

The Effect of Two Methods of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) and Stimulus-Response Asynchrony on Backward-Compatibility Effect in Mental Fatigue Conditions

Somayeh Hafezi ¹, Mohammadreza Doustan ^{2✉}, Esmael Saemi ³

1. Department of Motor Behavior and Sports Psychology, Faculty of Sport Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: s.hafezii87@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Motor Behavior and Sports Psychology, Faculty of Sport Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.doustan@scu.ac.ir
3. Department of Motor Behavior and Sports Psychology, Faculty of Sport Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: e.saemi@scu.ac.ir

Article Info

Article type: Research

Article history:

Received:

5 July 2023

Received in revised form:

4 November 2023

Accepted:

7 November 2023

Published online :

20 March 2024

Keywords:

Dual task,

Mental fatigue,

Psychological refractory

period,

Reaction time.

ABSTRACT

Introduction: The present study aimed to investigate the effect of anodal and cathodal brain tDCS and stimulus-response asynchrony on the backward-compatibility effect (BCE) in conditions of acute mental fatigue.

Methods: The participants were 39 boys (20 to 24 years old). The instruments included the informed consent form, the Edinburgh handedness questionnaire, the dual reaction time instrument, the Stroop software, the visual analog scale to evaluate fatigue severity (VAS-F), and the tDCS device. The participants in the pre-test were tested in two conditions of non-fatigue and mental fatigue with a dual reaction time instrument. The tests consisted of two three-choice visual stimulus-response (letters and colors) with ten different stimulus onset asynchronies (SOAs). Then the subjects were randomly assigned to three Anodal, Cathodal, and Sham stimulation groups. The intervention consisted of four consecutive 20-minute sessions of tDCS stimulation on the DLPFC area. One day and four days after the last stimulation session, the tests were repeated. For inferential data analysis, Mixed Model ANOVA and One-way ANOVA tests were used at a significance level of 0.05.

Results: The results showed that there is a difference between different SOAs in response time to the first stimulus (RT1) which is a representation of backward adaptation, and at lower SOAs, the RT1 is shorter. Also, there is a difference in RT1 at low SOAs between fatigued and non-fatigued conditions. However, the effect of cathodal and anodal tDCS on RT1 was very small.

Conclusion: In general, the results showed that at least some central aspects related to the response can be processed in parallel. Fatigue also affects this parallel processing.

Cite this article: 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.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jsmdl.2023.361794.1744>



Journal of Sports and Motor Development and Learning by University of Tehran Press is licensed under CC BY-NC 4.0| web site: <https://jsmdl.ut.ac.ir/> | Email: jsmdl@ut.ac.ir.

Extended Abstract

Introduction

Recent studies have challenged the purely serial central processing of tasks. According to a hypothesis, if the type of stimulus-response is the same in two tasks, the presence of the second stimulus-response causes interference and delay in the response to the first stimulus (RT1); A phenomenon known as the backward compatibility effect (BCE). This suggests that at least some aspects of response-related central processing (such as response activation) can occur in parallel. Mental fatigue is a suboptimal psychological-physiological state that is caused by cognitive activity and leads to a change in strategies. It is necessary to use strategies to reduce the effect of fatigue, especially in skills where speed of action plays a significant role. In recent years, several studies have investigated the effect of transcranial direct current stimulation (tDCS) to control these types of interference. The present study aimed to investigate the effect of anodal and cathodal brain tDCS on backward compatibility in ten different stimulus-onset asynchrony (SOAs) in non-fatigue and mental fatigue conditions.

Methods

The current research was quasi-experimental with three experimental groups and pre-test, post-test, and follow-up design. The participants included 39 boys (age range: 20-24 years). The measurement tools included the multiple reaction time measurement tool, the brain tDCS device (Neuro-Stim 2 model, made in Iran), the Stroop effect tool, and the visual analog scale questionnaire to evaluate fatigue severity (VAS-F). In the pre-test stage, the participants were tested in two non-fatigue and mental fatigue conditions (induced by using the Stroop test software for 30 minutes). The test consisted of a quick response to two stimuli with different time intervals (50, 75, 100, 150, 300, 400, 600, 900, 1200, and 1500 ms). The first visual stimulus had 3 choices (English letters A, B, and C). After a random SOA, the second stimulus, which was a 3-choice reaction time visual stimulus of color (red, yellow, and blue) was presented. In the following, participants were randomly assigned to three anodal, cathodal, and sham stimulation groups. In the intervention phase, all participants participated in 4 consecutive tDCS sessions. In the anodal and cathodal stimulation group, tDCS was applied to the DLPFC region for 20 minutes in each session. No stimulation was applied in the sham group. All participants were assessed one day after the last stimulation session, and 4 days later in the follow-up phase, similar to the pre-test phase. For inferential analysis, the statistical methods of mixed ANOVA, and one-way ANOVA with Bonferroni post-hoc test were used. The significance level for the tests was set at 0.05. SPSS version 21 software was used.

Results

The findings showed that at low SOAs, the RT1 which is a representation of backward compatibility, was shorter. The shortest RT1 occurred at SOA of 50 and then 300 ms. Also, at low SOAs, there was a difference in RT1 between fatigued and non-fatigued conditions. In the pre-test and follow-up phase, RT1 increased in fatigue conditions compared to non-fatigue conditions; however, in the post-test stage, this value

decreased after inducing mental fatigue. The effects of cathodal and anodal tDCS on both responses to the first and even the second stimulus were very small. There was a difference in the effects of anodal and cathodal stimulation on RT1 in fatigue and non-fatigue conditions. Anodal stimulation in non-fatigue conditions did not have much effect on RT1, while cathodal stimulation showed an improvement in RT1 in both mental fatigue and non-fatigue conditions.

Conclusion

Due to the difference in various SOAs over RT1, at least some central aspects of the response can be processed in parallel. Fatigue also affects this parallel processing. The results at higher SOA support Borger's model based on the response summation phenomenon, which, unlike the bottleneck model, predicts an increase in RT1 by increasing the SOA. However, considering that RT1 also decreased with the decrease of SOA, this can be considered due to the automatic arousal characteristics of the second stimulus and not any processing related to the second stimulus. This point confirms Posner's model and is opposed to the BCE phenomenon. The effects of cathodal and anodal tDCS were small. Perhaps the selectivity of the nature of the reaction time and the dominance of the effect of repeating the tests, due to the multiplicity of SOA compared to the stimulation effect, have minimized the difference between the groups. It is also possible that high current density has led to increased excitability in cathodal stimulation.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines: This study protocol was approved by the ethics committee of the Shahid Chamran University of Ahvaz (EE/1401.2.24.222390/scu.ac.ir).

Funding: This research did not receive any financial costs.

Authors' contribution: All authors contributed equally.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: We thank all participants in the research.

اثر دو روش تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای مغز (tDCS) و ناهمزمانی محرک - پاسخ‌ها بر سازگاری عقب‌گرد در شرایط خستگی ذهنی

سمیه حافظی^۱، محمدرضا دوستان^۲✉، اسماعیل صائمی^۳

۱. گروه رفتار حرکتی و روانشناسی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: s.hafezii87@gmail.com
۲. نویسنده مسؤل، گروه رفتار حرکتی و روانشناسی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.doustan@scu.ac.ir
۳. گروه رفتار حرکتی و روانشناسی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: e.saemi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	مقدمه: هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر دو روش tDCS آندی و کاتدی مغز و ناهمزمانی محرک - پاسخ‌ها بر سازگاری عقب‌گرد در شرایط خستگی ذهنی حاد بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۴	روش پژوهش: شرکت‌کنندگان ۳۹ پسر (۲۰ تا ۲۴ سال) بودند. ابزارها شامل برگه رضایت آگاهانه، پرسشنامه دست برتری ادینبورگ، ابزار زمان واکنش دوگانه، نرم‌افزار استروپ، پرسش‌نامه مقیاس آنالوگ دیداری (VAS-F) و دستگاه تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای (tDCS) بود. شرکت‌کنندگان در پیش‌آزمون در دو شرایط غیرخستگی و خستگی ذهنی با ابزار زمان واکنش دوگانه آزمون شدند. آزمون‌ها شامل دو محرک - پاسخ دیداری سه‌انتخابی (حروف و رنگ) با ده SOAs مختلف بود. سپس افراد به‌صورت تصادفی در سه گروه تحریک آندال، کاتدال و شم قرار گرفتند مداخله شامل چهار جلسه متوالی ۲۰ دقیقه تحریک tDCS بر روی ناحیه DLPFC بود. یک روز و ۴ روز پس از آخرین جلسه تحریک، آزمون‌ها تکرار شد. برای تحلیل استنباطی، از تحلیل واریانس مرکب و آنوای یکرهه در سطح معناداری ۰/۰۵ استفاده شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۸/۱۳	یافته‌ها: نتایج نشان داد که بین SOAs مختلف در زمان پاسخ به محرک اول که نمایشی از سازگاری عقب‌گرد است، تفاوت وجود دارد و در فواصل پایین، زمان پاسخ به محرک اول کمتر است. همچنین بین زمان پاسخ به محرک اول در فواصل بین‌محرکی پایین بین شرایط خستگی و غیرخستگی تفاوت وجود دارد. با این حال، اثرگذاری tDCS کاتدی و دوره بی‌پاسخی روان‌شناختی.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۱۶	نتیجه‌گیری: به‌طور کلی نتایج نشان داد که حداقل برخی از جنبه‌های مرکزی مربوط به پاسخ می‌تواند به‌صورت موازی پردازش شود. خستگی نیز بر این پردازش موازی تأثیر دارد.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۱۱	

کلیدواژه‌ها:
تکلیف دوگانه،
زمان واکنش،
خستگی ذهنی،
دوره بی‌پاسخی روان‌شناختی.

استناد: حافظی، سیمیه؛ دوستان، محمدرضا؛ صائمی، اسماعیل و استروباخ، هابیل تیلو (۱۴۰۳). اثر دو روش تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای مغز (tDCS) و ناهمزمانی محرک - پاسخ‌ها بر سازگاری عقب‌گرد در شرایط خستگی ذهنی. نشریه رشد و یادگیری حرکتی ورزشی، (۱)، ۱۶-۸۹، ۶۹-۸۹.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jssmdl.2023.361794.1744>

این نشریه علمی رایگان است و حق مالکیت فکری خود را بر اساس لایسنس کپی‌رایت CC BY-NC 4.0 به نویسندگان واگذار کرده

است. تارنما: <https://jssmdl.ut.ac.ir> | رایانامه: jssmdl@ut.ac.ir



مقدمه

در شرایط مختلف از جمله هنگام اجرای مهارت‌های ورزشی (ورزش‌های گروهی، راکتی و رزمی) یا برخی موقعیت‌های روزانه، موفقیت یا شکست اغلب به توانایی بازتولید مهارت‌های حرکتی خاص با سرعت عمل بالا مربوط می‌شود (ل منسک^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). برای مثال در بسیاری از مسابقات ورزشی، بازیکنان حریف با ارائه بخش اول یک پاسخ (مثلاً یک حرکت آهسته به چپ) و به دنبال آن با انجام حرکت واقعی (برای مثال حرکت به راست)، حریف را فریب می‌دهند (اشمیت و لی^۲، ۲۰۰۵). در چنین موقعیت‌هایی، که نیاز به ارائه واکنش‌های سریع دارند، زمان واکنش^۳ (RT) به‌عنوان راهبرد کلیدی در نظر گرفته می‌شود (لیتون^۴، ۱۹۹۱).

