Research Paper

Effects of Online Transcranial Alternating Current Stimulation Over the Parietal Cortex and Supplementary Motor Area on Bimanual Coordination in Elderly Women

Asiyeh Dehghani[1], *Hamid Reza Taheri Torbati[1], Mehdi Sohrabi[1], Afkham Daneshfar[2], Mohammad Saber Sotoodeh[3]

1. Department of Motor Behavior, Faculty of Sports Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
2. Department of Motor Behavior, Faculty of Sport Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran.
3. School of Psychology, University of Sussex, Brighton, United Kingdom.

Use your device to scan and read the article online

Citation Dehghani A, Taheri Torbati HR, Sohrabi M, Daneshfar A, Sotoodeh MS. [Effects of Online Transcranial Alternating Current Stimulation Over the Parietal Cortex and Supplementary Motor Area on Bimanual Coordination in Elderly Women (Persian)]. Iranian Journal of Psychiatry and Clinical Psychology. 2023; 29(3):250-267. http://dx.doi.org/10.32598/ijpcp.29.3.4556.1

http://dx.doi.org/10.32598/ijpcp.29.3.4556.1

CC BY NC

Received: 30 Apr 2023
Accepted: 02 Sep 2023
Available Online: 01 Oct 2023

Keywords:
Electrical stimulation, Aging, Motor cortex, Motor skills

ABSTRACT

Objectives Considering the negative effects of aging on bimanual motor skills, attention has been drawn to various non-invasive brain stimulation methods for the improvement of these skills. This study aimed to investigate the effects of online transcranial alternating current stimulation (tACS) over the right posterior parietal cortex (P4) and supplementary motor area (SMA) on bimanual coordination in elderly women.

Methods This is a quasi-experimental study. The study population includes all healthy elderly women aged 60-75 years in Tehran, Iran, of whom 31 were selected using a convenience sampling method and were subjected to tACS over P4, tACS over SMA, and sham tACS along with performing the Purdue pegboard task (4 trials) in three sessions with a one-week interval. Data were analyzed byby 3(condition)*4(trials) ANOVA with repeated measures.

Results The results of ANOVA showed that only the main effect of trial was statistically significant ($P<0.001$); The main effect of condition and the interaction effect of condition and trial were not significant ($P>0.05$). Therefore, although bimanual coordination increased significantly in all three conditions in different trials, there was no significant difference in bimanual coordination among different conditions.

Conclusion The online tACS over P4 or SMA has no short-term effect on the bimanual coordination of elderly women. Further studies are recommended to assess the long-term effects of tACS in other areas of the cerebral cortex using different protocols.

Corresponding Author:
Hamidreza Taheri-Torbati, PhD.
Address: Department of Motor Behavior, Faculty of Sports Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
Tel: +98 (51) 38803487
E-mail: hamidtaheri@um.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Bimanual coordination in older adults is crucial for participating in daily activities and live independently [1]. Elderly people may experience difficulties in performing activities that require significant bimanual coordination [2]. According to previous studies, the supplementary motor area (SMA) plays an important role in planning and executing sequential and continuous bimanual motor tasks. It also has a crucial role in motor planning prior to movement initiation [3]. The parietal cortex also plays a significant role in bimanual coordination, particularly in complex tasks [4]. Given the changes that occur in old age, providing safe and low-risk solutions to cope with these changes is highly important to reduce the treatment costs and time for elderly people. It has been reported that transcranial alternating current stimulation (tACS), as a non-invasive brain stimulation, facilitates changes in neural activity and promotes neuroplasticity in healthy people [5]. Considering the decline in motor function among the elderly in fine motor tasks and their difficulties performing these tasks in their lives, which are important indicators of functional independence [6], an effective stimulation method to improve bimanual motor skills can be beneficial for the rehabilitation of older adults. Therefore, this study aims to investigate the effects of tACS applied over the right posterior parietal cortex (P4) and SMA on bimanual coordination in elderly women.

Methods

In this quasi-experimental study, 31 healthy elderly women (Mean age 65.26±4.01 years) without a history of neurological or psychological disorders participated. They had normal or corrected-to-normal vision, with no previous experience of tACS. They completed the Montreal Cognitive Assessment Test (MoCA) [7] and the Edinburgh Handedness Inventory (EHI) [8]. The Purdue Pegboard Test (PPT) was used to assess bimanual coordination ability. This task required the participants to use both hands while assembling one pin, one collar, and two washers. They were given a total of 5 minutes to complete the test, and the total score was determined by the number of correctly assembled units at the end of the trial. In this study, a 2-channel brain electrical stimulator (NeuroStim2, Medina Teb, Iran) was used for sham and online brain stimulations. The right parietal cortex (P4) and the SMA (3.0 cm anterior to the central sagittal midline) were identified according to the 10–20 international standard system [9]. The participants received intervention under three conditions: tACS over SMA, tACS over P4, and sham. Each condition was performed in one session with at least a one-week interval. The acquisition phase included four trials of the PPT which lasted 20 min, with a 2-minute interval. During this training, participants received either 20-Hz beta-band tACS or sham stimulation. In the online stimulation protocol, a low intensity of 1 mA at 20 Hz (peak-to-peak intensity) was used. The used waveform was sinusoidal, and each trial lasted for 5 minutes. Throughout the stimulation, each participant underwent four trials, with a 2-minute interval between each trial. For the sham stimulation protocol, the current was gradually increased over a 30-second period at a frequency of 20 Hz, maintained at 1 mA for 10 seconds, and gradually decreased for 30 seconds at 20 Hz. The statistical analyses were conducted in SPSS software, version 26. The normality assumption was assessed using the Shapiro-Wilk test. The sphericity assumption was examined using Mauchly's test. A repeated measures ANOVA was conducted to determine the difference in the scores of bimanual coordination, followed by a Post hoc test using the Bonferroni test. The significance level was set at 0.05.

Results

Figure 1 shows participants' bimanual coordination scores in trials 1-4 under three different conditions. According to the results of the Shapiro-Wilk test, the distribution of data was normal (P>0.05), Mauchly's Test confirmed the sphericity assumption for the main effect of condition ($X^2(2)=2.878$, P=0.237), but not for the main effect of trial ($X^2(5)=22.558$, P<0.001) or the interaction effect of condition and trial ($X^2(20)=54.197$, P<0.001); Therefore, the Greenhouse–Geisser correction was used for the main effect of trial and the interaction effect.

According to the results of ANOVA, the main effect of condition ($F_{(2, 52)}=1.867$, P=0.165, $\eta^2_p=0.067$) and the interaction effect of condition and trial were not significant ($F_{(3.278, 85.24)}=1.855$, P=0.138, $\eta^2_p=0.067$), but the main effect of trial was significant ($F_{(1.868,48.562)}=42.781$, P<0.001, $\eta^2_p=0.622$). Therefore, there was no significant difference in bimanual coordination among different conditions. Based on the results of pairwise comparison using Bonferroni post hoc test for the effect of trial (Table 1), bimanual coordination significantly increased trial-to-trial.

Conclusion

The findings of the present study indicated that active stimulation of the P4 and SMA using β-tACS (20 Hz) did not cause a significant difference in bimanual coordination compared to the sham stimulation. However, the results of

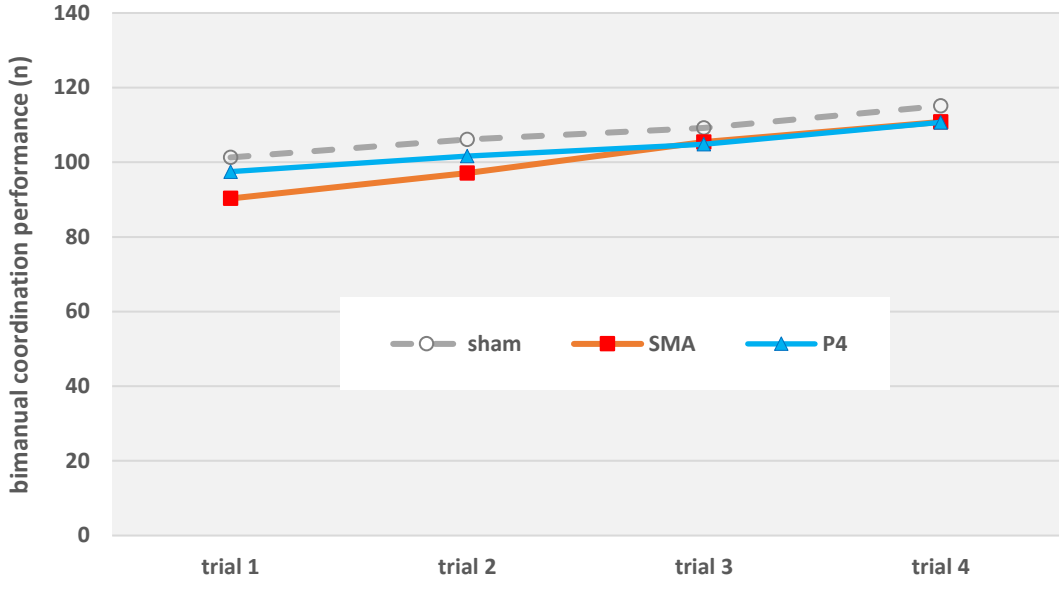
Table 1. Results of pairwise comparison of bimanual coordination in different trials

(I) trial	(J) trial	Mean Difference (I-J)*	Std. Error	p
Trial 1	Trial 2	-5.31	0.94	<0.0001
	Trial 3	-10.10	1.54	<0.0001
	Trial 4	-15.86	1.94	<0.0001
Trial 2	Trial 3	-4.79	1.35	0.009
	Trial 4	-10.56	1.62	<0.0001
Trial 3	Trial 4	-5.76	1.18	<0.0001

