

Article type: Research Article

The Effect of Transcranial Direct Current Stimulation of the Visual Cortex on Spatial and Timing Errors of Tapping Movements in the Classical Ebbinghaus Illusion

Fatmeh Jafaari¹ , MohammadReza Doustan^{2✉} , Esmacel Saemi³ 

1. Master's degree, Motor Behavior and Sport Psychology, Faculty of Sport Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: sarajafaari1997@gmail.com
2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Motor Behavior and Sport Psychology, Faculty of Sport Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.doustan@scu.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Motor Behavior and Sport Psychology, Faculty of Sport Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: e.saemi@scu.ac.ir

Article Info

Article history:

Received 25 November 2024

Revised form 13 March 2025

Accepted 17 May 2025

Keywords:

Primary Visual Cortex,
Continuous task,
Hand Dominance,
Visual Streams Separation
Hypothesis.

ABSTRACT

Objective: Human visual size perception is not always a faithful representation of the physical environment, but is heavily dependent on the surrounding context. The aim of the present study was to investigate the effect of transcranial direct current stimulation of the visual cortex on spatial errors and timing of tapping movements in the classical Ebbinghaus illusion.

Methods: The present study was quasi-experimental and fundamental in its purpose. Thirty-two university students aged 18 to 28 voluntarily participated in the study (real, 16 and sham, 16). In the pre-test, participants performed a dual-target tapping task in four different Ebbinghaus illusion conditions. These conditions included two temporal rhythms and two movement directions (horizontal and vertical). Timing error and spatial error were measured. Then, for four consecutive days, transcranial direct current stimulation was applied to the primary visual cortex (V1) in the real group and sham stimulation was applied in the sham group. One day after the last stimulation session, a post-test was performed, and three days later, a follow-up test similar to the pre-test was performed. Friedman and Wilcoxon statistical methods were used at a significance level of 0.05.

Results: The results showed that when performing movement in the Ebbinghaus illusion condition, spatial and timing errors did not differ in the horizontal and vertical conditions. Applying tDCS reduced the timing and spatial error in performing the rhythmic tapping task with the Ebbinghaus illusion context ($p < 0.05$).

Conclusions: Considering the effect of the Ebbinghaus visual illusion on spatial and temporal errors of continuous movement, the hypothesis of separation of the two visual-cognitive and motor streams is questioned. Also, considering the effect of anodal tDCS on the V1 area and the reduction of spatial and temporal errors in the performance of motor tasks, it is suggested to use this method in tasks that require the use of visual accuracy.

Cite this article: Jafaari, F., Doustan, M.R., & Saemi, E. (2025). The Effect of Transcranial Direct Current Stimulation of the Visual Cortex on Spatial and Timing Errors of Tapping Movements in the Classical Ebbinghaus Illusion. *Cognit Strateg Learn*, 13(24), 133-155. <https://doi.org/10.22084/j.psychogy.2025.30192.2748>



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).
Copyright © 2024 The Authors.

Publisher: Bu-Ali Sina University.

Extended Abstract

1. Introduction

Anodal transcranial direct current stimulation (a-tDCS) is a noninvasive electrical brain stimulation technique that can modulate neural excitability and increase neural plasticity (Abouleil et al., 2021). In recent years, significant advances in visual perception have been made using several noninvasive stimulation techniques in humans. Anodal tDCS over the primary visual cortex (V1) has been shown to improve perceptual-visual learning and increase cortical excitability (Kaiser et al., 2016). Converging evidence suggests that the effect of induction on perceived target size is mediated by processes located in V1 (Yorel et al., 2023). Factors that tDCS affects in V1 include contrast sensitivity (Behrens et al., 2017) and visual acuity (Bucci et al., 2018). A model of cortical visual processing was proposed that distinguished between vision for perception and vision for action (Milner and Gödel, 1993). This theory, known as the influential “visual-cognitive-motor dissociation theory,” assumes different pathways in the primary visual cortex of the brain for processing visual information (Pullanen and Davar, 2015);

It has long been known that the perceived size of an object depends on the size of nearby objects (Helmholtz, 1867, cited in Krisch and Kond, 2021). A well-known example of such a phenomenon is the Ebbinghaus illusion (Kriss and Kond, 2021). This illusion consists of a target circle surrounded by multiple background circles (Knoll et al., 2015). Surrounding contextual elements lead the viewer to perceive the inner circle as smaller or larger than it actually is (Sherman and Chouinard, 2016). It has been proposed that the Ebbinghaus illusion occurs both through lateral interaction in the early processing stage (Sherman and Chouinard, 2016) and through feedback prediction from higher to lower visual areas (King et al., 2017). Since visual size illusions are associated with functional and structural aspects of V1, it is likely that V1 stimulation could influence visual processing under visual illusion conditions;

Our study seeks to answer the question of whether the Ebbinghaus illusion affects the amount of movement errors (temporal and spatial) during the execution of a rhythmic tapping movement in the horizontal and vertical directions. Also, given the limited research that has been conducted on the effect of tDCS on performance in these conditions, we intend to investigate whether applying tDCS to the V1 area reduces these errors.

2. Materials and Methods

The present study was a quasi-experimental study in terms of method and a basic research study in terms of purpose. For this purpose, 32 students of Shahid Chamran University of Ahvaz, aged 18 to 28, were selected. They participated in the study using convenience sampling and were divided into two groups: real stimulation (n=16) and sham stimulation (n=16).. The instruments used included the Edinburgh Handedness Questionnaire (Oldfield, 1971), transcranial direct current stimulation (tDCS), adverse effects of stimulation (AEs, Manuel et al., 2014), speed-accuracy trade-off measurement tool, stopwatch, and metronome. After the required guidance, in the pre-test, participants performed a dual-target tapping task in four different Ebbinghaus illusion conditions. These conditions included two temporal rhythms and two directions of movement (horizontal and vertical). Timing error (average time interval between beats) and spatial error (average distance from the center of the target) were measured in the rhythmic tapping task. After that, transcranial direct current stimulation was applied for four consecutive days. Stimulation in the real group consisted of 20 minutes of stimulation with an intensity of 1 mA applied to the primary visual cortex (V1). In the sham group, stimulation was applied in a sham manner. Then, one day after the

last stimulation session, a post-test was performed, and after three days, a follow-up test similar to the pre-test was performed. For statistical analysis of the data, nonparametric U-Mann-Whitney, Friedman, and Wilcoxon statistical methods were used at a significance level of 0.05. For this purpose, SPSS version 27 software was used.

3. Results

The results showed that spatial error in different tests (pretest, posttest and follow-up) and in two different movement speeds (slow and fast rhythm), there was no significant difference between the two groups (in all cases $P > 0.05$). Also, in the general pretests (average of two targets) in two slow and fast rhythms there was a difference between the real stimulation and sham groups ($P = 0.024$ and $P = 0.020$, respectively). In the shrinking target in the pretest, there was a difference between the real stimulation and sham groups in the slow rhythm ($P = 0.042$). So that in the pretests, the real stimulation group performed weaker than the sham; but in the posttest and especially the follow-up, the real stimulation group had better spatial accuracy and made significant progress compared to the pretest. For the vertical movement, the results showed that the spatial error in the real stimulation group significantly decreased in the post-tests and follow-up tests, especially in the general and slow targets ($P < 0.05$ in all cases). However, there was no improvement in the sham group and there was no difference between the pre-test, post-test and follow-up ($P > 0.05$). In addition, the timing error in the real and sham groups when performing with slow and fast rhythms in the Ebbinghaus illusion condition was not significantly different between the pre-test, post-test and follow-up ($P > 0.05$ in all cases). The results showed that the spatial error in the real group when performing horizontal movement was significantly different between the pre-test, post-test and follow-up. So that in the post-tests and follow-up tests, there was a significant decrease, especially in the general and shrinking targets (in all cases $P < 0.05$). However, there was no improvement in the sham group. In the execution of the movement in different conditions, there was no difference in the timing error between the horizontal and vertical directions of movement (in all conditions $P > 0.05$). The results also showed that in the execution of the movement in different conditions, there was no difference in the spatial error between the horizontal and vertical directions of movement ($P > 0.05$).

4. Discussion and Conclusion

Our experiment showed that the Ebbinghaus illusion affects perceived size judgment. Also, a-tDCS over V1 improved spatial and temporal errors. In an investigation of how tDCS modulates visual cortical responses, An et al. (2023) found that a-tDCS increased baseline blood oxygen level-dependent activity without affecting stimulus activity. Also, Antal et al. (2001) showed that applying positive DC stimulation increased the excitability of the motor cortex as well as the visual cortex.

Our study also showed that in healthy subjects, stimulation of the OZ area with a current of 1 mA improved visual function. After stimulation, spatial and temporal errors on movement execution improved in the real stimulation group compared to the sham stimulation group. Neurophysiological and behavioral changes following prolonged stimulation may lead to improved motor performance (Lerner et al., 2021) and neuroplastic changes in the visual cortex that can modulate perception (Antal, 2003). tDCS stimulation of V1 has been shown to affect spatial attention performance (Silvanto & Cattano, 2017). Lu and Chen (2025) showed that the Ebbinghaus illusion causes a delay in visual information processing. In a series of experiments, Wang et al. (2021) found that occipital

anodal stimulation temporarily increased the magnitude of the Ebbinghaus illusion relative to sham stimulation, while cathodal stimulation showed a similar effect to sham stimulation.

Our study findings also showed that there was no difference in task performance between the vertical and horizontal conditions in both the real and sham groups. However, Danion et al. (2020) also state in their study that fixation of saccades in the vertical direction occurs faster than in the horizontal direction. Also, in our study, given that the Ebbinghaus visual illusion was effective on spatial and temporal errors in the execution of rhythmic tapping movement, it cannot be said that the two visual-cognitive and motor pathways are completely separate, which challenges this hypothesis.

5. Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines: All ethical principles are considered in this article. The participants were informed about the purpose of the research and its implementation stages. They were also assured about the confidentiality of their information and were free to leave the study whenever they wished, and if desired, the research results would be available to them.

Funding: This research did not receive any grant from funding agencies in the public, commercial, or non-profit sectors.

Authors' contributions: All authors have participated in the design, implementation and writing of all sections of the present study.

تأثیر تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای قشر بینایی بر خطاهای فضایی و زمانبندی حرکت ضربه‌زنی به اهداف در شرایط توهم بینایی کلاسیک اینگه‌هاوس

فاطمه جعفری^۱، محمدرضا دوستان^۲، اسماعیل صائمی^۳

۱. کارشناسی ارشد، رفتار حرکتی و روانشناسی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران. رایانامه: sarajafaari1997@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه رفتار حرکتی و روانشناسی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.doustan@scu.ac.ir
۳. دانشیار، گروه رفتار حرکتی و روانشناسی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: e.saemi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	هدف: ادراک اندازه بینایی انسان همیشه یک نمایش صادقانه از دنیای فیزیکی نیست، بلکه به شدت به زمینه اطراف متکی است. هدف پژوهش حاضر، تأثیر تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای قشر بینایی بر خطاهای فضایی و زمانبندی حرکت ضربه‌زنی به اهداف در شرایط توهم بینایی اینگه‌هاوس بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵	روش: پژوهش حاضر از نوع نیمه تجربی و از لحاظ هدف از نوع بنیادی بود. ۳۲ دانشجوی دانشگاه با دامنه سنی ۱۸ تا ۲۸ داوطلبانه در پژوهش مشارکت کردند (تحریک واقعی، ۱۶ نفر و تحریک ساختگی، ۱۶ نفر). در پیش‌آزمون شرکت‌کنندگان تکلیف ضربه‌زنی به اهداف دوگانه را در چهار شرایط مختلف توهم اینگه‌هاوس انجام دادند. این شرایط شامل دو ریتم زمانی و دو جهت حرکت (افقی و عمودی) بود. خطای زمان‌بندی و خطای فضایی اندازه‌گیری شد. سپس، طی چهار روز متوالی در گروه واقعی تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای بر ناحیه قشر بینایی اولیه (V1) و در گروه شم، تحریک به صورت ساختگی اعمال شد. یک روز پس از آخرین جلسه تحریک، پس‌آزمون و سه روز بعد آزمون پیگیری مشابه با پیش‌آزمون به عمل آمد. از روش‌های آماری فریدمن و ویلکاکسون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ استفاده شد.
کلیدواژه‌ها:	یافته‌ها: نتایج نشان داد که در هنگام انجام حرکت در شرایط توهم اینگه‌هاوس، خطاهای فضایی و خطاهای زمان‌بندی در شرایط افقی با عمودی تفاوت نداشت. اعمال tDCS باعث کاهش خطای زمان‌بندی و خطای فضایی در اجرای تکلیف ضربه‌زنی ریتمیک با پس‌زمینه توهم اینگه‌هاوس شد ($p < 0.05$).
قشر بینایی اولیه، تکلیف مداوم، دست‌برداری، فرضیه تفکیک دو مسیر بینایی.	نتیجه‌گیری: با توجه به تأثیر توهم بینایی اینگه‌هاوس، بر خطاهای فضایی و زمانی حرکت مداوم، فرضیه تفکیک دو مسیر بینایی شناختی و حرکتی مورد تردید قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به اثرگذاری tDCS آنودال بر ناحیه V1 و کاهش خطاهای فضایی و زمانی در اجرای تکلیف حرکتی، پیشنهاد می‌شود در تکالیفی که نیازمند استفاده از دقت بینایی هستند، از این روش استفاده شود.