یکی از راهبردهایی که اغلب بازیکنان ورزش‌های با مهارت‌های باز به‌منظور همراه کردن و کاهش عملکرد حریف به کار می‌گیرند، فریب بازیکن مقابل با استفاده از ارائه یک حرکت فرعی و فریبنده با فاصله کمی پیش از اجرای محرک اصلی است (اشمیت و ریسبرگ^۵، ۲۰۰۰). در نتیجه بازیکن تدافعی قادر به تکمیل پاسخ اصلاحی به‌موقع نخواهد بود (ویگلت و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین، در عمل، وقتی بازیکن مهاجم تظاهر می‌کند، پاسخ ورزشکار مدافع به حرکت دوم می‌تواند بیش از زمانی که به‌تنهایی ارائه شود به تأخیر بیفتد و زمان بیشتری به مهاجم برای انجام حرکت بدهد (هنری^۶ و همکاران، ۲۰۱۲). این تأخیر موجب ایجاد پدیده دوره بی‌پاسخی روان‌شناختی می‌شود که تحت تأثیر ناهمزمانی شروع محرک^۸ قرار می‌گیرد (اشتروباخ^۹ و همکاران، ۲۰۱۵). طرح غالب اثر دوره بی‌پاسخی روان‌شناختی، مدل تنگراه انتخاب پاسخ است (ولفورد^{۱۰}، ۱۹۵۲). همان‌طور که می‌دانیم، پردازش یک تکلیف به سه مرحله پردازش ادراکی، انتخاب پاسخ و اجرای پاسخ تقسیم می‌شود. انتخاب پاسخ برای دو تکلیف به‌طور همزمان قابل انجام نیست (راو و ژنگ^{۱۱}، ۲۰۲۰). این اثر ناهمزمانی شروع محرک را در عملکرد تکلیف دوگانه می‌توان با این فرض تفسیر کرد که مراحل پردازش مرکزی دو تکلیف (مرحله‌ای که در آن پاسخ مناسب باید انتخاب شود) فقط می‌توانند به‌صورت توالی رخ دهند؛ درحالی‌که شناسایی محرک و اجرای پاسخ می‌تواند به موازات هر مرحله از تکلیف دیگر انجام شود. این تنگراه مرکزی به شکل همه یا هیچ در نظر گرفته شده است. دلیل اصلی اولویت‌بندی تکلیف اول نسبت به تکلیف دوم این است که معمولاً ابتدا شناسایی محرک در تکلیف اول به پایان می‌رسد و در نتیجه زودتر به مرحله مرکزی (انتخاب پاسخ) می‌رسد (هافمن^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۰). این مدل همچنین پیش‌بینی می‌کند که اگر تکلیف دوم ارائه شود، در زمان پاسخگویی به تکلیف اول (RT1) تغییری ایجاد نمی‌شود، زیرا تکالیف بر اساس روش «خروج به‌ترتیب ورود» شناسایی می‌شوند (بائورس^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۷).

با وجود این اخیراً در مطالعاتی، فرض پردازش مرکزی کاملاً سریالی ویژگی‌های تکلیف مرتبط با پاسخ در سطوح مختلف به چالش کشیده شده است (پیکزیکولان و هوئستگ^{۱۴}، ۲۰۱۹). هومل^{۱۵} (۱۹۹۸) وجود پردازش مرکزی موازی جزئی را در بین تکالیف پیشنهاد کرد. نتایج پژوهش‌های او نشان داد که انتخاب پاسخ تکلیف اول تحت تأثیر ویژگی‌های مربوط به پاسخ تکلیف دوم است. به این ترتیب، فعال‌سازی پاسخ در تکلیف دوم می‌تواند با پردازش مرتبط با پاسخ در تکلیف اول تداخل داشته باشد (پیکزیکولان و هوئستگ، ۲۰۱۷). بر اساس این فرضیه در صورت یکسان بودن نوع محرک - پاسخ‌ها در دو تکلیف، وجود محرک - پاسخ دوم موجب تأخیر در RT1 می‌شود؛ پدیده‌ای که به‌عنوان اثر سازگاری عقب‌گرد^{۱۶} شناخته می‌شود (هومل، ۱۹۹۸؛ ادر^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۷). این موضوع نشان می‌دهد که حداقل برخی از جنبه‌های پردازش مرکزی مربوط به پاسخ (مانند فعال‌سازی پاسخ) می‌تواند به‌طور موازی رخ دهد (ادر و همکاران، ۲۰۱۷).

1. Le Mansec

2. Schmidt & Lee

3. reaction time

4. Layton

5. Wrisberg

6. Weigelt

7. Henry

8. Stimulus-onset asynchrony (SOA)

9. Strobach

10. Response selection bottleneck

(RSB)

11. Welford

12. Rau & Zheng

13. Hoffmann

14. Baurès

15. Pieczykolan & Huestegge

16. Hommel

17. Backward-compatibility effect

(BCE)

18. Eder

مدل اشتراک ظرفیت مرکزی^۱ (تامبو و جولیکور؛ ۲۰۰۳؛ ۲۰۰۵) مشابه مدل تنگراه مرکزی، تکلیف را به سه مرحله پردازش تقسیم می‌کند، با این تفاوت که تمام مراحل را می‌توان به موازات هر مرحله دیگر از یک تکلیف ثانویه انجام داد. در این مدل، فرض بر این است که در طول انجام تکالیف دوگانه، ظرفیت شناختی به‌طور مداوم در بین تکالیف به اشتراک گذاشته می‌شود. در واقع بخش عمده‌ای از ظرفیت ابتدا به انتخاب پاسخ تکلیف اول اختصاص داده می‌شود، تا زمانی که ظرفیت بعداً (به‌صورت تدریجی یا مرحله‌ای) برای تکمیل انتخاب پاسخ تکلیف دوم تغییر یابد. بنابراین، این مدل به‌جای یک مکانیزم تخصیص غیرمنعطف همه یا هیچ، امکان به اشتراک‌گذاری منعطف ظرفیت را فراهم می‌کند که می‌تواند با نیازها یا دستورالعمل‌های تکالیف ویژه تعدیل شود (هافمن و همکاران، ۲۰۲۰).

دکس^۲ و همکاران (۲۰۰۶) یک فعالیت تأخیری را در قشر پیش‌پیشانی مغز^۳ را در تکالیف سرعت واکنش دوگانه نشان دادند؛ به این معنی که یک شبکه فرونتال، مسئول تنگراه مرکزی پردازش اطلاعات است. مطالعات پیشین تصویربرداری تشدید مغناطیسی عملکردی^۵ این تنگراه را در بخش قشر پیش‌پیشانی خلفی-جانبی نیمکرهٔ چپ نشان داده است و شواهد همبستگی نتایج این تحقیقات، بیانگر آن است که بخش پشتی قشر پیش‌پیشانی جانبی و به‌ویژه محل اتصال فرونتال تحتانی^۶ نقش مهمی در انتخاب پاسخ ایفا می‌کند (هسلمن^۸ و همکاران، ۲۰۱۱). تصور می‌شود که ناحیهٔ IFJ برای کنترل شناختی، تصمیم‌گیری، و انتخاب مستقل از روش ورودی اطلاعات مربوط به تکلیف، حیاتی است (دایموند^۹؛ ۲۰۰۶). نتایج پژوهش فیلمر^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۳) نیز شواهد مستقیمی را ارائه می‌دهد که DLPFC سمت چپ یک مکان عصبی کلیدی در تنگراه مرکزی است که توانایی فرد را برای گرفتن دو تصمیم ساده به‌طور همزمان محدود می‌کند. بخش پشتی قشر پیش‌پیشانی جانبی چپ برای سطوح بالاتر کنترل شناختی حیاتی است و در زیرنواحی عملکردی متفاوت سازماندهی شده است (منطقهٔ ۴۶/۹، ۹/۸/۶، ۴۵/۴۴، ۴۵/۴۴، ۴۵/۴۴). در مجموع، DLPFC چپ به‌طور خاص زمانی که تقاضای پردازش افزایش می‌یابد، به‌کار گرفته می‌شود (وله^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۸).

تکنیک‌های تعدیل عصبی غیرتهاجمی با استفاده از جریان‌های الکتریکی، مانند تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای^{۱۲} می‌توانند روشی امیدوارکننده جهت تغییر عملکرد سیستم‌های عصبی، شناختی و رفتاری ارائه دهند (زمانی و دوستان، ۲۰۱۸؛ مهردادیان و همکاران، ۲۰۲۲). tDCS یک تکنیک شناخته‌شده برای تعدیل تحریک‌پذیری قشر مغز است، که به‌دلیل تأثیرات بالقوه بر قالب‌پذیری قشر مغز، داشتن ایمنی، عملکرد آسان، اقتصادی و قابل حمل بودن، به‌عنوان یک روش پژوهشی در علوم اعصاب استفاده شده است (ماچادو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۹). کاربرد این تکنیک شامل عبور جریانی مستقیم با شدت کم (معمولاً ۰/۲ تا ۲ میلی‌آمپر) بین جفت‌الکترودهای قرارگرفته بر روی پوست سر است که موجب ایجاد یک میدان الکتریکی در قشر زیرین می‌شود. جریان‌های اعمال‌شده در طول tDCS، پتانسیل تراغشایی نورون‌های قشر مغز را تغییر می‌دهند (ارهات^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۱؛ رادول^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۱).

در تنظیم سنتی و تک‌نیمکره‌ای تحریک فراجمجمه‌ای مغز، یک الکتروده به‌عنوان الکتروده فعال^{۱۶} (هدف) و دیگری به‌عنوان الکتروده برگشتی^{۱۷} (مرجع) شناخته می‌شود (تایبر^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۷). به‌طور کلی فرض بر این است که جریان آندی با دپولاریزه^{۱۹} کردن نورون‌ها، احتمال وقوع پتانسیل عمل‌ها را افزایش می‌دهد، به‌طور موقت رفتارهای مرتبط با ناحیهٔ قشری زیر الکتروده هدف را تسهیل می‌کند (گالوز^{۲۰} و همکاران، ۲۰۱۳)، درحالی‌که جریان کاتدی نورون‌ها را هایپرپولاریزه^{۲۱} کرده و ممکن است موجب مهار نواحی قشری مربوطه شود (نیچه^{۲۲} و پاتولوز، ۲۰۱۱). tDCS هم می‌تواند تأثیرات «آنلاین» و هم تأثیرات «آفلاین» ایجاد می‌کند. تأثیرات آنلاین در طول تحریک رخ می‌دهند، درحالی‌که تأثیرات آفلاین یا تأثیرات متعاقب، پس از پایان تحریک هم باقی می‌مانند (رادول^{۲۳} و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج تحقیقات

1. Central capacity-sharing (CCS)

2. Tombu & Jolicœur

3. Dux

4. Prefrontal cortex (PFC)

5. Functional magnetic resonance imaging (fMRI)

6. Dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC)

7. Inferior frontal junction (IFJ)

8. Hesselmann

9. Diamond

10. Filmer

11. Volle

12. Transcranial Direct Current Stimulation

13. Machado

14. Ehrhardt

15. Rothwell

16. Active

17. Return

18. Thair

19. Depolarizes

20. Gálvez

21. Hyperpolarizes

22. Rothwell

گزارش شده به نفع تحریک تکراری در فواصل زمانی خاص برای طولانی کردن تأثیرات متعاقب و در نتیجه افزایش کارایی این تکنیک است (نیچه و پائولوز، ۲۰۱۱). جلسات متعددی که در روزهای متوالی انجام می‌شوند، افزایش تجمعی و پایدار در تحریک عصبی ایجاد می‌کنند، تحریک‌پذیری قشر مغز را به‌طور مؤثرتری تغییر می‌دهند (گالوز و همکاران، ۲۰۱۳).

نتایج پژوهش فیلمر و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که تحریک آندی قشر پیش‌پیشانی خلفی-جانبی چپ که در فرایندهای مختلف تصمیم‌گیری و یادگیری نقش دارد. یافته‌های مولرو-چامیزو^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، نشان داد که تأثیر tDCS آندی بر قشر حرکتی اولیه^۲ چپ پیش از اجرای یک تکلیف زمان واکنش ساده، موجب بهبود عملکرد حرکتی می‌شود. البته میزان اثرگذاری به‌طور اساسی به بازه زمانی بین تحریک و اجرای تکلیف بستگی دارد. به هر حال، بهبود عملکرد حرکتی و نیاز به پاسخ‌های سریع، چالشی اساسی برای سیستم عصب-حرکتی است، که اغلب در موقعیت‌هایی از جمله شرایط خستگی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که غالباً در مراحل پایانی مسابقات ورزشی و تکلیف حرکتی مانند راندگی، که علاوه بر خستگی جسمی، خستگی ذهنی نیز بروز می‌کند، مهارت‌های فنی، توانایی تصمیم‌گیری و پردازش اطلاعات جهت انجام واکنش‌های سریع و دقیق کاهش می‌یابد (سان^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). این توانایی‌ها در بسیاری از مهارت‌های حرکتی پراهمیت است، جایی که واکنش‌های آهسته‌تر از حد مطلوب، شانس ارائه پاسخ مناسب و به‌موقع را کاهش می‌دهند (پاولکا^۴ و همکاران، ۲۰۲۰). خستگی ذهنی با کاهش عملکرد و تغییرات عصبی در نواحی مختلف قشر مغز، به‌ویژه قشر پیش‌پیشانی و قشر سینگولیت قدامی^۵ همراه است (مولر و اپز^۶، ۲۰۱۹). مکانیسم احتمالی برای تأثیر خستگی ذهنی بر عملکرد، افزایش غلظت آدنوزین در قشر پیش‌پیشانی مغز است که در تکلیف شناختی فعال می‌شود و عملکردهای اجرایی را مختل می‌کند (سان و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجا که در شرایط تکلیف دوگانه، مرحله انتخاب پاسخ پردازش مرکزی با عملکردهای اجرایی در ارتباط است (اشتروباخ و همکاران، ۲۰۱۵)، انجام مداخلاتی جهت کاهش تأثیرات منفی خستگی بر عملکرد، ضروری است. نتایج تحقیق اخیر نیکوچرف صالحی و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که tDCS آندی روی قشر پیش‌پیشانی جانبی خلفی چپ، کاهش عملکرد هوشیاری (گوش‌به‌زنگی) ناشی از خستگی را در طول زمان بهبود می‌بخشد. همچنین به‌نظر می‌رسد تحریک آندی به‌طور بالقوه تأثیرات خستگی را که می‌تواند بر زمان واکنش تأثیرگذار باشد کاهش می‌دهد (دواناتان و مدهاوان^۷، ۲۰۱۶).