* P<0.05

Iranian Journal of
PSYCHIATRY AND CLINICAL PSYCHOLOGY

pairwise comparisons using Bonferroni post hoc test showed that bimanual coordination significantly improved during the online stimulation. This suggests that although the brain stimulation itself may not have had a significant effect, the training accompanied with it lead to improvements in bimanual coordination. These findings are consistent with previous studies conducted by Berger et al. [10] and Choe et al. [11], but inconsistent with the results of Pogosian et al. [12] and Miyaguchi et al. [13]. A review and meta-analysis study by Hu et al. [14] reported that factors such as stimulation mode, location, and frequency can affect the outcome of tACS regarding motor performance. They also found that online tACS had a significant positive effect on motor performance in healthy individuals compared to sham stimulation. Previous research has shown that tACS can modulate neural activity not only after stimulation but also during stimulation, specifically under the electrode [15]. Furthermore, studies have demonstrated that β-tACS over the motor cortex during task performance can also help stabilize practice related performance improvement. It is worth to note that age may be a factor contributing to the discrepancies between the present study and previous studies. Older adults tend to have decreased dexterity and neural plasticity, which might have eliminated the effects of brain stimulation in this study. Additionally, it is important to consider the duration of brain stimulation. The after-effects of tACS are usually observed over a duration longer than 10 minutes. Given that the present study used only 5 minutes of tACS, it is possible that the after-effects were not fully produced. However, the potential repeated effects of the 5-minute tACS should not be neglected, as suggested by Miyaguchi et al. who used a 1-minute tACS and the PPT on young people [13]. There-



Iranian Journal of
PSYCHIATRY AND CLINICAL PSYCHOLOGY

Figure 1. Mean scores of bimanual coordination in 4 trials under conditions of sham, tACS over SMA, and tACS over P4

fore, further research is needed to fully understand the relationship between tACS-induced changes in neural networks and changes in motor performance. The non-significance effect of tACS on bimanual coordination can be due to the complexity of the bimanual coordination task and the unclear mechanisms underlying bimanual coordination [10]. Some studies have highlighted the importance of beta-band activity in interhemispheric coordination of movements [16], while others did not find any effect of tACS on brain oscillations in the beta frequency [10]. Furthermore, although both the amplitude of motor evoked potentials and the amplitude of beta oscillations in the motor cortex are related to cortical excitability, they do not seem to be strongly related to each other [17]. On the other hand, various studies have shown the importance of the dominant hemisphere in bimanual coordination [18]. However, it is still speculative whether this factor can explain the physiological side effects of tACS without changes in bimanual coordination performance.

In general, according to the findings of the present study, tACS over SMA and P4 had no significant effect on older women' bimanual coordination. Based on the improvement of bimanual coordination in elderly women after using the Purdue pegboard task, it seems that practice can be safely used to improve bimanual coordination in elderly people. These practices are cost effective and accessible, making them suitable for use at home, rehabilitation centers, and other care centers for the elderly. By improving the quality of life and maintaining the independence of the elderly, these practices can also help reduce the additional costs associated with elderly care.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

The study was approved by the Ethics Committee of Ferdowsi University of Mashhad (code: IR.UM.REC.1400.177). Prior to the study, the participants were given the necessary explanations about the study objectives and procedure and signed a consent form. Their personal information was kept confidential, and they were free to leave the study at any time.

Funding

This study was extracted from the doctoral dissertation of Asiyeh Dehghani, registered by the Faculty of Sports Sciences, Ferdowsi University of Mashhad. This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors contributions

Conceptualization, design, data collection, data analysis, and writing: Asiyeh Dehghani; Review & editing, methodology, and supervision: All authors.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank all participants for their cooperation in this study.

This Page Intentionally Left Blank

مقاله پژوهشی

اثر تحریک آنلاین جریان متناوب فراجمجمه‌ای آنلاین قشر آهیانه‌ای و ناحیه حرکتی مکمل بر هماهنگی دو دستی زنان سالمند

آسیه دهقانی[۱]، *حمیدرضا طاهری تربتی[۱]، مهدی سهرابی[۱]، افخم دانشفر[۲]، محمدصابر ستوده[۳]

۱. گروه رفتارحرکتی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۲. گروه رفتارحرکتی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.
۳. دانشکده روانشناسی، دانشگاه ساسکس، برایتون، انگلستان.

Use your device to scan and read the article online

Citation Dehghani A, Taheri Torbati HR, Sohrabi M, Daneshfar A, Sotoodeh MS. [Effects of Online Transcranial Alternating Current Stimulation Over the Parietal Cortex and Supplementary Motor Area on Bimanual Coordination in Elderly Women (Persian)]. Iranian Journal of Psychiatry and Clinical Psychology. 2023; 29(3):250-267. http://dx.doi.org/10.32598/ijpcp.29.3.4556.1

http://dx.doi.org/10.32598/ijpcp.29.3.4556.1

تاریخ دریافت: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۱ شهریور ۱۴۰۲
تاریخ انتشار: ۰۹ مهر ۱۴۰۲

چکیده

اهداف باتوجه‌به اثرات منفی سالمندی بر مهارت‌های حرکتی دو دستی، توجه محققان به بررسی اثر انواع روش‌های غیرتهاجمی تحریک مغز بر بهبود این حرکات هماهنگ جلب شده است. هدف از اجرای این پژوهش بررسی اثر تحریک جریان متناوب فراجمجمه‌ای آنلاین قشر آهیانه‌ای و ناحیه حرکتی مکمل بر هماهنگی دو دستی زنان سالمند بود.

مواد و روش‌ها پژوهش حاضر از نوع نیمه‌آزمایشی بود. جامعه آماری شامل زنان سالمند ۶۰ تا ۷۵ سال شهر تهران بود که ۳۱ نفر از آن‌ها به روش نمونه‌گیری دردسترس انتخاب شدند و سپس به‌صورت درون‌گروهی با ترتیب تصادفی، ۳ نوع تحریک جریان متناوب فراجمجمه‌ای (tACS) قشر آهیانه‌ای، ناحیه حرکتی مکمل و شم را هم‌زمان با تمرین تکلیف پوردو پگبورد (۴ کوشش) طی ۳ جلسه با فاصله ۱ هفته دریافت کردند. داده‌ها با استفاده از تحلیل واریانس ۳ (وضعیت) در ۴ (کوشش) با تکرار سنجش مورد تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها نتایج تحلیل واریانس ۳ در ۴ با تکرار سنجش، فقط اثر معنی‌دار کوشش را نشان داد ($P<0/0001$) و اثر اصلی وضعیت و اثر متقابل وضعیت و کوشش معنی‌دار نبود ($P>0/05$). بنابراین هرچند هماهنگی دو دستی در هر ۳ شرایط در کوشش‌های مختلف به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، اما بین هماهنگی دو دستی در شرایط مختلف تفاوت معنی‌داری وجود نداشت.

نتیجه‌گیری نتیجه پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تحریک جریان متناوب فراجمجمه‌ای آنلاین قشر آهیانه‌ای و ناحیه حرکتی مکمل بر هماهنگی دو دستی زنان سالمند اثر کوتاه‌مدت ندارد. بنابراین در مطالعات آینده باید اثرات بلندمدت در سایر نواحی قشر مغز با پروتکل‌های متفاوت بررسی شود.

کلیدواژه‌ها:
تحریک الکتریکی، سالمندی، قشرحرکتی، مهارت‌های حرکتی

* **نویسنده مسئول:**
دکتر حمیدرضا طاهری تربتی
نشانی: خراسان‌رضوی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم ورزشی، گروه رفتارحرکتی.
تلفن: ۳۸۸۰۳۴۸۷ (۵۱) ۹۸+
پست الکترونیکی: hamidtaheri@um.ac.ir

مقدمه

سالمندی[1] یک فرآیند بیولوژیکی اساسی است که با کاهش عمومی عملکرد بافت‌ها و افزایش خطر ابتلا به بسیاری از بیماری‌های مرتبط با افزایش سن همراه است [۱]. تخریب سیستم عصبی-عضلانی ناشی از افزایش سن، می‌تواند بر فعالیت‌های روزانه نیازمند هماهنگی دو دستی اثر بگذارد [۲]. ظرفیت کنترل هماهنگی دو دست برای افراد مسن برای شرکت در فعالیت‌های روزمره بسیار مهم است و به توانایی زندگی کردن مستقل آن‌ها مربوط می‌شود [۳]. افراد مسن ممکن است مشکلاتی را در انجام فعالیت‌هایی که بسیار زیاد به هماهنگی دو دستی نیاز دارند، تجربه کنند [۴]. کیفیت زندگی روزمره افراد مسن تا حد زیادی به توانایی آن‌ها در انجام حرکات هماهنگ و به‌ویژه هماهنگی دو دستی (مانند لباس پوشیدن، بستن بند کفش، بلند کردن و حمل اشیا، خوردن یا تایپ ایمیل) بستگی دارد [۵]. حرکات دو دستی به فعال شدن بسیاری از نواحی قشری مغز، ازجمله قشر حرکتی اولیه[2] و به‌ویژه ناحیه حرکتی مکمل[3] نیاز دارند [۶، ۷].

براساس مطالعات قبلی، ناحیه حرکتی مکمل یک منطقه مهم در قشر مغز برای برنامه‌ریزی و اجرای تکالیف حرکتی دو دستی متوالی و مداوم است. ناحیه حرکتی مکمل قبل از شروع حرکت نقش مهمی در برنامه‌ریزی حرکتی دارد [۸، ۹]. از سوی دیگر قشر آهیانه‌ای[4] نیز نقش مهمی در هماهنگی دو دستی دارد که در تکالیف پیچیده حائز اهمیت می‌باشد [۱۰]. براساس مطالعه توموگرافی انتشار پوزیترون[5] [۱۱]، چنین بیان شد که قشر آهیانه‌ای نقش ویژه‌ای در هماهنگی تکالیف حرکتی ایفا می‌کند. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که وقتی یک فرد با شرایطی مواجه است که نیاز به سازگاری حرکتی دارد، قشر آهیانه‌ای نقش مهمی در پردازش آنلاین اطلاعات حسی و حس عمقی بازی می‌کند و پردازش آنلاین در راستای موقعیت استراتژیک قشر آهیانه‌ای اتفاق می‌افتد [۱۲، ۱۳]. همچنین نشان داده شده است که قشر آهیانه‌ای بخش مهمی از حلقه قشری-مخچه‌ای را تشکیل می‌دهد که بر تکالیف دو دستی تأثیر می‌گذارد و آن‌ها را کنترل می‌کند. علاوه‌براین مطالعات تصویربرداری بیان کرده‌اند که فعال‌سازی آهیانه‌ای در حین اجرای تکالیف حرکتی دو دستی رخ می‌دهد [۱۴]. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در تکالیف حرکتی چند اندامی، مناطق مختلف قشری و زیرقشری در دستیابی به اهداف همکاری می‌کنند. در میان این نواحی، قشر آهیانه‌ای یک بخش مهم است [۱۵]

1. Aging
2. Primary Motor Cortex (M1)
3. Supplementary Motor Area (SMA)
4. Parietal cortex
5. PET

پیری جمعیت در قرن حاضر به‌سرعت در حال افزایش است. و این موضوع بـه یکـی از مهـم‌ترین چالش‌های بهداشت عمومی در سال‌های کنـونی تبدیل شـده است [۱۶]. ازآن‌جایی‌که کشور ایران نیز در حال پیوستن به جوامع سالخورده است، توجه به گروه سالمندان برای نیل به هدف سالمندی موفق، از مهم‌ترین برنامه‌های نظام سلامت خواهد بود [۱۷]. افزایش جمعیت سالمندان و هزینه‌هایی که این قشر برای جامعه دربر دارد، ضرورت توجه به مشکلات این قشر را روزافزون کرده است [۱۸]. آمارها نشان می‌دهد اگر برنامه‌ریزان و سیاستگذاران کشور از هم اکنون برنامه مدونی برای این قشر نداشته باشند در ۲۰ سال آینده، کشور دچار یک بحران و معضل اساسی برای رفع مشکل و مسائل پیش‌آمده ناشی از مسائل بهداشتی، درمانی، اقتصادی، اجتماعی و غیره این قشر می‌شود [۱۹].

