



Original Article

The Effect of Transcranial Direct Current Stimulation and Music-Accompanied Training on Learning a Bimanual Coordination Task

Najes Naser¹ , Mohammadreza Doustan¹ , Esmael Saemi¹ 

1. Faculty of Sport Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Received: 29/01/2025 Revised: 21/05/2025 Accepted: 05/06/2025

Abstract

Objective: Transcranial direct current stimulation (tDCS) is one of the newest methods of influencing the nervous system to improve motor performance, including coordination. The aim of the present study is to investigate the effect of tDCS and music combined with practice on learning bimanual coordination movement.

Methods: The present study was a quasi-experimental study with a pretest, posttest, and retention design. 48 students (mean age 22.32) were randomly divided into four groups (sham tDCS with practice, practice with music, real tDCS with practice, and real tDCS with music and practice) using the available method. Participants performed the bimanual circle drawing task during four stages: pre-test, intervention (4 sessions, each session consisting of 4 blocks of 10 trials), post-test, and retention after 48 hours. Radial drawing error and hand movement speed were measured. For statistical analyses, a combined analysis of variance was performed using SPSS at a significance level of 0.05.

Findings: The results showed that practice had a significant effect on learning two-handed takif in all four groups. Also, the training with real tDCS, training with music, and training with real tDCS, training with music groups had greater progress in reducing radial error than the training group without music and stimulation; but there was no difference between the groups in the speed component.

Conclusion: Considering the effect of music and real stimulation, it is suggested to use these two methods in learning these tasks. Also, considering the greater learning of musical groups, it seems that music has a greater effect than stimulation. However, using these two methods simultaneously does not have much effect.

Keywords: Music, Bimanual Task, Motor Cortex, Radial Error, Speed.

* Corresponding Author: Mohammadreza Doustan, E-mail: m.doustan@scu.ac.ir

How to Cite: Naser, N., Doustan, M., Saemi, E. The effect of transcranial direct current stimulation and music-accompanied training on learning a bimanual coordination task. *Sports Psychology*, 2025; 17(2): 1-24. In Persian.



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract Background and Purpose

bimanual coordination is controlled by several neural areas or a very large unifying area that functions to correctly execute bimanual movements (8). According to this approach, various brain areas, including the primary motor area (PMA), premotor cortex (PMC), and supplementary motor area (SMA), are associated with bimanual coordination (9, 10). It has been shown that most of these areas are involved in listening to music (11, 19, 20). Music seems to affect the performance of motor tasks through the coupling of sensorimotor processes in the brain (17). Recently, in addition to training, new noninvasive brain stimulation methods have been used for motor learning. Transcranial direct current stimulation (tDCS) is a suitable method for modulating cortical excitability (24, 25, 26) and also for reorganizing neural plasticity (27, 28). Very few studies have investigated the simultaneous effect of music and tDCS on motor performance and learning; if the combination of these two factors simultaneously has a dual effect on motor coordination, it can be used in motor learning, especially in sports, rehabilitation, military environments, musicianship, etc. The aim of the present study is to investigate the effect of tDCS and music combined with training on learning bimanual coordination movement.

Materials and Methods:

The present study was a quasi-experimental study with a pretest, posttest, and retention design. The instruments used included an informed consent form, a stopwatch, a digital metronome, a music player and headset, a Dell laptop, and a bimanual coordination measurement tool. 48 students (mean age 22.32) were randomly divided into four groups (sham tDCS with practice, practice with music, real tDCS with practice, and real tDCS with music and practice) using a convenience method. Participants performed the bimanual

circle drawing task during four stages: pretest, intervention (4 sessions, each session consisting of 4 blocks of 10 trials), posttest, and retention after 48 hours. Radial drawing error and hand movement speed were measured in the tests. The combined analysis of variance statistical method and ANCOVA was used using SPSS at a significance level of 0.05.

Results:

The results showed that practice had a significant effect on learning the bimanual task in all four groups. Also, the groups of training with real tDCS, training with music, and training with real tDCS, training with music had greater progress in reducing radial error than the group of training without music and stimulation ($p < 0.05$); but there was no difference between the groups in the speed component ($p \leq 0.05$).

Discussion:

In general, the results of the present study indicate a significant effect of training on reducing radial error in the continuous circle drawing bimanual coordination task. Also, considering the comparisons between groups and their effect sizes, the findings showed that the use of tDCS and music during training has a significant effect on motor learning. So that tDCS and music had a significant effect on reducing the radial error component and the participants performed the bimanual task with fewer errors and learned it well. Also, by examining the results obtained, it can be said that the simultaneous use of tDCS and music does not have a special advantage over using each of them separately. Considering the effect of music and real stimulation, it is suggested to use these two methods in learning coordination tasks. Also, considering the further progress of musical groups, it seems that music has a greater effect than tDCS. However, using these two methods simultaneously does not have much effect.

Funding

This study received no funding from public, commercial, or non-profit organizations.

Authors' Contributions

All authors participated in designing, implementing, and writing all parts of the present study.

Conflicts of Interest

The authors declared no conflict of interest. This study received no funding from public, commercial, or nonprofit organizations.

Authors' Contributions

All authors have participated in designing, implementing and writing all parts of the present study.

Conflicts of Interest

The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgement

We sincerely thank all the students who collaborated in this research.



نوع مقاله: پژوهشی

تأثیر تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای و تمرین همراه با موسیقی بر یادگیری تکلیف

هماهنگی دودستی

نرجس ناصر^۱، محمدرضا دوستان^{۱*}، اسماعیل صائمی^۱

۱. دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱، اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱، پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

چکیده

مقدمه: تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان مستقیم (tDCS) یکی از روش‌های اثرگذاری بر سیستم عصبی برای بهبود عملکرد حرکتی است. هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر tDCS و موسیقی همراه با تمرین بر یادگیری حرکت هماهنگی دودستی است. **روش‌شناسی:** پژوهش حاضر از نوع نیمه‌تجربی با طرح پیش‌آزمون، پس‌آزمون و یادداری مبتنی بود. ۴۸ دانشجو (میانگین سنی ۲۲/۳۲) به‌روش در دسترس به‌صورت تصادفی در چهار گروه (tDCS ساختگی همراه با تمرین، تمرین همراه با موسیقی، tDCS واقعی همراه با تمرین و tDCS واقعی همراه با موسیقی و تمرین) تقسیم شدند. شرکت‌کنندگان تکلیف دودستی ترسیم دایره را در طی چهار مرحله پیش‌آزمون، مداخله (۴ جلسه، هر جلسه ۴ بلوک ۱۰ کوششی)، پس‌آزمون و یادداری پس از ۴۸ ساعت انجام داده‌اند. خطای شعاعی ترسیم و سرعت حرکت دست در آزمون‌ها اندازه‌گیری شد. روش آماری تحلیل واریانس مرکب با استفاده از SPSS در سطح معناداری ۰/۰۵ استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد تمرین بر یادگیری تکلیف دودستی در هر چهار گروه تأثیر معناداری دارد. همچنین گروه‌های تمرین همراه با tDCS واقعی، تمرین همراه با موسیقی و تمرین همراه با tDCS واقعی، تمرین همراه با موسیقی نسبت به گروه تمرین بدون موسیقی و تحریک پیشرفت بیشتری در کاهش خطای شعاعی داشتند؛ اما در مؤلفه سرعت تفاوتی بین گروه‌ها نبود. **نتیجه‌گیری:** با توجه به تأثیر موسیقی و تحریک واقعی، پیشنهاد می‌شود در یادگیری تکلیف هماهنگی از این دو روش استفاده شود. همچنین با توجه به پیشرفت بیشتر گروه‌های موسیقی، به‌نظر می‌رسد موسیقی تأثیر بیشتری نسبت به تحریک دارد. با این وجود، استفاده همزمان از این دو روش تأثیر زیادی ندارد.

واژگان کلیدی: موسیقی، حرکت دودستی، قشر حرکتی، خطای شعاعی، سرعت.

* Corresponding Author: Mohammadreza Doustan, E-mail: m.doustan@scu.ac.ir

How to Cite: Naser, N., Doustan, M., Saemi, E. The effect of transcranial direct current stimulation and music-accompanied training on learning a bimanual coordination task. *Sports Psycholav*. 2025; 17(2): 1-24. In Persian.



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مقدمه

هماهنگی دودستی یا توانایی استفاده از هر دو دست به صورت هماهنگ، یک مهارت حرکتی ضروری است که در طیف وسیعی از تکالیف نقش مهمی ایفا می‌کند (۱). نگاتوا و همکاران (۲۰۲۲)، هماهنگی دودستی را هماهنگی مشاهده شده بین حرکات دست چپ و راست در انجام تکالیف حرکتی تعریف می‌کنند (۲). هماهنگی دودستی حتی در تکالیف دشوار و نامتقارن را می‌توان با تمرکز توجه و تمرین تعدیل کرد (۳، ۴، ۵، ۶).