مطالعات اندکی تأثیر tDCS را بر سازگاری عقب‌گرد بررسی کرده‌اند و همچنین مطالعاتی در زمینه تأثیر tDCS بر کاهش تأثیرات خستگی و عملکرد شناختی و حرکتی صورت گرفته است. با فرض اینکه سازگاری عقب‌گرد می‌تواند تحت تأثیر شرایط خستگی قرار بگیرد، پژوهش حاضر به این موضوع می‌پردازد که آیا تحریک جریان مستقیم فراجمعه‌ای می‌تواند بر سازگاری عقب‌گرد در شرایط خستگی ذهنی تأثیرگذار باشد. همچنین تأثیر فواصل بین محرکی یا ناهمزمانی محرک‌ها نیز بررسی می‌شود.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع نیمه‌تجربی بود و از نظر هدف در دسته پژوهش‌های کاربردی قرار دارد. شرکت‌کنندگان در پژوهش دانشجویان پسر مقطع کارشناسی دانشگاه شهید چمران اهواز با دامنه سنی ۲۰ تا ۲۴ بودند. پس از بررسی معیارهای ورود و خروج، به ۳۹ نفر کاهش پیدا کردند. از همه شرکت‌کنندگان پس از ورود به آزمایشگاه و پیش از اجرای هر فعالیتی، سؤال‌اتی درباره راست‌دست بودن، 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 پرسیده شد. شرکت‌کنندگانی که هر کدام از معیارهای ورود را نداشتند، از پژوهش کنار گذاشته شدند.

1. Molero-Chamizo

2. M1

3. Sun

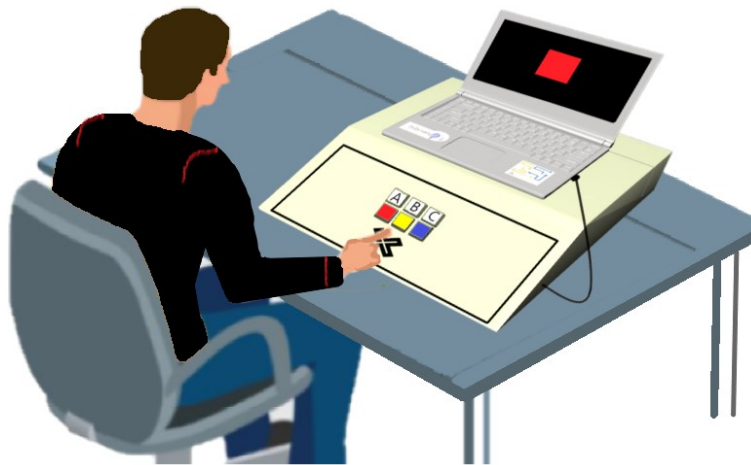
4. Pavelka

5. Anterior cingulate cortex (ACC)

6. Müller & Apps

7. Devanathan & Madhavan

ابزارهای اندازه‌گیری شامل برگه رضایت آگاهانه شرکت در پژوهش، پرسشنامه دست برتری ادینبورگ^۱ (اولدفیلد^۲؛ ۱۹۷۱)، ابزار سنجش زمان واکنش چندگانه و دستگاه تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای مغز مدل نورواستیم^۳ ساخت ایران، محصول شرکت مدینا طب‌گستر بود. ابزار سنجش زمان واکنش چندگانه (شکل ۱) ابزاری محقق‌ساخته است که قابلیت‌های منحصربه‌فردی دارد که ابزارهای دیگر فاقد آن هستند. برای نمونه قابلیت اعمال فاصله بین محرکی، زمان پیش‌دوره، اندازه‌گیری دوره بی‌پاسخی روان‌شناختی (زمان واکنش دوم) و همچنین سازگاری عقب‌گرد (زمان واکنش اول) و ... را دارد. روایی صوری این دستگاه توسط شش نفر از متخصصان علوم ورزشی تأیید شده است و برای ارزیابی روایی این ابزار از روش آزمون روایی همزمان با دستگاه سنجش زمان واکنش یاگامی وای‌بی ۱۰۰۰ استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون ۰/۸۱ حاصل شد. پایایی ابزار با استفاده از روش آزمون-بازآزمون برای زمان واکنش ساده و سه انتخابی به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۸۲ به دست آمد. این دستگاه دارای یک صفحه کلید است که ۳ دکمه با رنگ‌های مختلف و ۳ دکمه با حروف بزرگ انگلیسی (A. B. C) دارد و از طریق کابل رابط به درگاه یواس‌بی لپ‌تاپ متصل می‌شود. زمانی که آزمودنی در مقابل صفحه‌نمایش قرار می‌گیرد، با نمایش هر کدام از حروف و رنگ‌ها، دکمه متناسب با حرف یا رنگ نمایش داده‌شده را در سریع‌ترین زمان ممکن فشار می‌دهد و به این ترتیب، خروجی‌های مربوط به زمان پاسخ به محرک اول و دوم را فراهم می‌سازد. در این پژوهش، به منظور القای خستگی ذهنی از نرم‌افزار تکلیف اثر استروپ ساده^۴ محصول شرکت سینا استفاده شد. پایایی آزمون-بازآزمون آن ۰/۸۲ و روایی آن ۰/۸۵ گزارش شده است (استروپ، ۱۹۹۲؛ نقل از محمدزاده و همکاران، ۲۰۲۰). پرسشنامه مقیاس آنالوگ دیداری برای ارزیابی شدت خستگی (VAS-F) نیز استفاده شد. این پرسش‌نامه دارای دو خرده مقیاس است: خستگی (موارد ۱ تا ۵ و ۱۱ تا ۱۸) و انرژی (موارد ۶ تا ۱۰). نحوه امتیازدهی به این صورت است که با توجه به اینکه هر خط ۱۰۰ میلی‌متر طول دارد (۰ میلی‌متر «بدون خستگی ذهنی»؛ ۱۰۰ میلی‌متر «بیشترین خستگی ذهنی»)، امتیازها بین ۰ تا ۱۰۰ قرار می‌گیرند. نمرات بالاتر از ۵۰ به عنوان ملاک در نظر گرفته شد (شاهید و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۱. تصویری از ابزار مورد استفاده در پژوهش

به منظور تعیین دست برتر، شرکت‌کنندگان پرسشنامه دست‌برتری ادینبورگ را پر کردند. پس از آن، هر شرکت‌کننده، ده کوشش آزمایشی در ده فاصله بین محرکی مختلف (۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه) که به صورت تصادفی ارائه می‌شدند، انجام داد. فواصل بین محرکی انتخاب‌شده از مطالعه پیشین در زمینه دوره بی‌پاسخی استنباط شده‌اند (راو و ژنگ، ۲۰۲۰). در هر آزمون، از شرکت‌کنندگان خواسته شد درحالی که روی یک صندلی در فاصله ۶۰ سانتی‌متری از صفحه نمایش نشسته‌اند، انگشت اشاره دست راست خود را بر روی محل تعیین‌شده قرار داده و حواس خود را معطوف آزمون کنند. پس از اعلام آماده باش و فشردن دکمه شروع توسط آزمون‌گیرنده، ابتدا صدای بوق به مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه از مانیتور پخش شده و پس از گذشت ۲ ثانیه محرک اول که یک

1. Edinburg

2. Oldfield

3. Neurostim2

4. Yagami yb – 1000

5. Simple stroop task

6. Shahid

محرك دیداری زمان واکنش ۳ انتخابی بود، به صورت یک حرف انگلیسی (A,B,C) بر روی صفحه نمایش ظاهر می شد. شرکت کننده باید با سرعت با انگشت اشاره دست راست کلید مربوط به حرف مورد نظر بر روی صفحه کلید را فشار می داد. پس از بروز یک فاصله بین محرکی تصادفی، محرك دوم که یک محرك دیداری زمان واکنش ۳ انتخابی بود، به صورت یک مربع رنگی (یکی از رنگ های قرمز، زرد و آبی) روی صفحه نمایش ظاهر می شد و شرکت کننده باید به سرعت با انگشت اشاره همان دست به آن پاسخ می داد تا دستگاه زمان پاسخ به محرك اول و دوم را ثبت کند. سپس جلسات تحریک انجام می شد.

تعداد جلسات تحریک برای هر شرکت کننده چهار جلسه متوالی پیشنهاد شد (فیلمر و همکاران، ۲۰۱۷؛ ارهارت و همکاران، ۲۰۲۱). در جلسات تحریک، الکترودهای دستگاه تحریک جریان مستقیم فراجمله ای در هر سه گروه به نواحی مشابهی روی پوست سر متصل می شدند. محل الکترودها مطابق با سیستم الکتروود ۱۰-۲۰ الکتروانسفالوگرافی^۱ بین المللی (EEG) تعیین شد. الکتروود فعال بر روی ناحیه مربوط به بخش پشتی قشر پیش پیشانی جانبی (۱ سانتی متر عقب تر از F3؛ تقریباً معادل قسمت خلفی ناحیه ۹ برودمن^۲) و الکتروود برگشتی (مرجع) روی ناحیه فوق حدقه ای^۳ (Fp2) سمت راست قرار می گرفت (فیلمر و همکاران، ۲۰۱۳؛ فیلمر و همکاران، ۲۰۱۷؛ ارهارت و همکاران، ۲۰۲۱). در آزمایش حاضر، سه شرایط تحریک وجود داشت. در شرایط تحریک آندی، الکتروود فعال آند و الکتروود مرجع کاتد و در شرایط تحریک کاتدی، الکتروود فعال کاتد و الکتروود برگشتی آند بود. برای شرایط تحریک ساختگی، الکتروودها در همان موقعیت هایی که برای تحریک آندی و کاتدی تعیین شد، قرار گرفت. با این حال، جریان فقط در طول ۳۰ ثانیه ابتدا و انتهای تحریک برای القای همان احساس پوستی تحریک واقعی اعمال شد (نیکوحرף صالحی و همکاران، ۲۰۲۱). برای آزمایش یکپارچگی کور کردن، در پایان جلسات، با ارائه توضیحات در رابطه با سه گروه موجود در آزمایش، از شرکت کنندگان ماهیت جلسه آزمایشی که دریافت کردند (آندی، کاتدی، ساختگی) مورد پرسش قرار گرفت و از آنجا که اکثریت حدسشان اشتباه بود، نتیجه گرفتیم که شرایط کوری مؤثر بوده است (ارهارت و همکاران، ۲۰۲۱).

برای تجزیه و تحلیل استنباطی پژوهش، از روش های آماری تحلیل واریانس مرکب با اندازه گیری تکراری، آنوای یکراره و آزمون های پیگردی بنفرونی استفاده شد. سطح معناداری در نظر گرفته شده برای آزمون ها ۰/۰۵ بود.