بدین ترتیب باتوجه‌به تغییرات ایجادشده در دوران سالمندی، فراهم کردن راهکارهای ایمن و کم خطر برای مقابله با این تغییرات به منظور کاهش هزینه و زمان برای جامعه سالمندان در سراسر جهان بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور، تکنیک‌های غیرتهاجمی تحریک مغز، یک انتخاب مناسب برای تغییر در فعالیت‌های عصبی و به دنبال آن تغییر نوروپلاستیسیتی می‌باشد. گزارش شده است که تحریک الکتریکی مغز با جریان متناوب[6] به‌عنوان یک روش غیرتهاجمی تحریک مغز، تغییرات در فعالیت عصبی را تسهیل می‌کند و باعث افزایش انعطاف‌پذیری عصبی در افراد سالم می‌شود [۲۰]. tACS با اعمال یک جریان متناوب از طریق دو الکترود متصل به سر شرکت‌کننده، می‌تواند نوسانات مغز را بلافاصله در زیر الکترودها تا یک فرکانس خاص، تعدیل کند [۲۱]. میاگوچی و همکاران، در پژوهشی بر روی ۳۲ شرکت‌کننده جوان راست دست، در طول تحریک β-tACS (۲۰ هرتز)، γ-tACS (۸۰ هرتز) و شم بر ناحیه حرکتی مکمل، تکلیف پوردوپگبورد را بررسی و چنین بیان کردند که چون فعالیت عصبی در ناحیه حرکتی مکمل شامل حرکات دو دستی متوالی و مداوم است، tACS ناحیه حرکتی مکمل، اجرای تکالیف حرکتی دو دستی را تعدیل می‌کند [۲۲].

برگر و همکاران [۲۳]، در مطالعه‌ای بر روی زنان ۱۸ تا ۳۲ سال، چنین بیان کردند که اجرای هماهنگی دو دستی بین گروه‌های تحریک (۱۰ هرتز و ۲۰ هرتز) با گروه شم متفاوت نبود، بنابراین هیچ اثر خاصی از tACS بر عملکرد هماهنگی دو دستی نشان داده نشد [۲۳]. همچنین آذرپیکان و همکاران [۲۴] در بررسی تأثیر تحریک مستقیم فراجمجمه‌ای بر یادگیری حرکتی بر روی ۶۴ دانشجوی سالم، بیان کردند که تحریک مستقیم فراجمجمه‌ای قشر آهیانه‌ای، عملکرد حرکتی را در مراحل اولیه یادگیری در طول مرحله اکتساب بهبود می‌بخشد [۲۴].

6. Transcranial Alternating Current Stimulation (tACS)

مرور پیشینه نشان می‌دهد که مطالعات هماهنگی دو دستی همراه با نوسان فعالیت‌های مغزی پس از tACS، به‌خصوص در قشر سالمند محدود است. نظر به افت عملکرد سالمندان در حیطه حرکات ظریف و مشکلاتی که این قشر در انجام این تکالیف در زندگی روزمره خود به‌عنوان شاخص مهم استقلال عملکردی دارند [۴]، ایجاد یک روش تحریک مؤثر برای بهبود مهارت‌های حرکتی دو دستی نامتقارن برای توان‌بخشی سالمندان مفید خواهد بود. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، ارائه راهکاری به منظور کند شدن فرآیند تضعیف حرکات ظریف سالمندان و گاهاً حتی بهبود این حرکات می‌باشد. درحقیقت این پژوهش به دنبال پاسخ این سؤال است که آیا می‌توان بدون درگیری افراد سالمند در تمرینات نسبتاً دشوار حرکتی، از طریق تحریک جریان متناوب فراجمجمه‌ای مغز، بهبودی در هماهنگی دو دستی آن‌ها ایجاد کرد؟

روش

شرکت‌کنندها

پژوهش حاضر به روش نیمه‌آزمایشی انجام شد. جامعه آماری شامل کلیه زنان سالمند ۶۰ تا ۷۵ سال شهر تهران بود. برای محاسبه تعداد نمونه‌ها از نرم‌افزار جی‌پاور با اندازه اثر ۰/۶۹-۰/۳۸، سطح آلفای ۰/۰۵، توان ۰/۹ و همبستگی ۰/۷ بین سنجش‌ها برای تحلیل واریانس سنجش‌های تکراری (یک گروه و ۱۲ سنجش) استفاده شد. اندازه اثر براساس مجذور اتای جزئی در مطالعات مشابه [۲۵-۲۷] انتخاب شد. حداقل تعداد نمونه ۳ تا ۵ نفر به دست آمد، اما براساس مقالات مشابه tACS که تعداد نمونه در طرح‌های بین گروهی در دامنه ۷-۲۰ نفر در هر گروه و در طرح‌های درون گروهی در دامنه ۲۰-۲۸ نفر بود (به‌عنوان مثال مرور نظام‌مند و فراتحلیل هو و همکاران [۲۸]، تعداد ۳۱ زن سالمند به‌صورت دردسترس با میانگین سنی (۶۵/۲۶±۴/۰۱) سال انتخاب شدند.

از معیارهای ورود به مطالعه دامنه سنی بین ۶۰ تا ۷۵ سال، جنسیت زن، راست دست بودن، عدم وجود اختلال شناختی، عدم وجود هرگونه نقص حرکتی در اندام فوقانی، نداشتن اختلالات بینایی و دارا بودن دید طبیعی یا اصلاح‌شده با عینک، استفاده نکردن از داروهای تأثیرگذار بر دستگاه عصبی مانند ریتالین، وجود هرگونه ایمپلنت فلزی در مغز و تزریق حداقل دُز اول و دوم واکسن کرونا بود. همچنین ترس از تحریک الکتریکی، عدم شرکت منظم در جلسات و عدم تمایل به ادامه کار از معیارهای خروج از مطالعه بودند.

چهار نفر از شرکت‌کننده‌ها به‌دلیل عدم همکاری و یا دارا بودن معیارهای خروج از مطالعه، از پژوهش حذف شدند. تمامی شرکت‌کننده‌ها فرم رضایت شرکت در پژوهش را کامل کردند و تمامی مراحل پژوهش در کمیته اخلاق پژوهش تأیید شد. همچنین به منظور رعایت اخلاق در پژوهش حاضر، اهداف و مراحل پژوهش و ملاحظات ایمنی مربوط به استفاده از tACS به‌طور کامل برای سالمندان شرکت‌کننده توضیح داده شد و به آن‌ها این اطمینان داده شد که اصل رازداری در حفظ داده‌ها رعایت خواهد شد و تمامی اطلاعات به‌دست‌آمده صرفاً جنبه تحقیقاتی خواهد داشت. همچنین به منظور بررسی اثرات جانبی تحریک و ایمنی در پایان تمام جلسات تحریک، شرکت‌کنندگان به‌وسیله پرسش خودگزارش شفاهی «توجه، خستگی و درد احساس‌شده» که مقیاسی از ۱ تا ۷ دارد، مورد بررسی قرار گرفتند [۲۴].

ابزارهای پژوهش

پرسش‌نامه دست برتری ادینبرگ[7]

برای تعیین دست برتر از پرسش‌نامه دست برتری ادینبرگ استفاده شد. اولد فیلد در سال ۱۹۷۱ این پرسش‌نامه را ساخته است که ۱۰ سؤال دارد. گویه‌های آن شامل ۱. نوشتن، ۲. رسم کردن، ۳. پرتاب کردن، ۴. استفاده از قیچی، ۵. استفاده از چاقو، ۶. استفاده از قاشق، ۷. مسواک زدن، ۸. جارو زدن (دست بلند کردن)، ۹. روشن کردن کبریت (گرفتن چوب کبریت) و ۱۰. باز کردن درِ جعبه می‌باشد. روایی و اعتبار این پرسش‌نامه در کشورهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در ایران علی‌پور و آگاه هریس، آلفای کرونباخ پرسش‌نامه را ۰/۹۷ و همبستگی دو نیمه آن ۰/۹۲ گزارش کردند. براساس دستورالعمل پرسش‌نامه، برای تعیین دست برتر محاسبه می‌شود که عددی بین ۱۰۰+ و ۱۰۰- است. عدد ۱۰۰+ نشانه راست‌دستی کامل و عدد ۱۰۰- نشانه چپ‌دستی کامل است و افراد چپ‌دست نمره‌هایی در گستره ۴۰- تا ۱۰۰- افراد دوسو توان نمره‌هایی در گستره ۴۰- تا ۴۰+ و افراد راست‌دست نمره‌هایی در گستره ۴۰+ تا ۱۰۰+ می‌گیرند [۲۹].