استناد: جعفری، فاطمه، دوستان، محمدرضا، و صائمی، اسماعیل (۱۴۰۴). تأثیر تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای قشر بینایی بر خطاهای فضایی و زمانبندی حرکت ضربه‌زنی به اهداف در شرایط توهم بینایی کلاسیک اینگه‌هاوس. *راهبردهای شناختی در یادگیری*، ۱۳(۲۴)، ۱۵۵-۱۳۳. <https://doi.org/10.22084/j.psychogy.2025.30192.2748>

۱. مقدمه

تحریک الکتریکی فراجمعه‌ای^۱ (tDCS) یکی از روش‌های نوین در علوم اعصاب است که به منظور تعدیل فعالیت‌های الکتریکی مغز و بهبود عملکرد شناختی و حرکتی استفاده می‌شود. این روش شامل اعمال جریان الکتریکی ضعیف به سطح پوست سر است که می‌تواند به تغییر در فعالیت نورون‌ها و بهبود ارتباطات عصبی منجر شود و قابلیت استفاده در محیط‌های بالینی و پژوهشی، و همچنین امکان تنظیم دقیق پارامترهای تحریک را دارد (حافظی و همکاران، ۲۰۲۴). تحریک جریان مستقیم فراجمعه‌ای آنودال^۲ (a-tDCS) یک تکنیک غیرتهاجمی تحریک الکتریکی مغز است که می‌تواند تحریک‌پذیری عصبی را تعدیل کند و باعث افزایش قالب‌پذیری عصبی (ابولیل^۳ و همکاران، ۲۰۲۱) و بهبود توانایی‌های شناختی-اجرایی (عرفانی نسب و همکاران، ۲۰۲۵) شود. در سال‌های گذشته، با استفاده از چندین تکنیک تحریک غیرتهاجمی در انسان، دستاوردهای قابل توجهی در ادراک بینایی حاصل شده است.

تحریک سلول‌های عصبی در قشر بینایی مغز، ما را قادر به دیدن اشیاء می‌کند (کوتی و شهسوارانی، ۲۰۱۶). فسفن‌ها ادراکات دیداری وهمی هستند که با اعمال تحریک مغناطیسی فراجمعه‌ای در قشر پس‌سری تولید می‌شوند (ترهون^۴ و همکاران، ۲۰۱۵). حداقل شدت TMS مورد نیاز برای استخراج فسفن به عنوان آستانه فسفن^۵ (PTs) تعریف می‌شود. مشخص شده است که PTها در طول زمان در آزمودنی‌ها پایدار هستند و به عنوان شاخص تحریک‌پذیری قشر بینایی پیشنهاد شده است (آنتال^۶ و همکاران، ۲۰۰۳ الف). تحریک آنودال منجر به کاهش قابل توجهی در PT می‌شود که این موضوع به احتمال زیاد به دلیل افزایش تحریک‌پذیری قشر مغز می‌باشد و همچنین تحریک کاتودی اثر معکوس با تحریک آنودال داشت که احتمالاً به دلیل کاهش تحریک‌پذیری قشر مغز است (آنتال و همکاران، ۲۰۰۳ ب). نشان داده شده است که tDCS آنودال روی قشر بینایی اولیه^۷ (V1) منجر به بهبود یادگیری ادراکی-دیداری و افزایش تحریک‌پذیری قشر مغز می‌شود (کیسر^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). شواهد همگرا نشان می‌دهد که اثر القاء بر اندازه درک شده هدف توسط فرآیندهای واقع در V1 واسطه می‌شود (یورل^۹ و همکاران، ۲۰۲۳). از عواملی که tDCS روی V1 اثرگذار است می‌توان به حساسیت کنتراست (بهرنس^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷) و شدت بینایی (بوچی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸) اشاره کرد. همچنین اعمال tDCS حافظه دیداری-فضایی را بهبود می‌دهد (وو^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۴). از سال ۱۹۹۲ مدلی از پردازش بینایی قشر مغز پیشنهاد شد که بین دید برای ادراک و دید برای عمل تمایز قائل شد (میلنر و گودل^{۱۳}، ۱۹۹۳). این نظریه که تحت عنوان نظریه تأثیرگذار «تفکیک دو جریان بینایی شناختی و حرکتی»، شناخته شده است، برای پردازش اطلاعات دیداری مسیرهای متفاوتی را در قشر بینایی اولیه مغز در نظر می‌گیرد (پولانن و داوار^{۱۴}، ۲۰۱۵)؛ یکی از قشر بینایی اولیه به قشر گیجگاهی تحتانی از طریق مسیر شکمی^{۱۵} (V4) و دیگری از قشر بینایی اولیه به قشر خلفی از طریق ناحیه بینایی گیجگاهی میانی^{۱۶} (MT) (تروانتن^{۱۷}، ۱۹۶۸). تصور می‌شود که جریان شکمی که در نهایت به قشر تحتانی گیجگاهی منتهی می‌شود، نقش عمده‌ای در شناسایی ادراکی اشیاء (مسیر کجاست) ایفا می‌کند؛ در حالی که جریان پشتی که به قشر خلفی می‌تابد، واسطه اعمال هدایت شده دیداری است که به سمت اجسام هدایت می‌شوند. (چگونه مسیر طی شود) (گودل و میلنر^{۱۸}، ۱۹۹۲).

1. Transcranial Electrical Stimulation
2. anodal transcranial direct current stimulation
3. Abuleil
4. Terhune
5. phosphene threshold
6. Antal
7. Primary Visual Cortex
8. Kaiser
9. Urale
10. Behrnes
11. Bocci
12. Wu
13. Milner and Goodale
14. Polanen & Davare
15. Ventral Pathway
16. Middle Temporal
17. Trevarthen
18. Goodale & Milner

مکانیزم ثبات اندازه بر ویژگی‌های شیء تأکید دارد و پردازش عصبی را در نظر نمی‌گیرد (کریش و کاندله^۱، ۲۰۲۱). نشان داده شده است که قشر بینایی اولیه در تشخیص اندازه محرک، تنها به اندازه شبکه‌ای آن وابسته نیست، بلکه زمینه‌های دیداری اطراف که در آن قرار دارد نیز اهمیت دارند (یو و جو^۲، ۲۰۲۳). مدت‌هاست که مشخص است که اندازه درک شده یک شیء، به اندازه اشیای نزدیک بستگی دارد (هلمهولتز^۳، ۱۸۶۷ به نقل از کریش و کوند، ۲۰۲۱). یک مثال معروف از چنین پدیده‌ای، توهم ایبنگهاوس^۴ است (کریس و کوند، ۲۰۲۱). این توهم از یک دایره هدف تشکیل شده است که توسط دایره‌های زمینه‌ای متعدد احاطه شده است (نول^۵ و همکاران، ۲۰۱۵). عناصر زمینه‌ای اطراف بیننده را به این سمت سوق می‌دهند که دایره درونی را کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از آنچه هست درک کنند (شرمن و چوینارد^۶، ۲۰۱۶). علاوه بر این، درحالی‌که، القاء‌گرهای بزرگ به‌طور قابل اعتماد باعث می‌شوند هدف کوچک‌تر به‌نظر برسد، القاء‌گرهای کوچک باعث می‌شوند هدف برای برخی بزرگ‌تر و برای برخی دیگر بسته به سطح V1 آن‌ها کوچک‌تر به‌نظر برسد (یورل و شاسکوف^۷، ۲۰۲۲).

یکی از عملکردهای ادراک دیداری، نوعی از تشخیص بینایی است که مستلزم طبقه‌بندی و بسط معنایی اطلاعات حسی-دیداری در زمان واقعی با کمک بازنمایی‌های ذخیره شده است (حسن و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به متمایزسازی مسیرهای بینایی (شکمی و پشتی)، اگر بینایی شناختی و حرکتی کاملاً از هم جدا باشند، توهمات بینایی که در زمینه حرکت ایجاد می‌شود و بینایی شناختی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد، نباید بر بینایی حرکتی اثرگذار باشد. اگر ایجاد توهم بینایی در زمینه خطاهای حرکتی در اجرای حرکت ضربه‌زنی ریتمیک اثرگذار باشد، بنابراین نمی‌توان گفت که دو مسیر بینایی شناختی و حرکتی از هم کاملاً جدا هستند. بسیاری از مطالعات عوامل موثر بر توهم ایبنگهاوس را بررسی کرده‌اند؛ از این رو زمانی و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که در کودکان مبتلا به اوتیسم کاهش قابل توجهی در موج آلفا در گروه توهم بینایی درک شده بزرگ‌شونده رخ می‌دهد. با این وجود، تاکائو^۸ و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که توهم ایبنگهاوس بیشتر به شبکه چشم بستگی دارد تا اندازه درک شده از محرک‌های اطراف. پژوهش بهمنی و همکاران (۲۰۱۷)، در تیراندازی با تفنگ و تپانچه ۱۰ متری در توهم بینایی ایبنگهاوس، شرکت‌کنندگانی که هدف را بزرگ‌تر درک کردند، عملکرد بهتری داشتند. همچنین ویت^۹ و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که هدف ظاهراً بزرگ‌تر منجر به نتیجه یادگیری مؤثرتر در گلف می‌شود. شهپاز و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که توهم بزرگ‌شونده در زمینه دیداری نسبت به توهم کوچک‌شونده، همراه با تمرین خودکنترلی برای یادگیری تکلیف گلف مفیدتر است. ولی، پژوهش کانل برالند^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که توهمات کوچک‌شونده یادگیری را تقویت می‌کند، در حالی که توهمات بزرگ‌شونده برای یادگیری مفید نیستند. با این حال، پژوهش‌های بسیار اندکی در زمینه تکالیف مداوم هدف‌گیری در زمینه با توهم بینایی انجام شده است.

تکالیف مداوم هدف‌گیری به‌ویژه تکالیف ضربه‌زنی دوطرفه به اهداف، از جمله تکالیفی دیداری- حرکتی هستند که پژوهش‌های زیادی را در زمینه‌های مختلف حوزه نقش بینایی در کنترل حرکتی به خود اختصاص داده‌اند (اشمیت، ۲۰۱۴). در این حرکات، براساس مدل پیش‌رو درونی، برای اطمینان از دستیابی به هدف، سیستم عصبی مرکزی قادر است بر اساس اطلاعات آنلاین بینایی، اصلاحات همزمانی را در حرکت انجام دهد (هیندر^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۰)؛ غلامی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که هنگام اجرای تکالیف ضربه‌زنی به اهداف در تکلیف ضربه‌زنی مداوم دوطرفه، ارتباط تنگاتنگی بین فرایندهای بینایی با چالاکی دستی و برتری دستی وجود دارد. به‌طوری‌که با دشوار شدن تکالیف، خطاهای زمانبندی افزایش می‌یابد. همچنین دوستان و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که در تکالیف مداومی که به‌طور همزمان نیازمند دقت و سرعت هستند، هم خطای فضایی و هم خطای زمانی تحت تأثیر دشواری تکلیف و اندام قرار می‌گیرند، به‌طوری‌که هنگام اجرا با دست غیربرتر فعالیت مغزی افزایش می‌یابد. فلاح و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که هنگام اجرای تکالیف مداوم هدف‌گیری دوطرفه، خطاهای فضایی و زمانی در اجرای

1. Kirsch & Kunde
2. Yoo & Joo
3. Helmholtz
4. Ebbinghaus illusion
5. Knol
6. Sherman & Chouinard
7. Urale & Schwarzkopf
8. Takao
9. Witt
10. Canal-Bruland
11. Hinder

حرکت در جهت افقی از اجرا در جهت عمودی بیشتر است، زیرا استفاده از اطلاعات بازخوردی بینایی برای انجام ریزاصلاحات حرکتی دشوارتر است. به نظر می‌رسد با ایجاد توهم بینایی در پس‌زمینه حرکت بتوان به دیدگاه‌های عمیق‌تری از شیوه پردازش و استفاده از اطلاعات بینایی در این‌گونه تکالیف مداوم هدف‌گیری دست یافت.

پیشنهاد شده است که توهم اینگه‌هاوس هم با تعامل جانبی در مرحله اولیه پردازش (شرمن و چئونارد^۱، ۲۰۱۶) و هم پیش‌بینی بازخورد از نواحی بینایی بالاتر به پایین‌تر (کینگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۷) رخ دهد. از آنجا که توهمات اندازه بینایی با جنبه‌های عملکردی و ساختاری V1 مرتبط هستند. احتمالاً تحریک ناحیه V1 می‌تواند پردازش دیداری در شرایط توهم بینایی را تحت تأثیر قرار دهد؛ در این زمینه وانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که تحریک پس‌سری آنودال نسبت به تحریک ساختگی، به‌طور موقت بزرگی هردو توهم اینگه‌هاوس و پونزو را افزایش می‌دهد، درحالی‌که تحریک کاتودال اثری مشابه با تحریک ساختگی نشان می‌دهد. این تغییرات در میزان توهم در ادراک بینایی ممکن است بر خطاهای حرکتی در شرایط توهم‌زا (اینگه‌هاوس یا پونزو) اثرگذار باشد.