مطالعه مکانیزم‌های زیربنایی عصب‌شناختی حرکات دودستی نقش مهمی در دانش زیربنایی این حرکات دارد (۷). رویکرد علوم اعصاب بیان می‌کند که هماهنگی دودستی توسط چندین ناحیه عصبی یا یک ناحیه خیلی بزرگ متحدکننده کنترل می‌شود که برای اجرای درست حرکات دودستی عمل می‌کند (۸). بر اساس این رویکرد، نواحی مختلف مغزی، از جمله ناحیه حرکتی اولیه^۲ (PMA)، قشر پیش‌حرکتی^۳ (PMC)، ناحیه مکمل حرکتی^۴ (SMA) با هماهنگی دودستی مرتبط هستند (۹، ۱۰). اخیراً لی^۵ و همکاران (۲۰۲۳) به این نتیجه رسیدند که هماهنگی دودستی، در نواحی پیش‌حرکتی (قشر پیش‌حرکتی، ناحیه مکمل حرکتی) کنترل می‌شود. به نظر می‌رسد هماهنگی و یکپارچگی ادراکی اعمال حرکتی دودستی، از شبکه گسترده و پویایی از نواحی مغز ناشی می‌شود (۸، ۱۲). همچنین کارابانوف^۶ و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهش‌های خود نشان دادند که هنگام انجام حرکات دودستی دایره‌ای و مداوم، در مقایسه با تکالیف تک‌دستی، ناحیه مکمل حرکتی، ناحیه سینگولیت، قشر پیش‌حرکتی پشتی و مخچه حرکتی فعال می‌شوند (۱۳).

در برخی پژوهش‌ها، توانایی انسان برای هماهنگ‌سازی حرکات خود با محرک‌های بیرونی مورد مطالعه قرار گرفته است. نشان داده شده است که محرک‌های شنیداری بیرونی مداوم و پیوسته بر هماهنگی حرکتی تأثیر دارند (۱۴). موسیقی نوعی صوت ساختارمند با محتوای حسی و شناختی است که در الگویی از زمان و فضا ایجاد می‌شود (۱۵) که می‌توان از آن به‌عنوان یک محرک انگیزشی و برای هماهنگ کردن حرکت استفاده کرد (۱۶). جانتا^۷ و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که افراد بر اساس موسیقی هم با انگشت دست ضربه می‌زنند، و هم سایر اعضای بدن خود مانند پاها و سر را حرکت می‌دهند (۱۶). مارتینز^۸ و همکاران (۲۰۱۸) و حسین‌زاده و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که تمرین همراه با موسیقی نسبت به تمرین تنها، باعث یادگیری و اجرای حرکت هماهنگی دودستی، به‌ویژه باعث بهبود سرعت اجرای حرکت می‌شود (۱۷، ۱۸).

نشان داده شده است که بخش‌های مغزی قشر حرکتی اولیه، ناحیه مکمل حرکتی، قشر پیش‌حرکتی و عقده‌های قاعده‌ای، در گوش دادن به موسیقی درگیر هستند (۱۹، ۲۰). وو^۹ و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که این نواحی در حرکات هماهنگی دودستی نیز فعال هستند (۱۱)؛ به نظر می‌رسد موسیقی از طریق جفت‌شدن فرآیندهای حسی- حرکتی در مغز، بر انجام تکالیف حرکتی تأثیر می‌گذارد (۱۷). همچنین موسیقی کنترل حرکتی و سرعت ترسیم دودستی دایره را بهبود می‌دهد (۲۱). حسین‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان دادند که موسیقی همراه با تمرین نسبت به تمرین تنها اثر بیشتری در یادگیری الگوهای زمانی و فضایی هماهنگی دودستی دارد (۱۸). با این وجود، ویستی^{۱۰} (۲۰۱۰) نشان داد، اگر تکلیف انجام شده برای هر دو دست مشابه باشد (۲۲)،

غیرهم‌فاز و برعکس مورد بررسی قرار دادند (۳۷). آنها ثابت و سازگاری بهبود یافته و همچنین انتقال خودبه‌خودی از الگوی غیرهم‌فاز به الگوی با ثبات‌تر هم‌فاز را در پی tDCS آندال گزارش کردند، در حالی که tDCS کاتدی بر عملکرد تکلیف تأثیری نداشت. مطابق با این مشاهدات، tDCS آندال SMA، با تعویض‌های سریع‌تر عمدی از حرکات غیرهم‌فاز به هم‌فاز مرتبط است (۳۸). این یافته‌ها نشان می‌دهند که tDCS یک روش مناسب برای مدولاسیون گذرای این فرآیند است. کایرتون و کیلینسکی^۵ (۲۰۱۷) بهبود عملکرد حرکتی دودستی متقارن پس از تمرین دست چپ همراه با استفاده از tDCS آندال روی M1 دگرسوی مغز را در کودکان مدرسه سالم گزارش کردند (۳۹). جالب توجه است، این اثر زمانی که tDCS کاتدی به M1 همسو (C3) اعمال شد نیز وجود داشت. با این حال تکلیف نامتقارن دودستی تحت تأثیر هیچ یک از تحریکات قرار نگرفت. پس از یک فاصله زمانی ۶ هفته، بهبود عملکرد تکلیف ثابت ماند. پیکسائو و همکاران (۲۰۱۷) الف و ب اثر tDCS بر M1 دوطرفه را پس از یک دوره تمرین تکلیف دودستی ۳ روزه با تحریک همزمان، افزایش عملکرد تجمعی در پس‌آزمون و یادداری پس از یک هفته، در شرکت‌کنندگانی که tDCS آندال دریافت می‌کردند در مقایسه با گروه شم مشاهده شد و بهبود بیشتری برای عملکرد دست راست مشاهده شد. باز هم تکلیف پیچیده‌تر دودستی نامتقارن تحت تأثیر tDCS قرار نگرفت (۴۰، ۴۱). در دو مطالعه فورویا^۶ (۲۰۱۳ و ۲۰۱۴)، نشان داد که اثرات tDCS بر عملکرد حرکتی دودستی به سطح تخصص افراد بستگی دارد (۴۲، ۴۳). به طوری که پیانیست‌های متخصص بسیار آموزش دیده از tDCS آندال دوطرفه در یک تکلیف تایپ انگشتی دودستی بهره‌ای نبردند؛ ولی پیانیست‌هایی که آموزش پیانو را در سنین بالا شروع

شرکت‌کنندگان پس از دریافت آموزش موسیقی، تکلیف را با سرعت و دقت بیشتری انجام می‌دهند، ولی اگر تکلیف برای دو دست متفاوت باشد، بدتر عمل می‌کنند. کالابرو و فیورنت^۱ (۲۰۲۳) نیز بیان کردند که نواحی مشترکی در مغز در پی گوش دادن به موسیقی و هماهنگی حرکتی فعال می‌شوند (۲۳). بنابراین، تمرین و موسیقی از جمله عواملی هستند که می‌تواند روی هماهنگی دودستی موثر باشد.

اخیراً علاوه بر تمرین، روش‌های جدید تحریک غیرتهاجمی مغزی برای یادگیری حرکتی مورد استفاده قرار گرفته است. تکنیک تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای مغز^{۱۲} (tDCS) یک روش مناسب برای تعدیل تحریک‌پذیری قشر مغز (۲۴، ۲۵، ۲۶) و همچنین سازماندهی مجدد قالب‌پذیری عصبی^۳ (۲۷، ۲۸) است. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که tDCS می‌تواند از طریق تسهیل تحریک‌پذیری قشر مغز برای بهبود عملکرد و یادگیری حرکتی در افراد سالم (۲۵، ۲۶، ۲۹) و در بیمارانی که از اختلالات عصبی رنج می‌برند (۳۰) و حتی سالمندان (۳۱) استفاده شود. همچنین استفاده از tDCS، بهبود یادگیری مهارت حرکتی، حافظه کاری (۳۲)، زمان واکنش (۲۶)، قدرت عضلانی و استقامت (۳۳) شود.

اثرات tDCS بر عملکرد حرکتی تقریباً به‌طور انحصاری توسط مطالعاتی که از تکالیف تک‌دستی استفاده می‌کنند، اثبات شده است (۲۶، ۳۴). با این حال، به‌خوبی شناخته شده است که در انواع زیادی از فعالیت‌های روزانه، حرکت همزمان هر دو دست برای انجام اعمال مورد نیاز است. از آنجایی که ناحیه حرکتی تکمیلی (SMA) نقش محوری در چنین تکالیفی ایفا می‌کند (۳۵، ۳۶). کارتر^۴ و همکاران (۲۰۱۵) اثرات tDCS اعمال شده بر روی SMA را بر روی ثبات، سازگاری و انتقال حرکات دودستی ساعد از حرکات هم‌فاز به

بهبود بیشتری در مولفه‌های سرعت و خطای شعاعی حرکت دودستی متقارن می‌شود؟

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف از نوع کاربردی و از لحاظ شیوه از نوع نیمه تجربی بود.

شرکت‌کنندگان

شرکت‌کنندگان این پژوهش شامل ۴۸ دانشجوی (۲۴ نفر زن و ۲۴ مرد) راست دست مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز بودند (میانگین سنی ۲۲/۸۵ سال)، که در چهار گروه، تمرین بدون موسیقی با tDCS ساختگی (شم)، تمرین همراه موسیقی با tDCS ساختگی (موسیقی)، تمرین بدون موسیقی و tDCS واقعی (تحریک)، تمرین همراه با موسیقی و tDCS واقعی (موسیقی و تحریک) قرار گرفتند. از همه شرکت‌کنندگان پیش از آغاز کار، پرسش‌هایی درباره 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 هرکدام از معیارهای ورود را نداشتند، از پژوهش کنار گذاشته شدند. سپس فرم رضایت آگاهانه کتبی و پرسشنامه دست برتری ادینبورگ را تکمیل کردند (۴۷). همه مراحل پژوهش با تأیید کمیته اخلاق دانشگاه و مطابق با اعلامیه هلسینکی انجمن جهانی پزشکی (با کد اخلاق EE/1401.2.24.221951/scu.ac.ir) انجام شد.