ابزار سنجش شناختی مونترال[8]

به منظور ارزیابی وضعیت شناختی سالمندان و سنجش عدم وجود اختلال شناختی جهت ورود به مطالعه از این ابزار استفاده شد. پایایی این آزمون باتوجه‌به مقدار آلفای کرونباخ، ۹۲ درصد و میزان روایی آن ۸۳ درصد بود. این آزمون یک صفحه‌ای، دارای حداکثر ۳۰ امتیاز است و امتیاز ۲۶ یا بیشتر طبیعی محسوب می‌شود که طی ۱۰ دقیقه قابل اجرا است. بخش‌های مختلف این آزمون بدین شرح است:

7. Edinburgh Handedness Inventory (EHI)
8. Montreal Cognitive Assessment (MoCA)

حافظه کوتاه‌مدت که دارای حداکثر ۵ امتیاز است، تجسم فضایی با حداکثر ۴ امتیاز، قدرت تصمیم‌گیری با حداکثر ۴ امتیاز، توجه و تمرکز و حافظه رفتاری که حداکثر ۶ امتیاز دارد، زبان با حداکثر ۵ امتیاز و توجه به زمان و مکان که حداکثر ۶ امتیاز دارد. سالمندانی که از این آزمون امتیاز ۲۶ یا بیشتر دریافت کنند، مبتلا به اختلال شناختی نیستند (طبیعی بودن آزمون مونترال)، درحالی‌که کسب امتیاز کمتر از ۲۶ (غیرطبیعی بودن آزمون مونترال) مطرح‌کننده ابتلا به اختلالات شناختی است [۳۰].

دستگاه تحریک الکتریکی مغز

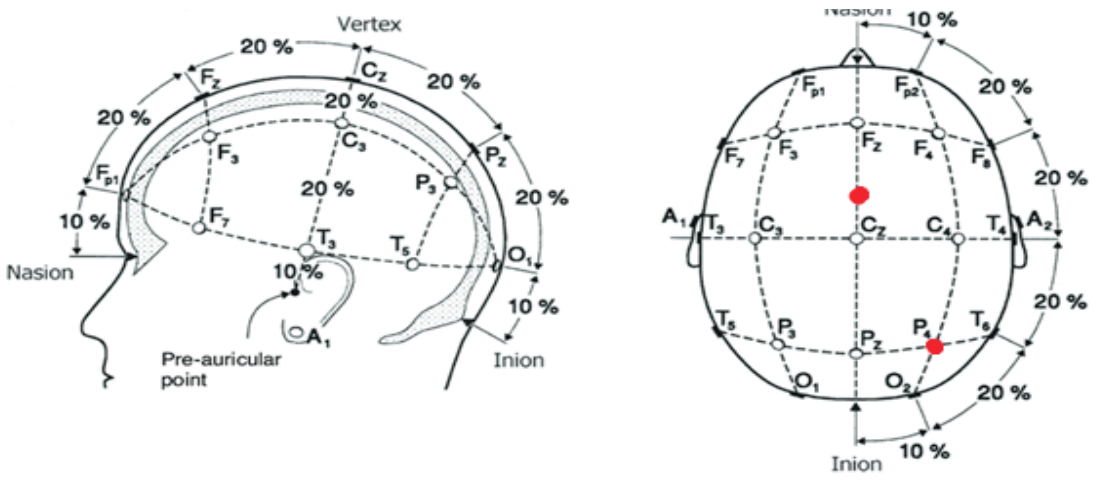
در این مطالعه از دستگاه تحریک الکتریکی مغزی دو کاناله مدل نورواستیم[9] ساخت شرکت مدینا طب ایران به منظور تحریک الکتریکی استفاده شد. این دستگاه از سال ۲۰۱۵ روانه بازار شد و ازنظر ایمنی و بالینی تست‌های زیادی را در این سال‌ها گذرانده است و موفق به دریافت استاندارد BS EN 60601-1 2014 شده است و همچنین مورد تأیید جامعه عصب روانشناسی و کاردرمانی بوده و در تحقیقات مختلفی جهت تحریک مغزی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۱]. منبع جریان در این دستگاه برق شهری ۱۱۰-۲۲۰ ولت ۵۰ هرتز و وزن آن ۰/۳۵ کیلوگرم و ابعاد آن ۱۵۲×۱۰۸×۵۴ میلی‌متر می‌باشد. محل قرارگیری الکترودها براساس نقشه استاندارد و بین‌المللی ۱۰-۲۰ مشخص شد (تصویر شماره ۱). بدین صورت که در تحریک قشر آهیانه‌ای، الکترود فعال بر روی قشر آهیانه‌ای راست (P4) و الکترود مرجع بر روی عضله بازوی شانه راست شرکت‌کننده‌ها [۲۴] و در تحریک ناحیه حرکتی مکمل، الکترود فعال بر روی ناحیه حرکتی مکمل (۳ سانتی‌متر جلوتر از نقطه Cz) و الکترود مرجع بر روی عضله بازوی شانه چپ شرکت‌کنندگان قرار داده شد [۲۲، ۳۲، ۳۳]؛ این موقعیت الکترود مرجع به منظور حذف اثرات نواحی قشری و به حداقل رساندن عوارض جانبی تحریک، انتخاب شده است [۲۲]. الکترودهای کربنی در ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر به‌وسیله کش بر روی سر و بازو محکم شدند.

آزمون پوردو پگبورد[10]

به منظور بررسی تکلیف هماهنگی دودستی از آزمون پوردو پگبورد (خرده‌آزمون مونتاژ) استفاده شد. تیفین برای ارزیابی سرعت و دقت حرکتی دست در سال ۱۹۸۷ این ابزار را طراحی کرد. پایایی این آزمون نیز بارها بررسی شده است. برای مثال، هاردین با ۳ بار آزمودن این آزمون بر روی افرادی با بیش از ۶۰ سال سن، پایایی آن را در خرده‌آزمون‌های مختلف ۸۲ درصد تا ۹۱ درصد گزارش کرد [۳۴]. برای اجرای این آزمون شرکت‌کننده پشت یک میز به ارتفاع حداکثر ۷۵ سانتی‌متر می‌نشیند و تخته پوردوپگبورد در جلوی وی قرار می‌گیرد، به‌نحوی‌که مهره‌های تخته در انتها قرار گیرند. در خرده‌آزمون مونتاژ، شرکت‌کننده‌ها از هر ۳ جزء قرار داده‌شده در گوی‌های آزمون یعنی میخ، واشر و استوانه برای پر کردن حفره‌ها آن هم در مدت‌زمان ۶۰ ثانیه استفاده کردند، به‌گونه‌ای‌که از هر دو دست به‌طور متناوب استفاده می‌شد. بدین صورت که شرکت‌کننده‌ها ابتدا یک میخ را با دست راست خود در حفره قرار دادند و سپس با دست چپ واشر را بر روی میخ قرار می‌دادند. سپس با دست راست خود یک استوانه را روی آن دو قرار داده و در آخر یک واشر را با دست چپ خود روی استوانه قرار می‌دادند تا یک واحد ۴ تایی مونتاژ شود. بنابراین دو دست در همه زمان‌های مونتاژ کردن، در حال حرکت بود. شرکت‌کننده‌ها از بالای تخته به سمت پایین،

9. Neurostism 2

10. Purdue Pegboard Test (PPT)



مجله روان‌پزشکی و روان‌شناسی بالینی ایران

تصویر ۱. محل قرار گیری الکترودها در نقشه استاندارد و بین‌المللی ۱۰-۲۰. همان‌گونه که در تصویر با دایره قرمز رنگ مشخص است، الکترود فعال در تحریک ناحیه آهیانه‌ای، بر روی قشر آهیانه‌ای راست (P4) و در تحریک ناحیه حرکتی مکمل، بر روی ناحیه حرکتی مکمل (۳ سانتی‌متر جلوتر از نقطه Cz) قرار داده شد.

مجله روان‌پزشکی و روان‌شناسی بالینی ایران

تصویر ۲. طرح درون‌گروهی با ترتیب تصادفی. هر جلسه شامل ۴ کوشش ۵ دقیقه‌ای از تکلیف هماهنگی دو دستی با ابزار پوردوپگبورد بود که هم‌زمان با آن، ۴ بار تحریک جریان متناوب، هربار به‌مدت ۵ دقیقه ارائه می‌شد. کوشش‌ها با یک استراحت ۲ دقیقه‌ای (توقف تکلیف و تحریک) از هم جدا می‌شدند.

پرکردن حفره‌ها را شروع می‌کردند. نمرات هر آزمون شامل تعداد مهره‌های قرار داده‌شده در حفره‌ها در مدت‌زمان ۶۰ ثانیه برای آزمون مونتاژ می‌باشد.

رعایت نکردن ترتیب پرکردن حفره‌ها و افتادن میخ‌ها از دست شرکت‌کننده، خطای دقت محسوب می‌شد. به شرکت‌کنندگان گفته شد تا جایی که می‌توانند سریع و دقیق عمل کنند. به منظور آشنایی با تجهیزات و همچنین نحوه اجرای آزمون پوردو پگبورد، شرکت‌کنندگان قبل از جلسه اول، دستورالعمل‌های موردنیاز را دریافت کردند و به‌صورت آزمایشی مونتاژ دو واحد را تمرین کردند و به سؤالات آن‌ها پاسخ داده شد.