یافته ها

با توجه به سطوح معناداری به دست آمده از آزمون لون برای بررسی برابری واریانس های خطا که همه آزمون ها که بالاتر از ۰/۰۵ بود، پیش فرض استفاده از آزمون تحلیل واریانس مرکب، برقرار بود. برای تحلیل استنباطی، از آزمون تحلیل واریانس با اندازه گیری های تکراری استفاده شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. نتایج آزمون تحلیل واریانس مرکب (۱۰×۲×۳) برای بررسی تفاوت بین RTI در آزمون های مختلف، در SOA های مختلف در شرایط خستگی در سه گروه

منبع تغییرات	مقدار F	sig	مجذور اتا
آزمون	۳۱۸/۳۱	*۰/۰۰۰۱	۰/۴۶۵
آزمون*گروه	۲/۰۲۴	۰/۱۰۰	۰/۱۰۱
خستگی	۱/۷۹۴	۰/۱۸۹	۰/۰۴۷
خستگی*گروه	۰/۱۹۷	۰/۸۲۲	۰/۰۱۱
SOA	۵/۰۶۰	*۰/۰۰۱	۰/۱۲۳
SOA*گروه	۰/۷۹۲	۰/۶۰۵	۰/۴۲

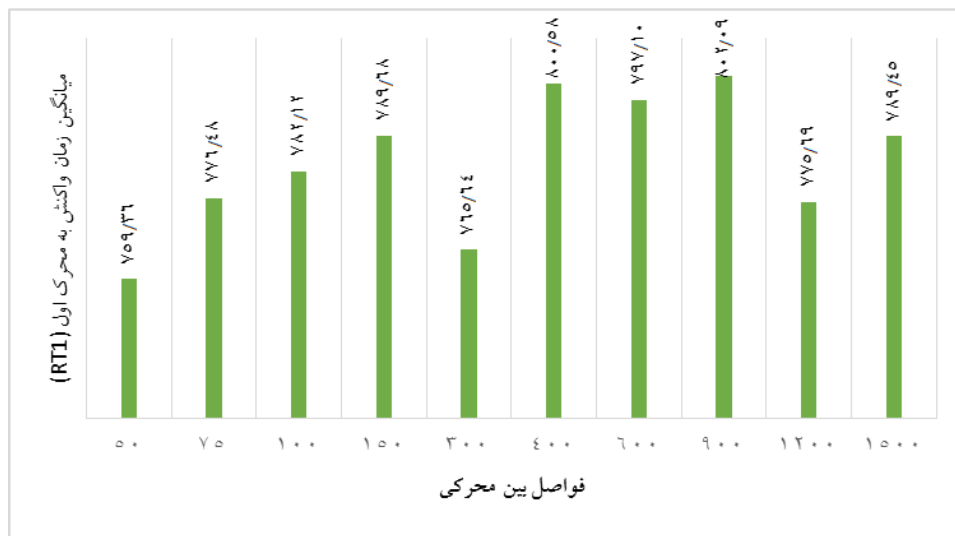
^۱. Electroencephalography (EEG)

^۲. Brodmann

^۳. Supraorbital

۰/۱۳۲	*۰/۰۰۶	۵/۴۷۴	آزمون*خستگی
۰/۱۶۵	*۰/۰۱۰	۳/۵۶۸	آزمون*خستگی*گروه
۰/۰۳۸	۰/۱۶۰	۱/۴۳۸	آزمون*SOA
۰/۰۷۰	۰/۱۱۴	۱/۳۴۹	آزمون*SOA*گروه
۰/۰۶۲	*۰/۰۲۷	۲/۳۸۳	خستگی*SOA
۰/۰۶۵	۰/۲۴۳	۱/۲۵۶	خستگی*SOA*گروه
۰/۰۵۱	*۰/۰۳۶	۱/۹۲۸	آزمون*خستگی*SOA
۰/۰۳۴	۰/۸۹۸	۰/۶۳۴	آزمون*خستگی*SOA*گروه

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، یافته‌های مربوط به آزمون تحلیل واریانس مرکب برای بررسی تأثیر tDCS بر زمان پاسخ به محرک اول نشان داد که اثر اصلی آزمون معنادار است ($F=۳۱/۳۱۸$, $sig=۰/۰۰۰۱$, $\eta^2=۰/۴۶۵$). بدین معنا که صرف‌نظر از شرایط خستگی و SOAs، بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری در زمان پاسخ به محرک اول تفاوت وجود دارد. آزمون‌های پیگردی بنفرونی نشان داد که بین پیش‌آزمون با پس‌آزمون ($P=۰/۰۰۰۱$) و پیش‌آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) تفاوت وجود دارد؛ میانگین زمان پاسخ به محرک اول در پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری به ترتیب برابر است با $۸۲۹/۹۳۱$ ، $۷۷۰/۳۳۸$ ، $۷۵۱/۱۹۰$. همچنین اثر اصلی خستگی بر زمان پاسخ به محرک اول معنادار نبود ($F_{۳۶,۱}=۱$, $sig=۰/۱۸۹$, $\eta^2=۰/۰۴۷$). بدین معنا که صرف‌نظر از آزمون و SOA، بین شرایط خستگی با غیرخستگی تفاوت وجود ندارد. با وجود این اثر اصلی SOA بر زمان پاسخ به محرک اول معنادار شد ($sig=۰/۰۰۱$, $\eta^2=۰/۱۲۳$)، با $F_{۱۳۷,۳۸}=۵/۰۶۰$. نتایج نشان داد بین فاصله بین محرکی ۵۰ با فواصل ۱۰۰، ۱۵۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ و نیز بین فاصله بین محرکی ۳۰۰ با فواصل بین محرکی ۴۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ و همچنین بین فواصل ۹۰۰ با ۱۲۰۰ تفاوت معنی‌داری وجود دارد ($P \leq ۰/۰۰۵$). میانگین زمان پاسخ به محرک اول، در فواصل بین محرکی ۵۰ و سپس ۳۰۰ میلی‌ثانیه نسبت به سایر فواصل، کمتر بود. اثر SOA در گروه معنادار نشد ($sig=۰/۰۴۲$ ، $\eta^2=۰/۶۰۵$ ، $F_{۱۳۷,۳۸}=۷/۶$). بدین معنا که صرف‌نظر از آزمون و شرایط خستگی، در اثرگذاری SOAs بر زمان پاسخ به محرک اول، بین گروه‌ها تفاوت وجود ندارد. اثر آزمون در خستگی معنادار شد ($F_{۷۳,۳}=۵/۴۷$ ، $sig=۰/۰۰۶$ ، $\eta^2=۰/۱۳۲$). برای یافتن جایگاه تفاوت‌ها از آزمون‌های تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های تکراری و آزمون تی وابسته استفاده شد، یافته‌ها حاکی از آن است که صرف‌نظر از مقادیر SOAs، در شرایط غیرخستگی ($F=۱/۹۵۱$ ، $sig=۰/۰۰۰۱$ ، $\eta^2=۰/۱۵۵$) و همچنین در شرایط خستگی اثر آزمون بر زمان پاسخ به محرک اول معنادار شد ($F=۱۱۳/۸۳۳$ ، $sig=۰/۰۰۰۱$ ، $\eta^2=۰/۲۳۷$). نتایج آزمون‌های پیگردی بنفرونی نشان داد که در شرایط غیرخستگی بین پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری تفاوت وجود دارد ($P=۰/۰۰۰۱$). در شرایط خستگی تنها بین پیش‌آزمون با پس‌آزمون و پیگیری تفاوت وجود داشت ($P=۰/۰۰۰۱$).



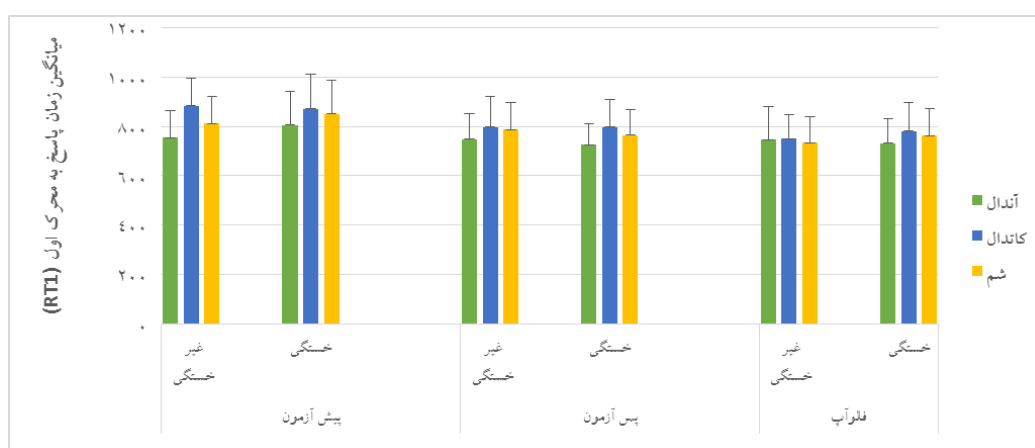
شکل ۱. مقایسه میانگین زمان پاسخ به محرک اول در فواصل بین محرکی مختلف

نتایج آزمون تحلیل واریانس درون گروهی نشان داد که در RT1 بین شرایط خستگی با غیرخستگی در پیش آزمون، پس آزمون و پیگیری تفاوت معناداری وجود دارد. همچنین مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در پیش آزمون و پیگیری میانگین RT1 در شرایط خستگی نسبت به شرایط غیرخستگی افزایش یافته، درحالی که در پس آزمون این مقدار کاهش ناچیزی نیز داشته است. همچنین اثر آزمون در خستگی در گروه معنادار شد ($F=۳/۵۷$ ، $sig=۰/۰۱۰$ ، $\eta^2=۰/۱۶۵$). در گروه tDCS آندی، در شرایط خستگی اثر آزمون بر RT1 معنادار شد ($P=۰/۲۱۲$ ، $\eta^2=۰/۰۰۰۱$)، $F=۳۴/۷۶۸$ ، $sig=۰/۰۰۰۱$). آزمون‌های پیگردی بنفرونی نشان داد که بین پیش آزمون با پس آزمون ($P=۰/۰۰۰۱$) و پیش آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) تفاوت وجود دارد؛ میانگین در پیش آزمون، پس آزمون و پیگیری به ترتیب برابر است با $۸۰۶/۲۸۲$ ، $۷۲۵/۰۴۱$ ، $۷۳۲/۷۱۴$. همچنین در گروه کاتدی، در هر دو شرایط غیرخستگی ($F=۸۶/۷۸۵$ ، $sig=۰/۰۰۰۱$ ، $\eta^2=۰/۴۰۲$) و خستگی ($F=۴۲/۸۷۰$ ، $sig=۰/۰۰۰۱$)، $\eta^2=۰/۲۴۹$ ، اثر آزمون بر RT1 معنادار شد. آزمون‌های پیگردی نشان داد که در شرایط غیرخستگی بین پیش آزمون با پس آزمون ($P=۰/۰۰۰۱$)، پیش آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) و پس آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) تفاوت وجود دارد؛ میانگین در پیش آزمون، پس آزمون و پیگیری به ترتیب برابر است با $۸۸۳/۶۸۳$ ، $۷۹۷/۷۹۲$ ، $۷۵۵/۶۵۵$. همچنین در شرایط خستگی بین پیش آزمون با پس آزمون ($P=۰/۰۰۰۱$)، پیش آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) و پس آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) تفاوت وجود دارد؛ میانگین RT1 در شرایط خستگی به ترتیب برابر است با $۸۷۲/۱۳۰$ ، $۷۹۸/۳۱۳$ ، $۷۸۰/۷۶۸$.

در نهایت در گروه شم نیز، در شرایط غیرخستگی ($F=۲۷/۵۵۰$ ، $sig=۰/۰۰۰۱$ ، $\eta^2=۰/۱۷۶$) و همچنین در شرایط خستگی ($F=۳۷/۷۹۲$ ، $sig=۰/۰۰۰۱$)، $\eta^2=۰/۲۲۷$ ، اثر آزمون بر RT1 معنادار شد. آزمون‌های پیگردی بنفرونی نشان داد که در شرایط غیرخستگی بین پیش آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) و پس آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) تفاوت وجود دارد؛ ولی بین پس آزمون با پیش آزمون تفاوت معنادار وجود نداشت ($P=۰/۰۶۳$). میانگین RT1 در پیش آزمون، پس آزمون و پیگیری به ترتیب برابر بود با $۸۱۲/۶۲۰$ ، $۷۸۷/۷۷۸$ ، $۷۳۴/۹۳۸$. در شرایط خستگی نیز بین پیش آزمون با پس آزمون ($P=۰/۰۰۰۱$)، پیش آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) و پس آزمون با پیگیری ($P=۰/۰۰۰۱$) تفاوت وجود داشت؛ میانگین RT1 در شرایط خستگی در پیش آزمون، پس آزمون و پیگیری به ترتیب برابر است با $۸۵۰/۰۶۱$ ، $۷۶۴/۰۱۱$ ، $۷۶۲/۲۲۱$.