ابزارهای پژوهش

برگه رضایت آگاهانه شرکت در پژوهش

پرسشنامه دست برتری ادینبورگ: به منظور تعیین دست برتر، شرکت‌کنندگان پرسشنامه دست برتری ادینبورگ را پر کردند.

کرونومتر: برای زمان‌بندی تست از کرونومتر استفاده شد.

مترونوم دیجیتال: برای ثبت زمان آزمون و همچنین جهت بازخورد شنوایی و تنظیم حرکت ریتمیک دست از مترونوم استفاده شد.

کرده بودند بهبود یافته بودند. همچنین داوطلبانی که در موسیقی آموزش ندیده بودند (تازه‌کارها) به طور قابل توجهی عملکرد دودستی را پس از tDCS بهبود دادند. دهقانی و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که اعمال tACS بر SMA به‌عنوان یک عامل تعدیل‌کننده برای افزایش هماهنگی دودستی در سالمندان مفید است (۴۴).

با این وجود، مطالعاتی نیز نتوانسته‌اند شواهدی مبنی بر اثرات قابل توجه تحریک بر عملکرد دودستی ارائه دهند. مک‌کمبریج^۸ و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که tDCS دوطرفه آند روی M1 راست و کاتد روی M1 چپ بر عملکرد ردیابی دایره‌ای دودستی تأثیر ندارد (۴۵). وانکلیف^۹ و همکاران (۲۰۱۶) نیز نشان دادند که tDCS آندال اعمال شده بر روی M1 چپ یا قشر پیش‌پیشانی خلفی-جانبی چپ (DLPFC) در طول تمرین تکلیف ردیابی دودستی پیچیده تأثیر چندانی ندارد (۴۶). به طور کلی به نظر می‌رسد که tDCS بر تکالیف ساده و متقارن دودستی تأثیر دارد ولی تکالیف دودستی پیچیده‌تر تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد (۳۵).

پژوهش‌های بسیار اندکی به بررسی اثر همزمان موسیقی و tDCS بر اجرا و یادگیری حرکتی پرداخته‌اند؛ اگر ترکیب این دو عامل به صورت همزمان اثر مضاعفی بر هماهنگی حرکتی داشته باشد، می‌توان در یادگیری حرکتی به‌ویژه در ورزش، توان‌بخشی، محیط‌های نظامی، نوازندگی و... از آن استفاده کرد. با توجه به اینکه پژوهش‌های اندکی اثر ترکیبی موسیقی همراه با تحریک مغزی به‌ویژه بر هماهنگی دودستی انجام شده است، ما در پژوهش حاضر در پی پاسخ به این پرسش هستیم که آیا برنامه تمرینی همراه با موسیقی و tDCS بر اجرا و یادگیری تکلیف هماهنگی دودستی ترسیم دایره تأثیر دارد؟ با توجه به اثرات مفید tDCS و موسیقی به‌طور جداگانه بر بهبود تکلیف هماهنگی دودستی در پژوهش‌های پیشین، آیا ترکیب این دو روش با تمرین، باعث

پشتیبانی از سیستم عامل‌های ویندوز ۷، ویندوز ۸، ویندوز ۱۰، ویندوز ایکس‌پی و ویندوز ویستا ۳ را دارا است. دو قلم نوری ایکس 608 آی^{۲۴} با برند جنیوس و با ابعاد ۵۲۸ × ۴۵۰ × ۱۷۵ میلی‌متر و نوع اتصال بی‌سیم در پژوهش حاضر استفاده شد. میزان حساسیت فشار قلم ۱۰۲۴ سطح و نوع باتری مورد استفاده آن گیگا بود. این ابزار (شکل ۱) برای اندازه‌گیری سرعت و دقت آزمودنی به کار می‌رود و زمان تخمین سرعت را با دقت ۰/۰۱ ثانیه اندازه‌گیری می‌کند.

دستگاه تحریک مستقیم الکتریکی *فراجمه‌ای (tDCS)*: برای اعمال تحریک مغزی در این مطالعه از یک دستگاه تحریک مستقیم الکتریکی *فراجمه‌ای* با دو کانال مجزا مدل *Neurostim* تولید شده توسط شرکت مدیناه طب گستر و موسسه علوم شناختی سینا استفاده شد. این ابزار توسط چندین پژوهشگر در داخل کشور مورد استفاده قرار گرفته است (۲۶، ۴۹، ۵۰). هر کانال این دستگاه را می‌توان به‌طور مستقل از یکدیگر تنظیم کرد تا انواع مختلف تحریک از جمله قدرت جریان، زمان‌بندی و فرکانس اعمال شود. شدت جریان خروجی این دستگاه از ۰/۱ تا ۲ و تا ۲۰۰ هرتز قابل تنظیم است، فرکانس موج خروجی و مدت زمان تحریک می‌تواند به ۴۵ دقیقه برسد و همچنین دستگاه دارای نمایشگر مقاومت الکتروود برای جلوگیری از آسیب می‌باشد. ابعاد الکتروودها ۴×۴ سانتی‌متر بود و الکتروودها در یک اسفنج آغشته به محلول کلرید سدیم ۹ درصد برای افزایش رسانایی جریان و جلوگیری از تجمع گرما قرار داده شدند.

مترونوم ابزاری است که ضربات پی‌درپی و یکنواختی را تولید می‌کند. این ضربات، به آزمودنی‌ها در نگه‌داشتن ریتم حرکت کمک می‌کند و با یکای ضرب در دقیقه (BPM) سنجیده شدند.

دستگاه پخش‌کننده موسیقی^{۱۷} و هدست: دستگاه پخش‌کننده موسیقی و هدست برای انتقال صدای موسیقی به گوش شرکت‌کنندگان؛ نوع موسیقی ساز گیتار براسکا از اوتمار لیبرت با ضرب‌آهنگ ۹۰ ضرب در دقیقه بود.

لپ‌تاپ مدل Dell دو دستگاه لپ‌تاپ *Dell* با صفحه نمایش ۱۵/۶ اینچی با اجرای برنامه‌های کامپیوتری (نرم‌افزاری) و دو قلم نور و دو پورت USB به هم متصل هستند.

ابزار سنجش هماهنگی دودستی

نرم‌افزار بررسی هماهنگی دودستی: در این پژوهش، از نرم‌افزار هماهنگی دودستی استفاده شده است. روایی این نرم‌افزار که دوستان (۱۳۹۵) در کار خود از آن استفاده کرده‌اند، و همچنین طراحی نرم‌افزار هماهنگی دودستی برای رسم دایره، مشابه کار تحقیقی ونگلو^(۲۰۰۶) می‌باشد (۴۸). ارزیابی هماهنگی دودستی اینگونه طراحی شده که آزمونگر قادر است که قطر داخلی و خارجی دایره را در ناحیه قابل قبول و موردنظر و باتوجه به ابعاد لپ‌تاپ تغییر دهد. در نسخه اصلاح شده نرم‌افزار نقاط قابل قبول و غیرقابل قبول را مشخص و با استفاده از برنامه رقیمی کننده میزان انحراف دواير را از الگوی موردنظر، میزان خطای شعاعی، سرعت، شتاب و مسافت طی شده را به‌صورت عددی محاسبه می‌کند. پایایی نرم‌افزار ترسیم دایره در پژوهش دوستان (۱۳۹۵) با استفاده از روش آزمون- بازآزمون ۰/۹۲ و در پژوهش ما برای خطای شعاعی و سرعت به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۷۸ بود.

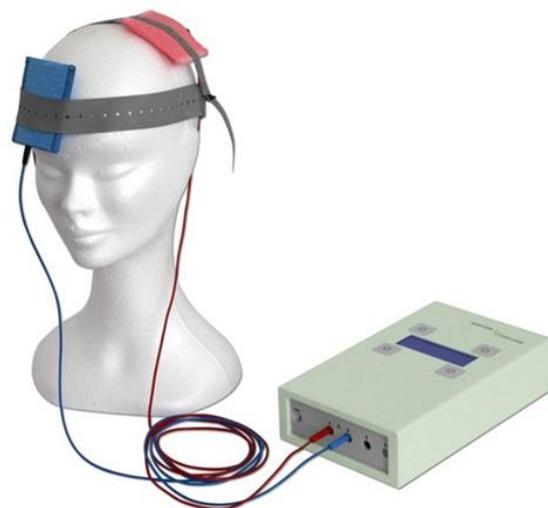
سخت‌افزار: برای بررسی هماهنگی دودستی از دو لپ‌تاپ، دو صفحه نمایشگر و دو قلم نوری استفاده شد. در نهایت برای بررسی هماهنگی دودستی میانگین داده‌های دو لپ‌تاپ استفاده و مورد تحلیل قرار گرفت.