شیوه اجرا

تمام زنان سالمند موردپژوهش، در این طرح درون گروهی، هر ۳ نوع تحریک مغزی (قشرآهیانه‌ای، ناحیه حرکتی مکمل و شم) را با ترتیب تصادفی طی ۳ جلسه با فاصله ۱ هفته دریافت کردند. بدین صورت که شرکت‌کننده‌ها در هرجلسه به‌صورت تصادفی در یکی از وضعیت‌ها قرار می‌گرفتند و بدین شکل، اثر ترتیب و انتقال با روش تصادفی کردن تحت کنترل قرار گرفت. در شرایط آزمایشی تحریک فراجمجمه‌ای ناحیه حرکتی مکمل و قشر آهیانه‌ای، پس از نصب الکترودها در نقاط موردنظر، شرکت‌کننده‌ها تحریکی با شدت جریانی معادل ۱ میلی‌آمپر، فرکانس بتا (۲۰ هرتز) یعنی β-tACS را به‌مدت ۲۰ دقیقه (به‌صورت ۴ کوشش ۵ دقیقه‌ای با ۲ دقیقه استراحت بین کوشش‌ها) دریافت کردند؛ بدین صورت که در زمان ارائه تحریک، فرکانس تحریک دستگاه بر روی ۲۰ هرتز تنظیم می‌شد. بدین علت که فعالیت نوسانی در فرکانس ۲۰ هرتز، در حرکات پیچیده مانند هماهنگی دو دستی در داخل و بین شبکه‌های حرکتی نیمکره چپ و راست غالب است [۳۵-۳۷]. هم‌زمان با دریافت تحریک (تحریک آنلاین)، ۴ کوشش ۵ دقیقه‌ای از تکلیف هماهنگی دو دستی با ابزار پوردوپگبورد را انجام دادند. کوشش‌ها با یک استراحت ۲ دقیقه‌ای از هم جدا می‌شدند (تصویر شماره ۲). از دلایل انتخاب تحریک آنلاین، مقاله مروری هو و همکاران می‌باشد که آن‌ها در پژوهش خود چنین بیان کردند که تحریک آنلاین نسبت به آفلاین اثر بیشتری بر عملکرد حرکتی دارد [۲۸]. در شرایط تحریک شم، پس از نصب الکترودها در نقاط موردنظر، شرکت‌کننده‌ها فقط ۳۰ ثانیه tACS را دریافت کردند [۳۸] تا افراد احساس خارش ناشی از تحریک را حس کنند. سپس به‌سرعت به صفر برمی‌گشت و بدون اینکه متوجه شوند، دستگاه طبق تنظیمات قبلی به‌طور خودکار خاموش می‌شد. طی تحریک شم نیز شرکت‌کنندگان، ۴ کوشش ۵ دقیقه‌ای از تکلیف هماهنگی دو دستی، با ۲ دقیقه استراحت بین کوشش‌ها را انجام دادند.

روش تحلیل داده‌ها

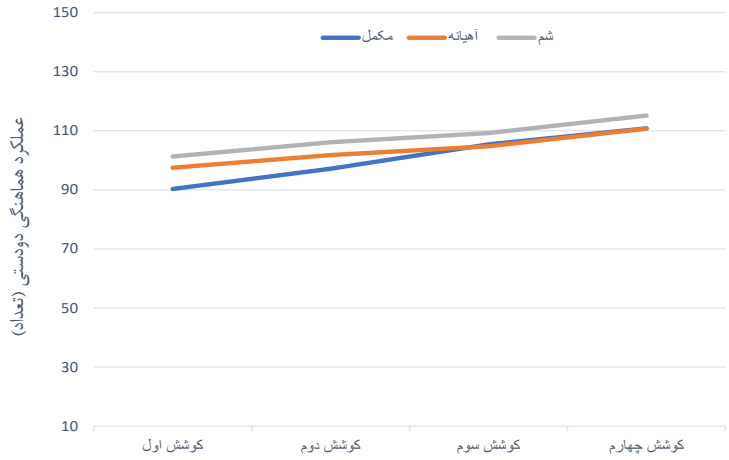
به منظور تحلیل داده‌ها از شاخص‌های آمار توصیفی، مانند میانگین و انحراف‌معیار برای توصیف مشخصات جمعیت‌شناختی استفاده شد. از آزمون شاپیرو ویلک[11] برای بررسی طبیعی بودن توزیع داده‌ها استفاده شد. نمره هماهنگی دو دستی با استفاده از تحلیل واریانس ۳ (وضعیت) در ۴ (کوشش) با تکرار سنجش، مورد تحلیل قرارگرفت. تمام آزمون‌ها در سطح معنی‌داری (۰۵/ P<۰)در نظر گرفته شدند. برای محاسبات آماری از نسخه ۲۴ نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

یافته‌ها

همان‌طورکه در تصویر شماره ۳ ملاحظه می‌شود هماهنگی دو دستی در کوشش‌های مختلف همراه با تحریک ناحیه حرکتی مکمل و آهیانه‌ای و تحریک شم افزایش یافت. نتایج آزمون شاپیرو ویلک، پیش‌فرض طبیعی بودن توزیع داده‌ها را تأیید کرد (P>۰/۰۵).

باتوجه‌به طبیعی بودن توزیع داده‌ها از تحلیل واریانس ۳ (وضعیت) در ۴ (کوشش) با تکرار سنجش برای تحلیل نمرات هماهنگی دو دستی در آزمون‌های آنلاین استفاده شد. آزمون ماخلی برای اثر اصلی وضعیت تحریک پیش‌فرض کرویت را تأیید کرد ($X^2(2)=2/878$ ،P=۰/۲۳۷)، اما برای اثر اصلی کوشش ($X^2(5)=22/558$ ،P<۰/۰۰۰۱) و اثر متقابل وضعیت و کوشش ($X^2(20)=54/197$ ،P<۰/۰۰۰۱) پیش‌فرض کرویت را تأیید نکرد.

11. Shapiro-Wilk



مجله روان‌پزشکی و روان‌شناسی بالینی ایران

تصویر ۳. میانگین نمره هماهنگی دو دستی در ۴ کوشش در ۳ وضعیت تحریک ناحیه مکمل حرکتی، قشر آهیانه‌ای و شم

بنابراین برای اثر اصلی کوشش و اثر متقابل وضعیت و کوشش، از اصلاح گرین هاوس–گیزر استفاده شد. مطابق نتایج تحلیل واریانس ۳ در ۴ با تکرار سنجش (جدول شماره ۱)، اثر اصلی وضعیت و اثر متقابل وضعیت و کوشش معنی‌دار نبود (P>۰/۰۵)، اما اثر اصلی کوشش معنی‌دار بود (P<۰/۰۰۰۱). بنابراین در آزمون‌های آنلاین بین هماهنگی دو دستی در شرایط مختلف تحریک ناحیه حرکتی مکمل، آهیانه‌ای و تحریک شم تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. به‌عبارت‌دیگر tACS ناحیه حرکتی مکمل و آهیانه‌ای بر هماهنگی دو دستی اثر معنی‌داری نداشت، اما مطابق نتایج مقایسه‌های زوجی با استفاده از آزمون تعقیبی بونفرونی برای اثر معنی‌دار کوشش (جدول شماره ۲) هماهنگی دو دستی کوشش به کوشش، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت؛ یعنی به‌طورکلی تمرین بر هماهنگی دو دستی اثری معنی‌دار داشت.

بحث

پژوهش حاضر باهدف بررسی اثر تحریک الکتریکی متناوب فراجمجمه‌ای (tACS) آنلاین قشر آهیانه‌ای و ناحیه حرکتی مکمل بر هماهنگی دو دستی زنان سالمند انجام شد. شرکت‌کننده‌های این پژوهش ۳۱ زن سالمند بودند که همگی با ترتیب تصادفی، ۳ نوع تحریک جریان متناوب فراجمجمه‌ای (tACS) قشر آهیانه‌ای، ناحیه حرکتی مکمل و شم را طی ۳ جلسه با فاصله ۱ هفته دریافت کردند. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد، تحریک آنلاین قشر آهیانه‌ای و ناحیه حرکتی مکمل، به‌وسیله β–tACS (۲۰ هرتز)، تفاوت معنی‌داری با تحریک شم نداشت، اما مطابق نتایج مقایسه‌های زوجی با استفاده از آزمون تعقیبی بونفرونی، هماهنگی دو دستی در آزمون آنلاین کوشش به کوشش، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌عبارت‌دیگر، اثر تمرین معنی‌دار بود، اما اثر تحریک معنی‌دار نبود. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های برگر و همکاران [۲۳] و چو و همکاران [۳۹] همسو بود؛ آن‌ها

جدول ۱. نتایج تحلیل واریانس ۳ در ۴ با تکرار سنجش

منبع تغییرات	SS	df	MS	F	η^2_p	P
اثر اصلی وضعیت	۲۷۱۴/۵۷	۲	۱۳۵۷/۲۹	۱/۸۶۷	۰/۰۶۷	۰/۱۶۵
خطا	۳۷۸۱۲/۲۶	۵۲	۷۲۷/۱۶			
اثر اصلی کوشش	۱۱۱۲۶/۲۶	۱/۸۶۸	۵۹۵۶/۹۷	۴۲/۷۸۱	۰/۶۲۲	<۰/۰۰۰۱
خطا	۶۷۶۱/۹۹	۴۸/۵۶۲	۱۳۹/۲۴			
اثر متقابل وضعیت در کوشش	۷۱۶/۱۴	۳/۲۷۸	۲۱۸/۴۵	۱/۸۵۵	۰/۰۶۷	۰/۱۳۸
خطا	۱۰۰۳۶/۳۶	۸۵/۲۴	۱۱۷/۷۵			

مجله روان‌پزشکی و روان‌شناسی بالینی ایران

جدول ۲. نتایج آزمون تعقیبی بونفرونی برای اثر معنی‌دار کوشش بر هماهنگی دو دستی در آزمون‌های آنلاین

کوشش‌های موردمقایسه		اختلاف میانگین	خطای استاندارد	حد پایین	حد بالا	p
کوشش اول	کوشش دوم	-۵/۳۰۹	۰/۹۴۲	-۷/۹۹۸	-۲/۶۱۹	<۰/۰۰۰۱
	کوشش سوم	-۱۰/۰۹۹	۱/۵۳۶	-۱۴/۴۸۵	-۵/۷۱۲	<۰/۰۰۰۱
	کوشش چهارم	-۱۵/۸۶۴	۱/۹۴۵	-۲۱/۴۱۸	-۱۰/۳۱۱	<۰/۰۰۰۱
کوشش دوم	کوشش اول	۵/۳۰۹	۰/۹۴۲	۲/۶۱۹	۷/۹۹۸	<۰/۰۰۰۱
	کوشش سوم	-۴/۷۹۰	۱/۳۴۷	-۸/۶۳۷	-۰/۹۴۳	۰/۰۰۹
	کوشش چهارم	-۱۰/۵۵۶	۱/۶۱۶	-۱۵/۱۷۱	-۵/۹۴۰	<۰/۰۰۰۱
کوشش سوم	کوشش اول	۱۰/۰۹۹	۱/۵۳۶	۵/۷۱۲	۱۴/۴۸۵	<۰/۰۰۰۱
	کوشش دوم	۴/۷۹۰	۱/۳۴۷	۰/۹۴۳	۸/۶۳۷	۰/۰۰۹
	کوشش چهارم	-۵/۷۶۵	۱/۱۷۷	-۹/۱۲۷	-۲/۴۰۴	<۰/۰۰۰۱
کوشش چهارم	کوشش اول	۱۵/۸۶۴	۱/۹۴۵	۱۰/۳۱۱	۲۱/۴۱۸	<۰/۰۰۰۱
	کوشش دوم	۱۰/۵۵۶	۱/۶۱۶	۵/۹۴۰	۱۵/۱۷۱	<۰/۰۰۰۱
	کوشش سوم	۵/۷۶۵	۱/۱۷۷	۲/۴۰۴	۹/۱۲۷	<۰/۰۰۰۱

مجله روان‌پزشکی و روان‌شناسی بالینی ایران

در مطالعه‌ای بر روی زنان ۱۸ تا ۳۰ سال چنین بیان کردند که عملکرد هماهنگی دو دستی بین گروه‌های تحریک (۱۰ هرتز و ۲۰ هرتز) با گروه شم متفاوت نبود، بنابراین هیچ اثر خاصی از tACS بر عملکرد هماهنگی دو دستی نشان داده نشد [۲۳].

