

The Cerebellum and Grammatical Agreement in Bilinguals: Evidence from Grammaticality Judgments Using fMRI

Simin Meykadeh* 

Ph.D. in Linguistics, Tarbiat Modares
University, Tehran, Iran

Werner Sommer 

Professor, Department of Psychology,
Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin,
Germany

Seyed Amirhossien Batouli 

Assistant Professor, Department of
Neuroscience, Tehran University of
Medical Sciences, Tehran, Iran

Abstract

The cerebellum is linked to all the key regions of the language control network. Currently, the cerebellum is recognized to be involved in the networks that handle grammatical aspects. Clinical and neuroimaging studies have confirmed cerebellar contributions to grammar processing. The present study intended to investigate the activity of the cerebellum in alternating L1-L2 processing in balanced bilinguals. We selected 35 Turkish-Persian bilinguals (21 women) who had learned their second language at the age of 7. Based on the Bilingual

- The present article is taken from the Ph.D. Dissertation in Linguistics at Tarbiat Modares University in Tehran

*Corresponding Author: a.meykadeh@modares.ac.ir

How to Cite: Meykadeh, S., Sommer, W., & Batouli, A. (2023). The Cerebellum and Grammatical Agreement in Bilinguals: Evidence from Grammaticality Judgments Using fMRI. *Language Science*, 10 (18), 309-342. doi: 10.22054/LS.2023.74871.1591.

Dominance Scale, there was no significant difference between the high proficiency levels of the participants in L1 (Turkish) and L2 (Persian). Participants carried out an auditory grammaticality judgment task in an alternative language-switching paradigm while fMRI images were acquired using a standard protocol. Combining a whole-brain and regions-of-interest (ROIs) approach, we examined event-related fMRI during syntactic processing. Following the identification of the activity of the bilateral cerebellum at the whole-brain level according to the Harvard-Oxford Atlas in FSL, percent signal change was extracted per participant as an intensity measure in the cerebellar region and statistically analyzed in SPSS. The results indicate a right hemispheric superiority in bilingual language processing, confirming that the right cerebellum is more involved in language control. Furthermore, bilinguals have shown stronger activation for L1 as compared to L2 in the cerebellum, substantiating the reversed language dominance effects.

Keywords: balanced bilinguals, grammatical agreement, right cerebellum, L1, fMRI

1. Introduction

The cerebellum, located at the back of the brain beneath the occipital lobes, contains approximately 80% of all brain neurons, but constitutes only approximately 10% of brain volume. Despite the fact that this brain region was previously known as a nervous system for movement control, many studies have confirmed that the cerebellum plays an important role in behavioral, sensory, and cognitive functions, including non-motor language functions. Hemispheric cerebellum asymmetry of functional activation during language processing is also reported. Due to the role of the cerebellum

in language processing, we examined its contribution to morphosyntactic processing.

The main research questions are as follows:

RQ1. To what extent is the Cerebellum involved in the processing of grammatical agreement by balanced bilinguals?

RQ2. Does the left and right cerebellum act differently for the simultaneous processing of the L1 and L2?

To answer the research questions guiding this study, a bilingual task with an alternating language-switching paradigm was developed. In this task, brain imaging was performed using event-related fMRI while the participants listened to a total of 128 sentences in two Turkish and Persian languages.

2. Literature Review

Using normal participants, Kovelman et al. (2008) examined 11 Spanish-English bilinguals and 10 English monolinguals during a syntactic judgment task. Bilinguals received their bilingual exposure before age 5. Monolinguals were presented with 40 English sentences and bilinguals were presented with 40 English and 40 Spanish sentences. Based on their findings, although the activity of the cerebellum was detected in both bilinguals and monolinguals, bilinguals showed a stronger effect in the cerebellum as compared to the monolinguals. Given that no neuroimaging study to date has examined the pattern of brain activity within the same individuals in *Planum Temporale*, we aimed to contribute to the literature about morphosyntactic analysis of L1 and L2 in two Subject-Object-Verb (SOV) languages.

3. Methodology

In this section, the applied methods and procedures including the choice of participants and stimuli followed by a description of the fMRI data acquisition and preprocessing are presented.

3.1. Participants

To allow for reliable ROI-based analysis, 36 right-handed and balanced Turkish-Persian bilingual students were recruited to participate in this study. All participants were native speakers of Turkish and learned Persian at school from the age of seven. Participants' language proficiency levels were assessed by the Bilingual Dominance Scale (BDS) and no significant difference was observed between Turkish and Persian (i.e., between L1 and L2) in language dominance.

3.2. Materials and Procedure

During a bilingual grammaticality judgment task, participants heard 128 test sentences (64 in L1 and 64 in L2, with 50% violation per language) and made their judgment by pressing a button. Stimuli were presented using the Psychtoolbox in MATLAB via headphones. Stimuli were randomized for each condition, but alternated in a fixed sequence for language.

3.3. Imaging

MRI data were collected in NBML, Tehran, Iran, using a Siemens Prisma 3T scanner with a 20-channel head coil. For each participant, a high-resolution T1-weighted anatomical scan was acquired (TR = 1800msec, TE = 3053 msec, flip angle: 7°, 192 axial slices, slice thickness = 1 mm, field of view (FOV) = 256 mm², 256 × 256

acquisition matrix, voxel size: $1 \times 1 \times 1$ mm). After the anatomical scan, participants underwent a 21.5-min fMRI scan that used a whole brain echo planar imaging (EPI) sequence (TE: 30 ms, TR: 3000 ms, flip angle: 90° , slice thickness: 3 mm, voxel size: $3 \times 3 \times 3$ mm, matrix size: 64×64 , FOV: 192 mm^2 , 430 volumes and 45 axial slices per volume).

3.4. Data preprocessing

Processing of the fMRI data was carried out using FEAT in FSL. Preprocessing steps included motion correction, slice-timing correction, non-brain removal using BET, spatial smoothing (6 mm FWHM), normalization, temporal filtering (with $\sigma = 50.0$ s), and exploratory ICA-based data analysis. Statistical analyses of fMRI data were conducted using general linear modeling (GLM), as implemented in FSL. Z statistic images were thresholded using clusters determined by $Z > 3.1$ and a (corrected) cluster significance threshold of $P < 0.05$. After detecting the Cerebellum activation in the whole-brain analysis, percent signal changes were extracted as an intensity measure in this brain region. All statistical analyses were conducted in IBM SPSS Statistics 26.

4. Results

In this section, results are presented starting with the whole-brain findings followed by the detection of cerebellum activity.

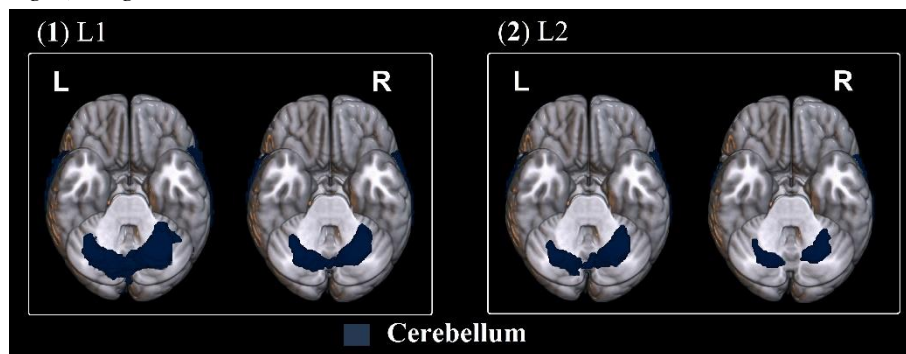
4.1. Whole-brain results

Widespread significant BOLD activation was found during the presentation of the sentences of L1 and L2 in the Cerebellum relative to the baseline (Figure 1). Visual inspection of panels 1 and 2 indicates more activity in L1 as compared to L2. Therefore, an ROI-based

analysis was performed for both languages in the bilateral cerebellum to determine the activity pattern of the stimuli in this brain area.

Figure 1.

Whole-brain clusters (dark blue) of BOLD activation for (A) L1 and (B) L2 sentences in the Cerebellum, projected onto surface templates using MRICroGL software in two experimental conditions including (from left to right) Ungrammatical and Grammatical conditions relative to the baseline.

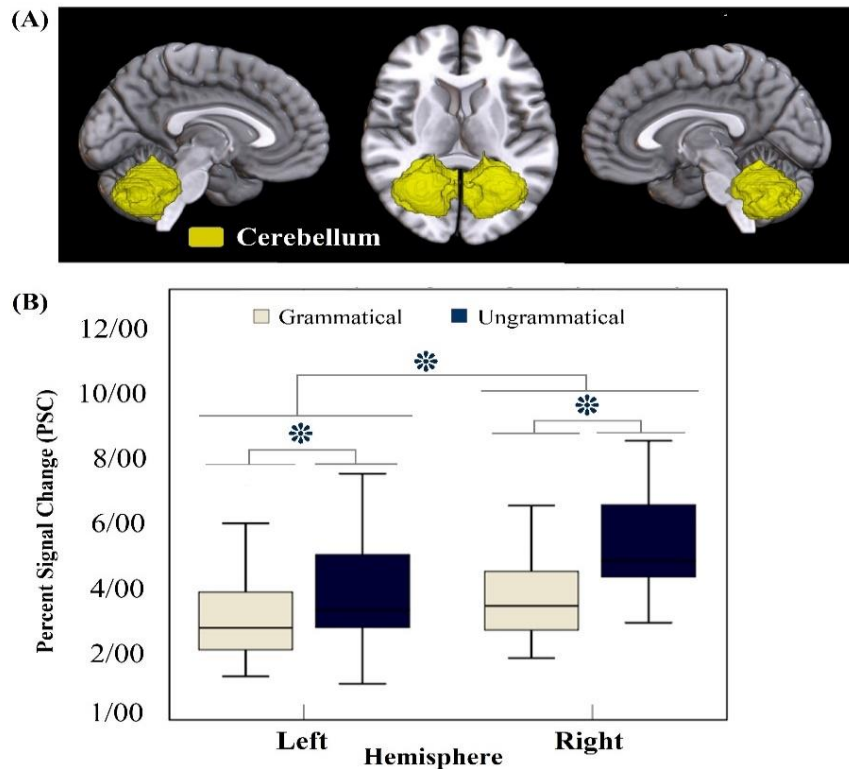


4.2. Results of the region of Cerebellum

The location of the Cerebellum is rendered in Figure 2. A significant main effect of Grammaticality was found, indicating a stronger activation for ungrammatical as compared to grammatical conditions (4.510 vs. 3.712 PSC). There was also a significant main effect of Language, indicating that the L1 conditions generated stronger effects than the L2 conditions (4.312 vs. 3.911 PSC). The main effect of the Hemisphere was also significant with a higher PSC for the right (4.465) than that for the left hemisphere (3.756). A separate *t*-test of the grammaticality effects per language in Cerebellum showed that it was significant for L1 but not for L2. In L1, post-hoc analysis indicated a right hemispheric superiority in our participants.