یافته‌ها نشان داد که در گروه tDCS آندی در متغیر RT1 بین شرایط خستگی با غیرخستگی در پیش آزمون و پس آزمون تفاوت معناداری وجود دارد. همچنین مقایسه میانگین‌ها در این دو آزمون نشان می‌دهد که در پیش آزمون میانگین در شرایط خستگی نسبت به شرایط غیرخستگی افزایش یافته است؛ این در حالی است که در پس آزمون بعد از ایجاد خستگی ذهنی میانگین RT1 تا حدی کاهش نیز داشته است. در گروه tDCS کاتدی RT1 بین شرایط خستگی با غیرخستگی تنها در پیگیری تفاوت معناداری وجود دارد. همچنین مقایسه

میانگین‌ها نشان می‌دهد که در این آزمون میانگین RT1 در شرایط خستگی نسبت به شرایط غیرخستگی افزایش داشته است؛ کمترین مقدار میانگین RT1 مربوط به شرایط غیرخستگی در پس‌آزمون و بیشترین مربوط به شرایط غیرخستگی در پیش‌آزمون بود. در گروه ساختگی در هر سه آزمون، بین شرایط خستگی با غیرخستگی RT1 تفاوت معناداری وجود دارد. در پیش‌آزمون و پیگیری میانگین RT1 در شرایط خستگی نسبت به شرایط غیرخستگی افزایش یافته است (شکل ۲).

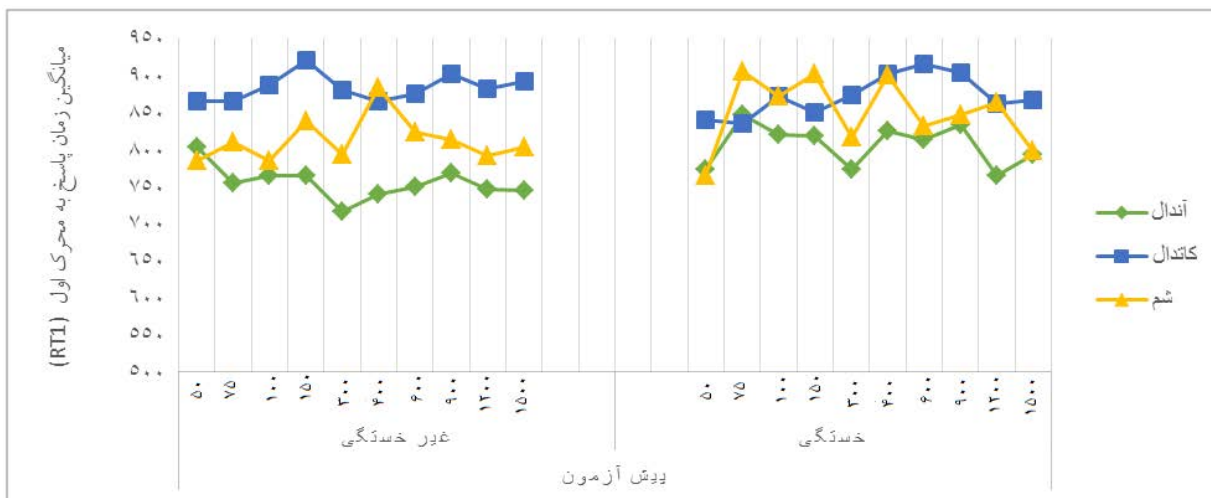


شکل ۲. نمودار مقایسه تأثیر پیش‌آزمون، پس‌آزمون و پیگیری بر زمان پاسخ به محرک اول در دو شرایط خستگی و غیر خستگی

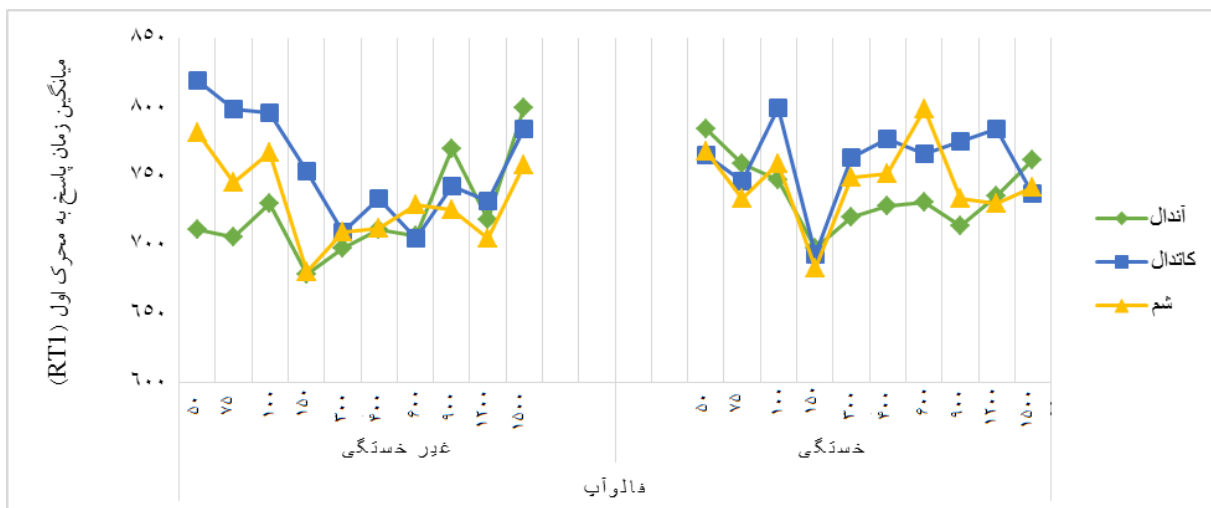
یافته‌های مربوط به آزمون آنوای یکراهه نشان داد که در پیش‌آزمون در هر دو شرایط غیرخستگی و خستگی در RT1 بین سه گروه تفاوت وجود داشت. آزمون‌های پیگردی بنفرونی نشان می‌دهد که در پیش‌آزمون، در شرایط غیرخستگی بین گروه تحریک آنودال با گروه تحریک کاتدال و شم، همچنین بین گروه تحریک کاتدال با گروه شم تفاوت وجود دارد (در هر سه حالت $P=0/0001$). در شرایط خستگی نیز بین گروه تحریک آنودال با گروه تحریک کاتدال و شم تفاوت وجود دارد (به ترتیب $P=0/001$ و $P=0/030$).

در پس‌آزمون نیز در هر دو شرایط خستگی و غیرخستگی، در RT1 بین سه گروه تفاوت معناداری وجود داشت. آزمون‌های پیگردی بنفرونی نشان داد که در شرایط غیرخستگی بین گروه تحریک آنودال با گروه تحریک کاتدال و شم تفاوت وجود دارد (به ترتیب $P=0/0002$ و $P=0/017$). در شرایط خستگی نیز بین گروه تحریک آنودال با گروه تحریک کاتدال و شم، همچنین بین گروه تحریک کاتدال با گروه شم نیز تفاوت وجود دارد (به ترتیب $P=0/0001$ ، $P=0/006$ و $P=0/019$).

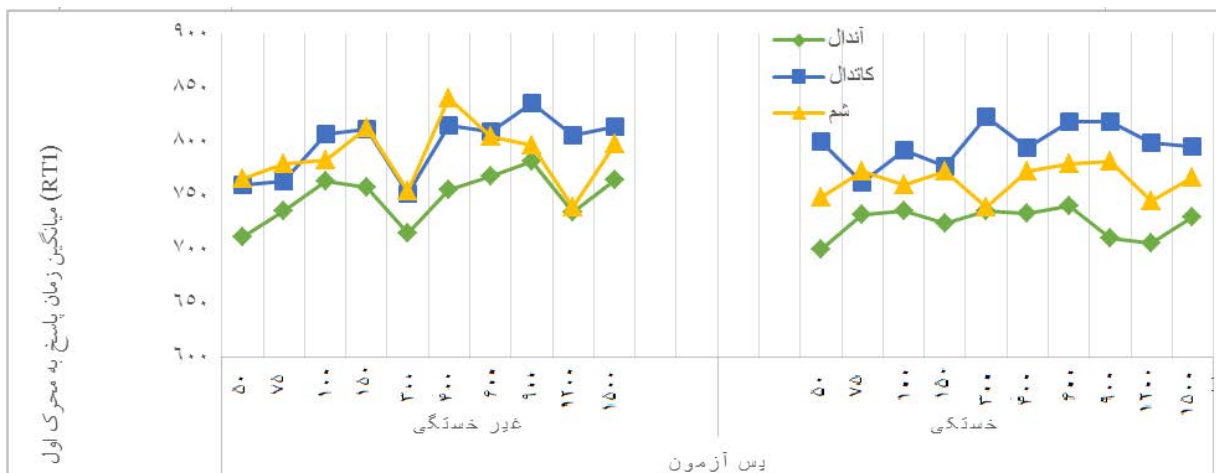
در نهایت در پیگیری در شرایط خستگی در RT1 بین سه گروه تفاوت معناداری وجود داشت. آزمون‌های پیگردی بنفرونی نشان داد که در شرایط خستگی تنها بین گروه تحریک آنودال با گروه تحریک کاتدال تفاوت وجود دارد ($P=0/001$) (نمودار ۴). با وجود این اثر خستگی در SOAs معنادار شد ($F=2/383$ ، $sig=0/027$ ، $\eta^2=0/062$). همچنین صرف‌نظر از آزمون، هم در شرایط غیرخستگی و هم در شرایط خستگی اثر SOAs بر زمان پاسخ به محرک اول معنادار شد. بدین معنا که در هر دو شرایط خستگی و غیرخستگی، در RT1 در فواصل بین محرکی مختلف تفاوت وجود دارد. آزمون پیگردی بنفرونی نشان داد در شرایط غیرخستگی، در فاصله بین محرکی ۵۰ با فواصل ۱۵۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ و همچنین در فاصله بین محرکی ۷۵ با فواصل بین محرکی ۱۵۰، ۴۰۰ و ۹۰۰ و نیز در فاصله بین محرکی ۳۰۰ با فواصل بین محرکی ۴۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ و همچنین بین فواصل ۹۰۰ با ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ و ۱۰۰ با ۴۰۰ نیز تفاوت معناداری وجود داشت ($P \leq 0/005$). علاوه بر این در شرایط خستگی نیز در فاصله بین محرکی ۵۰ با فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ تفاوت معناداری وجود داشت ($P \leq 0/005$).



شکل ۳. تغییرات زمان پاسخ به محرک اول در SOAs مختلف در شرایط خستگی و غیرخستگی در پیش‌آزمون هر سه گروه



شکل ۴. نمودار تغییرات زمان پاسخ به محرک اول در SOAs مختلف در شرایط خستگی و غیرخستگی در پس‌آزمون هر سه گروه



شکل ۵. نمودار تغییرات زمان پاسخ به محرک اول در SOAs مختلف در شرایط خستگی و غیرخستگی در پیگیری هر سه گروه

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر در پی یافتن پاسخ این پرسش بودیم که آیا تحریک جریان مستقیم فراججمه‌ای مغز، می‌تواند در کاهش زمان پاسخ به محرک اول (RT1) در شرایط تکلیف دوگانه و در نتیجه سازگاری عقب‌گرد به‌ویژه در شرایط خستگی ذهنی، مؤثر باشد؛ بر این اساس، RT1 در دو شرایط غیرخستگی و خستگی ذهنی و در فواصل بین محرکی مختلف ارزیابی شد. در RT1 طی مراحل پیش‌آزمون تا پس‌آزمون و سپس فالوآپ بهبود حاصل شد. اگرچه در گروه کاتدی نسبت به دو گروه دیگر، پیشرفت اندک بیشتری حاصل شد؛ ولی در مجموع بین گروه‌های تحریک و شم تفاوت معناداری مشاهده نشد. بنابراین پیشرفت در پس‌آزمون و فالوآپ را نمی‌توان مستقیماً به اثر تحریک نسبت داد. اثر اندک tDCS برای تکلیف زمان واکنش ساده (استگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۱؛ زمانی و دوستان، ۲۰۱۸) و انتخابی (ریبئی پور و همکاران، ۲۰۱۹؛ سویلا سانچز^۲ و همکاران، ۲۰۲۲) گزارش شده است. تأثیر tDCS بر روی یک تکلیف انتخابی و ساده، اغلب می‌تواند در اثر خستگی یا به دلیل بی‌توجهی، تمرکز و در نهایت اثر سقف پنهان شود (کو^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج پژوهش سیدل و راکرت^۴ (۲۰۱۹) هیچ اثر گروهی یا ورزشی خاص ناشی از تحریک (آنلاین و آفلاین) بر زمان واکنش را نه برای اندام‌های تحتانی و نه برای اندام فوقانی نشان نداد. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که احتمالاً نه ورزشکاران و نه غیرورزشکاران از دوره کوتاهی از تحریک، در تکلیف حرکتی مرتبط با سرعت، بهره‌مند نمی‌شوند. این نتایج با یافته‌های ما همخوان است. همچنین همسو با نتایج ما، پژوهش ریبئی پور و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد که یک جلسه tDCS آندی هیچ تأثیر واضحی فراتر از تحریک ساختگی بر مهارت حرکتی / شناختی و زمان پاسخ ندارد. آنها این‌گونه تفسیر کردند که تکلیف چالش‌برانگیزتر، برای تشخیص تأثیرات تحریک جریان مستقیم فراججمه‌ای مناسب‌تر باشند.