هرچند موضوع این پژوهش‌ها عمدتاً از نوع بنیادی است، با این‌وجود نتایج پژوهش در مورد اثر تحریک ناحیه بینایی بر ادراک بینایی در شرایط با زمینه توهم‌زا می‌تواند برای برخی تکالیف مانند تکالیف هوافضا، خلبانان یا هرگونه تکلیف هدف‌گیری در زمینه‌های پیچیده بینایی مفید باشد. با توجه به اینکه پژوهش‌های اندکی در مورد تأثیر وجود توهم بینایی اینگه‌هاوس در پس‌زمینه حرکت بر کیفیت اجرای حرکت در تکالیف مداوم انجام شده است، پژوهش ما در پی پاسخ‌گویی به این پرسش است که آیا توهم بینایی اینگه‌هاوس بر میزان خطاهای حرکتی (زمانی و فضایی) در هنگام اجرای حرکت ریتمیک ضربه‌زنی در جهت حرکت افقی و عمودی تأثیر دارد؟ همچنین با توجه به پژوهش‌های اندکی که در مورد بررسی تأثیر tDCS بر اجرا در این شرایط انجام شده است، قصد داریم بررسی کنیم که آیا اعمال tDCS بر ناحیه V1 باعث کاهش این خطاها می‌شود یا خیر؟

۲. روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع نیمه‌تجربی و از نظر هدف از نوع بنیادی است. در این پژوهش دانشجویان مقطع کارشناسی دانشگاه شهید چمران اهواز مشارکت کردند. حجم نمونه مورد نیاز بر اساس اندازه اثر در یک مطالعه مرتبط پیشین (مروژک^۴ و همکاران، ۲۰۲۲)، با استفاده از نرم‌افزار جی‌پاور ۳.۱.۹.۴ با فاصله اطمینان ۰/۰۵، توان آماری ۰/۹۵ و اندازه اثر ۰/۲۵ محاسبه شد. حداقل حجم نمونه مورد نیاز محاسبه شده در این پژوهش ۲۶ نفر بود. با این‌وجود، با توجه به اهمیت و اعتبار نتایج، تعداد حجم نمونه بیشتری در نظر گرفته شد. ملاک‌های ورود داشتن بینایی طبیعی و نداشتن سابقه مصرف داروهای آرام‌بخش، نوشیدن مشروبات الکلی و اعتیاد به مواد مخدر، بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی، اختلالات عصبی یا روان‌شناختی و ایمپلنت‌های فلزی بود. ملاک‌های خروج نیز شامل عدم مشارکت در حتی یکی از جلسات تحریک و یا انصراف فرد به هر دلیل بود. همه مراحل پژوهش با تأیید کمیته اخلاق دانشگاه و مطابق با اعلامیه هلسینکی انجمن جهانی پزشکی (با کد اخلاق EE/1401.2.24.222070/scu.ac.ir) انجام شد. شرکت‌کنندگان داوطلب دارای ملاک ورود شامل ۳۲ نفر (۱۶ نفر گروه شم و ۱۶ نفر گروه واقعی) بودند که همگی جهت شرکت در این پژوهش فرم رضایت‌نامه آگاهانه را پر کردند.

۲-۱. ابزارهای پژوهش

ابزار مورد استفاده در این پژوهش شامل پرسشنامه دست‌برتری ادینبورگ (اولدفیلد^۵، ۱۹۷۱)، فرم رضایت‌نامه، نرم‌افزار ترسیم دوایر، دستگاه تحریک جریان الکتریکی مستقیم فراجمعه‌ای، پرسشنامه اثرات نامطلوب^۶ (AEs) و دستگاه سنجش دقت فضایی-زمانی می‌باشد.

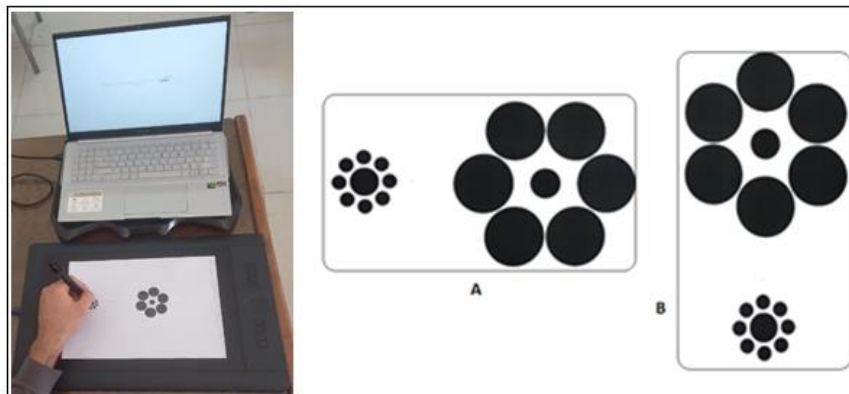
1. Sherman & Chouinard
2. King
3. Wang
4. Mruczek
5. G*Power 3.1.9.4
6. Oldfield
7. adverse effects (AEs)

دستگاه سنجش دقت فضایی- زمانی: این دستگاه در پژوهش حاضر از دو بخش تقسیم شده است؛ دستگاه سنجش دقت فضایی- زمانی؛ در بخش سخت‌افزاری شامل پدلمسی (تبلت)، قلم‌نوری و کابل رابط USB و در بخش نرم‌افزاری شامل برنامه نصب و راه‌اندازی قطعات سخت‌افزاری بر روی لپ‌تاپ و برنامه ضربه‌زدن به هدف می‌باشد. این دستگاه در تاریخ ۱۳۹۶/۰۵/۰۶ با شماره اظهارنامه ۱۳۹۶۵۰۱۴۰۰۳۰۰۵۲۲۹ و طبقه‌بندی بین‌المللی A61B5/11;B43M11/06 توسط دوستان و همکاران ثبت اختراع شده است. ابتدا برنامه نرم‌افزاری و پدلمسی و قلم‌نوری را بر روی لپ‌تاپ نصب کرده و سپس نرم‌افزار ضربه‌زنی به هدف نصب و اجرا می‌شود. در این نرم‌افزار امکان تعریف، طراحی و اجرای آزمون طبق نظر پژوهشگر با امکانات موجود در این برنامه میسر می‌باشد؛ این تنظیمات عبارتند از: نام آزمون، طول و عرض صفحه آزمون، تعداد اهداف، طول و عرض هر هدف، فاصله بین اهداف، نوع هدف (به‌عنوان مثال: دایره، مستطیل، خط و رنگ هدف) می‌باشد. همچنین واحدهای مکانی این نرم‌افزار بر اساس میلی‌متر می‌باشد. پس از طراحی و چاپ اهداف، برگه چاپ شده را روی صفحه تبلت یا پدلمسی قرار داده و ثابت می‌شود. همچنین برای انطباق هدف طراحی شده در نرم‌افزار و چاپ شده روی صفحه، کالیبراسیون انجام می‌شود (شکل ۱).

این دستگاه برای اندازه‌گیری و تخمین سرعت و دقت شرکت‌کننده به کار می‌رود؛ زمان تخمین سرعت با دقت ۰/۰۰۱ ثانیه اندازه‌گیری می‌کند. آزمایش‌های روانی- حرکتی مثل دقت مسیر، آهنگ فردی، هماهنگی چشم- دست، یادگیری از طریق کوشش و خطا در سطوح مختلف دشواری تکلیف قابل‌اندازه‌گیری است. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش مدل PTH-851 که دارای امکان تماس دست در محدوده عملکرد با سایز ۲۰۳/۲ در ۳۲۵/۱ میلی‌متر است؛ این پدلمسی به کامپیوتر و همچنین لپ‌تاپ از طریق کابل و پورت USB متصل می‌شود و می‌توان از طریق وایرلس وصل شود. همچنین دارای هشت کلید میانبر با رزولوشن ۵۸۰ و حساسیت قوی ۲۵۴۰ به سفارش کشور ایالات متحده آمریکا و ساخت کشور چین می‌باشد. قلم‌نوری دارای تکنولوژی الکترومغناطیسی، با حساسیت ۰/۲۵ میلی‌متر و سطح فشار ۲۰۴۸ می‌باشد.

وظیفه هر شرکت‌کننده در زمان معین و در فاصله خاص به اهداف تعبیه شده در تبلت با استفاده از قلم‌نوری، به سرعت و با دقت ضربه بزنند به‌طوری که محل ضربه درون اهداف باشد؛ در این حالت شرکت‌کننده ابتدا باید درباره ساختار فضایی حرکت و دوماً تخمینی از زمان انجام حرکت داشته باشد. پس از اتمام هر آزمون این ابزار چندین خروجی به ما نشان می‌دهد؛ از جمله: زمان حرکت، تعداد کل ضربه‌های درست و اشتباه، فاصله زمانی بین یکایک ضربه‌ها، میانگین فاصله زمانی بین ضربه‌ها، تعداد ضربه‌های بیرون از هدف (خطاها) و فاصله هر ضربه تا مرکز هدف مربوطه، انحراف استاندارد و پراکندگی ضربات و.. را مشخص می‌کند. روایی این ابزار توسط کارشناسان و افراد خبره در حوزه رفتار حرکتی تأیید شده است و پایایی ابزار با استفاده از روش آزمون- بازآزمون از طریق ضریب همبستگی پیرسون ۰/۹۱ تعیین شد.

نرم‌افزار Circle: قابلیت این نرم‌افزار، طراحی تصاویر اینیگه‌هاوس است که به‌طور اختصاصی توسط مهندسين حرفه‌ای دانشگاه تربیت مدرس تهران آماده شده است؛ این نرم‌افزار توانایی انتخاب تعداد و اندازه دایره‌های اطراف (زمینه) هدف و همچنین دایره هدف (میانی) و فاصله آنها را دارد. از دیگر قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به انتخاب رنگ تصاویر اینیگه‌هاوس و جداسازی دایره‌های هدف و زمینه اشاره کرد. خروجی این نرم‌افزار به‌صورت فایل PDF و امکان چاپ آن با تمامی چاپگرهای متصل به کامپیوتر و لپ‌تاپ وجود دارد.



شکل ۱. تصویر پروتکل اجرای پژوهش به صورت شکل

دستگاه تحریک جریان الکتریکی مستقیم فراجمجمه‌ای: این دستگاه دارای دو کانال مجزا Neurostim2 ساخت کشور ایران، محصول شرکت مدینا طب گستر و موسسه علوم شناختی سینا است. این دو کانال به‌طور مستقل از دیگری قابل تنظیم است و می‌توان انواع تحریکات که شامل: شدت جریان، زمان و فرکانس را اعمال کرد. شدت جریان خروجی دستگاه مذکور از ۰/۵ تا ۲ و تا ۲۰۰ هرتز فرکانس موج خروجی و تا ۴۵ دقیقه برای ارائه تحریک قابل تنظیم است. این دستگاه جهت جلوگیری از سوزش پوست ناشی از مقاومت دارای نمایشگر مقاومت الکترودها است و می‌توان تحریک ساختگی یا شم را نیز روی آن اعمال کرد. این دستگاه پنج نوع تحریک را داراست که شامل: تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب، تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان مستقیم، تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان مستقیم-نوسانی، تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان نويز تصادفی، تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان پالس می‌باشد؛ همچنین دارای سیستم هشداردهنده صوتی است که در مواقع لزوم مانند اتمام جلسه تحریک، افزایش مقاومت الکترودها، جدا شدن الکترود از سر، کاهش شارژ باتری به‌صدا در می‌آید؛ ابعاد این الکترود برای تحریک آند و کاتد ۵×۵ است.

پرسشنامه اثرات نامطلوب (AEs): تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای مغز: در این مطالعه، از پرسشنامه عوارض جانبی و نامطلوب tDCS، استفاده شد که دارای ۱۴ گویه است که مقدار ۱ به معنی عدم حس موردنظر تا ۱۰ به معنای حس شدید رتبه‌بندی شده است. این پرسشنامه شامل عوارض جانبی احتمالی تحریک فراجمجمه‌ای مغز مانند: سردرد، گردن درد، درد پوست سر، گزگز، خارش، احساس سوزش، قرمزی پوست، خواب‌آلودگی، مشکل تمرکز، تغییر خلق و خوی حاد و ... می‌باشد (مانوئل^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). دستورالعمل پیش از تحریک: اگر شرکت کنندگان برای هر یک از گویه‌ها به‌غیر از گویه‌های ۳، ۸، ۱۰ و ۱۱ که موارد ساختگی هستند نمره «۵» یا بالاتر را کسب کنند، نباید در آن روز تحریک دریافت کنند، زیرا تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای به‌طور موقت بعضی از این شرایط را تشدید خواهد کرد. دستورالعمل پس از تحریک: اگر مشارکت کنندگان در مواردی غیر از ۳، ۸، ۱۰ و ۱۱ که موارد ساختگی هستند نمره «۵» یا بالاتر کسب کرده باشند، باید تا زمانی که علائم کاهش یابد یا تا زمانی که مشارکت کننده یا پژوهشگر برای ترک محل رضایت دهند، در آزمایشگاه بمانند. اگر علائم بیش از ۲۴ ساعت ادامه داشت، باید با محقق تماس گرفته و به‌دنبال درمان مناسب باشند. بسیار مهم است که مشارکت کنندگان به‌تمامی موارد (گویه‌ها) صادقانه پاسخ دهند.

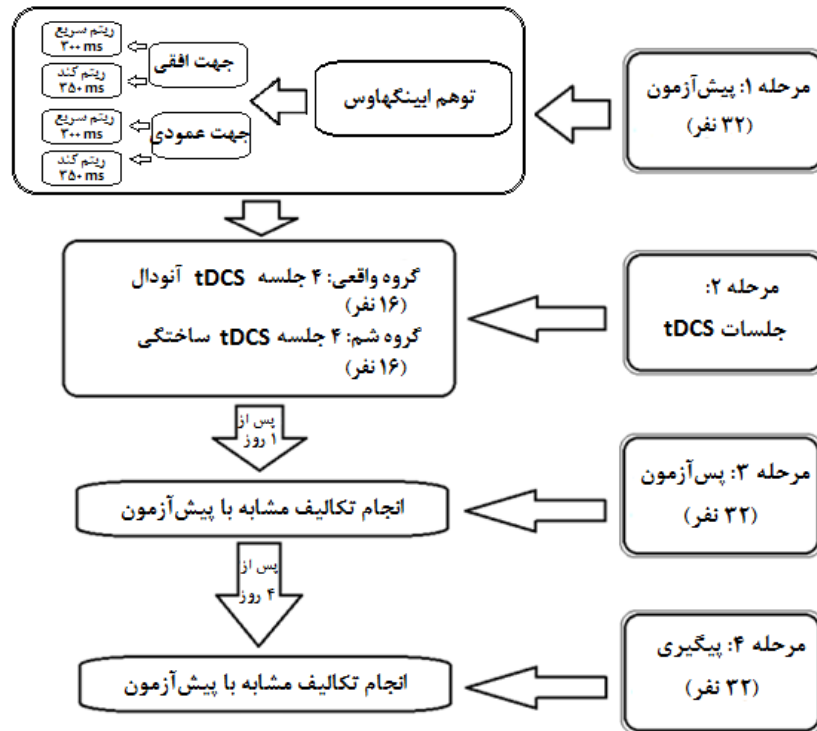
از دیگر ابزارهای مورد استفاده در پژوهش شامل کرنومتر، مترونوم، که ابزاری است که می‌تواند آزمودنی‌ها را در نگه داشتن ریتم حرکت هدایت کند. اغلب مترونوم‌ها با یکای ضرب در دقیقه سنجیده می‌شوند که قادر به تولید ضرباتی در گستره ۲۵۰ تا ۳۰۰ ضرب در دقیقه هستند. دو نوع مترونوم وجود دارد که عبارتند از: مترونوم دیجیتالی و مترونوم مکانیکی که در این تحقیق از مترونوم دیجیتالی نصب شده در لپ‌تاپ استفاده شد.