Figure 2.

(A). Location of Cerebellum (in yellow). (B) Box plots of percent signal change (PSC) values for LI in Cerebellum per hemisphere and condition. * $p < 0.05$



5. Conclusion

The present ROI-based analysis has two important findings. First, the grammaticality effect was detected in the right hemisphere, which confirms previous studies in normal (Marien et al. 2014) and patients (Silveri et al., 1994; Marien et al., 1996; Gasparini et al. ., 1999). The most important argument in support of the role of the right cerebellum in the present study is the simultaneous activity of the Pars opercularis, posterior Superior Temporal Gyrus (pSTG) and the right Cerebellum (see also Meykadeh et al., 2021a) which is consistent with the findings


of Berken et al. 2016. Berken and his colleague examined the French-English bilinguals during resting-state fMRI and observed functional connections between the left inferior frontal gyrus and the bilateral Cerebellum. Second, the grammaticality effect was significantly stronger in L1 than in L2 in the Cerebellum region. In line with the activity threshold hypothesis (Paradis, 1993; 2001), our participants regarded Turkish (L1) as the base language and Persian (L2) as the guest language during language exchange.


Acknowledgments


This work was supported by the Cognitive Sciences and Technologies Council of Iran (Grant agreement, no. 7401); a Doctoral Dissertation Grant from the Department of Linguistics, Tarbiat Modares University, a Scholarship Fund (Ph.D. Visiting Scholar Program) from the Iranian Ministry of Science, Research and Technology.



مخچه و مطابقت دستوری در دوزبانه‌ها: شواهدی از قضاوت دستوری بودگی با استفاده از fMRI

سیمین میکده*  دکتری زبان‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

ورنر زومر  استاد گروه روان‌شناسی، دانشگاه هومبولت برلین، برلین، آلمان

سیدامیر حسین بتولی  استادیار گروه علوم اعصاب، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

چکیده

مخچه با تمام نواحی کلیدی شبکه کنترل زبان در ارتباط است. در حال حاضر، نقش مخچه به‌عنوان بخشی از شبکه‌های مسئول پردازش ویژگی‌های دستوری تشخیص داده شده است. مطالعات بالینی و تصویربرداری نیز مشارکت مخچه را در پردازش دستور تأیید کرده‌اند. پژوهش حاضر در صدد است تا فعالیت مخچه را در پردازش همزمان زبان اول و دوم در افراد دوزبانه متوازن بررسی کند. به‌این منظور، ۳۶ دوزبانه ترکی-فارسی (۲۱ زن) انتخاب شدند که زبان دوم‌شان را به‌طور رسمی از سن ۷ سالگی آموخته بودند. بر اساس شاخص تسلط دوزبان، در شرکت کنندگان هیچ تفاوتی بین سطوح بالای بستگی به زبان اول (ترکی) و زبان دوم (فارسی) مشاهده نشد. شرکت کنندگان یک آزمون قضاوت دستوری بودگی شنیداری با الگوی زبان‌گردانی جایگزین را اجرا کردند و تصاویر fMRI با استفاده از یک پروتکل استاندارد اخذ می‌شد. با دو رویکرد کل-مغز و ناحیه‌موردنظر، fMRI وابسته‌به‌رویداد در حین پردازش نحوی بررسی شد. به‌دنبال شناسایی فعالیت دوجانبه مخچه در رویکرد کل-مغز، درصد تغییر سیگنال به‌عنوان معیار «شدت» برای هر شرکت‌کننده در ناحیه مخچه مطابق با اطلس هاروارد-آکسفورد در FSL استخراج و تجزیه و تحلیل آماری آن با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. نتایج حاضر نشان از برتری نیمکره راست در پردازش زبان دوزبانه‌ها داشت که این مسئله مؤید آن است که مخچه راست در کنترل زبان دخالت بیشتری دارد. افزون‌براین، دوزبانه‌ها فعالیت بیشتری را برای زبان اول در مقایسه با زبان دوم در ناحیه مخچه نشان دادند که این نتیجه بر تأثیرات تسلط زبان معکوس در دوزبانه‌های ترکی-فارسی صحه می‌گذارد.

کلیدواژه‌ها: دوزبانه‌های متوازن، مطابقت دستوری، مخچه راست، زبان اول، fMRI.

– مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری زبان‌شناسی در دانشگاه تربیت مدرس تهران است.

* نویسنده مسئول: a.meykadeh@modares.ac.ir

۱. مقدمه

مخچه^۱ بخشی از مغز است که در قاعدهٔ جمجمه و پشت ساقهٔ مغز قرار دارد. اگرچه مخچه تقریباً ۱۰٪ از کل حجم مغز را تشکیل می‌دهد، اما حدوداً ۸۰٪ از کل نورون‌های مغز را دربرمی‌گیرد (Herculano-Houzel, 2010; Herculano-Houzel, 2012). مخچه عمدتاً از طریق دو مدار چندسیناپسی با مخ^۲ طرف مقابل^۳ تعامل دارد: یک کانال ورودی که از پل مغز^۴ عبور می‌کند و سپس به مخچه می‌رسد و یک کانال خروجی که ابتدا به هسته‌های عمیق مخچه^۵، سپس به تالاموس^۶ و در نهایت، به سمت قشر مخ می‌رود (Strick, 1985; Buckner, 2013). علیرغم اینکه این ناحیهٔ مغزی پیشتر به‌عنوان دستگاهی عصبی برای کنترل حرکت شناخته می‌شد، مطالعات فراوانی تأیید کرده‌اند که مخچه نقش مهمی در کارکردهای رفتاری، حسی و شناختی، از جمله کارکردهای زبانی غیرحرکتی دارد (De Smet et al., 2013; Mariën et al., 2014; Mariën & Borgatti, 2018).

مسئلهٔ مهم دیگر، یکسویه‌شدگی^۷ مخچه است و اینکه آیا مخچه به‌صورت دو طرفه در کارکردهای شناختی متمایز دخیل است. برخی مطالعات درگیری مخچهٔ چپ را در فرایندهای فضایی شناختی نشان داده‌اند. به‌عنوان نمونه، ایمامیزو^۸ و همکاران (2003) در یک تکلیف ردیابی^۹ با ۷ شرکت‌کنندهٔ سالم ژاپنی، با محاسبهٔ میانگین حجم فعال مخچهٔ چپ و راست دریافتند که میانگین حجم مخچهٔ چپ ۵/۷۶ سانتی‌متر مکعب و میانگین حجم مخچهٔ راست ۳/۷۹ سانتی‌متر مکعب بود. اگرچه مخچه در هر دو نیمکره فعال شده بود، اما فعالیت مخچهٔ چپ قوی‌تر بود. ازسوی دیگر، ماریان^{۱۰} و همکاران (2014) در یک مقالهٔ مروری از ارتباط مخچهٔ راست با پردازش زبان حمایت کردند. در حوزهٔ دوزبانگی

-
1. cerebellum
 2. cerebrum
 3. contralateral
 4. pons
 5. deep cerebellar nuclei
 6. thalamus
 7. lateralization
 8. Imamizu, H.
 9. tracking task
 10. Mariën, P.

نیز استدلال شده است که در تکالیف دوزبانه بار^۱ زبان گردانی^۲ می تواند به عنوان یک شاخص رفتاری برای کنترل زبان دوزبانه ها در نظر گرفته شود (Bialystok et al., 2007; Bialystok et al., 2006). با توجه به اهمیت و نقش مخچه در پردازش زبان، مطالعه حاضر درصدد است تا عملکرد این ناحیه مغزی را حین پردازش نحوی زبان اول و دوم در افراد دوزبانه بررسی کند.

شواهد آسیب شناختی^۳ نیز حاکی از نقش ضایعات مخچه ای در اختلالات زبانی است. سیلوری^۴ (2021) در مقاله مروری خود با بررسی ۵۰ مقاله که بین سال های ۱۹۶۹ تا ۲۰۲۰ منتشر شده بودند، به این نتیجه رسید که علت برخی از اختلالات مربوط به تولید زبان (از جمله اختلالات گفتار، روانی کلمه و ساخت جمله)، آسیب به مخچه یا هسته های قاعده ای^۵ بوده است.