ما در مطالعه خود، سعی در برطرف کردن محدودیت‌های مطالعات پیشین داشتیم، بر این اساس از تکلیف دوگانه زمان واکنش سه‌انتخابی به‌عنوان یک تکلیف پیچیده‌تر نسبت به تکلیف زمان واکنش ساده و سریالی و یا زمان واکنش انتخابی در شرایط تکلیف منفرد، استفاده کردیم. از آنجا که بیشتر تحقیقاتی که از tDCS برای تقویت یا مختل کردن رفتار استفاده می‌کنند، به‌طور معمول در یک جلسه اجرا می‌شوند (فیلمر و همکاران، ۲۰۱۳؛ ریبئی پور و همکاران، ۲۰۱۹) و با توجه به اینکه الگوهای چندجلسه‌ای با پس‌آزمون تأخیری ممکن است از طریق تقویت یکپارچگی بین جلسات و بهره‌گیری از تأثیرات جمعی و سازوکارهای تثبیت در پی جلسات آفلاین، به نتایج بهتر منجر شوند (بری‌هیل و مارتین^۵، ۲۰۱۸)، از جلسات متوالی tDCS به‌جای یک جلسه تحریک و از پس‌آزمون تأخیری با فاصله یک‌روزه از آخرین جلسه تحریک استفاده شد. همچنین از قشر پیش‌پیشانی جانبی (PFC) که نقش مهمی در انتخاب پاسخ و پردازش اجرایی در تکلیف دوگانه ایفا می‌کند (فیلمر و همکاران، ۲۰۱۳؛ ارهارت و همکاران، ۲۰۲۱)، برای ناحیه تحریک استفاده شد.

اخیراً پژوهش کیمورا^۶ و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند هیچ حالت تنظیمی از tDCS (محل تحریک، قطبیت و زمان مورد بررسی در این پژوهش) به‌طور خاص موجب بهبود عملکرد دو تکلیف یا کاهش تداخل تکلیف دوگانه نمی‌شود. نتایج این تحقیق با یافته‌های ما مطابقت دارد. با این حال، نتایج پژوهش ارهارت و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که ۲۰ دقیقه تحریک آندی ۱ میلی‌آمپر (الکتروود آند بر روی dLPFC چپ و الکتروود کاتد بر روی ناحیه فوق‌حدقه‌ای سمت راست)، بهبود چشمگیری را در زمان واکنش تکلیف منفرد و زمان پاسخ و دقت تکلیف دوگانه، نسبت به تحریک ساختگی نشان داد؛ اگرچه تحقیق ارهارت و همکاران (۲۰۲۱) شامل شرایط کنترل فعال نیست، ولی تحقیقات قبلی از این گروه که با پروتکل مشابه طراحی شده‌اند و شامل قطبیت تحریک کنترل (تحریک کاتدی) بوده‌اند (فیلمر و همکاران، ۲۰۱۷)، هیچ تأثیری از تحریک در این شرایط نیافته‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد تنها تحریک آندی زمان پاسخ و عملکرد تصمیم‌گیری را بهبود می‌بخشد. همچنین از آنجا که در پژوهش ذکرشده از همین گروه، چندین جلسه تحریک ارائه‌شده در PFC سمت چپ بدون تمرین همزمان، هیچ اثری از افزایش عملکرد نشان نداد، دور از ذهن به‌نظر می‌آید که دستاوردهای عملکردی نشان داده‌شده توسط شرکت‌کنندگان به دلیل ترکیب tDCS و تمرین نبوده و تنها در اثر تحریک باشد (فیلمر و همکاران، ۲۰۱۷).

1. Stagg

3. Kuo

5. Berryhill & Martin

2. Sevilla-Sanchez

4. Seidel & Ragert

6. Kimura

از آنجا که نتایج ما حاکی از کاهش عمومی زمان پاسخ در روند پژوهش است، ممکن است شرکت کنندگان از راهبرد سرعت-دقت^۱ استفاده کرده باشند که به موجب آن تمرکز بیشتری را معطوف زمان پاسخ به قیمت کاهش دقت کرده باشند. با توجه به اینکه در پژوهش ما تنها کوشش‌های صحیح ثبت می‌شد، این امکان وجود دارد که پاسخ‌های سریع‌تر به قیمت کاهش دقت (تعداد خطای بیشتر در پاسخ‌دهی) به دست آمده باشد. همچنین ممکن است آشنایی بیشتر شرکت کنندگان با پژوهشگر، محیط، تکلیف و همچنین تمرین در پی تکرار آزمون‌ها در اثر تعداد بالای SOAs (ده فاصله بین محرکی و اجرای دو کوشش در هر فاصله) موجب بهبود سرعت پاسخ‌دهی در پس‌آزمون و فالوآپ شده باشد؛ طبیعتاً تأثیر تجمعی این عوامل در گروه شم نیز همچون دو گروه تحریک فعال، بهبود زمان پاسخ را در پی داشته است. این عوامل جانبی ممکن است به پنهان شدن تأثیرات اندک tDCS و در نتیجه عدم تفاوت بین گروه‌ها منجر شده باشد.

در پژوهشی که اخیراً انجام شد، محققان از یک روتین ۱۵ دقیقه‌ای استروپ به عنوان ابزاری جهت ایجاد خستگی ذهنی برای بررسی تأثیرات آن بر زمان واکنش حرکتی استفاده کردند. نتایج این تحقیق شواهد تجربی ارائه می‌کند که خستگی ذهنی، عملکرد را با افزایش زمان پاسخ حرکتی به یک محرک بینایی محدود می‌کند (میگلاشیو و همکاران، ۲۰۲۲). در مقابل در تحقیق حاضر، خستگی ذهنی القاشده از طریق ۳۰ دقیقه کار با نرم‌افزار تکلیف استروپ تنها در فواصل بین محرکی پایین (۷۵ و ۳۰۰ میلی‌ثانیه) تأثیرگذار بوده است و در این فواصل، RT1 در شرایط خستگی ذهنی نسبت به شرایط غیرخستگی طولانی‌تر بود. بر خلاف انتظار ما، در سایر SOAs، شرایط خستگی ذهنی چندان تأثیرگذار نبود و اندک تفاوت موجود بین شرایط غیرخستگی و خستگی ذهنی از لحاظ آماری معنادار نشد. حدس ما این است که این تفاوت در نتایج پژوهش ما و تحقیقات پیشین ممکن است به دلیل محتوای تکلیف شناختی تشکیل شده از تکلیف دوگانه باشد، چراکه تکلیف استروپ به عنوان نوع متفاوتی از موقعیت سازگاری محرک-پاسخ (مگیل و اندرسون، ۲۰۱۰) که با عملیات انتخاب پاسخ مرتبط است (بندر و همکاران، ۲۰۱۶)، به دلیل مشابهت با تکلیف زمان واکنش دیداری در پژوهش حاضر، ممکن است نوعی تمرین برای تکلیف اصلی محسوب می‌شود و علی‌رغم ایجاد خستگی ذهنی، با توجه به اثر مثبتی که در حفظ آمایه فعالیت^۵ می‌گذارد (ناکسون و اشمیت، ۱۹۷۱)، بر میزان خستگی غلبه کرده باشد.

در هر دو شرایط خستگی و غیرخستگی طی آزمون‌ها پیشرفت رخ داد. در مرحله پیش‌آزمون و فالوآپ، RT1 در شرایط خستگی نسبت به شرایط غیرخستگی افزایش یافت؛ ولی در مرحله پس‌آزمون این مقدار پس از ایجاد خستگی ذهنی، کاهش یافت. این موضوع شاید به این دلیل باشد که tDCS تأثیرات خستگی را در پس‌آزمون کاهش داد، ولی تأثیرات آن پایدار نبوده و تا فالوآپ باقی نمانده است. اما از آنجا که در این زمینه بین گروه‌ها تفاوتی یافت نشد، پس نمی‌توان این حالت را نیز به تأثیرات تحریک نسبت داد. نیکوحراف صالحی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که تحریک آندی قشر پیش‌پیشانی جانبی پشتی سمت چپ، تأثیرات نامطلوب خستگی ذهنی را در عملکرد شنای ۵۰ متر کاهش می‌دهد، در حالی که تحریک کاتدی تأثیر معناداری نداشت. اختلاف بین این نتیجه و نتایج پژوهش حاضر ممکن است به دلیل اختلاف بین شدت جریان مورد استفاده و یا ابعاد الکترودها در دو پژوهش (استفاده از شدت جریان ۲ میلی‌آمپر و الکترودهایی با ابعاد ۳۵ سانتی‌متر مربع در پژوهش ذکرشده) باشد.

بین SOAs مختلف تفاوت معنادار بود. به نظر می‌رسد در فواصل بین محرکی پایین‌تر، RT1 کاهش می‌یابد. با فرض اینکه بر اساس مدل تنگراه، پردازش مرکزی ابتدا به تکلیف ۱ اختصاص داده می‌شود، تکلیف اول باید بدون تداخل تکلیف دوگانه و بدون توجه به فواصل بین محرکی انجام شود (میلر، ۲۰۰۶)؛ ولی از آنجا که در تحقیق حاضر که در آن روابط سازگاری بین پاسخ‌ها در هر دو تکلیف، نه تنها بر پردازش تکلیف دوم، بلکه بر تکلیف اول نیز تأثیر گذاشته است، ممکن است پدیده تداخل عقب‌گرد رخ داده باشد. هومل (۱۹۹۸) به این نتیجه رسید که «مشاهده تأثیرات سازگاری عقب‌گرد [از تکلیف ۲ تا تکلیف ۱] با رویکرد استاندارد تنگراه برای عملکرد تکلیف دوگانه سازگار نیست، از این نظر که نگاهت محرک دوم به پاسخ متناظر آن قطعاً تا انتخاب پاسخ اول به تأخیر نمی‌افتد»؛ بلکه ممکن است گاهی