۲-۲. روش اجرا

شرکت کنندگان براساس برنامه‌ای که از پیش به آنها اعلام شد، در محل آزمایشگاه رفتار حرکتی و روانشناسی ورزشی دانشگاه شهید چمران اهواز حاضر شدند. ابتدا فرم رضایت‌نامه و مشخصات فردی و پرسشنامه دست‌برتری ادینبورگ را تکمیل کردند. پیش از اجرای هر فعالیتی، پرسش‌هایی درباره داشتن ملاک‌های ورود پرسیده شد در صورت دارا بودن شرایط افراد در پژوهش مشارکت می‌کردند. پیش از اجرای آزمون توضیحات شفاهی با نمایش عملی در مورد چگونگی اجرای آزمون به شرکت کنندگان نمایش داده شد.

ابتدا پیش‌آزمون به‌عمل آمد؛ پیش‌آزمون بدین صورت بود که مشارکت کنندگان تکلیف ضربه‌زنی به اهداف میانی را در شرایط مختلف با زمینه توهّم اینگه‌اوس انجام دادند؛ این شرایط شامل ریتم زمانی آهسته (۳۵۰ میلی‌ثانیه) و سریع (۳۰۰ میلی‌ثانیه)، در جهت افقی و عمودی با اندام برتر و غیربرتر بود. به‌طوری‌که در مجموع در ۸ شرایط مختلف انجام شد. هر کوشش در مدت‌زمان ۱۲ ثانیه انجام شد. توهّمات بینایی اینگه‌اوس شامل دایره هدف با زمینه کوچک‌شونده و بزرگ‌شونده بود. اطلاعات خروجی به‌صورت اعداد از صفحه قلم نوری و پدلمسی ثبت گردید؛ ما با ثبت خطای زمان‌بندی (میانگین فاصله زمانی بین ضربات) و خطای

فضایی (میانگین فاصله از مرکز هدف) در شرایط مختلف به بررسی و مقایسه شرایط و حالات مختلف پرداختیم. سپس شرکت-کنندگان به‌طور تصادفی در دو گروه ۱۶ نفره تحریک واقعی و ساختگی قرار گرفتند (شکل ۲). پس از آن به‌مدت چهار جلسه تحت تحریک الکتریکی فراجمعه‌ای قرار گرفتند و یک روز پس از آخرین جلسه تحریک، پس‌آزمون و سه روز پس از آن آزمون پیگیری مشابه با پیش‌آزمون به‌عمل آمد.



شکل ۲. فلوجارت اجرای پژوهش

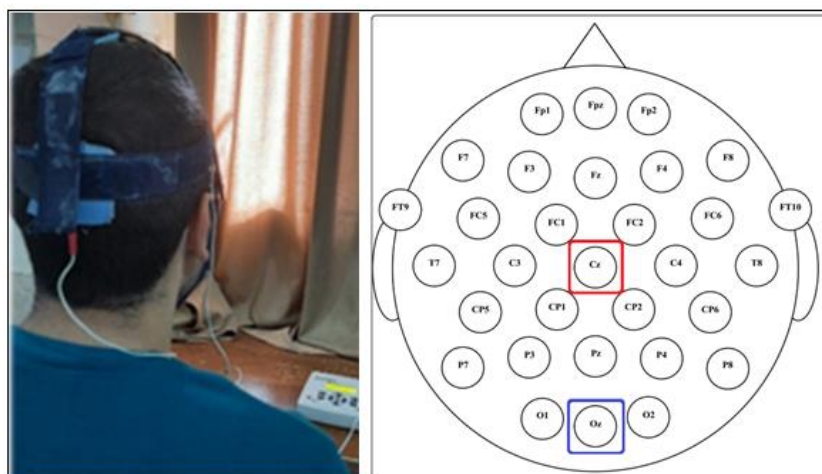
۲-۳. پروتکل تحریک

دوز تحریک با پارامترهای زیر تعریف می‌شود: (۱) دوز فعلی (در واحد آمپر) (۲) مدت‌زمان تحریک (۳) مونتاژ الکترود (اندازه و موقعیت الکترودها). متداول‌ترین اندازه‌های الکترود، از ۲۵ تا ۳۵ سانتی‌مترمربع با جریان ۱ تا ۲ میلی‌آمپر و مدت‌زمان تحریک تا ۲۰ دقیقه می‌باشد. چگالی جریان (دوز فعلی تقسیم بر اندازه الکترود) نیز به‌ویژه برای تعریف ایمنی؛ یکی از پارامترهای مهم در نظر گرفتن دوز است (حافظی و همکاران، ۱۴۰۳؛ نیچه و پائولوز، ۲۰۱۱).

در این پژوهش، جریانی با شدت ۱ میلی‌آمپر از طریق یک جفت الکترود اسفنجی ۵×۵ سانتی‌متر (۲۵ سانتی‌متر مربع) که با کش‌های مخصوص بر روی نواحی مورد نظر قشری ثابت می‌شوند، به‌مدت ۲۰ دقیقه اعمال شد (فیلمر^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). پدهای مخصوص هر الکترود در محلول نمک^۲ خیس می‌شود تا مقاومت ظاهری (امپدانس) را به حداقل رسانده و سپس بر روی نواحی مورد نظر قرار گرفتند (حافظی و همکاران، ۱۴۰۳؛ پائولوز و همکاران، ۲۰۱۶).

تعداد جلسات تحریک برای هر شرکت‌کننده ۴ جلسه متوالی پیشنهاد شده است (نیچه و همکاران، ۲۰۰۸). در جلسات تحریک، الکترودهای دستگاه تحریک جریان مستقیم فراجمعه‌ای در هر دو گروه تحریک واقعی و ساختگی به نواحی مشابهی بر روی پوست سر متصل شدند. محل الکترودها مطابق با سیستم الکترود ۱۰-۲۰ الکترودانسفالوگرافی بین‌المللی تعیین شد (شکل ۳). برای تحریک نقطه V1 الکترود فعال بر روی ناحیه OZ و الکترود مرجع در وسط سر ناحیه CZ قرار گرفت (وو^۳ و همکاران، ۲۰۲۱).

1. Filmer
2. Saline Solution
3. Wu



شکل ۳. تصویر محل نواحی الکتروود کاتد و آند بر روی نواحی قشری

به منظور نظارت برای عوارض جانبی بالقوه، از مشارکت کنندگان خواسته شد که به پرسشنامه اثرات نامطلوب پیشنهاد شده توسط برنونی و همکاران (۲۰۱۱) پیش و پس از هر جلسه تحریک را به طور دقیق و صادقانه پاسخ دهند (تایید^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). گرچه عوارض جانبی گزارش شده که شامل خارش زیر الکتروود و سوزش و قرمزی پوست سر و سردردهای کم، هم در حین و هم پس از تحریک شایع می باشند، اما معمولاً این عوارض خفیف و بدون اثرات پایدار هستند (حافظی و همکاران، ۲۰۲۴؛ مفا^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). تاکنون هیچ عارضه جانبی قابل توجهی در جلسات متوالی اعمال tDCS با حداکثر دوز مورد استفاده (۲ میلی آمپر) در کارآزمایی های بالینی مشاهده نشده است (لو^۳ و همکاران، ۲۰۱۲؛ گالوز^۴ و همکاران، ۲۰۱۳).

برای تجزیه و تحلیل داده ها از روش های آمار توصیفی مانند میانگین، انحراف استاندارد استفاده شد. همچنین با توجه به نتایج آزمون شاپیرو ویلک، از روش های آمار استنباطی ناپارامتریک نظیر ویلکاکسون، یو-من ویتنی و فریدمن استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل داده ها از نرم افزار SPSS نسخه ۲۳ استفاده شد. در نگارش پژوهش از نرم افزارهای word و Excel ۲۰۱۶ نیز به منظور نتایج محاسبات استفاده شد و کلیه آزمون ها در سطح معنی داری $p \leq 0.05$ آزمون شدند.

۳. یافته های پژوهش

جدول ۱. نتایج آزمون یو-من ویتنی برای بررسی تفاوت خطای زمان بندی در شرایط توهم ایننگهاوس بین گروه واقعی و ساختگی در پیش آزمون، پس آزمون و پیگیری در هنگام اجرا با ریتم کند و تند

جهت افقی	خطای زمان بندی (میلی ثانیه)	ریتم کند (۳۵۰ ms)	ریتم تند (۳۰۰ ms)	پیش آزمون	میانگین	Z	Sig	میانگین های رتبه ای	
								واقعی	شم
جهت افقی	ریتم کند (۳۵۰ ms)	پیش آزمون	۴۰۱/۸۹۶۳	-۰/۱۱۳	۰/۹۱۰	۱۶/۶۹	۱۶/۳۱		
		پس آزمون	۳۷۲/۵۶۷۲	-۰/۶۷۸	۰/۴۹۷	۱۵/۳۸	۱۷/۶۳		
		پیگیری	۳۵۶/۷۷۰۹	-۰/۰۵۷	۰/۹۵۵	۱۶/۴۱	۱۶/۵۹		
	ریتم تند (۳۰۰ ms)	پیش آزمون	۳۳۶/۹۶۰۶	-۰/۳۷۷	۰/۷۰۶	۱۵/۸۸	۱۷/۱۳		
		پس آزمون	۳۳۳/۴۳۷۲	-۱/۰۱۸	۰/۳۰۹	۱۴/۸۱	۱۸/۱۹		
		پیگیری	۳۱۴/۴۵۵۶	-۱/۶۰۲	۰/۱۰۹	۱۳/۸۴	۱۹/۱۶		
جهت عمودی	ریتم کند (۳۵۰ ms)	پیش آزمون	۳۸۳/۲۸۵۳	-۰/۳۰۲	۰/۷۶۳	۱۶/۰۰	۱۷/۰۰		
		پس آزمون	۳۸۰/۸۴۴۱	-۱/۱۶۸	۰/۲۴۳	۱۴/۵۶	۱۸/۴۴		
		پیگیری	۳۶۶/۶۰۰۹	-۰/۵۸۴	۰/۵۵۹	۱۷/۴۷	۱۵/۵۳		
	ریتم تند (۳۰۰ ms)	پیش آزمون	۳۴۵/۰۶۱۹	-۰/۴۹۰	۰/۶۲۴	۱۵/۶۹	۱۷/۳۱		
		پس آزمون	۳۳۷/۳۷۳۴	-۰/۶۹۷	۰/۴۸۶	۱۵/۳۴	۱۷/۶۶		
		پیگیری	۳۳۱/۳۰۳۸	-۰/۴۹۰	۰/۶۲۴	۱۵/۶۹	۱۷/۳۱		

1. Thair
2. Moffa
3. Loo
4. Gálvez

همان‌طور که در جدول ۱ آمده است، نتایج آزمون یو-من‌ویتنی برای بررسی تفاوت خطای زمان‌بندی توهم کلاسیک ایننگهاوس بین گروه واقعی و ساختگی در پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری در هنگام اجرا با ریتم کند و تند نشان می‌دهد در آزمون‌های مختلف (پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری) و در دو سرعت حرکتی متفاوت (ریتم کند و تند)، بین دو گروه تفاوت معنی‌داری یافت نشد (در همه موارد $P > 0.05$).