جاستس^۶ (2004) نیز ۳ عامل را در تغییرات مطابقتی دستوری ناشی از آسیب های مخچه ای دخیل می داند: یک، محدودیت در پردازش نحوی ممکن است از محدودیت در بازنمایی واجی، بازیابی واژگانی یا حافظه فعال کلامی نشأت گرفته باشد. دو، بر اساس مطالعات تصویربرداری مغز در حین اجرای انواع تکالیف، نیمکره های مخچه مکرراً با لوب های پیشانی جانبی^۷ طرف مقابل تعامل دارند. با استفاده از دادگان تصویربرداری شدید مغناطیسی حالت استراحت^۸، اتصالات کارکردی^۹ بین شکنج فرونتال تحتانی^{۱۰} چپ و مخچه چپ و راست در دوزبانه های فرانسوی - انگلیسی مشاهده شد (Berken et al., 2016). این محققان دو گروه از افراد دوزبانه را آزمودند: یک گروه ۱۶ نفره از دوزبانه های همزمان^{۱۱} که هر دو زبان فرانسه و انگلیسی را از بدو تولد آموخته بودند و یک

-
1. cost
 2. language switching
 3. pathology
 4. Silveri, M. C.
 5. basal ganglia
 6. Justus, T.
 7. lateral-frontal lobes
 8. resting-state functional Magnetic Resonance Imaging (*rs-fMRI*)
 9. functional connectivity
 10. inferior-frontal cortex
 11. simultaneous bilinguals

گروه ۱۸ نفره از دوزبانه‌های متوالی^۱ که زبان دوم (فرانسه یا انگلیسی) را بعد از سن ۵ سالگی آموخته بودند. البته، آنها گزارش کردند که قدرت اتصالات کارکردی در دوزبانه‌های همزمان بیشتر بود. سوم، مطالعات موردی که به طور مستقیم اختلالات دستوری و نحوی را به علت ضایعات مخچه‌ای گزارش کرده‌اند. در سال ۱۹۹۴ گزارش شد که یک بیمار ایتالیایی زبان در پی صدمه مخچه راست، دچار دستورپیشی^۲ شده است (Silveri et al., 1994). ماریان و همکاران (1996) نیز یک بیمار هلندی زبان را توصیف کردند که از ناحیه مخچه راست آسیب دیده بود و عملکرد ضعیفی در درک نحوی داشت. گسپرینی^۳ و همکاران (1999) نیز، یک بیمار ایتالیایی زبان را گزارش کردند که بعد از ضایعه مخچه راست دچار اختلالات دستوری شده بود.

در راستای پژوهش حاضر، جاستس (2004) برای نخستین بار با تمرکز بر جنبه‌های صرفی مطابقت دستوری، ۱۶ بیمار انگلیسی زبان با ضایعات مخچه‌ای را به همراه یک گروه کنترل ۱۶ نفره مطالعه کرد. گروه اصلی شامل ۳ بیمار با ضایعه مخچه راست، ۳ بیمار با ضایعه مخچه چپ، ۱ بیمار با ضایعه مخچه میانی و ۹ بیمار با ضایعه مخچه چپ و راست بود. ۳ بیمار هم دوزبانه انگلیسی - اسپانیایی بودند. یک تکلیف قضاوت دستوری بودگی شنیداری^۴ شامل به کارگیری تکواژهای دستوری و ترتیب‌واژگان بنیادی^۵ برای همه شرکت‌کنندگان اجرا شد. افراد باید در مورد شکل‌گیری درست/نادرست جملات تصمیم‌گیری می‌کردند. نتایج این آزمایش نشان داد که (۱) بیماران نسبت به گروه کنترل عملکرد ضعیف‌تری داشتند؛ (۲) در بیماران تشخیص خطای مطابقت دشوارتر از تشخیص خطای ترتیب واژه بود؛ (۳) عملکرد بیماران دچار ضایعه مخچه راست ضعیف‌تر از بیماران دچار ضایعه مخچه چپ بود. براین اساس، جاستس (2004) نتیجه گرفت که توانایی بیماران مخچه‌ای همانند بیماران بروکایی^۶ برای تشخیص جملات دستوری از غیردستوری کاهش یافته است.

-
1. sequential bilinguals
 2. agrammatism
 3. Gasparini, M.
 4. auditory grammaticality judgment
 5. canonical word-order
 6. Broca patients

در حوزه دوزبانگی و افراد سالم نیز، برخی پژوهش‌ها فعالیت ناحیه مخچه را گزارش کرده‌اند، اما مطالعاتی که صرفاً به یک گروه از افراد دوزبانه و با محوریت پردازش نحوی پرداخته باشند، بسیار محدودند.^۱ جهت آشنایی خوانندگان، نمونه مقاله‌ای بررسی می‌شود که نسبتاً قرابت بیشتری با مطالعه حاضر دارد. کاولمان^۲ و همکاران (2008) ۱۱ نفر از دوزبانه‌های اسپانیایی - انگلیسی را به همراه یک گروه کنترل ۱۰ نفره تک‌زبان انگلیسی در حین یک تکلیف قضاوت نحوی آزمودند. افراد دوزبانه، هر دو زبان اول و دوم را از بدو تولد آموخته بودند. به افراد تک‌زبان ۴۰ جمله انگلیسی و به افراد دوزبانه ۴ جمله انگلیسی و ۴۰ جمله اسپانیایی ارائه شد. بر مبنای یافته‌های این پژوهش، اگرچه فعالیت مخچه در همه افراد تشخیص داده شد، اما دوزبانه‌ها در مقایسه با تک‌زبان‌ها فعالیت بیشتری را در ناحیه مخچه نشان دادند. در همین راستا، پلیاتسیکاس^۳ و همکاران (2014) در یک مطالعه ریخت‌شناسی^۴ و کسل‌محور^۵ ساختاری با هدف بررسی نقش مخچه در پردازش زبان، دو گروه از افراد دوزبانه و تک‌زبان را آزمایش کردند. گروه اول شامل ۱۷ نفر از دوزبانه‌های یونانی - انگلیسی با میزان بسندگی بالا بود که زبان انگلیسی را (به‌عنوان زبان دوم) از سن ۶ سالگی آموخته بودند و گروه دوم شامل ۲۲ نفر تک‌زبان انگلیسی زبان بود. نتایج این تحقیق نشان داد که حجم ماده خاکستری در افراد دوزبانه در مقایسه با افراد تک‌زبان بیشتر است.

در بافت دوزبانگی، کنترل شناختی^۶ یک عامل اساسی در توانش^۷ زبان به شمار می‌رود (Lerman & Obler, 2017). دوزبانگی منابع حافظه فعال را برای مدیریت زبان‌هایی که به‌طور پیوسته برای گزینش رقابت می‌کنند، به کار می‌گیرد (Antón et al., 2019). بر اساس فرضیه آستانه فعالیت^۸ (Paradis, 1993; 2001)، در حین زبان‌گردانی،

۱. اغلب پژوهشگران یا دو گروه افراد دوزبانه با میزان بسندگی مختلف (مثلاً بسندگی بالا و پایین) را به کار گرفته‌اند یا دو گروه با سنین یادگیری متفاوت.

2. Kovelman, I.
3. Pliatsikas, C.
4. morphometry
5. voxel-based
6. cognitive control
7. competence
8. activation threshold hypothesis

دوزبانه‌ها یک زبان را به‌عنوان زبان پایه^۱ انتخاب می‌کنند (غالباً زبان مادری) و زبان دیگر را به‌عنوان زبان مهمان^۲ در نظر می‌گیرند. بنابراین، هر دو زبان فعال هستند، ولی زبان پایه فعالیت بیشتری دارد (Green, 1998). فعالیت بیشتر زبان پایه منجر به یک اثر نامتقارن می‌شود که در حین پردازش جملات زبان دوم باید مهار شود. هنگامی که دوزبانه‌ها در تلاش‌اند تا زبان اولشان را بازیابی کنند، دسترسی به بازنمایی‌های مهارشده در زبان اول زمان‌بر خواهد بود (Zhu et al., 2020). مطالعه دوزبانه‌های چینی - انگلیسی تأیید کرد که کنترل زبانی مرتبط با زبان گردانی، الگوهای فعالیت متفاوتی را در افراد دوزبانه ایجاد می‌کند (Wang et al., 2009).

در پژوهش حاضر، سخنگویان دوزبانه ترکی - فارسی مطالعه شدند. زبان‌های ترکی و فارسی مشخصه‌های دستوری مشترکی دارند که این مسأله عامل مهمی در کنترل پردازش زبان دوم محسوب می‌شود. در حالت بی‌نشان، هر دو زبان دارای ترتیب واژه فاعل - مفعول - فعل^۳ هستند و از ویژگی‌های نحوی خاصی مانند مطابقت فعلی^۴ پیروی می‌کنند. مطابقت فاعل - فعل در زبان فارسی و ترکی مستلزم تطابق مشخصه‌های شخص و شمار است. بنابراین، در هر دو زبان، فعل به‌صورت اجباری با فاعل جاندار در مشخصه‌های شخص و شمار مطابقت می‌کند و برای سه شخص مفرد (من، تو، او) و جمع (ما، شما، ایشان) صرف می‌شود. بر اساس توصیف نحو مشترک^۵ (Hartsuiker et al., 2004)، مادامیکه بازنمایی‌های نحوی بین زبان‌ها مشابه باشند، دوزبانه‌ها بازنمایی‌ها را بین زبان‌ها به اشتراک می‌گذارند. لذا، باتوجه به کنترل نوع زبان در پژوهش حاضر، هرگونه فعالیت مشاهده‌شده برای زبان‌های اول و دوم به نوع زبان قابل انتساب نیست.

بدین ترتیب، مطالعه حاضر برای نخستین بار با محوریت بررسی پردازش نحوی در یک گروه از دوزبانه‌های متوازن^۶ و سالم^۷ اجرا شد تا کارکرد مخچه را برای مطابقت دستوری به

-
1. base language
 2. guest language
 3. subject-object-verb (SOV)
 4. verbal agreement
 5. shared syntax account
 6. balanced bilingual

دوزبانه متوازن به کسی اطلاق می‌گردد که تسلطش به هر دو زبان یکسان است (پورمحمد، ۱۳۹۷).