1. Speed-accuracy

2. Migliaccio

3. Magill

4. Bender

5. Activity-Set

6. Nacson

7. Miller

این پردازش به صورت موازی صورت گیرد و الزامی به انتظار تکلیف ۲ برای پایان تکلیف ۱ نیست، در نتیجه امکان تأثیرگذاری تکلیف ۲ بر پردازش تکلیف ۱ وجود دارد. به طور کلی، این پدیده نشان دهنده وابستگی زمان پاسخ محرک اول به پاسخی است که برای محرک دوم مورد نیاز است. اگرچه با توجه به اینکه در تحقیق ما با کاهش فاصله بین محرکی (SOAs)، زمان پاسخ به محرک اول نیز کاهش یافته است، می‌توان بهبود سرعت پاسخ‌دهی به محرک اول را ناشی از ویژگی‌های برانگیختگی خودکار محرک دوم و نه هرگونه پردازش مرتبط با تکلیف در محرک دوم در نظر گرفت (هاکلی و وال‌انکلان، ۱۹۹۹). بر اساس مدل پوزنر^۲، شواهد حسی در مورد شناسایی محرک واکنش بدون در نظر گرفتن سطح برانگیختگی با سرعت ثابتی ایجاد می‌شود. بنابراین، افزایش برانگیختگی می‌تواند موجب پاسخ‌دهی سریع‌تر مکانیزم مرکزی نامشخصی بر اساس شواهد حسی کمتر شود و در نتیجه به واکنش‌های ارادی یا فشردن سریع کلیدها، به قیمت افزایش خطاها منجر می‌شوند (هاکلی و وال‌انکلان، ۱۹۹۹). علاوه بر مواردی که ذکر شد، گاهی افراد در پاسخ‌دهی به محرک‌ها در موقعیت تکلیف دوگانه درگیر استراتژی جمع‌بندی پاسخ‌ها^۳ می‌شوند؛ بدین معنا که فرد پاسخ تکلیف اول را انتخاب می‌کند، اما آن را تا زمان آماده‌سازی پاسخ تکلیف دوم در حافظه نگه می‌دارد. جمع‌بندی پاسخ‌ها به عنوان یک جنبه رفتاری همیشه حاضر در الگوی دوره بی‌پاسخی روان‌شناختی، به ساده‌تر شدن کنترل حرکتی منجر می‌شود. در مدل برگر^۴ (۱۹۶۳) که از پدیده جمع‌بندی پاسخ‌ها در دوره بی‌پاسخی روان‌شناختی حمایت می‌کند، برخلاف مدل تنگ‌راه، با افزایش فاصله بین ارائه دو محرک، افزایشی را در زمان پاسخ به محرک اول پیش‌بینی می‌کند (اولریخ^۵ و میلر، ۲۰۰۸). نتایج ما از این پدیده حمایت می‌کند، چراکه در SOA بالاتر، RT1 افزایش می‌یابد. در تحقیقی، از سه نوع تکلیف ساده، افتراقی و انتخابی استفاده کردند، نتایج نشان داد که در هر سه گروه آزمایشی، با افزایش فاصله بین ارائه دو محرک، RT1 افزایش و RT2 کاهش می‌یابد. این تغییرات در گروه زمان واکنش انتخابی با شیب بیشتری نسبت به دو گروه دیگر مشاهده شد (کاویانی و همکاران، ۲۰۱۷). این یافته‌ها با نتایج پژوهش ما سازگار است. اگرچه در این پژوهش تغییرات RT1 در گروه زمان واکنش ساده با اثر جمع‌بندی پاسخ‌ها همراستا بود، اما این تغییرات در گروه زمان واکنش انتخابی بیشتر ناشی از محدودیت ظرفیت پردازش و سازگاری بیشتری با الگوی تأثیر متقابل عقب‌گرد داشت. درحالی‌که در پژوهش ما که از تکلیف زمان واکنش انتخابی در موقعیت تکلیف دوگانه استفاده شد، به نظر می‌رسد نتایج بیشتر از الگوی اثر جمع‌بندی پاسخ‌ها (مدل برگر) حمایت می‌کند.

همچنین نتایج پژوهش ما نشان می‌دهد که کمترین RT1 در SOA زمان ۵۰ و سپس ۳۰۰ میلی‌ثانیه رخ داده است. در این زمینه تامبو و جولیکور (۲۰۰۲) در پژوهش خود پارامتر نسبت اشتراک‌گذاری را به عنوان عددی در بازه بسته [۰، ۱] تعریف نمودند که در شرایطی که مراحل پردازش مرکزی دو تکلیف همپوشانی داشته باشند، بیانگر نسبت ظرفیت تخصیص یافته به تکلیف ۱ است. با توجه به اینکه مدل‌های تنگ‌راه انتخاب پاسخ و مدل اشتراک‌گذاری ظرفیت، پیش‌بینی‌های یکسانی را برای RT2 ارائه می‌دهند، آنها نتیجه گرفتند که مدل تنگ‌راه مرکزی یک مورد خاص از مدل اشتراک‌گذاری ظرفیت مرکزی است که پارامتر نسبت اشتراک‌گذاری در آن روی عدد ۱ تنظیم شده است. اگر SP کمتر از ۱ باشد، RT1 باید با کاهش SOA افزایش یابد. در مدل اشتراک‌گذاری ظرفیت، افزایش زمان مرحله شناسایی محرک تکلیف دوم روی زمان پاسخ به محرک اول در SOAs بسیار کوتاه تأثیر معکوس خواهد داشت و موجب کاهش این مقدار خواهد شد، اگرچه در SOAs طولانی تأثیری بر RT1 ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به ۳ انتخابی بودن تکلیف زمان واکنش در پژوهش ما و به تبع آن طولانی بودن مرحله شناسایی محرک در تکلیف دوم که ناشی از پیچیده بودن محرک- پاسخ مورد نظر است، شاهد کوتاه‌تر شدن RT1 در فاصله ۵۰ میلی‌ثانیه بوده‌ایم. نکته جالب توجه این است که در این فاصله در شرایط خستگی هیچ پیشرفتی از پیش‌آزمون تا پس‌آزمون و فالوآپ صورت نگرفت. به نظر می‌رسد به واسطه دشوار بودن شرایط پاسخ‌دهی در این فاصله شاهد یک اثر کف بوده‌ایم و یا اینکه اثر نزدیکی بیش‌ازحد به محرک دوم ممکن است بیش از اثر تمرین انجام‌شده در پی تکرار آزمون‌ها باشد. در فاصله ۳۰۰ میلی‌ثانیه نیز به نظر می‌رسد فرد مرحله انتخاب پاسخ محرک اول را پشت سر گذاشته و تنها مرحله اجرای پاسخ که از نظر پردازشی مرحله ساده‌تری است را پیش‌رو دارد؛ بنابراین پردازش محرک دوم و به‌ویژه مرحله شناسایی محرک را به صورت موازی با اجرای پاسخ محرک

1. Hackley & Valle-Inclán

2. Posner's model

3. Response grouping

4. Borger's mode

5. Ulrich

6. Sharing proportion (SP)

اول انجام می‌دهد. در فواصل ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰، به مرور RT1 افزایش یافته است. با در نظر گرفتن این موضوع که در این فواصل درحالی که فرد درگیر مرحله شناسایی و یا انتخاب پاسخ در پردازش تکلیف اول است، احتمالاً مرحله شناسایی محرک- پاسخ دوم نیز آغاز می‌شود و هردو این شرایط به درگیر شدن فرد در فرایندهای عصبی منجر می‌شود و می‌تواند افزایش زمان پاسخ به محرک اول را در پی داشته باشد. اما در فواصل بین محرکی ۴۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌ثانیه اثر انگیزشی محرک دوم بر محرک اول کاهش و در نتیجه RT1 نیز نسبتاً افزایش می‌یابد. با وجود این در فواصل بین محرکی مختلف، بین گروه‌ها تفاوت معناداری مشاهده نشد؛ شاید انتخابی بودن ماهیت زمان واکنش و پیچیدگی تکلیف و غالب بودن اثر SOAs نسبت به اثر تحریک، تفاوت بین گروه‌ها را به حداقل رسانده است.

در اثرگذاری تحریک آندی و کاتدی بر RT1، در شرایط خستگی و غیرخستگی تفاوت وجود داشت. به طوری که نتایج حاکی از آن است که تحریک آندی در شرایط غیرخستگی، اثر چندانی بر RT1 نداشت، این در حالی است که تحریک کاتدی در هر دو شرایط خستگی ذهنی و غیرخستگی، بهبود زمان پاسخ به محرک اول را نشان داد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط خستگی، تحریک آندی ۷۰ میلی‌ثانیه و تحریک کاتدی بیش از ۹۰ میلی‌ثانیه کاهش را در پی داشت. این تفاوت‌ها در شرایط غیرخستگی بیشتر بود، درحالی که تحریک آندی پیشرفت معناداری نشان نداد، تحریک کاتدی، بیش از ۱۳۰ میلی‌ثانیه پیشرفت و کاهش RT1 را به دنبال داشت. برخی از پژوهش‌ها یک اثر تسهیل‌کننده مرتبط با تحریک نواحی زیر کاتد را گزارش می‌کنند (باتسیکادزه و همکاران، ۲۰۱۳). یک احتمال این است که مهار، نوزب عصبی را سرکوب می‌کند و نسبت سیگنال به نویز را در قشر تحریک‌شده کاهش می‌دهد (مینیوسی و همکاران، ۲۰۱۳). به طور کلی مکانیزم دقیق زیربنای تسهیل شناختی به دنبال پروتکل تحریک مهار نامشخص است. فیلمر و همکارانش با استفاده از مقایسه زمان‌های پاسخ برای تکالیف منفرد و دوگانه، پیش، بلافاصله و ۲۰ دقیقه پس از تحریک آندی، کاتدی و تحریک ساختگی به این نتیجه رسیدند که تحریک کاتدی بر روی ناحیه pLPFC سمت چپ به طور انتخابی عملکرد را در کارآزمایی‌های تکلیف دوگانه بلافاصله پس از تحریک، نسبت به تحریک آندی و ساختگی، بهبود بخشید (فیلمر و همکاران، ۲۰۱۳). شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد تحریک کاتدی با چگالی جریان بالا به افزایش تحریک‌پذیری قشر به جای مهار منجر می‌شود. محققان دریافتند که تحریک کاتدی اعمال شده با چگالی جریان ۰/۰۵۷ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع (۲۰ دقیقه) افزایش تحریک‌پذیری قشر مغز را در پی داشته است؛ درحالی که تحریک کاتدی اعمال شده با چگالی جریان ۰/۰۲۹ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع (۲۰ دقیقه) به کاهش پیش‌بینی شده در تحریک‌پذیری منجر می‌شود. مطالعه آنها نشان داد که جهت‌های پلاستیسیته وابسته به قطبیت (آند، تحریک و کاتد، مهار) در هنگام استفاده از شدت‌های تحریک بالاتر و یا مدت زمان تحریک طولانی‌تر دیگر تضمین نمی‌شوند (باتسیکادزه و همکاران، ۲۰۱۳). در تحقیق حاضر تحریک ۱ میلی‌آمپری به مدت ۲۰ دقیقه اعمال شد. با این حال، اندازه کوچک الکترودهای فعال (۱۶ سانتی‌متر مربع) به چگالی جریان ۰/۰۶۲۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع منجر می‌شود که بالاتر از آنچه توسط باتسیکادزه و همکاران (۲۰۱۳) گزارش شده است، است؛ از این رو ممکن است چگالی جریان بالا به افزایش تحریک‌پذیری در تحریک کاتدی منجر شده باشد. با وجود این، این تفاوت‌ها را نمی‌توان کاملاً به اثر تحریک نسبت داد، چراکه در گروه ساختگی نیز شاهد پیشرفت‌هایی بوده‌ایم، اگرچه اندازه اثر تحریک ساختگی (۰/۱۷۶) به نسبت اندازه اثر تحریک کاتدی (۰/۴۰۲) بسیار پایین‌تر بود. از دلایل احتمالی پیشرفت در گروه کاتدی می‌توان به بالاتر بودن زمان پاسخ به محرک اول در مرحله پیش‌آزمون، نسبت به سایر گروه‌ها و احتمال بروز پدیده آماری بازگشت به میانگین^۳ اشاره کرد. این تفاوت به دلیل انتصاب تصادفی شرکت‌کنندگان و عدم همگن‌سازی رخ داده است که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، این مورد کنترل شود.

تقدیر و تشکر

از همه شرکت‌کنندگان در پژوهش تقدیر و تشکر می‌کنیم.