چو و همکاران از دو تکلیف فرود آسان به‌مدت ۱۰ دقیقه و همچنین ۶ بلوک ۲۰ کوششی از تکلیف n-back در ۴ جلسه متوالی روزانه همراه با تحریک استفاده کردند. اجرای هر دو تکلیف فرود آسان و n-back، احتمالاً به‌دلیل اثر سقف، به‌طور قابل‌توجهی در طول زمان تغییر نکرد [۳۹].

تحلیل‌های آماری در پژوهش حاضر که اثر معنی‌دار کوشش را نشان داد، توجیه اثر سقف را رد می‌کند. همان‌طور که در تصویر شماره ۳ نشان داده شده است، سرعت بهبود اجرا در تکلیف هماهنگی دو دستی، در تحریک ناحیه حرکتی مکمل نسبت به وضعیت تحریک قشر آهیانه‌ای و تحریک شم بیشتر بود، گرچه تفاوت معنی‌داری بین میزان پیشرفت در وضعیت‌های مختلف مشاهده نشد. بااین‌حال، مطالعات قبلی قشر حرکتی اولیه (M1) را تحریک کرده و اثرات قابل‌توجهی از tACS را بر یادگیری حرکتی نشان دادند [۴۰، ۴۱]. در این پژوهش یادگیری حرکتی با سنجش عملکرد پس از فاصله یادداری سنجیده نشد و فقط اثرات فوری تحریک همراه با تمرین به‌صورت آنلاین بر اکتساب بدون بررسی ماندگاری اثرات مورد مطالعه قرار گرفت.

از طرف دیگر، یافته‌های پژوهش با نتایج پوگوسیان و همکاران [۴۲] و میاگوچی و همکاران [۲۲]، ناهمسو بود. پوگوسیان و همکاران کاهش قابل‌توجه زمان حرکت را پس از ۱ جلسه تکلیف ردیابی دو دستی، درحالی‌که شرکت‌کنندگان به‌طور هم‌زمان ۲۰ هرتز tACS را دریافت می‌کردند، نشان دادند. میاگوچی و همکاران در پژوهشی بر روی ۳۲ شرکت‌کننده جوان راست‌دست، در طول تحریک β-tACS (۲۰ هرتز)، γ-tACS (۸۰ هرتز) و شم بر ناحیه حرکتی مکمل، تکلیف پوردوپگبورد را مورد بررسی قرار دادند و چنین بیان کردند که چون فعالیت عصبی در SMA شامل حرکات دو دستی متوالی و مداوم است، tACS ناحیه حرکتی مکمل، اجرای تکالیف حرکتی دو دستی را تعدیل می‌کند [۲۲].

براساس مطالعه مروری و فراتحلیلی هو و همکاران [۲۷]، روش تحریک، مکان تحریک و فرکانس تحریک از عوامل اثرگذار tACS بر عملکرد حرکتی هستند. آن‌ها نشان دادند که tACS آنلاین در مقایسه با آفلاین عملکرد حرکتی را در افراد سالم به‌طور معنی‌داری بهبود می‌بخشد. از طرف دیگر، میاگوچی و همکاران [۲۲] درخصوص نقش فرکانس محرک در عملکرد حرکتی دریافتند که β-tACS با عملکرد ورزشی همبستگی مثبت دارد و به نظر می‌رسد فعالیت باند بتا فعالیتی ضدپویا است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که tACS، فعالیت عصبی نوسانی را نه تنها پس از تحریک، بلکه در طول تحریک، در زیر الکترود فوراً تعدیل می‌کند [۲۱]. علاوه‌بر شواهدی که از بهبود اکتساب مهارت در طول تمرین (یعنی یادگیری آنلاین) پشتیبانی می‌کند، نشان

داده شد که β-tACS که در طول اجرای تکلیف به قشر حرکتی هدایت می‌شود، بهبود عملکرد ناشی از تمرین را تثبیت می‌کند [۴۳].

احتمالاً علت تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیش‌گفت مربوط به سن شرکت‌کننده‌هاست. انجام حرکات ظریف به‌وسیله انگشتان دست در جوانان آسان‌تر از سالمندان می‌باشد؛ زیرا در سالمندان توانایی حرکات ظریف به مرور زمان کاهش می‌یابد و احتمالاً شکل‌پذیری کمتر مغز در سالمندی تأثیر تحریک را کاهش داده است. ازآن‌جایی‌که اثرات پس از تحریک متناوب فراجمجمه‌ای، در تحریکات بیشتر از ۱۰ دقیقه تولید می‌شود [۴۴-۴۶]، ممکن است تحریک ۵ دقیقه‌ای مورداستفاده در این مطالعه، اثرات پس از تحریک را ایجاد نکرده باشد. بااین‌حال، نمی‌توان اثرات تکراری تحریکات ۵ دقیقه‌ای را رد کرد، کما اینکه میاگوچی و همکاران نیز در تحریک متناوب ۱ دقیقه‌ای در تکلیف پوردو پگبورد بر روی جوانان، چنین ادعایی را مطرح کردند [۲۲]. بنابراین، تحقیقات بیشتری برای روشن شدن رابطه بین تغییرات ناشی از tACS در شبکه‌های عصبی و تغییرات در اجرای حرکتی، مورد نیاز است.

علاوه‌براین، عدم معنی‌داری تحریک tACS بر هماهنگی دو دستی ممکن است به پیچیدگی تکلیف هماهنگی دو دستی نسبت داده شود [۲۳]. ازآن‌جایی‌که دست غیرغالب دارای سطوح عملکردی پایین‌تری نسبت به دست غالب است، با تحریک قشر آهیانه‌ای در نیمکره غالب، حرکت دست غیرغالب افزایش می‌یابد. وقتی قشر آهیانه‌ای تحریک و فعالیت بیشتری را از طریق تحریک الکتریکی مستقیم مغز نشان می‌دهد، شرکت‌کنندگان به بازیابی منبع اطلاعات تمایل نشان می‌دهند [۲۴]. به‌عنوان یک دلیل می‌توان گفت که افزایش فعالیت در قشر آهیانه‌ای پس از تحریک الکتریکی مستقیم مغز، ممکن است منجر به اثرات معکوس شود که در مقابل در جهت کاهش یادگیری و فعال‌سازی مغز عمل می‌کند. البته این امکان وجود دارد که این اثر معکوس به اندازه کافی قوی نباشد که عملکرد دو دستی را در تکلیف تمرین‌شده تضعیف کند. بااین‌حال، به نظر می‌رسد این اثرات ممکن است به‌عنوان تداخل در تکلیف عمل کنند.

این نتایج با نتایج مطالعه پیکسا و همکاران مطابقت دارد. آن‌ها ادعا می‌کنند که تحریک فراجمجمه‌ای مستقیم مغز بر قشر آهیانه‌ای، اثرات مضری بر تحکیم و انتقال یک تکلیف هماهنگی پیچیده دو دستی دارد [۴۷]. یک علت دیگر هم ممکن است مکانیسم‌های مبهم زیربنایی هماهنگی دو دستی باشد [۲۳]؛ رجوسک و همکاران نشان دادند فعالیت باند بتا نقش مهمی در هماهنگی بین نیمکره‌ای حرکات دارد [۳۵]، حال آنکه برگر و همکارانبیان کردند که هیچ اثری از tACS بر نوسانات مغز در فرکانس بتا پیدا نشد [۲۳] و همچنین ویشنوسکی و همکاران گزارش کرده‌اند که تغییرات β-tACS قشر نخاعی با تأثیر بر فعالیت نوسانی، ارتباطی ندارد [۴۸]. اگرچه هم دامنه پتانسیل‌های برانگیخته حرکتی و هم دامنه نوسانات بتا در قشر حرکتی هر دو با سطح تحریک‌پذیری قشر مغز مرتبط هستند، به نظر نمی‌رسد با یکدیگر ارتباط قوی داشته باشند [۴۹].

از سوی دیگر شواهدی از بیماران با نقص هماهنگی دو دستی نشان می‌دهد که الگوهای دو دستی، به جفت‌های بین نیمکره‌ای متکی هستند [۵۰] که به موجب آن نیمکره غالب، جفت عملکردی بین قشر حرکتی را کنترل می‌کند [۳۶]. هم عدم تقارن نیمکره، هم تعادل بهینه بین نیمکره چپ و راست حیاتی هستند [۵۱]. نیمکره راست نیز نقش مهمی برای جنبه‌های حلقه بسته حرکات وابسته به بازخورد حسی ایفا می‌کند [۵۲] که برای تحقق رفتار هدفمند ضروری است [۵۱]. مطالعات مختلف مسئولیت نیمکره غالب برای هماهنگی دو دستی را برجسته می‌کند [۳۶]. بااین‌حال، اینکه این عامل می‌تواند اثرات فیزیولوژیکی جانبی tACS را بدون تغییر در عملکرد هماهنگی دو دستی توضیح دهد، حدس و گمان است و به تحقیقات بیشتری نیاز است.

محدودیت‌ها

مطالعه حاضر دارای چندین محدودیت بود:

اول اینکه گروه موردپژوهش باتوجه‌به محدودیت‌های کرونایی تنها شامل زنان سالمند سالم بود. ازاین‌رو بررسی اثر tACS بر روی جمعیت‌های مشابه که مهارت‌های حرکتی آن‌ها تمایل به زوال دارد، مانند مردان مسن، بیماران مبتلا به بیماری‌های مغزی و بیمارانی که پس از سکته بهبود می‌یابند، پیشنهاد می‌شود.