7. normal

روش تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی^۱ (fMRI) آزمایش کند. شیوه fMRI روشی کارآمد در تصویربرداری از مغز با توانایی ثبت فعالیت عصبی با رزولوشن مکانی بالا و مزیت غیرتهاجمی بودن است (Ogawa et al., 1993). شرکت کنندگان حاضر از بدو تولد زبان ترکی را آموخته بودند و از حدود ۷ سالگی که وارد دبستان شدند، شروع به یادگیری رسمی زبان فارسی کردند. مشخصاً، مطالعه این جمعیت بدین دلیل حائز اهمیت است که اگرچه آنها یادگیری زبان دوم را نسبتاً دیر شروع کرده‌اند، اما در ادامه به سطح بسیار بالایی از بسندگی رسیده بودند. مسأله دیگری که ضرورت اجرای این مطالعه را موجه می‌سازد گستردگی زبان ترکی در ایران است.

فارسی زبان رسمی ایران است و زبان مادری تقریباً ۶۰ درصد جمعیت ایران محسوب می‌شود، این در حالی است که زبان ترکی با میزان تقریباً ۲۰ درصد، در رده دوم قرار دارد (Comrie, 2009: 446). زبان فارسی زبان دوم تقریباً ۴۰ درصد از کل جمعیت قلمداد می‌شود و تعداد قابل ملاحظه‌ای از این سخنگویان در سن ۷ سالگی (در بدو ورود به مدرسه) و با شروع آموزش رسمی با زبان فارسی مواجه می‌شوند (میکده و زومر، ۱۴۰۲)، لذا پژوهش‌هایی از این دست می‌توانند درک عمیق‌تری از تأثیر یادگیری زبان دوم در سنین مدرسه و تبعات آتی آن بر آموزش فراهم کنند.

در پژوهش حاضر و با پاسخ به دو پرسش زیر نقش ناحیه مخچه در پردازش زبان‌های اول و دوم با روش fMRI در دوزبان‌های متوازن ترکی - فارسی که از سن ۷ سالگی رسماً زبان دوم را آموخته بودند، بررسی می‌شود:

الف) تا چه میزان ناحیه مخچه در پردازش مطابقت دستوری در افراد دوزبان نقش دارد؟
ب) چه تفاوتی در کارکرد مخچه چپ و راست برای پردازش همزمان زبان‌های اول و دوم وجود دارد؟

1. functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

۲. روش پژوهش

در شش زیربخش زیر جزئیات مربوط به گزینش شرکت کنندگان، مواد آزمون، نحوه گردآوری داده‌ها، پروتکل تصویربرداری، پیش‌پردازش و پردازش تصاویر و نیز تحلیل‌های آماری به تفصیل تشریح خواهد شد.

۲-۱. شرکت کنندگان

بر اساس فراخوان، دانشجویان واجد شرایط مقطع دکتری دعوت به همکاری در یک پژوهش تجربی شدند. از بین داوطلبان، ۳۶ دانشجوی ترک‌زبان (۲۱ زن و ۱۵ مرد به ترتیب با میانگین سنی و انحراف معیار $27/71 \pm 3/5$ و $26/87 \pm 2/97$ ، در محدوده سنی ۲۲-۳۴ سال) انتخاب شدند. در مطالعات fMRI، حداقل حجم نمونه برای هر گروه ۱۵ نفر پیشنهاد شده است (Friston, 2012). همه افراد سالم و طبق گزارش فردی از شنوایی طبیعی نیز برخوردار بودند. شروط ورود آزمودنی‌ها به این مطالعه از این قرار بود: متولد و ساکن استان‌های ترک‌زبان ایران تا سن ۷ سالگی، راست‌دستی، مبتلا نبودن به بیماری‌های زبانی - روانی، حداقل ۵ سال سکونت در شهرهای فارسی‌زبان، شروع آموزش رسمی زبان فارسی در سن ۷ سالگی و داشتن والدین ترک‌زبان. بنابر اظهارات شخصی، همه شرکت کنندگان ترک‌زبان در زندگی روزمره خود با زبان ترکی ارتباط برقرار می‌کردند. پس از غربالگری اولیه، افراد ملزم به شرکت در جلسه ارزیابی رفتاری بودند که این جلسه در گروه زبان‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس برگزار شد. بر اساس آزمون دست‌برتری ادینبورگ^۱، همه افراد راست‌دست بودند.

به منظور سنجش ظرفیت حافظه فعال، تکلیف فراخنای خواندن^۲ (خدادادی و همکاران، ۱۳۹۳) برای همه افراد اجرا شد. کسب امتیاز ۵۰ (از ۱۰۰) الزام‌آور بود و همه افراد موفق به کسب امتیاز لازم شدند. خودارزیابی بسندگی در زبان‌های فارسی و ترکی با اختلاف اندک بین درک و تولید زبان (۶ در برابر ۵) عالی بود. مصاحبه‌هایی به زبان‌های فارسی و ترکی توسط یک مصاحبه‌گر زبان‌شناس فارسی‌زبان و یک دانشجوی دکتری ترک‌زبان انجام شد. در بخشی از این مصاحبه، یک آزمون قضاوت دستوری بودگی شبیه‌سازی شده

1. *Edinburgh handedness inventory* (EHI)

2. reading span test

از شرکت کنندگان اخذ شد. با توجه به ماهیت آزمایش اصلی، این خرده آزمون (شامل ۳۰ آیتم) به صورت شنیداری به زبان‌های ترکی و فارسی ارائه و بر این اساس، توانمندی شنیداری و دستوری افراد در هر دو زبان «عالی» تشخیص داده شد.

موقعیت اجتماعی - اقتصادی افراد بر اساس شاخص چهارعاملی جایگاه اجتماعی - اقتصادی (Hollingshead, 1975) بررسی و هیچ اختلافی بین شرکت کنندگان پژوهش حاضر و گروه کنترل (افراد تک‌زبان فارسی‌زبان با میزان بسندگی زبانی بالا) مشاهده نشد (برای جزئیات بیشتر به پژوهش میکده^۱ و همکاران (2021b) مراجعه شود). میزان تسلط دوزبانه‌ها به زبان‌های اول و دوم بر اساس معیار تسلط دوزبانه (Dunn & Fox Tree, 2009) ارزیابی و اختلاف معناداری^۲ مشاهده نشد. همه افراد با رضایت کتبی در آزمایش شرکت و حق الزحمه حضور دریافت کردند. پژوهش حاضر در کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی ایران (مطابق با اعلامیه هلسینکی) تصویب شده و دارای کد IR.IUMS.REC.1398.465 است.

۲-۲. مواد آزمون

به منظور بررسی پردازش نحوی سخنگویان دوزبانه یک تکلیف قضاوت دستوری بودگی شنیداری طراحی شد (Meykadeh et al., 2021a). محرک‌ها شامل 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 فعل - فاعل بودند. همه محرک‌ها به لحاظ معنایی درست بودند و محرک‌های به لحاظ نحوی درست و نادرست از یکدیگر مشتق نشدند. بنابراین، هر محرک، چه درست و چه نادرست فقط یکبار ارائه شد. زمان گذشته ساده افعال (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. همانگونه که در جدول (۱) نشان داده شد^۳، در مقابل، در شرایط نقض مشخصه‌های شخص و شمار،

1. Meykadeh, A.

2. significant

۳. لیست کامل محرک‌ها در مقاله میکده و همکاران (2023a) ارائه شده است.

فاعل اول و سوم شخص مفرد با افعال اول و سوم شخص جمع و فاعل اول و سوم شخص جمع با افعال اول و سوم شخص مفرد همراه بودند. جملات توسط یک خانم با ریتم طبیعی خوانده و در استودیوی صدا برداری با فرمت WAV ذخیره شد (نرخ نمونه برداری ۱۶ بیت، ۴۴ کیلوهرتز). روایی محتوایی تکلیف قضاوت دستوری بودگی به تأیید متخصصین حوزه نحوه رسید و میزان اعتبار آن با استفاده از آزمون آلفای کرونباخ^۱ ۰/۹۳ به دست آمد.

جدول ۱. مثال‌هایی از مواد آزمون در زبان‌های ترکی و فارسی با حرف‌نویسی و ترجمه انگلیسی

زبان اول	زبان دوم
<p>نقض مطابقت دستوری</p> <p>*بیز.پل ۱. کیتا بلاریمیزی گتیردیم. ۱. sg.</p> <p>*Biz kitâb-lar-i-mizi gatirdim.</p> <p>We book-PL-HI-OBJ-CLT.Def bring-PAST-1SG</p> <p>(We brought our books)</p>	<p>*ما.پل ۱. بدهکاریمان را پرداختم. ۱. sg.</p> <p>*Ma_{1.pl} bedehkari-ye-mân râ pardâxtam_{1.sg}.</p> <p>We debt-HI-OBJ-CLT.Def pay.PAST-1SG</p> <p>(We paid our debts.)</p>
<p>مطابقت دستوری</p> <p>من ۱. پالتارمی یودوم. ۱. sg.</p> <p>Man_{1.sg} pâltâr-e-mi yudum_{1.sg}.</p> <p>I cloth-HI-OBJ-CLT.Def wash.PAST-1SG</p> <p>(I washed my cloth.)</p>	<p>من ۱. نظرش را پذیرفتم. ۱. sg.</p> <p>Man_{1.sg} nazar-aş râ paziroftam_{1.sg}.</p> <p>I offer-OBJ-CLT.Def accept.PAST-1SG</p> <p>(I accepted her/his offer.)</p>

* جملات غیر دستوری. زیر هجای هدف خط کشیده شده است.

برگرفته از Meykadeh et al., 2021a

۲-۳. نحوه اجرای آزمون

بعد از دریافت آموزش‌های لازم درباره نحوه اجرای تکلیف، شرکت کنندگان بر اساس دستوری/نادستوری بودگی جملات پاسخ خود را ثبت کردند. محرک‌های شنیداری طراحی شده توسط نرم‌افزار سایکوپای^۲ از طریق هدفون ارائه شد. الگوی تحریک

1. Cronbach's alpha
2. psychoPy

وابسته به رویداد^۱، شامل ۴ بلوک^۲ جملات شنیداری، ۴ بازه استراحت^۳ و نیز پارادایم زبان گردانی جایگزین^۴ به کار گرفته شد. هر بلوک متشکل از ۳۲ بخش^۵ است که برای ثبت پاسخ همودینامیکی^۶ نیز بازه‌های زمانی استراحت سی ثانیه‌ای قبل و بعد از آن تعبیه شد که طی آن هیچ تحریکی ارائه نشد. مدت زمان هر بلوک ۳۱۸ ثانیه بود. هر بخش شامل یک بوق هشدار یک ثانیه‌ای، یک جمله سه ثانیه‌ای و مرحله پاسخ چهار، پنج یا شش ثانیه‌ای بود.