جدول ۲. نتایج آزمون یو-من‌ویتنی برای بررسی تفاوت خطای فضایی در شرایط توهم ایننگهاوس بین گروه تحریک واقعی و شم در آزمون‌های مختلف

اهداف		آزمون	میانگین	Z	Sig	میانگین‌های رتبه‌ای	
						واقعی	شم
جهت افقی	خطای فضایی کلی (میانگین دو هدف)	پیش‌آزمون	۵/۳۰۶۹	-۲/۲۶۱	*۰/۰۲۴	۲۰/۲۵	۱۲/۷۵
		پس‌آزمون	۴/۴۳۱۳	-۱/۴۳۲	۰/۱۵۲	۱۸/۸۸	۱۴/۱۳
		پیگیری	۴/۴۹۱۹	-۱/۲۰۷	۰/۲۲۸	۱۴/۵۰	۱۸/۵۰
		پیش‌آزمون	۵/۶۶۱۹	-۲/۳۱۸	*۰/۰۲۰	۲۰/۳۴	۱۲/۶۶
		پس‌آزمون	۵/۲۶۰۶	-۱/۲۴۴	۰/۲۱۴	۱۴/۴۴	۱۸/۵۶
		پیگیری	۵/۰۱۱۶	-۱/۶۹۶	۰/۰۹۰	۱۳/۹۶	۱۹/۳۱
	خطای فضایی هدف کوچک‌شونده	پیش‌آزمون	۵/۲۰۳۷	-۲/۰۳۵	*۰/۰۴۲	۱۹/۸۸	۱۳/۱۳
		پس‌آزمون	۴/۳۸۰۶	-۰/۵۰۹	۰/۱۴۷	۱۸/۹۱	۱۴/۰۹
		پیگیری	۳/۶۱۳۱	-۰/۱۳۲	۰/۶۱۱	۱۵/۶۶	۱۷/۳۴
		پیش‌آزمون	۶/۲۰۴۷	-۰/۳۳۹	۰/۸۹۵	۱۶/۷۲	۱۶/۲۸
		پس‌آزمون	۵/۰۲۶۳	-۰/۹۹۹	۰/۳۱۸	۱۴/۸۴	۱۸/۱۶
		پیگیری	۳/۸۲۲۲	-۰/۵۰۹	۰/۶۱۱	۱۷/۳۴	۱۵/۶۶
	خطای فضایی هدف بزرگ‌شونده	پیش‌آزمون	۵/۳۶۸۸	-۰/۰۳۸	۰/۹۷۰	۱۶/۴۴	۱۶/۵۶
		پس‌آزمون	۴/۷۵۷۸	-۱/۲۰۶	۰/۲۲۸	۱۸/۵۰	۱۴/۵۰
		پیگیری	۴/۵۸۵۶	-۰/۰۷۵	۰/۹۴۰	۱۶/۳۸	۱۶/۶۳
		پیش‌آزمون	۶/۴۱۳۱	-۰/۸۱۰	۰/۴۱۸	۱۷/۸۴	۱۵/۱۶
		پس‌آزمون	۵/۷۰۵۹	-۰/۳۷۷	۰/۷۰۶	۱۵/۸۸	۱۷/۱۳
		پیگیری	۵/۸۹۸۴	-۰/۸۶۷	۰/۳۸۶	۱۷/۹۴	۱۵/۰۶
جهت عمودی	خطای فضایی کلی (میانگین دو هدف)	پیش‌آزمون	۵/۵۵۶۹	-۱/۸۴۷	۰/۰۶۵	۱۹/۵۶	۱۳/۴۴
		پس‌آزمون	۴/۸۳۲۵	-۰/۴۵۲	۰/۶۵۱	۱۷/۲۵	۱۵/۷۵
		پیگیری	۴/۰۷۰۹	-۱/۶۵۸	۰/۰۹۷	۱۳/۷۵	۱۹/۲۵
		پیش‌آزمون	۵/۷۷۲۸	-۰/۶۶۰	۰/۵۰۹	۱۷/۵۹	۱۵/۴۱
		پس‌آزمون	۵/۰۵۱۶	-۰/۰۳۸	۰/۹۷۰	۱۶/۵۶	۱۶/۴۴
		پیگیری	۴/۴۱۷۲	-۰/۰۷۵	۰/۹۴۰	۱۶/۶۳	۱۶/۲۸
	خطای فضایی هدف کوچک‌شونده	پیش‌آزمون	۴/۹۰۰۹	-۰/۳۷۷	۰/۷۰۶	۱۵/۸۸	۱۷/۱۳
		پس‌آزمون	۴/۵۲۰۳	-۰/۵۴۷	۰/۵۸۵	۱۷/۴۱	۱۵/۵۹
		پیگیری	۳/۹۰۷۵	-۱/۴۳۳	۰/۱۵۲	۱۴/۱۳	۱۸/۸۸
		پیش‌آزمون	۵/۰۰۲۵	-۱/۰۵۵	۰/۲۹۱	۱۴/۷۵	۱۸/۲۵
		پس‌آزمون	۴/۷۳۹۷	-۰/۲۶۴	۰/۷۹۲	۱۶/۹۴	۱۶/۰۶
		پیگیری	۴/۲۲۲۸	-۰/۸۶۷	۰/۳۸۶	۱۵/۰۶	۱۷/۹۴
	خطای فضایی هدف بزرگ‌شونده	پیش‌آزمون	۵/۳۴۹۴	-۰/۶۴۱	۰/۵۲۲	۱۷/۵۶	۱۵/۴۴
		پس‌آزمون	۵/۴۱۸۴	-۰/۶۴۱	۰/۵۲۲	۱۷/۵۶	۱۵/۴۴
		پیگیری	۴/۲۲۷۸	-۱/۳۹۴	۰/۱۶۳	۱۴/۱۹	۱۸/۸۱
		پیش‌آزمون	۶/۰۸۲۵	-۰/۰۳۸	۰/۹۷۰	۱۶/۴۴	۱۶/۵۶
		پس‌آزمون	۵/۱۴۰۶	-۰/۱۳۲	۰/۸۹۵	۱۶/۷۲	۱۶/۲۸
		پیگیری	۴/۶۰۸۱	-۰/۲۲۶	۰/۸۲۱	۱۶/۸۸	۱۶/۱۳

همان‌طور که در جدول ۲ آمده است، نتایج آزمون یو-من‌ویتنی برای بررسی تفاوت خطای فضایی (میانگین فاصله از مرکز هدف) توهم ایننگهاوس بین گروه واقعی و ساختگی در پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری در هنگام اجرا با ریتم کند و تند نشان

می‌دهد در پیش‌آزمون‌های کلی (میانگین دو هدف) در دو ریتم کند و تند بین دو گروه تحریک واقعی و شم تفاوت وجود دارد (به ترتیب $P=0/024$ و $P=0/020$). همچنین در هدف کوچک‌شونده در پیش‌آزمون در ریتم کند بین دو گروه تحریک واقعی و شم تفاوت وجود دارد ($P=0/042$). به‌طوری‌که در پیش‌آزمون‌ها گروه تحریک واقعی نسبت به ساختگی ضعیف‌تر عمل کرده است و خطای فضایی بیشتری داشته است ولی در پس‌آزمون و به‌ویژه پیگیری گروه تحریک واقعی دقت فضایی بهتری داشته است و نسبت به پیش‌آزمون پیشرفت قابل‌توجهی داشته است، در حالی‌که گروه ساختگی حتی افت هم داشته است. این موضوع به‌طور خاص در اهداف کوچک‌شونده و حتی بیشتر در مورد اجرای حرکت با ریتم کند رخ داده است.

جدول ۳. نتایج آزمون فریدمن برای بررسی تفاوت خطای زمان‌بندی بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری در دو گروه واقعی و ساختگی در هنگام اجرا با ریتم کند و تند در شرایط توهم ابینگهاوس

گروه	حالت	آزمون	میانگین	میانگین رتبه‌ای	K ²	Sig
تند	ریتیم کند (کلی) (۲۵۰ ms)	پیش‌آزمون	۴۱۲/۵۵۲۵	۲/۰۶	۰/۱۲۵	۰/۹۳۹
		پس‌آزمون	۳۶۴/۷۴۸۱	۲/۰۰		
		پیگیری	۳۵۶/۶۱۱۳	۱/۹۴		
	ریتیم تند (کلی) (۳۰۰ ms)	پیش‌آزمون	۳۶۵/۱۹۱۳	۲/۱۹	۱/۶۲۵	۰/۴۴۴
		پس‌آزمون	۳۴۳/۹۲۸۱	۲/۰۶		
		پیگیری	۳۱۰/۹۰۲۵	۱/۷۵		
	ریتیم کند (کلی) (۲۵۰ ms)	پیش‌آزمون	۳۹۱/۲۴۰۰	۲/۳۱	۲/۶۲۵	۰/۲۶۹
		پس‌آزمون	۳۸۰/۳۸۶۳	۱/۹۴		
		پیگیری	۳۵۶/۹۳۰۳	۱/۷۵		
	ریتیم تند (کلی) (۳۰۰ ms)	پیش‌آزمون	۳۰۸/۷۲۸۱	۲/۲۵	۶/۰۰۰	۰/۰۵۰
		پس‌آزمون	۳۲۲/۹۳۶۲	۲/۲۵		
		پیگیری	۳۱۸/۰۰۸۸	۱/۵۰		
عمودی	ریتیم کند (کلی) (۲۵۰ ms)	پیش‌آزمون	۳۴۵/۰۶۱۹	۲/۱۶	۳/۰۶۳	۰/۲۱۶
		پس‌آزمون	۳۳۷/۳۷۳۴	۲/۰۹		
		پیگیری	۳۳۱/۳۰۲۸	۱/۷۵		
	ریتیم تند (کلی) (۳۰۰ ms)	پیش‌آزمون	۳۶۷/۳۲۱۳	۲/۱۹	۲/۳۷۵	۰/۳۰۵
		پس‌آزمون	۳۴۴/۱۵۸۱	۲/۱۳		
		پیگیری	۳۱۹/۷۶۸۷	۱/۶۹		
	ریتیم کند (کلی) (۲۵۰ ms)	پیش‌آزمون	۳۷۰/۶۰۰۶	۲/۰۳	۰/۰۹۵	۰/۹۵۳
		پس‌آزمون	۳۶۷/۰۸۱۲	۱/۹۴		
		پیگیری	۳۶۸/۳۶۱۳	۲/۰۳		
	ریتیم تند (کلی) (۳۰۰ ms)	پیش‌آزمون	۳۲۲/۸۰۲۵	۲/۱۳	۰/۸۷۵	۰/۶۴۶
		پس‌آزمون	۳۳۱/۵۸۸۷	۲/۰۶		
		پیگیری	۳۴۲/۸۳۸۸	۱/۸۱		

همان‌طور که در جدول ۳ آمده است، نتایج آزمون فریدمن نشان داد که خطای زمان‌بندی در دو گروه واقعی و ساختگی در هنگام اجرا با ریتم کند و تند در شرایط توهم ابینگهاوس بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری تفاوت معنی‌داری وجود ندارد (در همه موارد $P>0/05$).

جدول ۴. نتایج آزمون فریدمن برای بررسی تفاوت خطای فضایی بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری در دو گروه واقعی و ساختگی در هنگام اجرای حرکت عمودی با ریتم کند و تند در شرایط توهم ابینگهاوس

حالت	آزمون	میانگین	میانگین رتبه‌ای	K ²	Sig	میانگین	میانگین رتبه‌ای	گروه واقعی	گروه ساختگی
ریتیم کند (کلی) (۲۵۰ ms)	پیش‌آزمون	۶/۰۹۶۳	۲/۵۶	۱۶/۶۲۵	۰/۰۰۱	۵/۰۱۷۵	۲/۱۳	۰/۷۷۹	۰/۵۰۰
	پس‌آزمون	۵/۱۵۹۴	۲/۲۵			۴/۵۰۵۶	۱/۸۸		
	پیگیری	۳/۶۵۶۳	۲/۱۹			۴/۴۸۵۶	۲/۰۰		
ریتیم تند (کلی) (۳۰۰ ms)	پیش‌آزمون	۵/۸۰۰۰	۲/۴۴	۷/۱۲۵	۰/۰۲۸	۵/۷۴۵۶	۲/۱۳	۰/۶۴۶	۰/۸۷۵
	پس‌آزمون	۵/۰۵۶۲	۲/۰۶			۵/۰۴۶۹	۲/۰۶		
	پیگیری	۴/۴۰۴۴	۱/۵۰			۴/۴۳۰۰	۱/۸۱		

هدف	پیش‌آزمون	۴/۹۲۴۴	۲/۴۴	۴/۸۷۵	۰/۰۰۷	۴/۱۵۰۰	۲/۰۶	۴/۸۷۵	۰/۹۳۹
کوچک‌شونده،	پس‌آزمون	۴/۸۹۰۶	۲/۱۹	۹/۸۷۵	۰/۰۰۷	۴/۱۵۰۰	۱/۹۴	۴/۸۷۵	۰/۱۲۵
ریتم کند	پیگیری	۳/۵۶۲۵	۱/۳۸	۹/۸۷۵	۰/۰۰۷	۴/۱۵۰۰	۲/۰۰	۴/۸۷۵	۰/۱۲۵
هدف	پیش‌آزمون	۴/۶۴۹۶	۲/۱۹	۲/۳۷۵	۰/۳۰۵	۴/۸۹۷۵	۲/۲۵	۴/۸۹۷۵	۰/۳۶۸
کوچک‌شونده،	پس‌آزمون	۴/۵۸۱۹	۲/۱۳	۲/۳۷۵	۰/۳۰۵	۴/۸۹۷۵	۲/۰۰	۴/۸۹۷۵	۰/۳۶۸
ریتم تند	پیگیری	۴/۱۳۷۵	۱/۶۹	۲/۳۷۵	۰/۳۰۵	۴/۸۹۷۵	۱/۷۵	۴/۸۹۷۵	۰/۳۶۸
هدف	پیش‌آزمون	۵/۶۲۶۲	۲/۳۱	۹/۳۷۵	۰/۰۰۹	۴/۸۱۷۵	۲/۱۹	۴/۸۱۷۵	۰/۵۷۰
بزرگ‌شونده،	پس‌آزمون	۶/۰۱۹۴	۲/۳۱	۹/۳۷۵	۰/۰۰۹	۴/۸۱۷۵	۱/۸۱	۴/۸۱۷۵	۰/۵۷۰
ریتم کند	پیگیری	۳/۷۵۵۰	۱/۳۸	۹/۳۷۵	۰/۰۰۹	۴/۸۱۷۵	۲/۰۰	۴/۸۱۷۵	۰/۵۷۰
هدف	پیش‌آزمون	۶/۱۴۱۲	۲/۴۴	۴/۸۷۵	۰/۰۸۷	۵/۱۴۶۳	۲/۴۴	۴/۸۷۵	۰/۰۸۷
بزرگ‌شونده،	پس‌آزمون	۵/۱۳۵۰	۱/۸۸	۴/۸۷۵	۰/۰۸۷	۵/۱۴۶۳	۱/۸۸	۴/۸۷۵	۰/۰۸۷
ریتم تند	پیگیری	۴/۶۶۰۰	۱/۶۹	۴/۸۷۵	۰/۰۸۷	۵/۱۴۶۳	۱/۶۹	۴/۸۷۵	۰/۰۸۷

همان‌طور که در جدول ۴ آمده است، نتایج آزمون فریدمن نشان داد که خطای فضایی در گروه واقعی در هنگام اجرای حرکت افقی بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری تفاوت قابل توجهی وجود دارد. به‌طوری که در پس‌آزمون‌ها و آزمون‌های پیگیری به‌طور ویژه در اهداف کلی و کوچک‌شونده کاهش معنی‌داری داشته است (در همه موارد $P < 0.05$). اما در گروه ساختگی پیشرفتی رخ نداده است و بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری تفاوت وجود ندارد ($P > 0.05$) و حتی در یک مورد خطای زمانبندی افزایش یافته است.