ابزار سنجش هماهنگی دودستی شامل دو صفحه حسگر لمسی و دو قلم نوری با نشان جنیوس^{۲۳} بود (شکل ۱). صفحه حسگر لمسی دارای دقت ۱۰۰ آرپی‌اس و ۲۵۶۰ ال‌پی‌آی بوده و قابلیت اتصال با کابل و پورت USB به کامپیوتر یا لپ‌تاپ را دارد. این ابزار قابلیت

شرکت‌کنندگان در روز مقرر در محل تمرین واقع در آزمایشگاه رفتاری و روانشناسی ورزشی دانشگاه حضور یافتند و در چهار گروه مربوطه (هر گروه ۱۲ نفر) تقسیم شدند. همه شرکت‌کنندگان پیش از اینکه پیش‌آزمون اجرا شود، توسط آزمونگر با موارد آزمون و با انجام الگوی هماهنگی دودستی و هماهنگی با صدای موسیقی و مترونوم آشنا شدند. سپس به چهار گروه آزمایشی مجزا (تمرین همراه با موسیقی با اعمال tDCS واقعی، تمرین همراه با موسیقی با tDCS ساختگی، تمرین بدون موسیقی و با اعمال tDCS واقعی، تمرین بدون موسیقی و با اعمال tDCS ساختگی) تقسیم شدند.

ابتدا پیش‌آزمون تکلیف حرکت هماهنگی دودستی (دست راست دایره در جهت ساعت‌گرد و دست چپ ترسیم دایره در جهت پادساعت‌گرد) به عمل آمد. در هر کوشش ۳۰ دایره توسط دو دست ترسیم می‌شد. در هر یک آزمون‌ها ۱۰ کوشش انجام می‌شد و میانگین خطای شعاعی و سرعت حرکت دست‌ها در ۱۰ کوشش به‌عنوان پیش‌آزمون ثبت گردید (به‌عنوان یک بلوک). تمرینات در ۴ بلوک ۱۰ کوششی در هر روز، به مدت چهار روز (یک روز در میان) انجام شد، به‌نحوی که در هر کوشش شبیه به پیش‌آزمون، ۳۰ دایره ترسیم شد. در گروه اول تمرین همراه با موسیقی (مترونوم) و اعمال tDCS ساختگی، گروه دوم tDCS واقعی و تمرین همراه با موسیقی (مترونوم)، گروه سوم تمرین همراه با موسیقی بدون اعمال تحریک و گروه چهارم تمرین tDCS واقعی همراه با موسیقی انجام شد. با هدف بررسی عوارض ناشی از تحریک، پس از هر جلسه تحریک پرسشنامه اثرات نامطلوب (AES) تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای مغز استفاده شد. این پرسش‌نامه دارای ۱۴ گویه است که از مقدار ۱ به معنی عدم حس موردنظر تا ۱۰ به معنی حس شدید رتبه‌بندی شده است. این پرسش‌نامه شامل عوارض جانبی احتمالی تحریک فراجمجمه‌ای مغز می‌باشد، عوارضی همچون سردرد، گردن درد، درد پوست سر، گزگز، خارش، احساس سوزش، قرمزی پوست، خواب‌آلودگی، مشکل در تمرکز، تغییر خلق و خوی حاد و غیره (۷۵،۲۶).

روش اجرای پژوهش



شکل ۱. بالا: تصویری از شیوه اجرای تکلیف دودستی و نقطه تحریک. پایین: تصویری از نقطه تحریک پرسشنامه اثرات نامطلوب^{۲۵} (AES) تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای مغز: به‌منظور پایش عوارض tDCS، استفاده شد. این پرسش‌نامه دارای ۱۴ گویه است که از مقدار ۱ به معنی عدم حس موردنظر تا ۱۰ به معنی حس شدید رتبه‌بندی شده است. این پرسش‌نامه شامل عوارض جانبی احتمالی تحریک فراجمجمه‌ای مغز می‌باشد، عوارضی همچون سردرد، گردن درد، درد پوست سر، گزگز، خارش، احساس سوزش، قرمزی پوست، خواب‌آلودگی، مشکل در تمرکز، تغییر خلق و خوی حاد و غیره (۷۵،۲۶).

تحت tDCS آندال در ناحیه C3 با جریان الکتریکی ۱/۵ آمپر قرار گرفتند. در گروه اول و سوم، تحریک شم به روش مشابه اما به مدت ۲۰ دقیقه تحریک به صورت ساختگی انجام شد. در هر جلسه بلافاصله پس از تحریک، شرکت کنندگان در برنامه تمرینی خود شرکت کردند. بلافاصله پس از پایان ۴ جلسه مداخله، هر چهار گروه در پس آزمون شرکت کردند. تا تأثیرات فوری مداخلات مشخص شود. گروه‌ها دو روز پس از اتمام مداخلات در آزمون پیگیری شرکت کردند و متغیرهای وابسته مجدداً اندازه‌گیری شدند.

روش آماری: از آزمون شاپیرو-ویلک برای بررسی طبیعی بودن توزیع داده‌ها استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل استنباطی پژوهش، از روش‌های آماری تحلیل واریانس مرکب با اندازه‌گیری تکراری ۴ در ۳ و آزمون‌های پیگردی بونفرونی و نیز تحلیل کوواریانس تک‌متغیره آنکووا استفاده شد. سطح معناداری در نظر گرفته شده برای آزمون‌ها ۰/۰۵ بود و برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از SPSS نسخه ۲۲ استفاده شد.

یافته‌ها

برای بررسی برابری واریانس‌های خطا از آزمون لئون استفاده شد، با توجه به سطوح معنی‌داری به دست آمده در تمامی آزمون‌ها که بالاتر از ۰/۰۵ بود، به این نتیجه رسیدیم که واریانس خطا در همه شرایط برابر بوده است. بنابراین پیش‌فرض استفاده از آزمون آنوای مرکب، برقرار می‌باشد. برای تحلیل استنباطی، از آزمون آنوای مرکب استفاده شد که نتایج آن در جداول ۲ آمده است.

قابل ذکر است خطای شعاعی این‌گونه توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شد که هر دایره به ۳۶۰ نقطه (هر درجه یک نقطه) تقسیم می‌شد و فاصله تک تک نقاط با دایره الگو محاسبه می‌شد و سپس مجموع این فواصل به عنوان مجموع خطای شعاعی ثبت می‌گردید. در ترسیم ۳۰ دایره در پژوهش حاضر خطای مربوط به 30×360 نقطه ثبت گردید. همچنین نرم‌افزار خروجی مربوط به سرعت را براساس مسیر طی شده تقسیم بر مدت زمان کل محاسبه شد.

پروتکل فعال‌سازی: دوز تحریک توسط: (۱) دوز جریان (بر حسب آمپر) (۲) مدت زمان تحریک (۳) مونتاژ الکتروود (اندازه و موقعیت الکتروودها) تعیین می‌شود. اندازه الکتروود ۱۶ سانتی متر مربع، با جریان ۱ آمپر و زمان تحریک حداکثر ۲۰ دقیقه مطابق با پژوهش فیلمر^{۲۶} و همکاران (۲۰۱۷) است (۵۲). چگالی جریان (دز فعلی تقسیم بر اندازه الکتروود) نیز به روش خاصی برای تعیین ایمنی استفاده می‌شود. یکی از پارامترهای مهم در نظر گرفتن دوز است (۵۳).

تعداد جلسات تحریک چهار جلسه متوالی به صورت یک روز در میان در نظر گرفته شد (۵۲، ۵۳، ۲۶). در جلسات تحریک، الکتروودهای تحریک جریان مستقیم فراجمعه‌ای در هر دو گروه تحریک واقعی و دو گروه ساختگی به نواحی مشابهی روی پوست سر متصل می‌شدند. محل الکتروودها مطابق با سیستم الکتروود ۱۰-۲۰ الکتروانسفالوگرافی^{۲۷} بین‌المللی (EEG) تعیین شد. الکتروود فعال در ناحیه حرکتی نیمکره چپ (C3) و الکتروود برگشتی (مرجع) در ناحیه فوقانی (Fp2) جانبی قرار گرفت (۵۴).