به علت ماهیت شنیداری تکلیف^۷ شناختی، یک علامت (+) در وسط صفحه نمایشگر نمایش داده شد. در هر بلوک، جملات دو زبان به طور پیوسته تغییر می‌کرد (به طور مثال، زبان اول، زبان دوم، زبان اول، زبان دوم و ...). محرک‌های دستوری - نادرستی هر زبان، در هر بلوک به طور تصادفی توزیع و به طور یکسان برای همه شرکت‌کننده‌ها اجرا شد. مزیت پارادایم زبان گردانی جایگزین بر دیگر پارادایم‌ها، از جمله پارادایم زبان گردانی توالی - محور^۸ است که شرایط برنامه‌ریزی زبانی را برای زبان بعدی فراهم می‌کند؛ به گونه‌ای که وضعیت پیش‌برنامه‌ریزی را در طول پردازش زبان طبیعی تداعی می‌کند (Declerck & Philipp, 2015). در دنیای واقعی سخنگویان دوزبانه قادرند هر یک از زبان‌هایشان را به تناسب موقعیت به کار ببرند و به سرعت زبان گردانی بین دو زبان را انجام دهند. برای هر آزمودنی، اجرای آزمون fMRI به انضمام مرحله آماده‌سازی تقریباً ۳۵ دقیقه به طول انجامید.

-
1. event-related design
 2. block
 3. resting period
 4. alternating language switching paradigm
 5. run
 6. hemodynamic baseline
 7. task
 8. sequence-based language switching paradigm

۲-۴. پروتکل تصویربرداری

تصاویر fMRI توسط اسکنر MRI سه تسلا^۱ زیمنس مدل پرزما^۱ با کویل سر ۲۰ کاناله^۲ در آزمایشگاه ملی نقشه‌برداری مغز ثبت شد. در یک جلسه، تصویربرداری ساختاری رزولوشن بالا و عملکردی حالت استراحت از مغز هر فرد انجام شد. پروتکل‌ها و پارامترهای مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شد. تصاویر ساختاری با استفاده از توالی سه-بعدی اکو گرادینت سریع مغناطش آماده شده^۳ و تصاویر عملکردی، به صورت تصویربرداری اکو صفحه‌ای^۴ گرفته شد. زمان تصویربرداری عملکردی ۱۲۹۰ ثانیه به طول انجامید. تعداد کل والیوم‌ها^۵ ۴۳۰ عدد و هر والیوم نیز حاوی ۴۵ اسلایس بود.

۲-۵. پیش پردازش تصاویر

مطابق مطالعه میکده و همکاران (2023a) و با استفاده از ابزارهای موجود در نرم افزار FSL مدل ۶/۰۰، پیش پردازش تصاویر به شرح زیر انجام شد:

- ۱- حذف مجموعه و استخراج قشر مغز؛
- ۲- انطباق داده ساختاری T1-MPRAGE بر روی اطلس MNI و سپس انطباق داده‌های عملکردی بر آن؛
- ۳- تصحیح حرکت سر^۶؛
- ۴- تصحیح زمان بندی برش‌ها^۷ با استفاده از درون‌یابی فوریه^۸؛
- ۵- نرم کردن مکانی^۹ توسط فیلتر کرنل گوسی^{۱۰} با FWHM برابر با ۶ میلی متر؛

-
1. 3.0 tesla siemens prisma MRI scanner
 2. 20 channel head coil
 3. three-dimension magnetization-prepared rapid gradient-echo (MP-RAGE) sequence
 4. echo planner imaging (EPI)
 - 5 volume

هر والیوم واحد، متشکل از عناصر مکعبی شکل به نام وکسل است.

6. head motion correction
7. slice timing correction
8. Fourier interpolation
9. spatial smoothing
10. gaussian kernel

۶- بهنجار کردن^۱ دامنه همه حجم‌ها در هر نقطه زمانی بر پایه شدت میانگین؛
 ۷- فیلتر کردن زمانی^۲ توسط فیلتر بالاگذر گوسی با سیگمای ۵۰ ثانیه؛
 ۸- حذف مؤلفه‌های نویز^۳ از تصاویر پیش پردازش شده با استفاده از روش ICA. نهایتاً، از مدل خطی عمومی^۴، جهت تحلیل سطح اول (اجرای فردی) و دوم (اجرای گروهی) استفاده شد. با استفاده از مدل تأثیر آمیخته^۵، تحلیل‌های بین گروهی^۶ انجام و وکسل‌هایی با z-stat بالای ۳/۱ و سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ به عنوان وکسل فعال تشخیص داده شد. فقط جملاتی که به آنها پاسخ درست داده شده بود، در چرخه تحلیل قرار گرفتند.

۶-۲. روش تحلیل آماری

جهت تعیین نقش ناحیه مخچه در پردازش همزمان زبان‌های اول و دوم در افراد دوزبانه و مطابق با مطالعات میکده (۱۴۰۰) و میکده و زومر (در دست انتشار)، تحلیلی با رویکرد کل-مغز^۷ اجرا شد. در ادامه، در یک تحلیل ناحیه موردنظر^۸، درصد تغییر سیگنال^۹ به عنوان معیار «شدت»^{۱۰} برای هر شرکت کننده در ناحیه مخچه مطابق با اطلس هاروارد - آکسفورد^{۱۱} در FSL محاسبه شد. شدت سیگنال به عنوان متغیر وابسته و دستوری بودگی (دستوری، نادرستی)، زبان (زبان اول، زبان دوم)، نیمکره (چپ، راست) و جنسیت (زن، مرد) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. تغییرات شدت سیگنال از طریق آزمون استنباطی تحلیل واریانس^{۱۲} با اندازه گیری‌های مکرر^{۱۳} $2 \times 2 \times 2 \times 2$ بررسی شد.

-
1. normalization
 2. temporal filtering
 3. noise
 4. generalized linear model (GLM)
 5. mixed effects
 6. between-subjects
 7. whole-brain
 8. region-of-interest analysis (ROI)
 9. percent signal change (PSC)
 10. intensity
 11. Harvard-Oxford atlas
 12. analysis of variance
 13. repeated measures

جدول ۲. پروتکل های تصویربرداری ساختاری و عملکردی

T2-weighted EPI-BOLD (عملکردی)	T1-weighted MP-RAGE (ساختاری)	نام پروتکل
۳ × ۳ × ۳	۱ × ۱ × ۱	اندازه وکسل ^۱ (mm ³)
۶۴	۲۵۶	اندازه ماتریس ^۲ (mm ²)
۳۰	۳/۵۳	زمان اکو ^۳ (TE) (ms)
۳۰۰۰	۱۸۰۰	زمان تکرار ^۴ (TR) (ms)
۳	۱	ضخامت اسلایس ^۵ (mm)
۱۹۲	۲۵۶	میدان دید ^۶ (FOV) (mm ²)
۹۰°	۷°	زاویه چرخش ^۷ α (deg)

۳. یافته ها

در این بخش، یافته های پژوهش، اعم از نتایج رفتاری و آزمایشگاهی در زیربخش های جداگانه ارائه خواهد شد. به منظور شفاف سازی نتایج و درک بهتر خوانندگان، نتایج آماری در قالب جداول ارائه و نمودارهای جعبه ای ضمیمه می گردد.

۱-۳. یافته های رفتاری

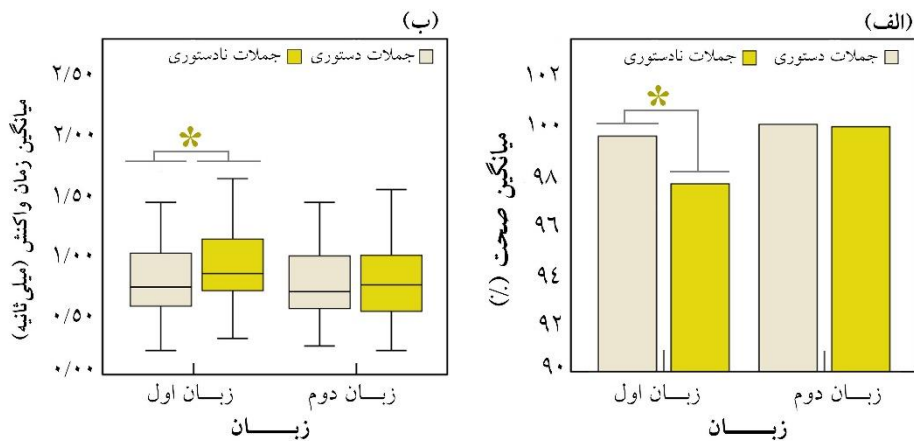
شرکت کننده ها، به طور میانگین، به بیش از ۹۹٪ محرک ها پاسخ درست دادند. درصد پاسخ درست (و انحراف معیار) برای زبان اول ۹۸/۹۶٪ (±۱/۱۸) و برای زبان دوم ۹۹/۶۱٪ (±۰/۷۹) بود. میانگین زمان واکنش (و انحراف معیار) به محرک های زبان اول و زبان دوم به ترتیب ۰/۸۸٪ (±۰/۳۷) و ۰/۷۸٪ (±۰/۳۶) هزارم ثانیه بود.