دوم، ما نتوانسیم روشن کنیم که آیا نتایج پژوهش، مخصوص فرکانس در باند بتا (β) است یا در سایر باندهای تحریکی نیز همین نتایج مشاهده می‌شود، زیرا ما فقط فرکانس بتا (۲۰ هرتز) را بررسی کردیم.

سومین محدودیت این مطالعه فقدان ابزارهای تفسیری پیچیده مانند تصویربرداری تشدید مغناطیسی کارکردی[12] یا الکتروانسفالوگرافی کمی[13] بود. علاوه‌براین، ممکن است تفاوت در قدرت میدان الکتریکی در هر شرایط تحریک بر اثرات تحریکی تأثیر بگذارد، اما ما در این مطالعه قدرت میدان‌های الکتریکی را با هم مقایسه نکردیم؛ چنین تغییراتی را می‌توان با استفاده از مغناطیس‌نگاری مغزی[14] و شبیه‌سازی میدان الکتریکی برای روشن شدن مکانیسم‌های درگیر، در مطالعات آینده اندازه‌گیری

12. Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)
13. Quantitative ElectroEncephaloGraphy (QEEG)
14. Magnetoencephalography (MEG)

کرد. ازآن‌جایی که تجزیه‌وتحلیل‌ها، تفاوت معنی‌داری بین شرایط β-tACS و شرایط شم نشان ندادند، بنابراین، تحقیقات بیشتری برای روشن شدن رابطه بین تغییرات ناشی از tACS در شبکه‌های عصبی و تغییرات در اجرای حرکتی، مورد نیاز است.

پیشنهادات

زآنجایی‌که از یک تکلیف پیچیده حسیی-حرکتی دو دستی استفاده شد، بررسی‌های بیشتر در سایر تکالیف حرکتی استانداردشده دو دستی (مانند تکالیف دسترسی و یا چنگ زدن دو دستی) توصیه می‌شود. علاوه‌برآن، پیشنهاد می‌شود آثار بلندمدت تمرین تکلیف حرکتی با همراهی **tACS** تا رسیدن به مرحله نخبگی بررسی شود.

در آخر پیشنهاد می‌شود برای مطالعات آینده، فرآیندهای نوروفیزیولوژیکی با استفاده از ابزارهایی مانند **fMRI** یا اسکن **PET** به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شوند؛ زیرا استفاده از این روش‌های مکمل می‌تواند به ارزیابی بهتر تکنیک‌های تحریک مغز و درک مکانیسم‌های پنهان در تکالیف حرکتی کمک کند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، اولین مطالعه‌ای است که اثر β-tACS قشر آهیانه‌ای و ناحیه حرکتی مکمل را بر هماهنگی دو دستی سالمندان مورد بررسی قرار داده است. نتیجه پژوهش حاضر نشان داد که تحریک جریان متناوب فراجمجمه‌ای (tACS) آنلاین قشر آهیانه‌ای و ناحیه حرکتی مکمل بر هماهنگی دو دستی زنان سالمند اثر کوتاه‌مدت ندارد، بنابراین در مطالعات آینده باید اثرات بلندمدت در سایر نواحی قشر مغز با پروتکل های متفاوت، مورد بررسی قرار گیرد. ممکن است tACS در قشر آهیانه‌ای و ناحیه حرکتی مکمل، با تعیین فرکانس تحریک براساس سطح اجرای حرکتی هر فرد به‌جای استفاده از یک فرکانس تحریک خاص برای همه افراد، به ارتقای مؤثرتر اجرا و یادگیری حرکتی دو دستی منجر شود که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی مورد بررسی قرار گیرد.

باتوجه‌به بهبود هماهنگی دو دستی زنان سالمند در هر ۳ وضعیت تحریک (قشر آهیانه‌ای، ناحیه حرکتی مکمل و شم) به‌وسیله تمرینات پوردو پگبورد، به نظر می‌رسد می‌توان از این تمرینات بی‌خطر، کم هزینه و در دسترس به منظور بهبود حرکات ظریف سالمندان چه در منزل و چه در مراکز توان‌بخشی و تمام مراکز نگهداری سالمندان، برای ارتقاء کیفیت زندگی روزمره و حفظ استقلال افراد سالمند بهره برد و از هزینه‌های اضافی اعمال‌شده بر جامعه کاست.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این مطالعه، ابتدا درخصوص اهداف پژوهش و روش اجرا به زنان سالمند، توضیحات لازم داده شد و پس از امضای فرم رضایت‌نامه، سالمندان در مطالعه شرکت کردند. محافظت از اطلاعات شخصی شرکت‌کننده‌ها و اصل رازداری در مطالعه رعایت شد و به سالمندان اطمینان داده شد که می‌توانند در هر مرحله از پژوهش از ادامه همکاری انصراف دهند. تمامی مراحل پژوهش در کمیته اخلاق دانشگاه فردوسی مشهد با کد IR.UM.REC.1400.177 تأیید شده است.

حامی مالی

این پژوهش حاصل رساله دکتری آسیه دهقانی، در رشته رفتار حرکتی از دانشکده علوم ورزشی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمانی‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

پیشنهاد موضوع، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل داده‌ها و نوشتن مقاله: آسیه دهقانی؛ بازنگری، تصحیح طرح و روش پژوهش، نظارت بر گردآوری داده‌ها: همه نویسندگان.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان هیچ تعارض منافعی وجود ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از همه شرکت‌کنندگان برای حمایت و همکاری خود در این مطالعه تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

[1] Brayne C, Miller B. Dementia and aging populations-A global priority for contextualized research and health policy. PLoS Medicine. 2017; 14(3):e1002275. [DOI:10.1371/journal.pmed.1002275] [PMID]

[2] Lin CH, Chou LW, Wei SH, Lieu FK, Chiang SL, Sung WH. Influence of aging on bimanual coordination control. Experimental Gerontology. 2014; 53:40-7. [DOI:10.1016/j.exger.2014.02.005] [PMID]

[3] Abedan Zadeh R, Abdoli B, Farsi AR. [The effect of the sensory information and age on the transition of the relative phase in bimanual coordination pattern (Perian)]. Jundishapur Scientific Medical Journal. 2017; 15(6):619-33. [Link]

[4] Maes C, Gooijers J, Orban de Xivry JJ, Swinnen SP, Boisgontier MP. Two hands, one brain, and aging. Neuroscience & Biobehavioral Reviews. 2017; 75:234-56. [DOI:10.1016/j.neubiorev.2017.01.052] [PMID]

[5] Temprado JJ, Torre MM, Langeard A, Julien-Vintrou M, Devillers-Réolon L, Sleimen-Malkoun R, et al. Intentional switching between bimanual coordination patterns in older adults: Is it mediated by inhibition processes? Frontiers in Aging Neuroscience. 2020; 12:29. [DOI:10.3389/fnagi.2020.00029] [PMID]

[6] Grefkes C, Eickhoff SB, Nowak DA, Dafotakis M, Fink GR. Dynamic intra-and interhemispheric interactions during unilateral and bilateral hand movements assessed with fMRI and DCM. Neuroimage. 2008; 41(4):1382-94. [DOI:10.1016/j.neuroimage.2008.03.048] [PMID]

[7] Toyokura M, Muro I, Komiya T, Obara M. Activation of presupplementary motor area (SMA) and SMA proper during unimanual and bimanual complex sequences: An analysis using functional magnetic resonance imaging. Journal of Neuroimaging. 2002; 12(2):172-8. [DOI:10.1111/j.1552-6569.2002.tb00116.x] [PMID]

[8] Taube W, Mouthon M, Leukel C, Hoogewoud HM, Annoni JM, Keller M. Brain activity during observation and motor imagery of different balance tasks: An fMRI study. Cortex. 2015; 64:102-14. [DOI:10.1016/j.cortex.2014.09.022] [PMID]

[9] Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, Silbersweig D, Ceballos-Baumann AO, Frith CD, et al. Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. Journal of Neurophysiology. 1995; 73(1):373-86. [DOI:10.1152/jn.1995.73.1.373] [PMID]

[10] Serrien DJ, Strens LH, Oliviero A, Brown P. Repetitive transcranial magnetic stimulation of the supplementary motor area (SMA) degrades bimanual movement control in humans. Neuroscience Letters. 2002; 328(2):89-92. [DOI:10.1016/S0304-3940(02)00499-8] [PMID]

[11] Ramnani N, Toni I, Passingham RE, Haggard P. The cerebellum and parietal cortex play a specific role in coordination: A PET study. Neuroimage. 2001; 14(4):899-911. [DOI:10.1006/nimg.2001.0885] [PMID]

[12] Pergolizzi D. The role of posterior parietal cortex in episodic memory retrieval: Transcranial Direct Current Stimulation Studies (tDCS) [PhD dissertation]. New York: City University of New York; 2015. [Link]

[13] Huk AC, Meister ML. Neural correlates and neural computations in posterior parietal cortex during perceptual decision-making. Frontiers in Integrative Neuroscience. 2012; 6:86. [DOI:10.3389/fnint.2012.00086] [PMID]

[14] Mooshagian E, Kaplan J, Zaidel E, Iacoboni M. Fast visuomotor processing of redundant targets: The role of the right temporo-parietal junction. PLoS One. 2008; 3(6):e2348. [DOI:10.1371/journal.pone.0002348] [PMID]

[15] Azarpaikan A, Torbati H, Sohrabi M, Boostani R, Ghoshuni M. The effect of parietal and cerebellar transcranial direct current stimulation on bimanual coordinated adaptive motor learning. Journal of Psychophysiology. 2019. [Link]

[16] Yeghaneh B, Einalia J, Charaghi M, Eskandari Shahraki Z. [Evaluation of quality of life and vulnerability components of elderly women in rural areas case study: Zanjan city (Persian)]. Journal of Gerontology. 2019; 3(4):67-77. [Link]

[17] Farokhnezhad Afshar P, Malakouti SK, Rashedi V, Ajrikhameslou M. [Relationship between place attachment and social functioning in the elderly (Persian)]. Iranian Journal of Psychiatry and Clinical Psychology. 2021; 27(2):194-203. [DOI:10.32598/ijpcp.27.2.2822.2]

