اساس، می‌توان پیشنهاد کرد که در بافت دوزبانگی، ناحیه حرکتی تکمیلی در نیمکره راست نقش مهمی در پردازش شنیداری محرک‌های زبانی ایفا می‌کند.

در پایان، عملکرد یکسان زنان در پردازش زبان اول و دوم، ما را به این نکته رهنمون می‌کند که این افراد به‌اندازه کافی در هر دو زبان اول و دوم به بسندگی زیادی دست یافته‌اند؛ بنابراین، با توجه به بسندگی بالای جامعه آماری حاضر در هر دو زبان اول و دوم و عدم شناسایی تفاوت‌های زبان-ویژه (مشخصاً در گروه زنان)، نتایج فعلی قابلیت تعمیم‌پذیری به جامعه زنان تک‌زبانه را نیز دارد. نظر به اینکه مطالعه حاضر -دست‌کم براساس بررسی‌ها- نخستین تلاش در زمینه بررسی نقش جنسیت بر اتصالات کارکردی تکلیف‌محور در افراد دوزبانه است، ضرورت اجرای مطالعات آینده را نیز می‌طلبد.

۵. ملاحظات اخلاقی

پژوهش حاضر مورد تصویب کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی ایران و دارای کد IR.IUIMS.REC.1398.465 است. کلیه اصول اخلاقی از جمله شفاف‌سازی کامل اهداف پژوهش برای شرکت‌کنندگان، آزادی عمل افراد در شرکت یا ترک پروژه، کسب رضایت کتبی، محرمانه‌بودن اطلاعات شرکت‌کنندگان و پرداخت حق‌الزحمه حضور رعایت شد.

۶. حمایت مالی

این پژوهش به‌موجب قرارداد شماره ۷۴۰۱ با حمایت مالی ستاد توسعه علوم و فناوری‌های شناختی انجام شد. افزون بر این از حمایت مالی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ایران جهت تکمیل اهداف پروژه در دانشگاه هومبولت برلین^۵ (آلمان) تحت راهنمایی پروفیسور ورنر زومر برخوردار بود.

۷. تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ‌گونه تعارض منافی وجود ندارد.

منابع

- پورمحمد، م. (۱۳۹۷). روان‌شناسی زبان. تهران: سمت.
 علیپور، ا. و آگاه‌هریس، م. (۱۳۸۶). بررسی قابلیت اعتماد و اعتبار پرسشنامه دست برتری ادینبورگ در ایران، فصلنامه علوم روانشناختی، ۶(۲۲)، ۱.
<https://www.magiran.com/volume/90156>

1. Makoshi, Kroliczak, & van Donkelaar
 2. Hertrich, Dietrich, & Ackermann
 3. Welniarz et al.
 4. Cona & Semenza
 5. Humboldt-Universität zu Berlin

میکده، س. (۱۴۰۰). بررسی اثرات بسندگی زبان و سن یادگیری زبان دوم بر دستگاه عصبی برای پردازش صرفی نحوی با استفاده از ERPs و fMRI. رساله دکتری رشته زبانشناسی. دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس. تهران: ایران.

میکده، س.، و زومر، و. (۱۴۰۲). عدم تفاوت‌های جنسیتی در پردازش مشخصه‌های فای در افراد دوزبانه متوازن: مطالعه‌ای بر پایه تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی (fMRI). پژوهش‌های زبانشناسی تطبیقی، ۱۳(۱)، ۱۰۹-۱۳۱.

https://rjhll.basu.ac.ir/article_5275.html

میکده، س.، زومر، و.، و بتولی، س. ا. ح. (۱۴۰۲). مخچه و مطابقت دستوری در دوزبانه‌ها: شواهدی از قضاوت دستوری‌بودگی با استفاده از fMRI. علم زبان، ۱۰(۱۸)، ۳۰۹-۳۴۲.

https://ls.atu.ac.ir/article_16338.html

میکده، س.؛ زومر، و.، بتولی، س. ا. ح. (۱۴۰۳). پوتامن و درک جملات زبان اول و دوم: شواهدی از تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی. پژوهش‌های زبانشناسی، ۱۶(۱)، ۹۵-۱۱۰.