-
1. voxel size
 2. matrix size
 3. echo time
 4. repetition time
 5. slice thickness
 6. field of view
 7. flip angle

جدول ۳. نتایج آزمون‌های رفتاری صحت پاسخ و زمان واکنش

آزمون رفتاری	منبع تغییرات	آماره F^3	درجه آزادی ^۲	معناداری	مجذور اتا ^۱
زمان واکنش	دستوری بودگی	۱۲/۷۵۰	۱	۰/۰۰۱	۰/۲۷۳
	زبان	۱۸/۵۵۶	۱	<۰/۰۰۱	۰/۳۵۳
	دستوری بودگی × زبان	۷/۳۸۹	۱	۰/۰۱۰	۰/۱۷۹
زمان واکنش	دستوری بودگی	۴/۷۳۹	۱	۰/۰۳۷	۰/۱۲۲
	زبان	۸/۹۸۱	۱	۰/۰۰۵	۰/۲۰۹
	دستوری بودگی × زبان	۳/۹۵۴	۱	۰/۰۵۵	۰/۱۰۴

شکل ۱. تحلیل رفتاری زبان اول (ترکی) و زبان دوم (فارسی). (الف) نمودارهای میله‌ای میانگین درصد پاسخ‌های درست به محرک‌های دستوری/نادستوری در هر زبان. (ب) نمودارهای جعبه‌ای میانگین زمان واکنش به محرک‌های دستوری/نادستوری در هر زبان به هزارم ثانیه. علامت ستاره نشانه معناداری است (سطح معناداری = ۰/۰۵)



نتایج تحلیل واریانس آمیخته 2×2 در جدول (۳) ذکر شده است. نتایج آزمون تعقیبی نمونه‌تی زوجی^۴، اختلاف معنادار بین پاسخ‌های درست به محرک‌های دستوری و نادستوری را فقط در زبان اول ($t_{(35)} = 2/66$, $p = 0/012$) و نه در زبان دوم ($t_{(35)} = 0/869$) تأیید کرد. در ارتباط با زمان واکنش، نتایج آزمون تعقیبی تی زوجی $t_{(35)} = 1/67$, p

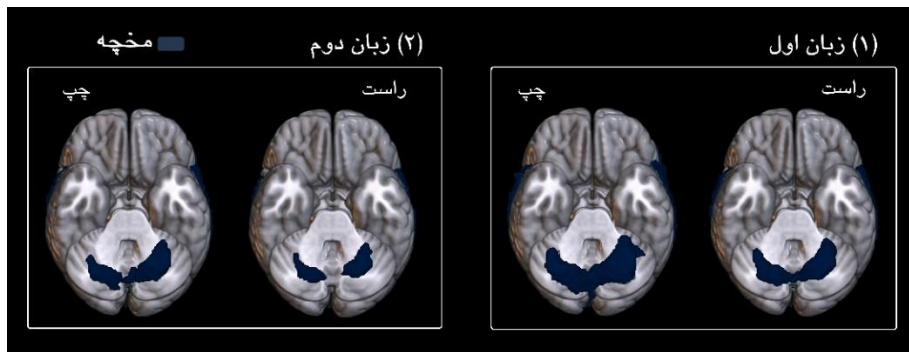
1. eta squared (η^2)
2. degree of freedom (dF)
3. F -test
4. post-hoc paired sample t-test

نشان داد که اختلاف معنادار بین زبان‌ها محدود به زبان اول ($t_{(35)} = 4/51, p = 0/000$) و نه به زبان دوم ($t_{(35)} = 0/610, p = 0/546$) است. نتایج رفتاری در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است.

۲-۳. یافته‌های فعالیت کل - مغز

در سطح کل - مغز، فعالیت معنادار سیگنال بولد^۱ در حین ارائه محرک‌های دستوری و نادرستی هر دو زبان اول و دوم در ناحیه مخچه مشاهده شد (شکل (۲)). مقایسه چشمی پنل‌های ۱ و ۲ حاکی از فعالیت بیشتر زبان اول در مقایسه با زبان دوم و نیمکره راست در مقایسه با نیمکره چپ است. براین اساس، یک تحلیل مبتنی بر ناحیه موردنظر برای هر دو زبان در مخچه چپ و راست اجرا شد تا الگوی فعالیت محرک‌ها در این ناحیه مغزی مشخص گردد (Poldrack, 2007).

شکل ۲. میانگین فعالیت مغزی در ناحیه مخچه هنگام ارائه محرک‌های شنیداری (الف) دستوری و (ب) نادرستی زبان اول (۱) و محرک‌های شنیداری (ج) دستوری و (د) نادرستی زبان دوم (۲).



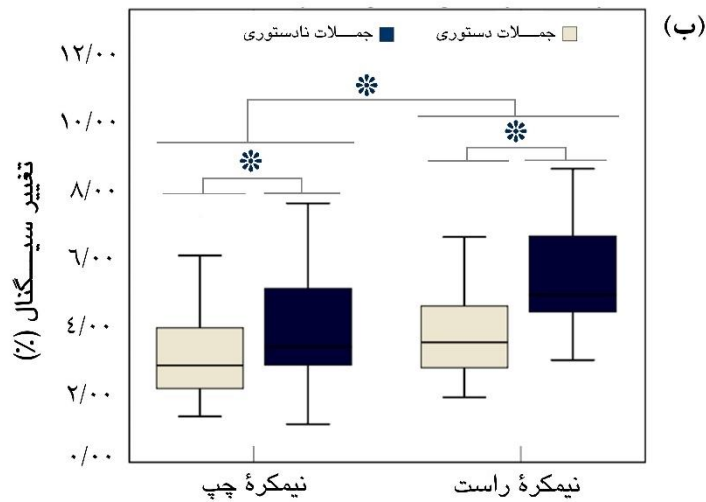
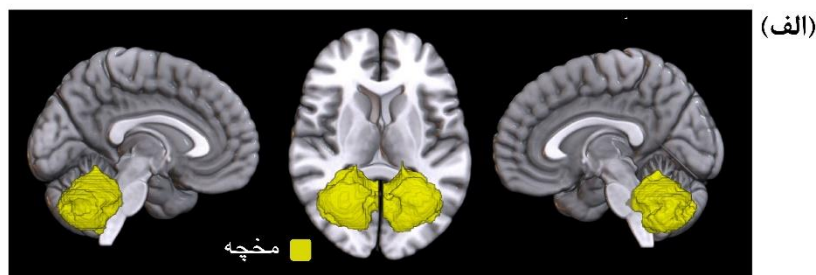
۳-۳. یافته‌های ناحیه مخچه

شکل (۳ الف) موقعیت ناحیه مخچه را در نیمکره‌های چپ و راست مغز نشان می‌دهد. در ناحیه مخچه، نتایج تحلیل واریانس آمیخته $2 \times 2 \times 2 \times 2$ (جدول ۳) نشان داد که عامل اصلی دستوری بودگی به سطح معناداری رسید. مشخصاً، درصد تغییر سیگنال جملات

1. blood-oxygen-level-dependent (BOLD)

نادستوری (۴/۵۱۰) در مقایسه با جملات دستوری (۳/۷۱۲) بیشتر بود. عامل اصلی زبان با درصد تغییر سیگنال بیشتر برای زبان اول (۴/۳۱۱) نسبت به زبان دوم (۳/۹۱۱) به سطح معناداری رسید. عامل اصلی نیمکره نیز، با درصد تغییر سیگنال بیشتر برای نیمکره راست (۴/۴۶۵) نسبت به نیمکره چپ (۳/۷۵۶) معنادار بود.

شکل ۳. (الف) موقعیت ناحیه مخچه. (ب) نمودارهای جعبه‌ای نشانگر درصد تغییر سیگنال به تفکیک هر نیمکره در زبان اول (ترکی). علامت ستاره نشانه معناداری است.



براین اساس، تعامل دو عامل دستوری بودگی × زبان معنادار بود. با در نظر گرفتن عامل دستوری بودگی، مشاهده شد که در زبان اول درصد تغییر سیگنال جملات نادستوری (۴/۹۱۹) در مقایسه با جملات دستوری (۳/۷۰۳) بیشتر بود ($t_{(35)} = 5.989, p < 0.001$)، اما در زبان دوم اختلاف معناداری بین درصد تغییر سیگنال جملات نادستوری (۴/۱۰۱) و

دستوری (۳/۷۲۰) مشاهده نشد ($p = ۰/۲۱۲$)، $t_{(۳۵)} = ۱/۲۷۳$. با در نظر گرفتن عامل زبان، مشاهده شد که در جملات نادرستی درصد تغییر سیگنال در زبان اول (۴/۹۱۹) در مقایسه با زبان دوم (۴/۱۰۱) بیشتر بود ($p < ۰/۰۰۱$)، $t_{(۳۵)} = ۵/۸۱۱$ ، اما در جملات دستوری هیچ تفاوتی بین درصد تغییر سیگنال زبان اول (۳/۷۰۳) در مقایسه با زبان دوم (۳/۷۲۰) مشاهده نشد ($p = ۰/۹۴۰$)، $t_{(۳۵)} = -۰/۰۷۶$.