[18] Akbari Kamrani AA, Azadi F, Foroughan M, Siadat S, Kaldi AR. [Characteristics of falls among institutionalized elderly people (Persian)]. Salmand: Iranian Journal of Ageing. 2007; 1(2):101-5. [Link]

[19] Fathi-Rezaie Z, Aslankhani MA, Farsi A, Abdoli B, Zamani-Sani SH. [A comparison of three functional tests of balance in identifying fallers from non-fallers in elderly people (Persian)]. Knowledge & Health. 2010; 4(4):22-7. [Link]

[20] Suzuki M, Tanaka S, Gomez-Tames J, Okabe T, Cho K, Iso N, et al. Nonequivalent after-effects of alternating current stimulation on motor cortex oscillation and inhibition: Simulation and experimental study. Brain Sciences. 2022; 12(2):195. [DOI:10.3390/brainsci12020195] [PMID]

[21] Helfrich RF, Schneider TR, Rach S, Trautmann-Lengsfeld SA, Engel AK, Herrmann CS. Entrainment of brain oscillations by transcranial alternating current stimulation. Current Biology. 2014; 24(3):333-9. [DOI:10.1016/j.cub.2013.12.041] [PMID]

[22] Miyaguchi S, Inukai Y, Takahashi R, Miyashita M, Matsumoto Y, Otsuru N, et al. Effects of stimulating the supplementary motor area with a transcranial alternating current for bimanual movement performance. Behavioural Brain Research. 2020; 393:112801. [DOI:10.1016/j.bbr.2020.112801] [PMID]

[23] Berger A, Pixa NH, Steinberg F, Doppelmayr M. Brain oscillatory and hemodynamic activity in a bimanual coordination task following transcranial alternating current stimulation (tACS): A combined EEG-fNIRS study. Frontiers in Behavioral Neuroscience. 2018; 12:67. [DOI:10.3389/fnbeh.2018.00067] [PMID]

[24] Azarpaikan A, Taherii Torbati H, Sohrabi M, Boostani R, Ghoshuni M. Power spectral parameter variations after transcranial direct current stimulation in a bimanual coordination task. Adaptive Behavior. 2021; 29(1):25-38. [DOI:10.1177/1059712319879971]

[25] Miyaguchi S, Inukai Y, Mitsumoto S, Otsuru N, Onishi H. Gamma-transcranial alternating current stimulation on the cerebellum and supplementary motor area improves bimanual motor skill. Behavioural Brain Research. 2022; 424:113805. [DOI:10.1016/j.bbr.2022.113805] [PMID]

[26] Sugata H, Yagi K, Yazawa S, Nagase Y, Tsuruta K, Ikeda T, et al. Modulation of motor learning capacity by transcranial alternating current stimulation. Neuroscience. 2018; 391:131-9. [DOI:10.1016/j.neuroscience.2018.09.013] [PMID]

[27] Miyaguchi S, Otsuru N, Kojima S, Saito K, Inukai Y, Masaki M, et al. Transcranial alternating current stimulation with gamma oscillations over the primary motor cortex and cerebellar hemisphere improved visuomotor performance. Frontiers in Behavioral Neuroscience. 2018; 12:132. [DOI:10.3389/fnbeh.2018.00132] [PMID]

[28] Hu K, Wan R, Liu Y, Niu M, Guo J, Guo F. Effects of transcranial alternating current stimulation on motor performance and motor learning for healthy individuals: A systematic review and meta-analysis. Frontiers in Physiology. 2022; 13:1064584. [PMID]

[29] Alipour A, Agah Haris M. [Reliability and validity of Edinburg Handedness Inventory in Iran (Persian)]. Journal of Modern Psychological Researches. 2007; 7(26):110-31. [Link]

[30] Sikaroodi H, Majidi A, Samadi S, Shirzad H, Aghdam H, Azimi Kia A, et al. [Evaluating reliability of the montreal cognitive assessment test and its agreement with neurologist diagnosed among patients with cognitive complaints (Persian)]. Journal of Police Medicine. 2012; 1(1):11-7. [Link]

[31] Arastoo AA, Zahednejad S, Parsaei S, Alboghebish S, Ataei N, Ameriasl H. [The effect of direct current stimulation in left dorsolateral prefrontal cortex on working memory in veterans and disabled athletes (Persian)]. Daneshvar Medicine. 2020; 26(6):25-32. [Link]

[32] Green PE, Ridding MC, Hill KD, Semmler JG, Drummond PD, Vallence AM. Supplementary motor area-primary motor cortex facilitation in younger but not older adults. Neurobiology of Aging. 2018; 64:85-91. [DOI:10.1016/j.neurobiolaging.2017.12.016] [PMID]

[33] Manji A, Amimoto K, Matsuda T, Wada Y, Inaba A, Ko S. Effects of transcranial direct current stimulation over the supplementary motor area body weight-supported treadmill gait training in hemiparetic patients after stroke. Neuroscience Letters. 2018; 662:302-5. [DOI:10.1016/j.neulet.2017.10.049] [PMID]

[34] Mehdizadeh H, Taghizadeh G, Ashayeri HA. [Test-retest reliability of the Purdue Pegboard test in drug on-phase for patients with Parkinson's disease (Persian)]. Koomesh. 2010; 11(3):189-97. [Link]

[35] Rjosk V, Kaminski E, Hoff M, Gundlach C, Villringer A, Sehm B, et al. Transcranial alternating current stimulation at beta frequency: Lack of immediate effects on excitation and interhemispheric inhibition of the human motor cortex. Frontiers in Human Neuroscience. 2016; 10:560. [DOI:10.3389/fnhum.2016.00560] [PMID]

[36] Serrien DJ, Cassidy MJ, Brown P. The importance of the dominant hemisphere in the organization of bimanual movements. Human Brain Mapping. 2003; 18(4):296-305. [DOI:10.1002/hbm.10086] [PMID]

[37] Davis NJ, Tomlinson SP, Morgan HM. The role of Beta-frequency neural oscillations in motor control. Journal of Neuroscience. 2012; 32(2):403-4. [DOI:10.1523/JNEUROSCI.5106-11.2012]

[38] Rumpf JJ, Barbu A, Fricke C, Wegscheider M, Classen J. Posttraining Alpha transcranial alternating current stimulation impairs motor consolidation in elderly people. Neural Plasticity. 2019; 2019:2689790. [DOI:10.1155/2019/2689790] [PMID]

[39] Choe J, Coffman BA, Bergstedt DT, Ziegler MD, Phillips ME. Transcranial direct current stimulation modulates neuronal activity and learning in pilot training. Frontiers in Human Neuroscience. 2016; 10:34. [DOI:10.3389/fnhum.2016.00034] [PMID]

[40] Heise KF, Monteiro T, Gijbels V, Leunissen I, Mantni D, Swinnen S. Modulation of interhemispheric connectivity by alternating current stimulation and its impact on transitions between bimanual movements of varying stability. Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation. 2017; 10(2):452. [Link]

[41] Krause V, Meier A, Dinkelbach L, Pollok B. Beta band transcranial alternating (tACS) and direct current stimulation (tDCS) applied after initial learning facilitate retrieval of a motor sequence. Frontiers in Behavioral Neuroscience. 2016; 10:4. [DOI:10.3389/fnbeh.2016.00004] [PMID]

[42] Pogosyan A, Gaynor LD, Eusebio A, Brown P. Boosting cortical activity at beta-band frequencies slows movement in humans. Current Biology. 2009; 19(19):1637-41. [DOI:10.1016/j.cub.2009.07.074] [PMID]

[43] Pollok B, Boysen AC, Krause V. The effect of transcranial alternating current stimulation (tACS) at alpha and beta frequency on motor learning. Behavioural Brain Research. 2015; 293:234-40. [DOI:10.1016/j.bbr.2015.07.049] [PMID]

[44] Helfrich RF, Knepper H, Nolte G, Strüber D, Rach S, Herrmann CS, et al. Selective modulation of interhemispheric functional connectivity by HD-tACS shapes perception. PLoS Biology. 2014; 12(12):e1002031. [DOI:10.1371/journal.pbio.1002031] [PMID]

[45] Kasten FH, Dowsett J, Herrmann CS. Sustained aftereffect of α-tACS lasts up to 70 min after stimulation. Frontiers in Human Neuroscience. 2016; 10:245. [DOI:10.3389/fnhum.2016.00245] [PMID]

[46] Veniero D, Vossen A, Gross J, Thut G. Lasting EEG/MEG aftereffects of rhythmic transcranial brain stimulation: Level of control over oscillatory network activity. Frontiers in Cellular Neuroscience. 2015; 9:477. [DOI:10.3389/fncel.2015.00477] [PMID]

[47] Pixa NH, Berger A, Steinberg F, Doppelmayr M. Parietal, but not motor cortex, HD-atDCS deteriorates learning transfer of a complex bimanual coordination task. Journal of Cognitive Enhancement. 2019; 3:111-23. [DOI:10.1007/s41465-018-0088-x]

[48] Wischnewski M, Engelhardt M, Salehinejad MA, Schutter DJLG, Kuo MF, Nitsche MA. NMDA receptor-mediated motor cortex plasticity after 20 Hz transcranial alternating current stimulation. Cerebral Cortex. 2019; 29(7):2924-31. [DOI:10.1093/cercor/bhy160] [PMID]

[49] Mäki H, Ilmoniemi RJ. EEG oscillations and magnetically evoked motor potentials reflect motor system excitability in overlapping neuronal populations. Clinical Neurophysiology. 2010; 121(4):492-501. [DOI:10.1016/j.clinph.2009.11.078] [PMID]

[50] Kennerley SW, Diedrichsen J, Hazeltine E, Semjen A, Ivry RB. Callosotomy patients exhibit temporal uncoupling during continuous bimanual movements. Nature Neuroscience. 2002; 5(4):376-81. [DOI:10.1038/nn822] [PMID]

[51] Serrien DJ, Ivry RB, Swinnen SP. Dynamics of hemispheric specialization and integration in the context of motor control. Nature Reviews Neuroscience. 2006; 7(2):160-6. [DOI:10.1038/nrn1849] [PMID]

[52] Haaland KY, Harrington DL. Hemispheric control of the initial and corrective components of aiming movements. Neuropsychologia. 1989; 27(7):961-9. [DOI:10.1016/0028-3932(89)90071-7] [PMID]

This Page Intentionally Left Blank