<https://doi.org/10.22108/jrl.2024.138007.1777>

References

- Alipour, A., & Agahheris, M. (2008). The study of the reliability and validity of the Edinburgh Handedness Questionnaire. *Journal of Psychological Sciences*, 6(22), 1. <https://www.magiran.com/volume/90156>. (In Persian)
- Allen, E. A., Erhardt, E. B., Damaraju, E., Gruner, W., ... & Calhoun, V. D. (2011). A baseline for the multivariate comparison of resting-state networks. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 5, 2. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2011.00002>
- Behzadi, Y., Restom, K., Liao, J., & Liu, T. T. (2007). A component based noise correction method (CompCor) for BOLD and perfusion based fMRI. *NeuroImage*, 37(1), 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.04.042>
- Berken, J. A., Chai, X., Chen, J. K., Gracco, V. L., & Klein, D., (2016). Effects of early and late bilingualism on resting-state functional connectivity. *Journal of Neuroscience*, 36, 1165-1172. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1960-15.2016>
- Biswal, B. B., Mennes, M., Zuo, X. N., ... & Milham, M. P. (2010). Toward discovery science of human brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(10), 4734-4739. <https://doi.org/10.1073/pnas.0911855107>
- Bolt, T., Nomi, J. S., Rubinov, M., & Uddin, L. Q. (2017). Correspondence between evoked and intrinsic functional brain network configurations. *Human Brain Mapping*, 38(4), 1992-2007. <https://doi.org/10.1002/hbm.23500>
- Churchland, M. M., Yu, B. M., Cunningham, J. P., ... & Shenoy, K. V. (2010). Stimulus onset quenches neural variability: A widespread cortical phenomenon. *Nature Neuroscience*, 13(3), 369-378. <https://doi.org/10.1038/nn.2501>
- Cole, M. W., Ito, T., Cocuzza, C., & Sanchez-Romero, R. (2021). The functional relevance of task-state functional connectivity. *The Journal of Neuroscience*, 41(12), 2684-2702. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1713-20.2021>
- Cona, G., & Semenza, C. (2017). Supplementary motor area as key structure for domain-general sequence processing: A unified account. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 72, 28-42. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.10.033>
- DeLuca, V., Rothman, J., Bialystok, E., & Pliatsikas, C. (2019). Redefining bilingualism as a spectrum of experiences that differentially affects brain structure and function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(15), 7565-7574. <https://doi.org/10.1073/pnas.1811513116>
- Di, X., Gohel, S., Kim, E.H., & Biswal, B.B. (2013). Task vs. rest-different network configurations between the coactivation and the resting-state brain networks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 493. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00493>
- Elliott, M. L., Knodt, A. R., Cooke, M., Kim, M. J., ... & Hariri, A. R. (2019). General functional connectivity: Shared features of resting-state and task fMRI drive reliable and heritable individual differences in functional brain networks. *NeuroImage*, 189, 516-532. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.068>