جدول ۴. نتایج آزمون تحلیل واریانس آمیخته در ناحیه مخچه

منبع تغییرات	آماره F	درجه آزادی	معناداری	مجذور اتا
دستوری بودگی	۱۸/۱۲۶	۱	<۰/۰۰۱	۰/۳۵۵
دستوری بودگی × جنسیت	۱/۷۳۲	۱	۰/۱۳۷	۰/۱۲۵
زبان	۱۰/۵۱۲	۱	۰/۰۰۳	۰/۲۴۲
زبان × جنسیت	۰/۰۳۸	۱	۰/۸۴۷	۰/۰۰۱
نیمکره	۶/۰۶۹	۱	۰/۰۱۹	۰/۱۵۵
نیمکره × جنسیت	۰/۰۰۵	۱	۰/۹۴۲	۰/۰۰۰
دستوری بودگی × زبان	۷/۵۶۶	۱	۰/۰۱۰	۰/۱۸۷
دستوری بودگی × زبان × جنسیت	۰/۳۷۵	۱	۰/۵۴۴	۰/۰۱۱
دستوری بودگی × نیمکره	۷/۱۳۸	۱	۰/۰۱۲	۰/۱۷۸
دستوری بودگی × نیمکره × جنسیت	۲/۴۵۲	۱	۰/۱۲۷	۰/۰۶۹
زبان × نیمکره	۴/۴۹۸	۱	۰/۰۴۲	۰/۱۲۰
زبان × نیمکره × جنسیت	۰/۱۰۰	۱	۰/۷۵۴	۰/۰۰۳
دستوری بودگی × زبان × نیمکره	۲/۹۳۵	۱	۰/۰۹۶	۰/۰۸۲
دستوری بودگی × زبان × نیمکره × جنسیت	۰/۲۴۸	۱	۰/۶۲۲	۰/۰۰۷

اثر تعاملی دستوری بودگی × نیمکره نیز به سطح معناداری رسید. با در نظر گرفتن عامل دستوری بودگی، مشاهده شد که در نیمکره راست درصد تغییر سیگنال در جملات نادرستی (۵/۰۴۲) در مقایسه با جملات دستوری (۳/۸۸۷) بیشتر بود ($p = ۰/۰۰۱$)، $t_{(۳۵)} = ۳/۸۱۳$ ، در نیمکره چپ هم درصد تغییر سیگنال در جملات نادرستی (۳/۹۷۸) در مقایسه با جملات دستوری (۳/۵۳۴) بیشتر بود ($p = ۰/۰۳۴$)، $t_{(۳۵)} = ۲/۲۰۶$. با در نظر گرفتن عامل نیمکره، مشاهده شد که در جملات نادرستی درصد تغییر سیگنال در نیمکره راست (۵/۰۴۲) در مقایسه با نیمکره چپ (۳/۹۷۸) بیشتر بود ($p = ۰/۰۰۴$)، $t_{(۳۵)} = ۳/۰۷۱$ ، اما در

جملات دستوری هیچ تفاوتی در درصد تغییر سیگنال نیمکره راست (۳/۸۸۸) و نیمکره چپ (۳/۵۳۴) مشاهده نشد ($p = ۰/۲۲۴$, $t_{(۳۵)} = ۱/۲۳۸$). نهایتاً، اثر تعاملی زبان \times نیمکره معنادار بود. با در نظر گرفتن عامل زبان، مشاهده شد که در نیمکره راست درصد تغییر سیگنال جملات زبان اول (۴/۸۰۵) در مقایسه با زبان دوم (۴/۱۲۶) بیشتر بود ($p = ۰/۰۰۲$, $t_{(۳۵)} = ۳/۴۴۹$)، اما در نیمکره چپ اختلاف معناداری بین درصد تغییر سیگنال جملات زبان اول (۳/۸۱۸) و دوم (۳/۶۹۵) مشاهده نشد ($p = ۰/۴۴۳$, $t_{(۳۵)} = ۰/۷۷۶$). با در نظر گرفتن عامل نیمکره، مشاهده شد که در زبان اول درصد تغییر سیگنال در نیمکره راست (۴/۸۰۵) در مقایسه با نیمکره چپ (۳/۸۱۸) بیشتر بود ($p = ۰/۰۰۲$, $t_{(۳۵)} = ۳/۴۵۱$)، اما در زبان دوم درصد تغییر سیگنال در نیمکره راست (۴/۱۲۶) در مقایسه با نیمکره چپ (۳/۶۹۵) تفاوتی نداشت ($p = ۰/۲۰۵$, $t_{(۳۵)} = ۱/۲۹۳$). شکل (۲ ب) نمودار جعبه‌ای اثرات دستوری بودگی معنادار را در زبان اول نشان می‌دهد. همانگونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، جنسیت با سایر عوامل در تعامل نبود. نتایج آزمون‌های تی زوجی برای عامل دستوری بودگی به‌ازای هر نیمکره و زبان در جدول (۵) ذکر شده است.

جدول ۵. نتایج آزمون تی زوجی برای اثر دستوری بودگی در ناحیه مخچه

آماره t	میانگین شدت تغییر سیگنال (%) (انحراف معیار)	زبان	نیمکره
۲/۵۸۶*	(۱/۴۸) ۰/۶۴۸	زبان اول	چپ
۱/۰۲۲	(۱/۳۸) ۰/۲۳۸	زبان دوم	
۵/۵۵۴***	(۱/۹۰) ۱/۷۸۹	زبان اول	راست
۱/۱۹۷	(۰/۷۳) -۰/۴۱۷	زبان دوم	

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، عملکرد ناحیه مخچه در پردازش مطابقت دستوری زبان‌های اول و دوم در دوزبان‌های متوازن ترکی (زبان اول) - فارسی (زبان دوم) با سن یادگیری ۷ سالگی در بدو ورود به مدرسه) بررسی شد. محرک‌های دستوری و نادرستی به صورت تصادفی و محرک‌های زبان‌های اول و دوم به صورت متوالی توزیع شدند که این مسأله مستلزم مشارکت و عدم مشارکت متناوب بین زبان‌هاست. در سطح کل - مغز، حساسیت ناحیه

مخچه چپ و راست به محرک‌های دستوری و نادرستی هر دو زبان اول و دوم در دوزبانه‌های ترکی - فارسی مشاهده شد که این مسأله از نقش این ناحیه در پردازش زبان در افراد دوزبانه حکایت دارد (De Smet et al., 2013; Mariën et al., 2014; Mariën & Borgatti, 2018).

تحلیل مبتنی بر ROI، دو یافته مهم در برداشت. اولاً، اثر دستوری بودگی در نیمکره راست محرز شد که این نکته مؤید مطالعات پیشین در گروه‌های نرمال (Mariën et al., 2014) و بیمار است (Silveri et al., 1994; Mariën et al., 1996; Gasparini et al., 1999). مهم‌ترین استدلال در حمایت از نقش مخچه راست در پژوهش حاضر، فعالیت همزمان نواحی پارس آپرکولایس، شکنج فوقانی گیجگاهی خلفی و مخچه راست است (به پژوهش می‌کده و همکاران (2021a) مراجعه شود) که با نتایج برکن^۱ و همکاران (2016) همسو است. البته این پژوهشگران دوزبانه‌های فرانسوی - انگلیسی را با تکنیک تصویربرداری تشدید مغناطیسی در حالت استراحت^۲ بررسی کردند و اتصالات کارکردی بین شکنج فرونتال تحتانی چپ و مخچه چپ و راست را مشاهده کردند. با وجود این، نکته حائز اهمیت این است که یافته‌های دوزبانه‌های مطالعه حاضر که زبان دوم را از سن ۷ سالگی آموخته بودند، با دوزبانه‌های همزمان پژوهش برکن و همکاران (2016) - که هر دو زبان اول و دوم را از بدو تولد آموخته بودند (و نه دوزبانه‌های متوالی که از سن ۵ سالگی زبان دوم را فراگرفته بودند) - هم‌راستا بود. لذا، این همسویی خود مؤید بسندگی بالای دوزبانه‌های ترکی - فارسی حاضر در زبان دوم است. دوماً، اثر دستوری بودگی فقط در زبان اول تأیید شد. طبق فرضیه آستانه فعالیت (Paradis, 1993; 2001)، به نظرمی‌رسد که در پژوهش حاضر دوزبانه‌های ترکی - فارسی در حین زبان‌گردانی زبان ترکی را به‌عنوان زبان پایه و زبان فارسی را به‌عنوان زبان مهمان انتخاب کرده‌اند.

اگرچه هر دو زبان ترکی و فارسی فعال هستند، اما زبان ترکی به‌عنوان زبان غالب فعالیت قوی‌تری دارد (Green, 1998) که این مسأله اثرات تغییر نامتقارن^۳ را ایجاد کرده

1. Berken, J. A.

۲. تشریح تفاوت بین fMRI در حالت استراحت و تکلیف - محور (Task-based) خارج از حوصله پژوهش حاضر است. خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند برای اطلاعات بیشتر به پژوهش می‌کده و همکاران (2023b) مراجعه کنند.

3. asymmetrical switch effects

است (Zhu, et al., 2020). در بافت زبان گردانی، هنگامیکه (از بین دو زبان) تغییر به- سمت محرک‌های زبان اول انجام می‌شود، لازم است مهار زبان اول (که فعالیت بیشتری داشت) در طول پردازش جملات زبان دوم برطرف شود که این مسأله خود منجر به فعالیت بیشتر نواحی درگیر فرایند مهار می‌شود (Meykadeh et al., 2021a). نتایج رفتاری دوزبانه‌ها در پژوهش حاضر نیز در راستای داده‌های fMRI است. در واقع، شرکت کنندگان زمان بیشتری را برای پردازش جملات زبان اول در مقایسه با زبان دوم صرف کردند، زیرا تغییر به زبان پایه (زبان ترکی) مستلزم زمان بیشتری است تا به مهار قبلی که به این زبان اعمال شده بود، غلبه گردد؛ ضمن اینکه پردازش زبان اول با خطای بیشتری همراه بود و این مسأله به فعالیت مغزی بیشتر منتهی شد. به بیان دقیق‌تر، از آنجاکه زبان دوم زبان ضعیف‌تری محسوب می‌شود، کنترل شناختی مضاعفی لازم است تا زبان دوم پس از تولید زبان اول بازفعال شود (Zhu, et al., 2020). به‌طور کلی، نتایج فعلی اهمیت ناحیه مخچه راست را در پردازش زبان دوزبانه‌ها نشان داد. ضمناً، به‌نظر می‌رسد در افراد دوزبانه ناحیه مخچه نقش ویژه‌ای در کنترل زبان دارد.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از یک طرح پژوهشی است که از حمایت مالی ستاد توسعه علوم و فناوری‌های شناختی (کد ۷۴۰۱) و وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ایران جهت تکمیل اهداف پروژه در دانشگاه هومبولت برلین^۱ (آلمان) تحت راهنمایی نویسنده دوم این مقاله برخوردار بوده است. بدین‌وسیله مراتب تشکر و امتنان خود را از همکاری آن سازمان متبوع اعلام می‌دارم.