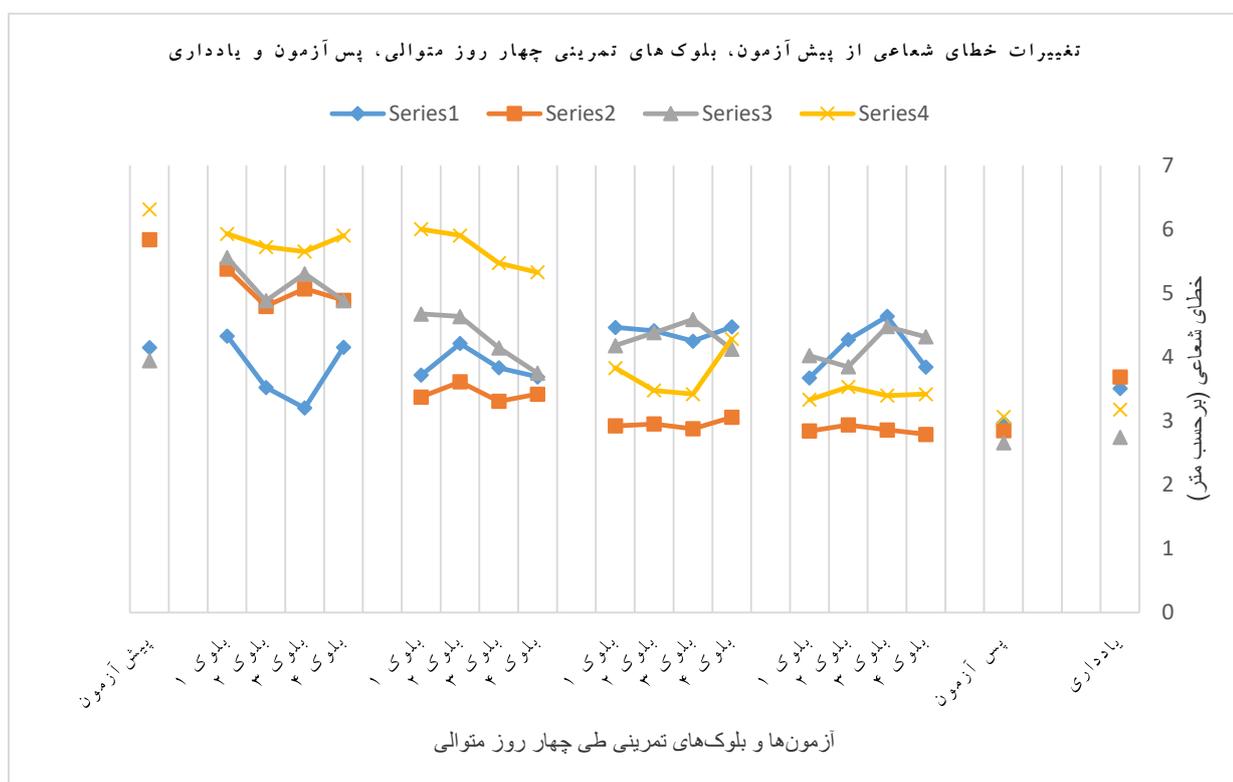
پروتکل تحریک: شرکت کنندگان در گروه‌های آزمایشی تحریک واقعی (دوم و چهارم) در هر جلسه به مدت ۲۰ دقیقه

جدول ۱. سطوح معناداری آزمون لون برای بررسی تجانس واریانس‌ها

آزمون	دست راست	دست چپ	دودستی
پیش‌آزمون	۰/۱۸۴	۰/۱۸۴	۰/۰۹۳
پس‌آزمون	۰/۱۱۲	۰/۰۶۷	۱/۱۵۴
یادداری	۰/۱۱۴	۰/۱۰۰	۰/۰۷۹

جدول ۲. نتایج آزمون آنوای مرکب (۴×۳) برای بررسی تفاوت خطای شعاعی بین آزمون‌های مختلف در چهار گروه

دست	منبع تغییرات	مجموع مجذورات	df	میانگین مجذورات	F	sig	η^2
دست راست	آزمون	۲۵/۴۷۰	۱/۶۰۵	۱۵/۸۷۳	۲۹/۳۸۱	*.۰/۰۰۱	۰/۴۰۰
	آزمون * گروه	۹/۴۰۷	۴/۸۱۴	۱/۹۵۴	۳/۶۱۷	*.۰/۰۰۶	۰/۱۹۸
	خطا	۳۸/۱۴۳	۷۰/۶۰۵	۰/۵۴۰			
دست چپ	آزمون	۳۴/۲۷۵	۱/۳۵۹	۲۵/۲۲۹	۳۲/۰۰۷	*.۰/۰۰۱	۰/۴۲۱
	آزمون * گروه	۴/۵۷۶	۴/۰۷۶	۱/۱۲۳	۱/۴۲۴	*.۰/۲۳۶	۰/۰۸۹
	خطا	۴۷/۱۱۸	۸۸	۰/۷۷۸			
دودستی	آزمون	۱۳۰/۲۱۸	۱/۳۹۲	۹۳/۵۴۶	۵۲/۹۵۳	*.۰/۰۰۱	۰/۵۴۶
	آزمون * گروه	۲۹/۸۷۵	۴/۱۷۶	۷/۱۵۴	۴/۰۵۰	*.۰/۰۰۵	۰/۲۱۶
	خطا	۱۰۸/۲۰۲	۶۶/۲۴۹	۱/۷۶۷			



نمودار ۱: تغییرات خطای شعاعی در آزمون‌ها و بلوک‌های تمرینی در چهار گروه مختلف

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، یافته‌های مربوط به آزمون آنوای مرکب نشان داد که برای دست راست اثر تمرین بر خطای شعاعی معنادار است ($P=۰/۰۰۱, \eta^2=۰/۴۰$). بدین معنا که تمرین در مجموعه چهار گروه بر خطای شعاعی در آزمون‌های مختلف در تکلیف حرکتی دست راست تأثیر داشته است. به طوری که میانگین خطای شعاعی طی آزمون‌ها کاهش یافته است، یعنی پیشرفت داشته است (پیش‌آزمون، پس‌آزمون و یادداری به ترتیب ۲/۲۲۷، ۱/۲۲۵ و ۱/۵۲۰). همچنین اثر آزمون در گروه معنادار شد ($F_{6,88}=۲/۲۶۲, P=۰/۰۰۶, \eta^2=۰/۱۹۸$). بدین معنا که بین اثر تمرینات چهار گروه مختلف بر خطای شعاعی برای تکلیف دست راست تفاوت معناداری وجود دارد. آزمون‌های پیگردی نشان داد که بجز بین گروه دوم با چهارم، در سایر موارد بین گروه‌ها تفاوت وجود دارد ($P<۰/۰۵$). به طوری که در

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، یافته‌های مربوط به آزمون آنوای مرکب نشان داد که برای دست راست اثر تمرین بر خطای شعاعی معنادار است ($P=۰/۰۰۱, \eta^2=۰/۴۰$). بدین معنا که تمرین در مجموعه چهار گروه بر خطای شعاعی در آزمون‌های مختلف در تکلیف حرکتی دست راست تأثیر داشته است. به طوری که میانگین خطای شعاعی طی آزمون‌ها کاهش یافته است، یعنی پیشرفت داشته است (پیش‌آزمون، پس‌آزمون و یادداری به ترتیب ۲/۲۲۷، ۱/۲۲۵ و ۱/۵۲۰). همچنین اثر آزمون در گروه معنادار شد ($F_{6,88}=۲/۲۶۲, P=۰/۰۰۶, \eta^2=۰/۱۹۸$). بدین معنا که بین اثر تمرینات چهار گروه مختلف بر خطای شعاعی برای تکلیف دست راست تفاوت معناداری وجود دارد. آزمون‌های پیگردی نشان داد که بجز بین گروه دوم با چهارم، در سایر موارد بین گروه‌ها تفاوت وجود دارد ($P<۰/۰۵$). به طوری که در

پیگردی نشان داد که بین گروه سوم (تمرین همراه با tDCS واقعی با گروه‌های چهارم (تمرین همراه با موسیقی با اعمال tDCS) و دوم (تمرین همراه با موسیقی با tDCS ساختگی) تفاوت وجود دارد ($P < 0/05$). به طوری که گروه چهارم پیشرفت بیشتری به‌ویژه در پس‌آزمون داشته است. آزمون‌های آنوای یک‌راهه نشان داد که در پیش‌آزمون بین گروه‌ها تفاوت وجود دارد ($F_{3,44} = 9/196, P = 0/001$). به طوری که گروه‌های دوم و چهارم خطای شعاعی از گروه‌های اول و سوم بیشتر بود. ولی در پس‌آزمون و یادداری تفاوتی بین گروه‌ها مشاهده نشد (پس‌آزمون $P = 0/774, \eta^2 = 0/371$ و $F_{3,44}$ یادداری $P = 0/140, \eta^2 = 1/921$). بنابراین از آزمون آنکووا نیز برای بررسی تفاوت تغییرات گروه‌ها در پس‌آزمون و یادداری نسبت به پیش‌آزمون استفاده شد. نتایج نشان داد که در پس‌آزمون اثر گروه بر خطای شعاعی معنادار نیست ($F_{3,44} = 1/467, P = 0/238, \eta^2 = 0/099$). همچنین تعامل گروه در پیش‌آزمون معنادار نشد ($F_{3,44} = 0/317, \eta^2 = 0/083$). بدین معنا که با در نظر گرفتن تفاوت در پیش‌آزمون‌ها، تفاوت در نوع تمرینات در گروه‌ها اثر معناداری بر پس‌آزمون‌ها نداشته است. به علاوه، در یادداری اثر گروه بر خطای شعاعی معنادار نشد ($F_{3,44} = 0/003, \eta^2 = 0/744, P = 0/108$). همچنین تعامل گروه در پیش‌آزمون معنادار نشد ($F_{3,44} = 0/321, P = 0/281, \eta^2 = 0/090$). بدین معنا که با در نظر گرفتن تفاوت در پیش‌آزمون‌ها، تفاوت در نوع تمرینات در گروه‌ها اثر معناداری بر پس‌آزمون‌ها نداشته است (جدول ۳).