جدول ۵. نتایج آزمون فریدمن برای بررسی تفاوت فضایی بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری در دو گروه واقعی و ساختگی در هنگام اجرای حرکت عمودی با ریتم کند و تند در شرایط توهیم ایبینگهاوس

گروه واقعی			گروه ساختگی		
حالت	آزمون	میانگین	میانگین رتبه‌ای	K^2	Sig
ریتم کند (کلی) (۳۵۰ ms)	پیش‌آزمون	۶/۰۹۶۳	۲/۵۶	۱۶/۶۲۵	۰/۰۰۱
	پس‌آزمون	۵/۱۵۹۴	۲/۲۵	۱۶/۶۲۵	۰/۰۰۱
	پیگیری	۳/۶۵۶۳	۲/۱۹	۱۶/۶۲۵	۰/۰۰۱
ریتم تند (کلی) (۳۰۰ ms)	پیش‌آزمون	۵/۸۰۰۰	۲/۴۴	۷/۱۲۵	۰/۰۲۸
	پس‌آزمون	۵/۰۵۶۲	۲/۰۶	۷/۱۲۵	۰/۰۲۸
	پیگیری	۴/۴۰۴۴	۱/۵۰	۷/۱۲۵	۰/۰۲۸
هدف کوچک‌شونده، ریتم کند	پیش‌آزمون	۴/۹۲۴۴	۲/۴۴	۹/۸۷۵	۰/۰۰۷
	پس‌آزمون	۴/۸۹۰۶	۲/۱۹	۹/۸۷۵	۰/۰۰۷
	پیگیری	۳/۵۶۲۵	۱/۳۸	۹/۸۷۵	۰/۰۰۷
هدف کوچک‌شونده، ریتم تند	پیش‌آزمون	۴/۶۴۹۶	۲/۱۹	۲/۳۷۵	۰/۳۰۵
	پس‌آزمون	۴/۵۸۱۹	۲/۱۳	۲/۳۷۵	۰/۳۰۵
	پیگیری	۴/۱۳۷۵	۱/۶۹	۲/۳۷۵	۰/۳۰۵
هدف بزرگ‌شونده، ریتم کند	پیش‌آزمون	۵/۶۲۶۲	۲/۳۱	۹/۳۷۵	۰/۰۰۹
	پس‌آزمون	۶/۰۱۹۴	۲/۳۱	۹/۳۷۵	۰/۰۰۹
	پیگیری	۳/۷۵۵۰	۱/۳۸	۹/۳۷۵	۰/۰۰۹
هدف بزرگ‌شونده، ریتم تند	پیش‌آزمون	۶/۱۴۱۲	۲/۴۴	۴/۸۷۵	۰/۰۸۷
	پس‌آزمون	۵/۱۳۵۰	۱/۸۸	۴/۸۷۵	۰/۰۸۷
	پیگیری	۴/۶۶۰۰	۱/۶۹	۴/۸۷۵	۰/۰۸۷

برای اجرای حرکت در شرایط عمودی نیز همان‌طور که در جدول ۵ آمده است، آزمون فریدمن نشان داد که خطای فضایی در گروه واقعی در اکثر موارد بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری تفاوت قابل توجهی وجود دارد. به‌طوری که در پس‌آزمون‌ها و آزمون‌های پیگیری به‌طور ویژه در اهداف کلی و کند کاهش معنی‌داری داشته است (در همه موارد $P < 0.05$). اما در گروه ساختگی پیشرفتی رخ نداده است و بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری تفاوت وجود ندارد ($P > 0.05$).

نتایج آزمون ویلکاکسون نشان داد که در اجرای حرکت در شرایط مختلف، خطای زمانبندی بین جهت حرکت افقی با عمودی تفاوتی مشاهده نمی‌شود (در همه شرایط $P > 0.05$). همچنین نتایج آزمون ویلکاکسون نشان داد که در اجرای حرکت در شرایط

مختلف، خطای فضایی نیز بین جهت حرکت افقی با عمودی تفاوتی مشاهده نمی‌شود ($P > 0.05$)؛ بجز در یک مورد (ریتم تند آزمون یادداری در گروه ساختگی) که خطای فضایی در جهت عمودی از افقی بیشتر بود ($p = 0.044$).

۴. بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به مقایسه تأثیر تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای قشر بینایی بر خطاهای فضایی و زمانبندی حرکت ضربه‌زنی ریتمیک به اهداف در شرایط توهم بینایی کلاسیک ایننگهاوس پرداخت. آزمایش ما نشان داد که توهم ایننگهاوس بر قضاوت اندازه درک‌شده تأثیر می‌گذارد. همچنین a-tDCS بر ناحیه V1 باعث بهبود خطاهای فضایی و زمانی شد. این نتیجه با مطالعات پیشین که نشان دادند tDCS آنودال باعث بهبود خطای فضایی می‌شود همخوان است (میک^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ کاجیامانی^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). یافته‌ها نشان داد که در هر دو گروه در پس‌آزمون و آزمون پیگیری نسبت به پیش‌آزمون خطاها کاهش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که تکرار آزمون‌ها اثرگذار بوده است. ولی با توجه به اینکه پیشرفت و کاهش خطا در گروه تحریک واقعی نسبت به گروه تحریک ساختگی به‌ویژه در آزمون‌های پیگیری بسیار مشهود و قابل‌توجه است، کاملاً مشخص است که در اثر تحریک آنودال ناحیه پس‌سری حاصل شده است. پژوهش میک و همکاران (۲۰۲۱)، نشان داد که برای کسب مهارت پرتاب دارت که یک تکلیف دقت فضایی است، tDCS آنودال در مقایسه با شرایط کاتودال و شم تأثیر بیشتری می‌گذارد؛ در پژوهش آنها عملکرد بهبود یافته برای tDCS آنودال در ربع دوم تمرین به‌طور قابل‌توجهی بالاتر بود و در پس‌آزمون، بالا باقی‌ماند؛ این یافته با پژوهش ما که نشان داد شرکت‌کنندگان در یافتن موقعیت فضایی اهداف پس از اعمال tDCS بهتر عمل کرده‌اند، همسویی دارد؛ همچنین مطالعات زمانی و همکاران (۲۰۱۸)، تالیمخانی^۳ و همکاران (۲۰۱۹) و حافظی و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که پس از اعمال tDCS بهبودی زمان واکنش ساده و زمان واکنش به محرک‌های چندگانه دیداری حاصل می‌شود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش ما همسو است.

آن^۴ و همکاران (۲۰۲۳)، برای بررسی اینکه چگونه tDCS پاسخ‌های بینایی قشر مغز را تعدیل می‌کند، جنبه‌های مکانی و زمانی فعالیت وابسته به سطح اکسیژن خون قشر بینایی اولیه را قبل، در حین و پس از کاربرد tDCS پیگیری کردند. آنها دریافتند که a-tDCS فعالیت وابسته به سطح اکسیژن خون پایه را بدون تأثیر بر فعالیت محرک افزایش می‌دهد، در حالی که با افزایش سرکوب فراگیر، مشخصات فضایی کوچک‌ترین جزء ساختاری را تشدید می‌کند. این اثرات به تدریج از شروع تحریک الکتریکی تا جبران آن رشد کرده و پس از آن نیز به‌طور قابل‌توجهی باقی ماند. آنتال و همکاران (۲۰۰۱) از نخستین پژوهشگرانی بودند که بیان کردند عملکرد قشر مغز را می‌توان با tDCS در قشر بینایی دستکاری کرد. آنها نشان دادند که اعمال محرک DC مثبت، افزایش تحریک‌پذیری سطح قشر حرکتی و نیز قشر بینایی را در پی دارد. همچنین لانگ^۵ و همکاران (۲۰۰۷)، دریافتند که tDCS قشر بینایی فقط تغییرات گذرا در تحریک‌پذیری قشر بینایی پس‌سری ایجاد می‌کند. این یافته لانگ و همکاران با پژوهش ما همخوانی ندارد؛ زیرا با توجه به یافته‌های پژوهش و عملکرد شرکت‌کنندگان در پس‌آزمون و به‌ویژه آزمون پیگیری، a-tDCS روی قشر بینایی حداقل تا ۷۲ ساعت پس از آخرین جلسه تحریک اثرات پایداری را بر عملکرد نشان داد. مدت‌هاست نشان داده شده است که هرچه‌قدر مدت زمان تحریک tDCS بیشتر باشد اثرات پایداری به‌همراه خواهد داشت (نیچه و پائولوس، ۲۰۰۱)؛ ولی میونی و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که تأثیر tDCS نه تنها به مدت زمان بستگی دارد، بلکه به مجموعه شناختی تکلیف و روش محرک مورد نظر بستگی دارد. در پژوهش لرنر و همکاران (۲۰۲۱) مشخص شده است که تنظیم شدت جریان تأثیر به‌سزایی در بهبود عملکرد حرکتی دارد؛ آنها نشان دادند که جریان ۱/۵ میلی‌آمپری باعث بهبود در عملکرد می‌شود، ولی جریان ۲ میلی‌آمپری تأثیری نداشت. در مورد سیستم بینایی نشان داده شده است که V1 به روشی مشابه M1 اثر می‌پذیرد (آنتال و همکاران، ۲۰۰۴)؛ همچنین در مورد شدت جریان، نشان داده شده است که جریان ۱ میلی‌آمپری برای ایجاد تغییرات عملکردی مرتبط در مهار و تحریک در سیستم بینایی کافی است (آنتال و همکاران، ۲۰۰۶)؛ پژوهش ما نیز هم‌راستا با پژوهش آنتال و همکاران (۲۰۰۶) نشان

1. Meek

2. Cacciamani

3. Talimkhani

4. Ahn

5. Lang

داد که در افراد سالم تحریک ناحیه^۱ Oz با جریان ۱ میلی‌آمپری باعث بهبود عملکرد ناحیه^۱ بینایی شده است. چرا که پس از تحریک، خطاهای فضایی و زمانی بر اجرای حرکت در گروه تحریک واقعی نسبت به تحریک ساختگی بهبود یافت. تغییر الگوهای عصبی فیزیولوژیکی و رفتاری به دنبال تحریک طولانی‌مدت ممکن است منجر به عملکرد حرکتی بهتر (لرنر و همکاران، ۲۰۲۱) و تغییرات نوروپلاستیک در قشر بینایی شود که می‌تواند ادراک را تعدیل کند (آنتال، ۲۰۰۳).

باسکینگ^۱ و همکاران (۲۰۱۷) استدلال کردند که اکثر نتایج حاصل از tDCS قشر بینایی را می‌توان با ارزیابی سه عامل درک کرد: وسعت فضایی جمعیت فعال نورون‌ها، سازماندهی عملکردی ناحیه^۱ قشری تحریک‌شده و تکلیف یا زمینه‌ای که در آن تحریک به نمونه منتقل می‌شود. نشان داده شده است که tDCS آنودال روی قشر بینایی اولیه به مدت چهار روز متوالی آستانه فسفن ناشی از TMS را به طور قابل توجهی کاهش داده است که نشان‌دهنده^۲ افزایش تحریک‌پذیری V1 است و در مقایسه با تحریک کاتودی و ساختگی، باعث بهبود یادگیری تمایز جهت‌گیری و افزایش تحریک‌پذیری قشر مغز می‌شود (کیسر و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش ما نشان داده شد که tDCS بر ناحیه^۱ پس‌سری با توجه به مدت زمان و تعداد جلسات تحریک بر ناحیه^۱ V1 کافی بوده است و احتمالاً باعث کاهش آستانه^۳ فسفن شده است، زیرا باعث بهبود عملکرد در خطای فضایی و هم خطای زمانی در تکلیف ضربه‌زنی ریتمیک به اهداف داشت.

هنگام گرفتن یک شیء، پردازش اطلاعات حسی برای انجام دقیق حرکت بسیار مهم است و در طول حرکت می‌توان از بازخورد دیداری برای تنظیم خطاها استفاده کرد. پیشنهاد شده است که اطلاعات مورد استفاده برای کنترل حرکات متفاوت از اطلاعاتی که برای تشخیص اشیاء استفاده می‌شود پردازش می‌شود. همان‌طور که اشاره شده است نظریه^۴ تأثیرگذار «تفکیک دو جریان بینایی شناختی و حرکتی»، پردازش اطلاعات دیداری را به دو جریان تقسیم می‌کند که مسیرهای متفاوتی را در مغز پس از قشر بینایی اولیه دنبال می‌کنند (پولانن و داوار^۲، ۲۰۱۵). در پژوهش ما، با توجه به اینکه توهم بینایی اینگه‌هاوس بر روی خطاهای فضایی و زمانی در اجرای حرکت ضربه‌زنی ریتمیک اثرگذار بود، بنابراین نمی‌توان گفت که دو مسیر بینایی شناختی و حرکتی کاملاً از هم جدا هستند و این فرضیه را دچار چالش می‌کند. هرچند به نظر می‌رسد شرکت‌کنندگان پژوهش ما بیشتر از جریان پشتی استفاده می‌کردند، زیرا برای تکلیف ضربه‌زنی به اهداف به دلیل القاگرها که باعث کوچک‌تر یا بزرگ‌تر دیده شدن زمینه می‌شود، مشارکت‌کنندگان باید به اطلاعات مکانی بیشتر توجه داشته باشند؛ با این وجود، با توجه به اثرگذاری توهم بینایی بر خطاهای حرکتی از اطلاعات مربوط جریان شکمی نیز استفاده شده است. زیرا با توجه به این که تحریک الکتریکی بر ناحیه پس‌سری اعمال شد و ناحیه^۱ خلفی وظیفه^۱ جریان پشتی را بر عهده دارد، احتمالاً تحریک باعث بهبود مسیر پشتی (کجا) شده است.