تعارض منافع

تعارض منافع نداریم.

1. Humboldt-Universität zu Berlin

ORCID

Simin Meykadeh 

<http://orcid.org/0000-0001-8155-2891>

Werner Sommer 

<http://orcid.org/0000-0001-5266-3445>

Seyed Amirhussein Batouli 

<http://orcid.org/0000-0002-9157-4522>

منابع

- پورمحمد، مهدی. (۱۳۹۷). روان‌شناسی زبان. تهران: سمت.
- حدادادی، مجتبی، اسدزاده، حسن، کلانتر قریشی، منیر و امانی، حسین. (۱۳۹۳). نرم‌افزار حافظه کاری دانیمن و کارپنتر. تهران: مؤسسه تحقیقات علوم رفتاری - شناختی سینا.
- میکده، سیمین. (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، دانشگاه تربیت مدرس.
- میکده، سیمین و زومر، ورنر. (در دست انتشار). عدم تفاوت‌های جنسیتی در پردازش مشخصه‌های فای در افراد دوزبانه متوازن: مطالعه‌ای بر پایه تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی (fMRI). پژوهش‌های زبان‌شناسی تطبیقی.

References

- Antón, E., Carreiras, M., & Duñabeitia, J. A. (2019). The impact of bilingualism on executive functions and working memory in young adults. *PLoS One*, 14(2), 1-30. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206770>
- 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. *The Journal of Neuroscience*, 36(4), 1165-1172. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1960-15.2016>
- Bialystok, E., Craik, F. I., & Ryan, J. (2006). Executive control in a modified antisaccade task: Effects of aging and bilingualism. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32(6), 1341-1354. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.32.6.1341>
- Bialystok, E., Craik, F. I., & Freedman, M. (2007). Bilingualism as a protection against the onset of symptoms of dementia. *Neuropsychologia*, 45(2), 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.10.009>

- Buckner R. L. (2013). The cerebellum and cognitive function: 25 years of insight from anatomy and neuroimaging. *Neuron*, 80(3), 807-815. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.10.044>
- Comrie, B. (2009). *The World's Major Languages* (2nd ed.). London: Routledge.
- Declerck, M., & Philipp, A. M. (2015). A review of control processes and their locus in language switching. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22(6), 1630-1645. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0836-1>
- De Smet, H. J., Paquier, P., Verhoeven, J., & Mariën, P. (2013). The cerebellum: Its role in language and related cognitive and affective functions. *Brain and Language*, 127(3), 334-342. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.11.001>
- Dunn, A. L., & Fox Tree, J. E. (2009). A quick, gradient Bilingual Dominance Scale. *Bilingualism: Language and Cognition*, 12(3), 273-289.
- 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>
- Gasparini, M., Di Piero, V., Ciccarelli, O., Cacioppo, M. M., Pantano, P., & Lenzi, G. L. (1999). Linguistic impairment after right cerebellar stroke: A case report. *European Journal of Neurology*, 6(3), 353-356. <https://doi.org/10.1046/j.1468-1331.1999.630353.x>
- Green, D. W. (1998). Mental control of the bilingual lexico-semantic system. *Bilingualism: Language and Cognition*, 1, 67-81. <https://doi.org/10.1017/S1366728998000133>
- Hartsuiker, R. J., Pickering, M. J., & Veltkamp, E. (2004). Is syntax separate or shared between languages? Cross-linguistic syntactic priming in Spanish-English bilinguals. *Psychological Science*, 15(6), 409-414. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00693.x>
- Herculano-Houzel S. (2010). Coordinated scaling of cortical and cerebellar numbers of neurons. *Frontiers in Neuroanatomy*, 4(12), 1-8. <https://doi.org/10.3389/fnana.2010.00012>
- Herculano-Houzel S. (2012). The remarkable, yet not extraordinary, human brain as a scaled-up primate brain and its associated cost. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 10661-10668. <https://doi.org/10.1073/pnas.1201895109>
- Hollingshead, A. (1975). *Four factor index of social status*. [Unpublished Manuscript]. New Haven, CT: Yale University Department of Sociology.

- Imamizu, H., Kuroda, T., Miyauchi, S., Yoshioka, T., & Kawato, M. (2003). Modular organization of internal models of tools in the human cerebellum. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(9), 5461-5466. <https://doi.org/10.1073/pnas.0835746100>
- Justus T. (2004). The cerebellum and English grammatical morphology: evidence from production, comprehension, and grammaticality judgments. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(7), 1115-1130. <https://doi.org/10.1162/0898929041920513>
- Khodadadi, M., Asadzadeh, H., Kalantar Ghoreishi, M., & Amani, H. (2014). *Working Memory Test. Daneman M. & Carpenter P. A., Software*. Tehran: Institute for Behavioral & Cognitive Sciences. [In Persian]
- Kovelman, I., Baker, S. A., & Petitto, L. A. (2008). Bilingual and monolingual brains compared: A functional magnetic resonance imaging investigation of syntactic processing and a possible “neural signature” of bilingualism. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(1), 153-169. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20011>
- Lerman, A., & Obler, L. K. (2017). Aging in bilinguals: Normal and abnormal. In A. Ardila, A. B. Cieślicka, R. R. Heredia & M. Rosselli (Eds.), *Handbook of Psychology of Bilingualism: The Cognitive and Emotional World of Bilinguals* (Vol. 5) (pp. 189-210). Switzerland. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64099-0_8
- Mariën, P., Scaerens, J., Nanhoe, R., Moens, E., Nagels, G., Pickut, B. A., Dierckx, R. A., & De Deyn, P. P. (1996). Cerebellar induced aphasia: Case report of cerebellar induced prefrontal aphasic language phenomena supported by SPECT findings. *Journal of the Neurological Sciences*, 144 (1-2), 34-43. [https://doi.org/10.1016/s0022-510x\(96\)00059-7](https://doi.org/10.1016/s0022-510x(96)00059-7)
- Mariën, P., Ackermann, H., Adamaszek, M., Barwood, C. H., Beaton, A., Desmond, J., De Witte, E., Fawcett, A. J., Hertrich, I., Küper, M., Leggio, M., Marvel, C., Molinari, M., Murdoch, B. E., Nicolson, R. I., Schmahmann, J. D., Stoodley, C. J., Thürling, M., Timmann, D., Wouters, E., & Ziegler, W. (2014). Consensus paper: Language and the cerebellum: an ongoing enigma. *Cerebellum*, 13(3), 386-410. <https://doi.org/10.1007/s12311-013-0540-5>
- Mariën, P., & Borgatti, R. (2018). Language and the cerebellum. *Handbook of Clinical Neurology*, 154, 181–202. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63956-1.00011-4>

- 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, Tarbiat Modares University]. [In Persian]
- Meykadeh, A., Golfam, A., Batouli, S. A. H., & Sommer, W. (2021a). 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*, 26 (15), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.728549>
- Meykadeh, A., Golfam, A., Nasrabadi, A. M., Ameri, H., & Sommer, W. (2021b). First Event-Related Potentials evidence of auditory morphosyntactic processing in a subject-object-verb nominative-accusative language (Farsi). *Frontiers in Psychology*, 16 (12), 1-9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.698165>
- 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*, 1–16. <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), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2023.101162>
- Meykadeh, S., & Sommer, W. (In press). No sex differences in phi-features processing in balanced bilinguals: A functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) study. *Iranian Journal of Comparative Linguistics Research*.
- 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)
- Paradis, M. (1993). Linguistic, psycholinguistic, and neurolinguistic aspects of “interference” in bilingual speakers: The activation threshold hypothesis. *International Journal of Psycholinguistics*, 9, 133-145.
- Paradis, M. (2001). An integrated neurolinguistic theory of bilingualism (1976–2000). *Paper Presented at the LACUS Forum 27*, (pp. 5-15). Houston, TX.

- Pliatsikas, C., Johnstone, T., & Marinis, T. (2014). Grey matter volume in the cerebellum is related to the processing of grammatical rules in a second language: A structural voxel-based morphometry study. *Cerebellum*, 13(1), 55-63. <https://doi.org/10.1007/s12311-013-0515-6>
- Poldrack, R. A. (2007). Region of interest analysis for fMRI. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2(1), 67-70. <https://doi.org/10.1093/scan/nsm006>
- Pourmohammad, M. (2019). *Psycholinguistics*. Tehran: samt. [In Persian]
- Silveri, M. C., Leggio, M. G., & Molinari, M. (1994). The cerebellum contributes to linguistic production: A case of agrammatic speech following a right cerebellar lesion. *Neurology*, 44(11), 2047-2050. <https://doi.org/10.1212/wnl.44.11.2047>
- Silveri M. C. (2021). Contribution of the cerebellum and the basal ganglia to language production: Speech, word fluency, and sentence construction-evidence from pathology. *Cerebellum*, 20(2), 282-294. <https://doi.org/10.1007/s12311-020-01207-6>
- Strick P. L. (1985). How do the basal ganglia and cerebellum gain access to the cortical motor areas? *Behavioral Brain Research*, 18(2), 107-123. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(85\)90067-1](https://doi.org/10.1016/0166-4328(85)90067-1)
- Wang, Y., Kuhl, P. K., Chen, C., & Dong, Q. (2009). Sustained and transient language control in the bilingual brain. *NeuroImage*, 47(1), 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.12.055>
- Zhu, J. D., Seymour, R. A., Szakay, A., & Sowman, P. F. (2020). Neurodynamics of executive control in bilingual language switching: An MEG study. *Cognition*, 199, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104247>

استناد به این مقاله: میکده، سیمین، زومر، ورنر و بتولی، سید امیرحسین. (۱۴۰۲). مخچه و مطابقت دستوری در دوزبانه‌ها: شواهدی از قضاوت دستوری‌بودگی با استفاده از fMRI. *علم زبان*، ۱۰ (۱۸)، ۳۴۲-۳۰۹. doi: 10.22054/LS.2023.74871.1591



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