پس‌آزمون گروه دوم و گروه چهارم پیشرفت بیشتری داشتند ولی در یادداری گروه چهارم (تمرین همراه با موسیقی با اعمال tDCS) پیشرفت بیشتری نسبت به سایر گروه‌ها داشت.

همچنین برای دست‌چپ اثر تمرین بر خطای شعاعی معنادار شد ($F_{2,88} = 32/007, P = 0/001, \eta^2 = 0/421$). بدین معنا که تمرین در مجموعه چهار گروه بر خطای شعاعی در آزمون‌های مختلف در تکلیف حرکتی دست‌چپ تأثیر داشته است. به طوری که میانگین خطای شعاعی طی آزمون‌ها کاهش یافته است، یعنی پیشرفت داشته است (پیش‌آزمون، پس‌آزمون و یادداری به ترتیب $2/835, 1/740$ و $1/873$). ولی اثر آزمون در گروه معنادار نشد ($F_{2,88} = 0/236, \eta^2 = 0/089$). بدین معنا که بین اثر تمرینات چهار گروه مختلف بر خطای شعاعی برای تکلیف دست‌چپ تفاوت معناداری وجود ندارد ($p \geq 0/05$).

همچنین برای حرکت دودستی (مجموع دو دست) اثر تمرین بر خطای شعاعی معنادار شد ($F_{2,88} = 52/953, P = 0/001, \eta^2 = 0/546$). بدین معنا که تمرین در مجموعه چهار گروه بر خطای شعاعی در آزمون‌های مختلف در تکلیف حرکتی دودستی تأثیر داشته است. به طوری که میانگین خطای شعاعی طی آزمون‌ها کاهش یافته است، یعنی پیشرفت داشته است (پیش‌آزمون، پس‌آزمون و یادداری به ترتیب $5/062, 3/278$ و $2/873$). همچنین اثر آزمون در گروه معنادار شد (اثر تمرینات چهار گروه مختلف بر خطای شعاعی برای تکلیف حرکتی دودستی تفاوت معناداری وجود دارد. آزمون‌های

جدول ۳. جدول تحلیل کوواریانس تک‌متغیری با اندازه‌گیری‌های مکرر در گروه‌ها در مراحل آزمون

آزمون	منبع	مجموع مجزورات	df	میانگین مجزورات	F	sig	η^2
	گروه	۱/۶۸۱	۳	۰/۵۶۰	۱/۴۶۷	۰/۲۳۸	۰/۰۹۹
پس‌آزمون	پیش‌آزمون	۰/۰۰۷	۱	۰/۰۰۷	۰/۰۱۹	۰/۸۹۲	۰/۰۰۱
	گروه در پیش‌آزمون	۱/۳۹۱	۳	۰/۴۶۴	۱/۲۱۴	۰/۳۱۷	۰/۰۸۳
	گروه	۱/۸۷۱	۳	۰/۶۲۴	۱/۵۲۴	۰/۲۲۳	۰/۱۰۳
یادداری	پیش‌آزمون	۰/۰۴۴	۱	۰/۰۴۴	۰/۱۰۸	۰/۷۴۴	۰/۰۰۳
	گروه در پیش‌آزمون	۱/۶۲۲	۳	۰/۵۴۱	۰/۳۲۱	۰/۲۸۱	۰/۰۹۰

آزمون‌های تحلیل واریانس درون‌گروهی برای هر چهار گروه نشان داد که از پیش‌آزمون تا پس‌آزمون و یادداری پیشرفت حاصل شده است (گروه اول $F_{2,22}=15/468$, $P=0/015$, $\eta^2=0/343$ ؛ گروه دوم $F_{2,22}=5/737$, $P=0/001$, $\eta^2=0/686$ ؛ گروه سوم $F_{2,22}=24/051$, $P=0/001$, $\eta^2=0/605$ ؛ گروه چهارم $F_{2,22}=16/843$, $P=0/002$, $\eta^2=0/584$). همان‌طور که از اندازه اثرهای به‌دست آمده مشخص است در گروه‌های تمرین همراه با موسیقی و تحریک واقعی نسبت به گروه اول که بدون موسیقی و تحریک ساختگی بود، پیشرفت بیشتری حاصل شده است.

جدول ۴. نتایج آزمون آنوای مرکب (4×3) برای بررسی تفاوت سرعت انجام حرکت بین آزمون‌های مختلف در چهار گروه (به تفکیک برای هر دست و نیز حرکت دودستی)

η^2	sig	F	میانگین مجدورات	df	مجموع مجدورات	منبع تغییرات	
0/098	*0/025	4/769	0/017	1/278	0/022	آزمون	دودستی
0/297	*0/001	6/194	0/022	3/834	0/085	آزمون * گروه	
			0/004	56/230	0/200	خطا	

گروه دوم $F_{2,22}=0/633$, $P=0/541$, $\eta^2=0/056$ ؛ گروه سوم $F_{2,22}=2/999$, $P=0/111$, $\eta^2=0/214$ ؛ گروه چهارم $F_{2,22}=3/801$, $P=0/038$, $\eta^2=0/214$.

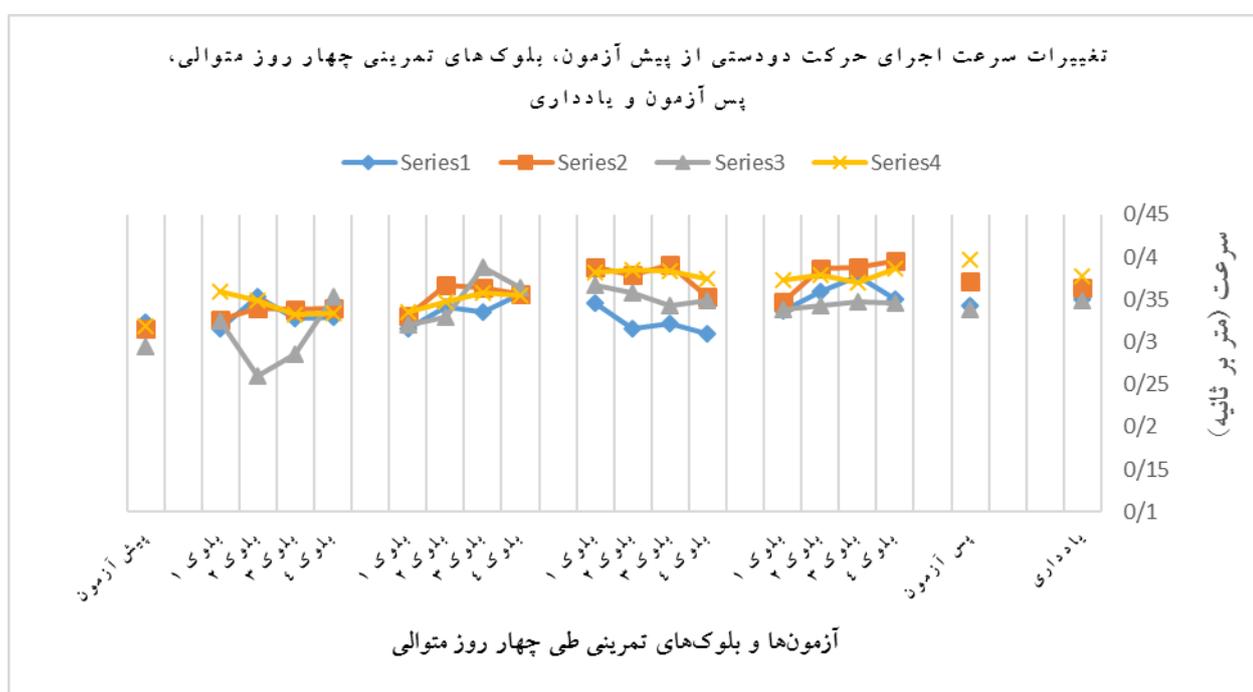
همچنین از آزمون آنکووا نیز برای بررسی تفاوت تغییرات سرعت در گروه‌ها در پس‌آزمون و یادداری نسبت به پیش‌آزمون استفاده شد. نتایج نشان داد که در پس‌آزمون اثر گروه بر سرعت معنادار نیست ($F_{3,44}=0/361$, $P=0/782$, $\eta^2=0/026$). همچنین تعامل گروه در پیش‌آزمون معنادار نشد ($F_{3,44}=0/340$, $P=0/797$, $\eta^2=0/025$). بدین معنا که با در نظر گرفتن تفاوت در پیش‌آزمون‌ها، تفاوت در نوع تمرینات در گروه‌ها اثر معناداری بر پس‌آزمون‌ها نداشته است. به‌علاوه، در یادداری اثر گروه بر سرعت معنادار نشد ($F_{3,44}=0/293$, $P=0/830$, $\eta^2=0/022$). همچنین تعامل گروه در پیش‌آزمون معنادار نشد ($F_{3,44}=0/19$, $P=0/852$, $\eta^2=0/019$). بدین معنا که با در نظر گرفتن تفاوت در پیش‌آزمون‌ها، تفاوت در نوع تمرینات در گروه‌ها اثر معناداری بر پس‌آزمون‌ها نداشته است (جدول ۵).