- Filippi, M., Valsasina, P., Misci, P., Falini, A., Comi, G., & Rocca, M. A. (2013). The organization of intrinsic brain activity differs between genders: A resting-state fMRI study in a large cohort of young healthy subjects. *Human Brain Mapping, 34*(6), 1330–1343. <https://doi.org/10.1002/hbm.21514>
- Foundas, A. L., Leonard, C. M., Gilmore, R., Fennell, E., & Heilman, K. M. (1994). Planum temporale asymmetry and language dominance. *Neuropsychologia, 32*(10), 1225–1231. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(94\)90104-x](https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)90104-x)
- Fox, M. D., & Raichle, M. E. (2007). Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional magnetic resonance imaging. *Nature Reviews Neuroscience, 8*(9), 700–711. <https://doi.org/10.1038/nrn2201>
- Friederici, A. D. (2018). The neural basis for human syntax: Broca's area and beyond. *Current Opinion in Behavioral Sciences, 21*, 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.03.004>
- Friederici, A. D., Chomsky, N., Berwick, R. C., Moro, A., & Bolhuis, J. J. (2017). Language, mind and brain. *Nature Human Behaviour, 1*, 713–722. <https://doi.org/10.1038/s41562-017-0184-4>
- Geschwind, N., & Levitsky, W. (1968). Human brain: Left-right asymmetries in temporal speech region. *Science, 161*(3837), 186–187. <https://doi.org/10.1126/science.161.3837.186>
- Goucha, T., & Friederici, A. D. (2015). The language skeleton after dissecting meaning: A functional segregation within Broca's Area. *NeuroImage, 114*, 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.04.011>
- Griffiths, T. D., & Warren, J. D. (2002). The planum temporale as a computational hub. *Trends in Neurosciences, 25*(7), 348–353. [https://doi.org/10.1016/s0166-2236\(02\)02191-4](https://doi.org/10.1016/s0166-2236(02)02191-4)
- Gullifer, J. W., Chai, X. J., Whitford, V., Pivneva, I., Baum, S., Klein, D., & Titone, D. (2018). Bilingual experience and resting-state brain connectivity: Impacts of L2 age of acquisition and social diversity of language use on control networks. *Neuropsychologia, 117*, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.037>
- He, B. J. (2013). Spontaneous and task-evoked brain activity negatively interact. *The Journal of Neuroscience, 33*(11), 4672–4682. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2922-12.2013>
- Hertrich, I., Dietrich, S., & Ackermann, H. (2020). The margins of the language network in the brain. *Frontiers in Communication, 5*, 519955. <https://doi.org/10.3389/fcomm.2020.519955>
- Hjelmervik, H., Hausmann, M., Osnes, B., Westerhausen, R., & Specht, K. (2014). Resting states are resting traits—an FMRI study of sex differences and menstrual cycle effects in resting state cognitive control networks. *PLoS One, 9*(7), e103492. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103492>
- Joly, O., Pallier, C., Ramus, F., Pressnitzer, D., Vanduffel, W., & Orban, G. A. (2012). Processing of vocalizations in humans and monkeys: A comparative fMRI study. *NeuroImage, 62*(3), 1376–1389. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.070>
- Ingalhalikar, M., Smith, A., Parker, D., Satterthwaite, T. D., ... & Verma, R. (2014). Sex differences in the structural connectome of the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111*(2), 823–828. <https://doi.org/10.1073/pnas.1316909110>
- Kannurpatti, S. S., Rypma, B. & Biswal, B. B. (2012). Prediction of task-related BOLD fMRI with amplitude signatures of resting-state fMRI. *Frontiers in Systems Neuroscience, 6*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2012.00007>
- Lang, E. W., Tomé, A. M., Keck, I. R., Górriz-Sáez, J. M., & Puntinet, C. G. (2012). Brain connectivity analysis: A short survey. *Computational Intelligence and Neuroscience, 2012*, 412512. <https://doi.org/10.1155/2012/412512>
- Li, L., Abutalebi, J., Zou, L., Yan, X., Liu, L., Feng, X., Wang, R., Guo, T., & Ding, G. (2015). Bilingualism alters brain functional connectivity between "control" regions and "language" regions: Evidence from bimodal bilinguals. *Neuropsychologia, 71*, 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.04.007>