وانگ و همکاران (۲۰۲۱) در یک سری آزمایش، متوجه شدند که تحریک پس‌سری آنودال به طور موقتی بزرگی توهم اینگه‌هاوس را نسبت به تحریک ساختگی افزایش می‌دهد، در حالی که تحریک کاتودال اثری مشابه با تحریک ساختگی نشان می‌دهد. در تحقیق مروزک و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده شد که پویایی حرکت ناشی از حرکت هدف و حرکات چشم منجر به کاهش دقت شده است. همچنین توجه به القاگرها نیز بزرگی توهم اینگه‌هاوس را افزایش می‌دهد (شولمن^۳، ۱۹۹۲) و تحریک ساختگی برای انواع توهم اثر ناچیزی داشت، این خطا در گروه ساختگی بیشتر بود؛ به همین دلیل می‌توان بیان کرد که خطای فضایی و زمانی در تکلیف ریتمیک ضربه‌زنی به اهداف در گروه واقعی کاهش چشم‌گیری داشته است. همچنین در پژوهش حاضر نشان داده شده است که افزایش بزرگی توهم اینگه‌هاوس، منجر به افزایش خطا و گسترش زمان پاسخ در شرکت‌کنندگان شد؛ زیرا در توهمات بزرگ‌شونده احتمالاً شرکت‌کنندگان اهداف را بزرگ‌تر تصور می‌کردند (درحالی که در واقعیت این گونه نیست) و دست خود را سریع‌تر به سمت هدف حرکت می‌دادند بنابراین در اجرای تکلیف ریتمیک ضربه‌زنی به اهداف دچار کاهش دقت فضایی و بنابراین خطای بیشتری می‌شدند. مروزک و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که در توهم کلاسیک اینگه‌هاوس اندازه^۱ القاگرها (دایره‌های اطراف) نسبت به توهم پویا به صورت زیاده‌تری توهم ایجاد می‌کند و در شرایط پویا بزرگی توهم به صورت تدریجی افزایش پیدا می‌کند. لو و چن^۴ (۲۰۲۵) نشان دادند که توهم بینایی اینگه‌هاوس باعث تأخیر در پردازش اطلاعات دیداری می‌شود.

1. Bosking
2. Polanen & Davare
3. Shulman
4. Lu & Chen

تکلیف پژوهش حاضر مشابه تکلیف سرعت-دقت فیتز می‌باشد؛ هرچقدر سرعت حرکات بیشتر شود، دقت کاهش پیدا می‌کند و برعکس که این مسأله را می‌توان با فرضیه وابسته به نویز سیگنال توضیح داد (ایتاگوچی و فوکوزاوا^۱، ۲۰۱۸). در پژوهش ما شرکت‌کنندگان در تکلیف ضربه‌زنی ریتمیک به اهداف، در ریتم زمانی سریع با توجه به یافته‌ها فارغ از نوع توهم، دقت را فدای سرعت کردند که این اتفاق به‌ویژه در دست برتر بیشتر مشهود است؛ این احتمال می‌رود به این دلیل باشد که در اندام برتر، نه تنها به استفاده و تمرین بیشتر عضلات اندام برتر، بلکه به تحریک نسبتاً بیشتر قشر حرکتی اندام برتر در مغز و همچنین تحریک بیشتر عصب حرکتی اندام برتر در سطح نخاع نسبت داده شده است (اوزکن^۲ و همکاران، ۲۰۰۴). اونگاوا^۳ و همکاران (۲۰۱۹) بررسی کردند که انسان‌ها اکثراً ملزم به تصمیم‌گیری تحت محدودیت‌های زمانی هستند و مبادله سرعت-دقت را بر پایه محدودیت‌های زمانی تنظیم می‌کنند. این کنترل انتخابی تصمیم‌گیری محدود است، با این حال، به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد تا هم سرعت و هم دقت را اولویت‌بندی کند (بوگاج^۴ و همکاران، ۲۰۱۰). زمانی که تصمیم‌گیری تحت محدودیت‌های زمانی است، نیاز است رقابت بین سرعت و دقت در نظر گرفته شود (اونگاوا و همکاران، ۲۰۱۹). در پژوهش ما به نظر می‌رسد چون زمان با مترونوم کنترل می‌شد و شرکت‌کنندگان به‌ویژه در ریتم زمانی سریع خواهان این بودند که با صدای مترونوم به اهداف ضربه بزنند دقت را فدای سرعت کرده بودند. این نتیجه با یافته‌های پژوهش دوستان و همکاران (۲۰۱۸) و غلامی و همکاران (۲۰۲۰) همخوان است. مطالعه اونگاوا و همکاران (۲۰۱۹) همچنین نشان دادند که وقتی افراد با انتخاب کاهش تدریجی زمان مواجه هستند، حرکات و سرعت تصمیم‌گیری افراد به‌طور سازگارانه تغییر خواهد کرد.

نشان داده شده است که تحریک tDCS ناحیه V1 بر عملکرد توجه فضایی تاثیر دارد (سیلواتو و کاتانو^۵، ۲۰۱۷). همچنین tDCS حافظه دیداری فضایی را تقویت می‌کند و نتایجی که به‌دست می‌آید برای چند ماه پس از تمام شدن آزمایش باقی می‌ماند (او^۶ و همکاران، ۲۰۱۶). وو و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که اعمال tDCS باعث تقویت حافظه دیداری-حرکتی می‌شود. یافته‌های پژوهش ما همچنین نشان داد در اجرای تکلیف، هم در گروه واقعی و هم در گروه ساختگی، بین اجرا در شرایط عمودی با شرایط افقی تفاوت وجود ندارد. دانیون و همکاران (۲۰۲۰) نیز در پژوهش خود بیان می‌کنند که تثبیت ساکادها^۷ در جهت عمودی با سرعت بیشتری نسبت به جهت افقی انجام می‌گیرد. به‌نظر می‌رسد در شرایط عادی و بدون توهم بینایی، در حرکت افقی، فرد از بازخورد بینایی برای رساندن دست به هدف استفاده می‌کند و اندام ظریف‌تر (انگشتان) در استفاده از بازخورد بینایی برای رساندن دست به هدف ریزحرکات ظریف‌تری انجام می‌دهد و این خود مستلزم صرف زمان است؛ در حالی که در شرایط عمودی حرکت عمدتاً با اندام درشت و پروگزیمال (ساعد و بازو) انجام می‌شود، احتمالاً از بازخورد بینایی کمتر برای ریزحرکات اصلاحی استفاده می‌شود. بنابراین حرکت در جهت عمودی نسبت به افقی سریع‌تر انجام می‌شود و خطاهای زمان‌بندی کمتر باشد؛ ولی، در پژوهش ما در زمینه حرکت از توهم بینایی ایننگه‌اوس استفاده شده است و احتمالاً این موضوع باعث تفاوت در نتایج شده است. آنچه مشخص است این است که وجود توهم بینایی در هر صورت باعث کند شدن حرکت در هر دو شرایط افقی و عمودی می‌شود و این موضوع بر مؤلفه‌های دیگر مانند ظرافت حرکتی اندام درگیر غالب است. این درحالی است که در اکثر پژوهش‌هایی که از توهم بینایی در زمینه حرکت استفاده شده است نتایج متفاوتی به‌دست آمده است. در پژوهش فلاح و همکاران (۲۰۱۹) عملکرد بخش دیستال در هر دو سطح افقی و عمودی بهتر از بخش پروگزیمال بود. لاکوانیتی^۸ و همکاران (۱۹۸۷) نیز نشان دادند که حرکات مفاصل پروگزیمال شانه و آرنج به‌طور محکم با هم جفت هستند، در حالی که حرکات مفاصل دیستال به اندازه مفاصل پروگزیمال جفت نیستند. بنابراین، حرکات مفاصل دیستال (مچ) دقت حرکت را افزایش می‌دهد. همچنین آبروز^۹ و همکاران، (۱۹۹۹) در مطالعه‌ای نشان دادند برای عضلات پروگزیمال نسبت به عضلات دیستال بازدارندگی قشری کوچک‌تر و تسهیل بزرگ‌تر ظاهر می‌شود که این باعث انجام ریزحرکات کمتر، و بنابراین دقت کمتر می‌شود. در پژوهشی دانیون و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که

1. Itaguchi & Fukuzawa
2. Ozcan
3. Onagawa
4. Bogacz
5. Silvanto & Cattaneo
6. Au
7. saccades
8. Lacquaniti
9. Abbruzzese

چشم به صورت افقی نسبت به عمودی، تقریباً ۲۰٪ نزدیک تر به هدف می‌رسد. آنها همچنین بیان کردند که فاصله نگاه-هدف در هنگام شروع، ساکادهای عمودی در مقایسه با افقی بزرگ تر است. با این وجود در پژوهش ما این موضوع تأثیر چندانی نداشته است و وجود توهم بینایی بر نزدیک بودن به هدف، غالب بوده است.

نتایج پژوهش ما نشان داد که در شرایط توهم بینایی ایبینگهاوس خطاهای زمان بندی افزایش یافته است؛ مروزک (۲۰۲۲) بیان می‌کند که توهم ایبینگهاوس، به دلیل تغییر اندازه دوائر، القاءهای زمینه‌ای شدیدی ایجا می‌کند. مروزک و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود اشاره کردند که توهم ایبینگهاوس که توهمی مربوط به تضاد اندازه است در مقایسه با توهم‌های بینایی مانند راهرو و پونزو که مربوط به ثبات اندازه هستند، شدت قوی‌تری دارد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همه مشارکت کنندگان پژوهش کمال سپاسگزاری را داریم.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافی ندارد.

References

- Abbruzzese, G., Assini, A., Buccolieri, A., Schieppati, M., & Trompetto, C. (1999). Comparison of intracortical inhibition and facilitation in distal and proximal arm muscles in humans. *The Journal of physiology*, 514(Pt 3)(Pt 3), 895-903. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1999.895ad.x>
- Abuleil, D., McCulloch, D., & Thompson, B. (2021). Visual cortex cTBS increases mixed percept duration while a-tDCS has no effect on binocular rivalry. *PLoS One*, 16(2), e0239349. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239349>
- Ahn, J., Ryu, J., Lee, S., Lee, C., Im, C. H., & Lee, S. H. (2023). Transcranial direct current stimulation elevates the baseline activity while sharpening the spatial tuning of the human visual cortex. *Brain stimulation*, 16(4), 1154-1164. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2023.07.052>
- Antal, A., Kincses, T. Z., Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2003). Manipulation of phosphene thresholds by transcranial direct current stimulation in man. *Experimental brain research*, 150(3), 375-378. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1459-8>
- Antal, A., Kincses, T. Z., Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2003). Modulation of moving phosphene thresholds by transcranial direct current stimulation of V1 in human. *Neuropsychologia*, 41(13), 1802-1807. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(03\)00181-7](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(03)00181-7)
- Antal, A., Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2001). External modulation of visual perception in humans. *Neuroreport*, 12(16), 3553-3555. <https://doi.org/10.1097/00001756-200111160-00036>
- Antal, A., Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2006). Transcranial direct current stimulation and the visual cortex. *Brain research bulletin*, 68(6), 459-463. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2005.10.006>
- Antal, A., Nitsche, M. A., Kruse, W., Kincses, T. Z., Hoffmann, K. P., & Paulus, W. (2004). Direct current stimulation over V5 enhances visuomotor coordination by improving motion perception in humans. *Journal of cognitive neuroscience*, 16(4), 521-527. <https://doi.org/10.1162/089892904323057263>
- Au, J., Katz, B., Buschkuhl, M., Bunarjo, K., Senger, T., Zabel, C., Jaeggi, S. M., & Jonides, J. (2016). Enhancing Working Memory Training with Transcranial Direct Current Stimulation. *Journal of cognitive neuroscience*, 28(9), 1419-1432. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00979
- Bahmani, M., Wulf, G., Ghadiri, F., Karimi, S., & Lewthwaite, R. (2017). Enhancing performance expectancies through visual illusions facilitates motor learning in children. *Human movement science*, 55, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.07.001>
- Behrens, J. R., Kraft, A., Irlbacher, K., Gerhardt, H., Olma, M. C., & Brandt, S. A. (2017). Long-lasting enhancement of visual perception with repetitive noninvasive transcranial direct current stimulation. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 11, 238. <https://doi.org/10.3389/fncel.2017.00238>