همچنین برای حرکت دودستی اثر تمرین بر سرعت حرکت دست‌ها معنادار شد ($F_{2,88}=4/769$, $P=0/025$, $\eta^2=0/098$). بدین معنا که تمرین در مجموعه چهار گروه بر سرعت حرکت دست‌ها در آزمون‌های مختلف در تکلیف حرکتی دودستی تأثیر داشته است. به‌طوری که میانگین سرعت حرکت دست‌ها طی آزمون‌ها تغییر یافته است (پیش‌آزمون، پس‌آزمون و یادداری به ترتیب 0/312، 0/358 و 0/360). همچنین اثر آزمون در گروه معنادار شد ($F_{2,22}=6/194$, $P=0/001$, $\eta^2=0/297$). بدین معنا که بین اثر تمرینات چهار گروه مختلف بر سرعت حرکت دست‌ها برای تکلیف حرکتی دودستی تفاوت معناداری وجود دارد.

آزمون‌های آنوای یک‌راهه نشان داد که در پیش‌آزمون، پس‌آزمون و یادداری بین گروه‌ها تفاوت وجود دارد ($F_{3,44}=5/146$, $P=0/004$ ؛ پس‌آزمون $F_{3,44}=1/723$, $P=0/006$ ؛ یادداری $F_{3,44}=7/097$, $P=0/001$). تحلیل واریانس درون‌گروهی برای سه گروه از چهار گروه نشان داد که از پیش‌آزمون تا پس‌آزمون و یادداری تغییر رخ داده است (گروه اول $F_{2,22}=6/356$, $P=0/028$, $\eta^2=0/366$ ؛

جدول ۵. جدول تحلیل کوواریانس تک‌متغیری با اندازه‌گیری‌های مکرر در گروه‌ها در مراحل آزمون

آزمون	منبع	مجموع مجذورات	df	میانگین مجذورات	F	P	η^2
پس آزمون	گروه	۰/۰۰۱	۳	۰/۰۰۲	۰/۳۶۱	۰/۷۸۲	۰/۰۲۶
	پیش‌آزمون	۰/۰۰۵	۱	۰/۰۰۵	۰/۷۷۴	۰/۳۸۴	۰/۰۱۹
	گروه در پیش‌آزمون	۰/۰۰۶	۳	۰/۰۰۲	۰/۳۴۰	۰/۷۹۷	۰/۰۲۵
یادداری	گروه	۰/۰۰۱	۳	۰/۰۰۱	۰/۲۹۳	۰/۸۳۰	۰/۰۲۲
	پیش‌آزمون	۰/۰۰۱	۱	۰/۰۰۱	۰/۶۴۷	۰/۴۲۶	۰/۰۱۶
	گروه در پیش‌آزمون	۰/۰۰۱	۳	۰/۰۰۱	۰/۲۶۲	۰/۸۵۲	۰/۰۱۹



نمودار ۲: تغییرات سرعت حرکت دست‌ها در آزمون‌ها و بلوک‌های تمرینی در چهار گروه مختلف

بحث و نتیجه گیری

هدف از اجرای این پژوهش بررسی اثر تمرین همراه با tDCS و موسیقی بر مؤلفه‌های خطای شعاعی و سرعت در یادگیری تکلیف هماهنگی دودستی بود. در پژوهش حاضر، با توجه به این تکلیف هماهنگی دودستی به‌عنوان یک تکلیف پیچیده‌تر نسبت به تکلیف مجرد بررسی شد، و تلاش شد که محدودیت‌های موجود در مطالعات پیشین برطرف شود. نتایج مربوط به همه گروه‌ها نشان داد که در پی تمرینات، خطای شعاعی کاهش یافته است. این یافته با پژوهش‌های دوستان و همکاران (۲۰۱۹)، دوستان و باقرنژاد (۲۰۱۸ و ۲۰۲۰) و اجاز^{۲۸} و همکاران (۲۰۲۴) که در پژوهش‌های خود نشان دادند که می‌توان با تمرین، هماهنگی دودستی را بهبود داد، همخوان بود (۴، ۵، ۶، ۵۵).

در مراحل اولیه یادگیری یک حرکت هماهنگ دودستی مانند نواختن پیانو، در هنگام یادگیری و اجرا منابع توجه بیشتری به‌کار گرفته شود (۵۶). با این حال، پس از رسیدن به مرحله خودکاری پس از تکرارها و تمرین زیاد با کاهش نیاز به توجه به‌راحتی انجام می‌شود؛ همچنین فعالیت نواحی قشر مغز کاهش می‌یابد (۵۷، ۵۸)؛ زیرا جفت‌شدگی در دو دست رخ می‌دهد. سیستم عصب- حرکتی انسان این قابلیت را دارد که با تمرین الگوهای جدیدی در عملکرد دودستی ایجاد کند؛ این ویژگی می‌تواند در نواختن برخی سازهای موسیقی مانند پیانو یا ارگ، به هماهنگی بین حرکت دست‌ها کمک کند (۵۹، ۶۰). با بررسی تغییرات مغزی پس از تمرین تکلیف دودستی نوازندگی نشان داده شده است که این تغییرات

عملکردی، به دلیل تغییرات ساختاری و عملکردی در مغز رخ می‌دهد (۶۱).

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که در گروه‌های موسیقی یادگیری بیشتری رخ داده است، زیرا کاهش خطا بیشتر است. نتایج ما در مورد کاهش خطای حرکت هماهنگی دودستی در پی تمرین همراه با موسیقی، با نتایج برخی پژوهش‌ها (۶۲، ۶۳). هم‌راستا است. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که گوش دادن به موسیقی، می‌تواند فعالیت قشر حرکتی را تعدیل کند؛ کالابرو و فیورنت^{۲۹} (۲۰۲۳) نشان دادند نواحی مشترکی در مغز در انجام حرکت حرکتی و در پی گوش دادن به موسیقی فعال می‌شوند (۲۳). چن^{۳۰} و همکاران (۲۰۰۸) نقش قشر پیش حرکتی پشتی را هنگام زمانبندی حسی- حرکتی مشخص نمودند و بیان کردند که شکنج قدامی گیجگاهی خلفی هنگام رمزگردانی قطعات ریتمیک و قشر پیش حرکتی پشتی در ترکیب واکنش‌های حرکتی و اطلاعات شنیداری ایفای نقش می‌کنند (۲۰). انسان‌ها تمایل دارند که بدن خود را هماهنگ با ضرب آهنگ موسیقی حرکت دهند که موجب ایجاد رابطه فازی مشترک میان حرکت، موقعیت و ضرب آهنگ و نوع حرکت می‌گردد (۶۴). به‌طور کلی، حرکت‌های القایی از موسیقی هماهنگ و سازمان‌یافته‌اند. مانند زمانی که نوازندگان، حرکات خود را از پالس‌های موسیقیایی دنبال و تقلید می‌نمایند (۶۵).

پژوهش‌هایی نیز نشان داده است که موسیقی با ریتم‌های مختلف، تغییراتی در امواج آلفا و بتا قشر حرکتی و قشر شنیداری ایجاد می‌کنند (۶۶، ۶۷). هنگام گوش دادن به موسیقی محرک و با ریتم تند، فعالیت موج آلفا در نواحی

زمان سنج مرکزی بدن و تغییرپذیری سیستم حرکتی محیطی تعیین می‌گردد (۷۴).

در اکثر پژوهش‌های انجام گرفته تمرین و موسیقی نقش به‌سزایی در هماهنگ کردن حرکات بدن دارند (۳، ۱۴، ۱۸، ۷۵، ۷۶، ۷۷). در پژوهش ما تمرین همراه با موسیقی توانست یادگیری حرکت هماهنگی دودستی را تسهیل نماید. این یافته با پژوهش‌های مارتینز^{۳۳} و همکاران (۲۰۱۸) و حسین‌زاده و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد (۳ و ۱۸). نشان داده شده است که می‌توان با موسیقی به‌طور قابل توجهی دقت حرکات مداوم موزون را بهبود داد (۷۸). روزنباوم و زلازینیک^{۳۴} (۲۰۱۰) بیان کردند ترسیم دایره یک حرکت مداوم است که موسیقی می‌تواند دقت انجام آن را بهبود (۷۹). حسین‌زاده و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که موسیقی باعث بهبود قابل توجهی در اجرای ترسیم دودستی متقارن و نامتقارن می‌شود (۱۸): یافته‌های ما مبنی بر تأثیر قابل توجه تمرین و موسیقی، بر پیشرفت تکلیف دودستی، با پژوهش‌های ایوری و آلبرت^{۳۵} (۲۰۰۹)، شی^{۳۶} و همکاران (۲۰۱۶)، بوگاس^{۳۷} (۲۰۱۷) و چانگ^{۳۸} و همکاران (۲۰۱۴) همخوان است (۸۰، ۸۱، ۸۲، ۸۳).

ویستی (۲۰۱۰) نشان داد که اگر حرکت دو دست، مانند تکلیف پژوهش حاضر، مشابه باشد (متقارن)، شرکت‌کنندگان پس از دریافت آموزش موسیقی، تکلیف را با سرعت و دقت بیشتری انجام می‌دهند ولی اگر حرکت دو دست متفاوت باشد (نامتقارن)، بدتر عمل می‌کنند (۲۲).