- Liu, X., Tu, L., Wang, J., Jiang, B., ... & Huang, R. (2017). Onset age of L2 acquisition influences language network in early and late Cantonese-Mandarin bilinguals. *Brain and Language*, 174, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2017.07.003>
- Makoshi, Z., Kroliczak, G., & van Donkelaar, P. (2011). Human supplementary motor area contribution to predictive motor planning. *Journal of Motor Behavior*, 43(4), 303–309. <https://doi.org/10.1080/00222895.2011.584085>
- Meykadeh, S. (2021). An investigation of the effects of language proficiency and age of acquisition on neural organization for morphosyntactic processing using ERPs and fMRI. *Doctoral dissertation in Linguistics*. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian).
- Meykadeh, A., 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, 728549. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.728549>
- Meykadeh, S., Golfam, A., Batouli, S. A. H., & Sommer, W. (2023a). The neural basis of Number and Person phi-features processing: An fMRI study in highly proficient bilinguals. *Bilingualism: Language and Cognition*, 27(3), 306–321. <https://doi.org/10.1017/S1366728923000615>
- Meykadeh, S., Khadem, A., Sulpizio, S., & Sommer, W. (2023b). Functional connectivity during morphosyntactic processing: An fMRI study in balanced Turkish-Persian bilinguals. *Journal of Neurolinguistics*, 68, 101162. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2023.101162>
- Meykadeh, S., & Sommer, W. (2023). No sex differences in Phi-Features Processing in bilinguals: A functional magnetic resonance imaging (fMRI) Study. *Iranian Journal of Comparative Linguistics Research*. 13(25), 109-131. https://rjhll.basu.ac.ir/article_5275.html?lang=en (In Persian)
- 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/ls.2023.74871.1591> (In Persian)
- Meykadeh, S., Sommer, W., & Batouli, S. (2024). Putamen and L1-L2 sentence comprehension: Evidence from functional magnetic resonance mapping. *Journal of Researches in Linguistics*, 16(1), 95-110. <https://doi.org/10.22108/jrl.2024.138007.1777> (In Persian)
- Moffat, S. D., Hampson, E., & Lee, D. H. (1998). Morphology of the planum temporale and corpus callosum in left handers with evidence of left and right hemisphere speech representation. *Brain: A Journal of Neurology*, 121 (Pt 12), 2369–2379. <https://doi.org/10.1093/brain/121.12.2369>
- Moussa, M. N., Vechlekar, C. D., Burdette, J. H., Steen, M. R., Hugenschmidt, C. E., & Laurienti, P. J. (2011). Changes in cognitive state alter human functional brain networks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 83. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00083>
- Obleser, J., & Kotz, S. A. (2009). Expectancy constraints in degraded speech modulate the language comprehension network. *Cerebral Cortex*, 20(3), 633–640. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp128>
- Oldfield R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Popiel, N. J. M., Metrow, C., Laforge, G., Owen, A. M., Stojanoski, B., & Soddu, A. (2021). Exploring electroencephalography with a model inspired by quantum mechanics. *Scientific Reports*, 11(1), 19771. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97960-7>
- Pourmohammad, M. (2019). *Psycholinguistics*. Tehran: samt. (In Persian).
- Saur, D., Kreher, B. W., Schnell, S., Kümmerer, D., ... & Weiller, C. (2008). Ventral and dorsal pathways for language. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(46), 18035–18040. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805234105>
- Scofield, J. E., Johnson, J. D., Wood, P. K., & Geary, D. C. (2019). Latent resting-state network dynamics in boys and girls with attention-deficit/hyperactivity disorder. *PLoS One*, 14(6), e0218891. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218891>

- Sulpizio, S., Del Maschio, N., Del Mauro, G., Fedeli, D., & Abutalebi, J. (2020). Bilingualism as a gradient measure modulates functional connectivity of language and control networks. *NeuroImage*, 205, 116306. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116306>
- Tavares, V., Fernandes, L. A., Antunes, M., Ferreira, H., & Prata, D. (2022). Sex differences in functional connectivity between resting state brain networks in autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 52(7), 3088–3101. <https://doi.org/10.1007/s10803-021-05191-6>
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Herve, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houde, O., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage*, 30(4), 1414–1432. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.11.002>
- Welniarz, Q., Gallea, C., Lamy, J. C., Méneret, A., ... & Roze, E. (2019). The supplementary motor area modulates interhemispheric interactions during movement preparation. *Human Brain Mapping*, 40(7), 2125–2142. <https://doi.org/10.1002/hbm.24512>
- Xiao, Y., Friederici, A. D., Margulies, D. S., & Brauer, J. (2016). Development of a selective left-hemispheric fronto-temporal network for processing syntactic complexity in language comprehension. *Neuropsychologia*, 83, 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.003>
- Zaccarella, E., Meyer, L., Makuuchi, M., & Friederici, A. D. (2017). Building by syntax: The neural basis of minimal linguistic structures. *Cerebral Cortex*, 27(1), 411–421. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv234>.
- Zhang, S., Li, X., Lv, J., Jiang, X., Guo, L., & Liu, T. (2016). Characterizing and differentiating task-based and resting state fMRI signals via two-stage sparse representations. *Brain Imaging and Behavior*, 10, 21–32. <https://doi.org/10.1007/s11682-015-9359-7>
- Zou, L., Abutalebi, J., Zinszer, B., Yan, X., Shu, H., Peng, D., & Ding, G. (2012). Second language experience modulates functional brain network for the native language production in bimodal bilinguals. *NeuroImage*, 62(3), 1367–1375. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.062>