1. Batsikadze

2. Miniussi

3. Regression to the Mean (RTM)

References

- Batsikadze, G., Moliadze, V., Paulus, W., Kuo, M. F., & Nitsche, M. (2013). Partially non-linear stimulation intensity-dependent effects of direct current stimulation on motor cortex excitability in humans. *The Journal of physiology*, 591(7), 1987-2000. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.249730>
- Baurès, R., DeLucia, P. R., Olson, M., & Oberfeld, D. (2017). Asymmetric interference in concurrent time-to-contact estimation: Cousin or twin of the psychological refractory period effect? *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79(2), 698-711. <https://doi.org/10.3758/s13414-016-1244-y>
- Bender, A. D., Filmer, H. L., Garner, K. G., Naughtin, C. K., & Dux, P. E. (2016). On the relationship between response selection and response inhibition: An individual differences approach. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78, 2420-2432. <https://doi.org/10.3758/s13414-016-1158-8>
- Berryhill, M. E., & Martin, D. (2018). Cognitive effects of transcranial direct current stimulation in healthy and clinical populations: an overview. *The journal of ECT*, 34(3), e25-e35. <https://doi.org/n10.1097/YCT.0000000000000534>
- Berryhill, M. E., Peterson, D. J., Jones, K. T., & Stephens, J. A. (2014). Hits and misses: leveraging tDCS to advance cognitive research. *Frontiers in psychology*, 5, 800. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00800>
- Devanathan, D., & Madhavan, S. (2016). Effects of anodal tDCS of the lower limb M1 on ankle reaction time in young adults. *Experimental brain research*, 234(2), 377-385. <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4470-y>
- Diamond, A. (2006). Bootstrapping conceptual deduction using physical connection: Rethinking frontal cortex. *Trends in cognitive sciences*, 10(5), 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.03.003>
- Eder, A. B., Pfister, R., Dignath, D., & Hommel, B. (2017). Anticipatory affect during action preparation: Evidence from backward compatibility in dual-task performance. *Cognition and Emotion*, 31(6), 1211-1224. <https://doi.org/10.1080/02699931.2016.1208151>
- Ehrhardt, S. E., Filmer, H. L., Wards, Y., Mattingley, J. B., & Dux, P. E. (2021). The influence of TDCS intensity on decision-making training and transfer outcomes. *Journal of Neurophysiology*, 125(2), 385-397. <https://doi.org/10.1152/jn.00423.2020>
- Filmer, H. L., Ehrhardt, S. E., Bollmann, S., Mattingley, J. B., & Dux, P. E. (2019). Accounting for individual differences in the response to tDCS with baseline levels of neurochemical excitability. *Cortex*, 115, 324-334. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.02.012>
- Filmer, H. L., Mattingley, J. B., & Dux, P. E. (2013a). Improved multitasking following prefrontal tDCS. *Cortex*, 49(10), 2845-2852. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.08.015>
- Filmer, H. L., Mattingley, J. B., Marois, R., & Dux, P. E. (2013b). Disrupting prefrontal cortex prevents performance gains from sensory-motor training. *Journal of Neuroscience*, 33(47), 18654-18660. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2019-13.2013>
- Filmer, H. L., Varghese, E., Hawkins, G. E., Mattingley, J. B., & Dux, P. E. (2017). Improvements in attention and decision-making following combined behavioral training and brain stimulation. *Cerebral cortex*, 27(7), 3675-3682. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw189>
- 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>

- [Hackley, S. A., & Valle-Inclán, F. \(1999\). Accessory stimulus effects on response selection: Does arousal speed decision making? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11\(3\), 321-329. https://doi.org/10.1162/089892999563427](https://doi.org/10.1162/089892999563427)
- [Henry, G., Dawson, B., Lay, B., & Young, W. \(2012\). Effects of a feint on reactive agility performance. *Journal of sports sciences*, 30\(8\), 787-795. https://doi.org/10.1080/02640414.2012.671527](https://doi.org/10.1080/02640414.2012.671527)
- [Hoffmann, M. A., Pieczykolan, A., Koch, I., & Huestegge, L. \(2020\). Two sources of task prioritization: The interplay of effector-based and task order-based capacity allocation in the PRP paradigm. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 82\(7\), 3402-3414. https://doi.org/10.3758/s13414-020-02071-6](https://doi.org/10.3758/s13414-020-02071-6)
- [Hommel, B. \(1998\). Automatic stimulus-response translation in dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24\(5\), 1368. https://doi.org/10.1037/0096-1523.24.5.1368](https://doi.org/10.1037/0096-1523.24.5.1368)
- [Kavyani M, Farsi A, Abdoli B. \(2017\). The backward crosstalk effect or response grouping in the psychological refractory period paradigm. *Feyz*, 21\(5\), 433-42. \(In Persian\)](#)
- [Kimura, T., Kaneko, F., & Nagamine, T. \(2021\). The Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on Dual-Task Interference Depend on the Dual-Task Content. *Frontiers in human neuroscience*, 15, 157. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.653713](https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.653713)
- [Kuo, M. F., Unger, M., Liebetanz, D., Lang, N., Tergau, F., Paulus, W., & Nitsche, M. A. \(2008\). Limited impact of homeostatic plasticity on motor learning in humans. *Neuropsychologia*, 46\(8\), 2122-2128. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.02.023](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.02.023)
- [Layton, C. \(1991\). How fast are the punches and kicks of traditional Shotokan karateka? *Traditional Karate*, 4, 29-31. https://doi.org/10.2466/pms.1993.76.3.1001](https://doi.org/10.2466/pms.1993.76.3.1001)
- [Le Mansec, Y., Dorel, S., Nordez, A., & Jubeau, M. \(2019\). Is reaction time altered by mental or physical exertion? *European journal of applied physiology*, 119\(6\), 1323-1335. https://doi.org/10.1007/s00421-019-04124-7](https://doi.org/10.1007/s00421-019-04124-7)
- [Machado, D. G. D. S., Unal, G., Andrade, S. M., Moreira, A., Altimari, L. R., Brunoni, A. R., ... & Okano, A. H. \(2019\). Effect of transcranial direct current stimulation on exercise performance: a systematic review and meta-analysis. *Brain stimulation*, 12\(3\), 593-605. https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.12.227](https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.12.227)
- [Magill, R., & Anderson, D. I. \(2010\). *Motor learning and control*. New York: McGraw-Hill Publishing.](#)
- [Mehrdadian, M., Saemi, E., Badicu, G., Doustan, M., & Yamaguchi, T. \(2023\). A Selected Balance Exercise Combined with Anodal tDCS Was Beneficial in Balance Performance but not in Working Memory in Healthy Older Adults. *International Journal of Motor Control and Learning*, 5\(2\), 1-9. https://doi.org/10.61186/ijmcl.5.2.1](https://doi.org/10.61186/ijmcl.5.2.1)
- [Migliaccio, G. M., Di Filippo, G., Russo, L., Orgiana, T., Ardigò, L. P., Casal, M. Z., ... & Padulo, J. \(2022\). Effects of mental fatigue on reaction time in sportsmen. *International journal of environmental research and public health*, 19\(21\), 14360. https://doi.org/10.3390/ijerph192114360](https://doi.org/10.3390/ijerph192114360)
- [Miller, J. \(2006\). Backward crosstalk effects in psychological refractory period paradigms: Effects of second-task response types on first-task response latencies. *Psychological Research*, 70\(6\), 484-493. https://doi.org/10.1007/s00426-005-0011-9](https://doi.org/10.1007/s00426-005-0011-9)
- [Miniussi, C., Harris, J. A., & Ruzzoli, M. \(2013\). Modelling non-invasive brain stimulation in cognitive neuroscience. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37\(8\), 1702-1712. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.014](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.014)

- Mohammadzadeh, S.; Farsi, A. R.; & Khosrowabadi, R. (2020). The Effect of Cognitive Fatigue on the Neural Efficacy of the Executive Control Network among Athletes: Dual Regulation System Model. *Sport Psychology Studies*, 8(30); Pp: 41-56. <https://doi.org/10.22089/spsyj.2019.7301.1778> (In Persian)
- Molero-Chamizo, A., Bailén, J. R. A., Béjar, T. G., López, M. G., Rodríguez, I. J., Lérída, C. G., ... & Rivera-Urbina, G. N. (2018). Poststimulation time interval-dependent effects of motor cortex anodal tDCS on reaction-time task performance. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 18(1), 167-175. <https://doi.org/10.3758/s13415-018-0561-0>
- Müller, T., & Apps, M. A. (2019). Motivational fatigue: A neurocognitive framework for the impact of effortful exertion on subsequent motivation. *Neuropsychologia*, 123, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.030>
- Nacson, J., & Schmidt, R. A. (1971). The activity-set hypothesis for warm-up decrement. *Journal of Motor Behavior*, 3(1), 1-15. <https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734887>
- Nikooaharf Salehi, E., Jaydari Fard, S., Jaberzadeh, S., & Zoghi, M. (2021). Transcranial Direct Current Stimulation Reduces the Negative Impact of Mental Fatigue on Swimming Performance. *Journal of Motor Behavior*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/00222895.2021.1962238>
- 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>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Pavelka, R., Třebický, V., Třebická Fialová, J., Zdobinský, A., Coufalová, K., Havlíček, J., & Tufano, J. J. (2020). Acute fatigue affects reaction times and reaction consistency in Mixed Martial Arts fighters. *PLoS one*, 15(1), e0227675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227675>
- Pieczkolan, A., & Huestegge, L. (2017). Cross-modal action complexity: action-and rule-related memory retrieval in dual-response control. *Frontiers in psychology*, 8, 529. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00529>
- Pieczkolan, A., & Huestegge, L. (2019). Action scheduling in multitasking: A multi-phase framework of response-order control. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 81(5), 1464-1487. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-01660-w>
- Rabipour, S., Vidjen, P. S., Remaud, A., Davidson, P. S., & Tremblay, F. (2019). Examining the interactions between expectations and tDCS effects on motor and cognitive performance. *Frontiers in Neuroscience*, 12, 999. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00999>
- Rau, P. L. P., & Zheng, J. (2020). Cross-modal psychological refractory period in vision, audition, and haptics. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 1-13. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-01978-4>
- Rothwell, J., Antal, A., Burke, D., Carlsen, A., Georgiev, D., Jahanshahi, M., Sternad, D., Valls-Solé, J., Ziemann, U. (2021). Central nervous system physiology. *Clinical neurophysiology*, 132 (12), 3043-3083. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2021.09.013>
- Schmidt, R. A., & Wrisberg, C. A. (2008). *Motor learning and performance: A situation-based learning approach*. Human kinetics.
- Schmidt, R.A., & T.D. Lee. (2005). *Motor control and learning: A behavioral emphasis* (4rd ed.). Human Kinetics.

- Seidel, O., & Ragert, P. (2019). Effects of transcranial direct current stimulation of primary motor cortex on reaction time and tapping performance: a comparison between athletes and non-athletes. *Frontiers in human neuroscience*, *13*, 103. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00103>
- Sevilla-Sanchez, M., Hortobágyi, T., Carballeira, E., Fogelson, N., & Fernandez-del-Olmo, M. (2022). A lack of timing-dependent effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on the performance of a choice reaction time task. *Neuroscience Letters*, *782*, 136691. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2022.136691>
- Shahid, A., Wilkinson, K., Marcu, S., & Shapiro, C. M. (2011). Visual analogue scale to evaluate fatigue severity (VAS-F). In *STOP, THAT and one hundred other sleep scales* (pp. 399-402). New York, NY: Springer New York.
- Stagg, C. J., Jayaram, G., Pastor, D., Kincses, Z. T., Matthews, P. M., & Johansen-Berg, H. (2011). Polarity and timing-dependent effects of transcranial direct current stimulation in explicit motor learning. *Neuropsychologia*, *49*(5), 800-804. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.009>
- Strobach, T., Schütz, A., & Schubert, T. (2015). On the importance of Task 1 and error performance measures in PRP dual-task studies. *Frontiers in psychology*, *6*, 403. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00403>
- Sun, H., Soh, K. G., Roslan, S., Wazir, M. R. W. N., & Soh, K. L. (2021). Does mental fatigue affect skilled performance in athletes? A systematic review. *PloS one*, *16*(10), e0258307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258307>. eCollection 2021
- 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>
- Tomblu, M., & Jolicœur, P. (2002). All-or-none bottleneck versus capacity sharing accounts of the psychological refractory period phenomenon. *Psychological research*, *66*(4), 274-286. <https://doi.org/10.1007/s00426-002-0101-x>
- Tomblu, M., & Jolicœur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*(1), 3. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.29.1.3>
- Tomblu, M., & Jolicœur, P. (2005). Testing the predictions of the central capacity sharing model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*(4), 790. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.4.790>
- Tremblay, S., Lepage, J. F., Latulipe-Loiselle, A., Fregni, F., Pascual-Leone, A., & Théoret, H. (2014). The uncertain outcome of prefrontal tDCS. *Brain stimulation*, *7*(6), 773-783. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2014.10.003>
- Ulrich, R., & Miller, J. (2008). Response grouping in the psychological refractory period (PRP) paradigm: Models and contamination effects. *Cognitive Psychology*, *57*(2), 75-121. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2007.06.004>
- Volle, E., Kinkingnéhun, S., Pochon, J. B., Mondon, K., Thiebaut de Schotten, M., Seassau, M., & Levy, R. (2008). The functional architecture of the left posterior and lateral prefrontal cortex in humans. *Cerebral Cortex*, *18*(10), 2460-2469. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn010>
- Weigelt, M., Guldénpenning, I., Steggemann-Weinrich, Y., Alaboud, M. A. A., & Kunde, W. (2017). Control over the processing of the opponent's gaze direction in basketball experts. *Psychonomic Bulletin & Review*, *24*(3), 828-834. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1140-4>
- Welford, A. T. (1952). The 'psychological refractory period' and the timing of high-speed performance—a review and a theory. *British Journal of Psychology. General Section*, *43*(1), 2-19.

[Zamani, G., & Doostan, M. R. \(2018\). The effect of Transcranial Direct Current Stimulation on Working Memory and Reactiontime in Athlete Girls. *Neuropsychology*, 3\(10\), 51-62.](#)