- Birlik, M., Akar, S., Onen, F., Ozcan, M. A., Bacakoglu, A., Ozkal, S., ... & Akkoc, N. (2004). Articular, B-cell, non-Hodgkin's lymphoma mimicking rheumatoid arthritis: synovial involvement in a small hand joint. *Rheumatology international*, 24, 169-172. <https://doi.org/10.1007/s00296-003-0373-5>
- Bocci, T., Nasini, F., Caleo, M., Restani, L., Barloscio, D., Ardolino, G., ... & Sartucci, F. (2018). Unilateral application of cathodal tDCS reduces transcallosal inhibition and improves visual acuity in amblyopic patients. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 12, 109. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2018.00109>
- Bosking, W. H., Beauchamp, M. S., & Yoshor, D. (2017). Electrical Stimulation of Visual Cortex: Relevance for the Development of Visual Cortical Prosthetics. *Annual review of vision science*, 3, 141-166. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-111815-114525>
- Brunoni, A. R., Amadera, J., Berbel, B., Volz, M. S., Rizzerio, B. G., & Fregni, F. (2011). A systematic review on reporting and assessment of adverse effects associated with transcranial direct current stimulation. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, 14(8), 1133-1145. <https://doi.org/10.1017/S1461145710001690>
- Cacciamani, L., Tomer, D., Mylod-Vargas, M. G., Selcov, A., Peterson, G. A., Oseguera, C. I., & Barbieux, A. (2024). HD-tDCS to the lateral occipital complex improves haptic object recognition. *Experimental Brain Research*, 242(9), 2113-2124. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06888-7>
- Cañal-Bruland, R., van der Meer, Y., & Moerman, J. (2016). Can visual illusions be used to facilitate sport skill learning?. *Journal of motor behavior*, 48(5), 285-389. <https://doi.org/10.1080/00222895.2015.1113916>
- Danion, F. R., Mathew, J., Gouirand, N., & Brenner, E. (2021). More precise tracking of horizontal than vertical target motion with both the eyes and hand. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, 134, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.10.001>
- Doustan, M. R., Farzad, L., & Saemi, E. (2018). The Effect of Handedness and Manipulation of the Index of Difficulty on the Behavioral and Neural Components of Speed-Accuracy Trade Off. *Motor Behavior*, 10(34), 121-150.
- Erfani Nasab, M., Faramarzi, S., & Sharifi, A. (2024). The Effectiveness of Transcranial Direct Current Stimulation along with Computerized Cognitive Training on the Executive Functions and Academic Performance of Students with Specific Learning Disorder comorbid with Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Cognit Strateg Learn*, 12(23), 19-41. <https://doi.org/10.22084/j.psychogy.2024.28580.2644>
- Fallah, M., Doustan, M., & Shetab Bousheri, N. (2019). The Effect of Time Limitation and Level of Movement on the Spatial Accuracy of the Speed-Precision of Fitts Task while Moving with Distal and Proximal Parts of the Hand. *Neuropsychology*, 4(15), 89-106.
- Filmer, H. L., Mattingley, J. B., & Dux, P. E. (2013). Improved multitasking following prefrontal tDCS. *Cortex*, 49(10), 2845-2852. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.08.015>
- Gálvez, V., Alonzo, A., Martin, D., & Loo, C. K. (2013). Transcranial direct current stimulation treatment protocols: should stimulus intensity be constant or incremental over multiple sessions?. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, 16(1), 13-21. <https://doi.org/10.1017/S1461145712000041>
- Gholami, S., Shetab Boushehri, S. N., & Doustan, M. R. (2020). The Investigate the Components of Visual Tracking and the Amount of Spatial and Temporal Error in the Bilateral Targeting Task with Dominant and Non-Dominant Hands. *Motor Behavior*, 12(42), 131-160.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in neurosciences*, 15(1), 20-25. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(92\)90344-8](https://doi.org/10.1016/0166-2236(92)90344-8)
- Gülmez, M., Ural Fatihoğlu, Ö., & Tekçe, A. (2022). Comparison of visual outcomes between 120-µm and 140-µm cap thicknesses 12 months after small incision lenticule extraction. *Lasers in Medical Science*, 37(6), 2667-2673. <https://doi.org/10.1007/s10103-022-03534-y>
- Hafezi, S., Doustan, M., & Saemi, E. (2024). The effect of brain anodal and cathodal transcranial direct current stimulation on psychological refractory period at different stimulus-onset asynchrony in non-fatigue and mental fatigue conditions. *Brain sciences*, 14(5), 477. <https://doi.org/10.3390/brainsci14050477>
- Hafezi, S., Doustan, M., Saemi, E. & Strobach, H.T. (2024). The Effect of Two Methods of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) and Stimulus-Response Asynchrony on Backward-Compatibility Effect in Mental Fatigue Conditions. *Journal of Sports and Motor Development and Learning*, 16 (1), 69-89. <https://doi.org/10.22059/jsmdl.2023.361794.1744>

- Hasan, H. A., Enns, J. T., & Whitwell, R. L. (2023). The simultaneous tilt illusion reveals separate yet interacting visual systems for perception and action. *Journal of Vision*, 23(9), 4697-4697. <https://doi.org/10.1167/jov.23.9.4697>
- Hinder, M. R., Riek, S., Tresilian, J. R., de Rugy, A., & Carson, R. G. (2010). Real-time error detection but not error correction drives automatic visuomotor adaptation. *Experimental brain research*, 201, 191-207. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-2025-9>
- Itaguchi, Y., & Fukuzawa, K. (2018). Influence of speed and accuracy constraints on motor learning for a trajectory-based movement. *Journal of motor behavior*, 50(6), 653-663. <https://doi.org/10.1080/00222895.2017.1400946>
- Kaiser, D., & Cichy, R. M. (2018). Typical visual-field locations enhance processing in object-selective channels of human occipital cortex. *Journal of Neurophysiology*, 120(2), 848-853. <https://doi.org/10.1152/jn.00229.2018>
- King, D. J., Hodgekins, J., Chouinard, P. A., Chouinard, V. A., & Sperandio, I. (2017). A review of abnormalities in the perception of visual illusions in schizophrenia. *Psychonomic bulletin & review*, 24(3), 734-751. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1168-5>
- Kirsch, W., & Kunde, W. (2021). On the origin of the Ebbinghaus illusion: The role of figural extent and spatial frequency of stimuli. *Vision research*, 188, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2021.07.016>
- Knol, H., Huys, R., Sarrazin, J. C., & Jirsa, V. K. (2015). Quantifying the Ebbinghaus figure effect: target size, context size, and target-context distance determine the presence and direction of the illusion. *Frontiers in psychology*, 6, 1679. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01679>
- Kouti, E., & Shahsavarani, A. M. (2016). The “Neuropsychological Theory of Color Vision” in action: Facilitation of dyslexia psychoneurorehabilitation based upon psychoneuro-education. *Journal of Cognitive Strategies in Learning*, 3(5), 21-37.
- Lacquanti, F., Ferrigno, G., Pedotti, A., Soechting, J. F., & Terzuolo, C. (1987). Changes in spatial scale in drawing and handwriting: kinematic contributions by proximal and distal joints. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 7(3), 819-828. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.07-03-00819.1987>
- Lang, N., Siebner, H. R., Chadaide, Z., Boros, K., Nitsche, M. A., Rothwell, J. C., Paulus, W., & Antal, A. (2007). Bidirectional modulation of primary visual cortex excitability: a combined tDCS and rTMS study. *Investigative ophthalmology & visual science*, 48(12), 5782-5787. <https://doi.org/10.1167/iov.07-0706>
- Lerner, O., Friedman, J., & Frenkel-Toledo, S. (2021). The effect of high-definition transcranial direct current stimulation intensity on motor performance in healthy adults: a randomized controlled trial. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 18(1), 103. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00899-z>
- Loo, C. K., Alonzo, A., Martin, D., Mitchell, P., Galvez, V., & Sachdev, P. (2012). A three-week, randomized, sham-controlled trial of transcranial direct current stimulation in depression. *British Journal of Psychiatry*, 200, 1-8. <https://doi.org/10.1192/bjp.bp.111.097634>
- Lu, Y., & Chen, L. (2025). Affective content of simple geometric shapes promotes visual size perception. *Biological Psychology*, 195, 109006. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2025.109006>
- Meek, A. W., Greenwell, D., Poston, B., & Riley, Z. A. (2021). Anodal tDCS accelerates on-line learning of dart throwing. *Neuroscience letters*, 764, 136211. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2021.136211>
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1993). Visual pathways to perception and action. *Progress in brain research*, 95, 317-337. [https://doi.org/10.1016/s0079-6123\(08\)60379-9](https://doi.org/10.1016/s0079-6123(08)60379-9)
- Mioni, G., Grondin, S., Bardi, L., & Stablum, F. (2020). Understanding time perception through non-invasive brain stimulation techniques: A review of studies. *Behavioural brain research*, 377, 112232. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2019.112232>
- Moffa, A. H., Brunoni, A. R., Fregni, F., Palm, U., Padberg, F., Blumberger, D. M., ... & Loo, C. K. (2017). Safety and acceptability of transcranial direct current stimulation for the acute treatment of major depressive episodes: Analysis of individual patient data. *Journal of affective disorders*, 221, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2017.06.021>
- Mruczek, R. E., Blair, C. D., Strother, L., & Caplovitz, G. P. (2015). The Dynamic Ebbinghaus: motion dynamics greatly enhance the classic contextual size illusion. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 77. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00077>

- Mruczek, R. E., Fanelli, M., Kelly, S., & Caplovitz, G. P. (2022). The combination of target motion and dynamic changes in context greatly enhance visual size illusions. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 959367. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.959367>
- Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2011). Transcranial direct current stimulation--update 2011. *Restorative neurology and neuroscience*, 29(6), 463-492. <https://doi.org/10.3233/RNN-2011-0618>
- Nitsche, M. A., Cohen, L. G., Wassermann, E. M., Priori, A., Lang, N., Antal, A., Paulus, W., Hummel, F., Boggio, P. S., Fregni, F., & Pascual-Leone, A. (2008). Transcranial direct current stimulation: State of the art 2008. *Brain stimulation*, 1(3), 206-223. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2008.06.004>
- Onagawa, R., Shinya, M., Ota, K., & Kudo, K. (2019). Risk aversion in the adjustment of speed-accuracy tradeoff depending on time constraints. *Scientific reports*, 9(1), 11732. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48052-0>
- Paulus, W. (2011). Transcranial electrical stimulation (tES-tDCS; tRNS, tACS) methods. *Neuropsychological rehabilitation*, 21(5), 602-617. <https://doi.org/10.1080/09602011.2011.557292>
- Polanen, V., & Davare, M. (2015). Interactions between dorsal and ventral streams for controlling skilled grasp. *Neuropsychologia*, 79(Pt B), 186-191. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.010>
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2014). *Motor learning and performance: From principles to application* (5th éd.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Shahbaz, R., Saemi, E., Doustan, M., Hogg, J. A., & Diekfuss, J. A. (2024). The effect of a visual illusion and self-controlled practice on motor learning in children at risk for developmental coordination disorder. *Scientific Reports*, 14(1), 12414. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63387-z>
- Sherman, J. A., & Chouinard, P. A. (2016). Attractive Contours of the Ebbinghaus Illusion. *Perceptual and motor skills*, 122(1), 88-95. <https://doi.org/10.1177/0031512515626632>
- Silvanto, J., & Cattaneo, Z. (2017). Common framework for "virtual lesion" and state-dependent TMS: The facilitatory/suppressive range model of online TMS effects on behavior. *Brain and cognition*, 119, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.09.007>
- Takao, S., Clifford, C. W. G., & Watanabe, K. (2019). Ebbinghaus illusion depends more on the retinal than perceived size of surrounding stimuli. *Vision research*, 154, 80-84. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2018.10.010>
- Talimkhani, A., Abdollahi, I., Mohseni-Bandpei, M. A., Ehsani, F., Khalili, S., & Jaberzadeh, S. (2019). Differential Effects of Unihemispheric Concurrent Dual-Site and Conventional tDCS on Motor Learning: A Randomized, Sham-Controlled Study. *Basic and clinical neuroscience*, 10(1), 59-72. <https://doi.org/10.32598/bcn.9.10.350>
- Terhune, D. B., Murray, E., Near, J., Stagg, C. J., Cowey, A., & Cohen Kadosh, R. (2015). Phosphene perception relates to visual cortex glutamate levels and covaries with atypical visuospatial awareness. *Cerebral cortex*, 25(11), 4341-4350. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv015>
- Thair, H., Holloway, A. L., Newport, R., & Smith, A. D. (2017). Transcranial direct current stimulation (tDCS): a beginner's guide for design and implementation. *Frontiers in neuroscience*, 11, 641. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00641>
- Trevarthen, C. B. (1968). Two mechanisms of vision in primates. *Psychologische Forschung*, 31(4), 299-348. <https://doi.org/10.1007/BF00422717>
- Van Polanen, V., & Davare, M. (2015). Interactions between dorsal and ventral streams for controlling skilled grasp. *Neuropsychologia*, 79(Pt B), 186-191. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.010>
- Wang, A., Chen, L., & Jiang, Y. (2021). Anodal Occipital Transcranial Direct Current Stimulation Enhances Perceived Visual Size Illusions. *Journal of cognitive neuroscience*, 33(3), 528-535. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01664
- Witt, J. K., Linkenauger, S. A., & Proffitt, D. R. (2012). Get me out of this slump! Visual illusions improve sports performance. *Psychological science*, 23(4), 397-399. <https://doi.org/10.1177/0956797611428810>
- Wu, P. J., Huang, C. H., Lee, S. Y., Chang, A. Y., Wang, W. C., & Lin, C. C. K. (2024). The distinct and potentially conflicting effects of tDCS and tRNS on brain connectivity, cortical inhibition, and visuospatial memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 18, 1415904. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1415904>
- Wu, D., Zhou, Y., Lv, H., Liu, N., & Zhang, P. (2021). The initial visual performance modulates the effects of anodal transcranial direct current stimulation over the primary visual cortex on the contrast

- sensitivity function. *Neuropsychologia*, 156, 107854.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.107854>
- Yoo, S. A., & Joo, S. J. (2023). Behavioral examination of the role of the primary visual cortex in the perceived size representation. *Scientific Reports*, 13(1), 21134. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48632-1>
- Zamani, M. H., Taheri Torbati, H. R., Saberi Kakhki, A. R., & Ghoshoni, M. (2022). The effects of two types Ebbinghaus visual illusion on changes perception of visual size and brain waves pattern in children with autism: A review of neurocognitive perspective. *Advances in Cognitive Science*, 23(4), 18-32.