با بررسی نتایج حاصل از هر چهار گروه پژوهش حاضر، یافته‌ها نشان دادند که گروه چهارم با توجه به دریافت

فرونتال و گیجگاهی کاهش (۶۸)، و فعالیت موج بتا در لوب گیجگاهی و ناحیه حرکتی نیمکره چپ افزایش می‌یابد (۶۹، ۷۰). مطالعات دیگری نیز نشان داده است که موسیقی باعث ایجاد احساسات مثبت می‌شود و با فعال‌سازی در قشر شنیداری، نواحی حرکتی و سیستم لیمبیک همراه است (۷۱، ۷۲). لیو^{۳۱} و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان دادند که موسیقی با ریتم بالا نسبت به ریتم پایین و متوسط، فعال‌سازی بیشتری در سیستم عصبی ایجاد می‌کند (۷۳).

در حرکات دودستی، وجود سازوکارهای زمانبندی شده مشترک، دستور انقباض عضلانی بر پایه زمان را برای هر دو دست ارسال می‌کند. الگوی حرکتی پیشنهاد شده توسط سمجن^{۳۲} و همکاران (۲۰۰۰) حاکی از آن است که هماهنگی حرکتی دودستی، دست برتر و سرعت موقعیت حرکتی را کنترل می‌نماید. همچنین حرکات دست غیربرتر، آهسته و در کنار دست سریع‌تر انجام می‌گیرد. این روند براساس ساعت مرکزی درونی اجرا می‌شود و ضربه‌های دست سریع‌تر را آغاز می‌نماید. همچنین ساعت دست آهسته‌تر نیز ضربه‌های همسو با ضربه‌های دست سریع‌تر را اجرا و راه‌اندازی می‌نماید. نظریه گفته شده براساس کنترل شواهدی استوار می‌باشد که نمایانگر آن است که دست سریع‌تر و برتر به‌ندرت تحت تأثیرات تغییرات زمانبندی و مشخصات چندریتی قرار خواهد گرفت؛ درحالی‌که دست آهسته‌تر و غیربرتر همیشه پیرو تغییرات زمانبندی و همچنین مشخصات چندریتی قرار می‌گیرد. مدل ارائه شده نمایانگر آن است که دقت زمانی در ضربه‌زدن خودکار از طریق تغییرپذیری در یک

درحالی‌که تمرین اثر مناسبی دارد (۸۷). پژوهش کیمورا^{۴۱} و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند هیچ حالت تنظیمی از tDCS باعث بهبود عملکرد حرکتی یا کاهش تداخل تکلیف دوگانه نمی‌شود (۸۸). نتایج این مطالعه با یافته‌های ما مطابقت ندارد. با این حال، نتایج حاصل از پژوهش ارهارت^{۴۲} 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 قابل توجهی را در دقت تکلیف دوگانه، نسبت به تحریک ساختگی نشان داد (۵۴). اگرچه مطالعه ارهارت و همکاران (۲۰۲۱) شامل شرایط کنترل فعال نبود، ولی مطالعات قبلی از این گروه که با پروتکل مشابه طراحی شده‌اند و شامل قطبیت تحریک کنترل (تحریک کاتدی) بوده‌اند (۵۳)، هیچ تأثیری از تحریک تحت این شرایط نیافته‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد تنها تحریک آندی زمان پاسخ و عملکرد تصمیم‌گیری را بهبود می‌بخشد. مورد دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد، گنجاندن تمرین تکلیف در جلسات تحریک به‌صورت همزمان در پژوهش مورد بحث بود. از آنجا که در پژوهش ذکر شده از همین گروه، چندین جلسه تحریک ارائه شده در PFC سمت چپ بدون تمرین همزمان، هیچ اثری از افزایش عملکرد نشان نداد، دور از ذهن به‌نظر می‌آید که دستاوردهای عملکردی نشان داده شده توسط شرکت‌کنندگان به‌دلیل ترکیب tDCS و تمرین نبوده و تنها در اثر تحریک باشد (۵۱).

یافته‌های پژوهش ما با نتایج پژوهش وانکلیف و همکاران (۲۰۱۶) هم‌راستا است (۴۶)؛ آنها با اعمال tDCS آندال بر ناحیه M1 و نیز DLPFC عملکرد در شروع و پایان

tDCS و موسیقی بهبود عملکرد و یادگیری حرکتی بیشتری را نسبت به گروه اول (بدون موسیقی و تحریک) داشته است؛ ولی نسبت به دو گروه دیگر برتری چندانی نداشته است. آدرپیکان و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که tDCS آندال آهیانه‌ای و مخچه‌ای باعث افزایش توان امواج آلفا، بتا و SMR می‌شود (۸۴). علاوه بر این، tDCS مخچه در طول انجام حرکت دودستی، بهبود قابل توجهی در یادگیری این تکلیف شد. یافته‌های آراماکی و هیکوساکا^{۴۹} (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که tDCS ناحیه M1 منجر به تعدیل عصبی می‌شود که می‌تواند استحکام گرفتن یک‌دستی و دودستی بیشتری ایجاد کند (۸۵). این نتیجه شواهد اساسی را ارائه می‌دهد که tDCS ممکن است در ورزش‌ها مفید باشد، به‌ویژه آنهایی که شامل هماهنگی دوطرفه حرکت اندام فوقانی هستند. با این حال آنها اشاره کردند که شواهد مستقیمی وجود ندارد که نشان دهد در حرکات دودستی، تسهیل مسیرهای حرکتی دست همسو (چپ)، ناشی از tDCS در ناحیه M1 چپ رخ می‌دهد. رحمان و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که tDCS آندال M1 تحریک‌پذیری قشر نخاعی دوطرفه را بدون توجه به طرف تحریک، افزایش می‌دهد (۸۶). بنابراین می‌تواند بهبود عملکرد دودستی را در پی داشته باشد. این یافته‌ها با یافته‌های پژوهش ما مبنی بر تأثیر tDCS بر بهبود عملکرد دودستی همخوان است، هرچند موسیقی و تحریک در ترکیب با هم بر هرکدام از این دو به‌تنهایی برتری قابل توجهی نداشت.

با این حال، د-لائی^{۴۰} و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که tDCS واقعی در مقایسه با شم، یادگیری، حفظ یا تعمیم مهارت حرکتی دودستی را در افزایش نمی‌دهد؛

مشخص روی می‌دهد (۹۰، ۹۱). پیکارد^۴ و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهش خود بیان کردند که اگر مدت زمان طولانی، تمرین و تکرار فعالیت حرکتی صورت گیرد باعث کارآمدی هرچه بیشتر فعالیت‌های عصبی در قشر حرکتی اولیه می‌شود (۹۲، ۹۳) و یادگیری سریع تکالیف حرکتی مداوم باعث می‌شود فعالیت قشر حرکتی اولیه تعدیل شود (۹۴).

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی، نتایج حاصل از پژوهش حاضر نمایانگر تأثیر معنادار تمرین بر کاهش خطای شعاعی در تکلیف هماهنگی دودستی ترسیم مداوم دایره بود. همچنین با توجه به مقایسات بین گروهی و اندازه اثر آنها، یافته‌ها نشان داد که استفاده از tDCS و موسیقی حین تمرین تأثیر قابل‌توجهی بر یادگیری حرکتی دارد. به‌طوری‌که tDCS و موسیقی تأثیر زیادی بر کاهش مؤلفه خطای شعاعی داشت و شرکت‌کنندگان تکلیف دودستی را با خطای کمتری انجام دادند و آن را به‌خوبی یاد گرفتند. با این حال، با بررسی نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت استفاده همزمان از tDCS و موسیقی برتری ویژه‌ای بر استفاده از هر کدام به‌صورت جداگانه ندارد.

پانویس‌ها

^۱Negatu

^۲ Primary motor area

^۳ Pre-motor cortex

^۴ Supplementary motor area

^۵ Li

^۶ Karabanov

^۷ Janata

^۸ Martinz

^۹ Wu

^{۱۰} Wisti

^{۱۱} Fiorent and Calabrò

هر روز تمرین اندازه‌گیری کردند تا بین کسب و تثبیت تمایز قائل شوند. اگرچه عملکرد تکلیف طی روزها بهبود یافت، تفاوت معنی‌داری بین پروتکل‌های تحریک مشاهده نشد، که نشان می‌دهد tDCS آندال بدون توجه به مکان‌های تحریک و مرحله یادگیری (اکتساب یا تثبیت) تأثیر کمی بر یادگیری تکلیف دودستی دارد. جالب‌توجه است، عملکرد شناختی و همچنین تحریک‌پذیری قشری- حرکتی در پی تحریک تغییری نکرد. بر این اساس، آنها مدرکی برای تغییرات رفتاری یا عصبی فیزیولوژیکی به دنبال tDCS در M1 یا DLPFC چپ در یادگیری تکلیف پیچیده دودستی پیدا نکردند.

بررسی‌های پژوهش ما در جلسات اکتساب گروه چهارم نشان داد که از جلسه سوم به بعد پیشرفت قابل‌توجهی در کاهش خطا رخ داده است، که ممکن است به دلیل اثرات جمعی تحریک باشد. الگوهای چندجلسه‌ای با پس‌آزمون تأخیری می‌تواند به نوبه خود باعث تقویت یکپارچگی و بهره‌مند شدن از تأثیرات جمعی و مکانیزم‌های تثبیت در طی جلسات آفلاین شود، باعث بهبود عملکرد می‌شود (۸۹)؛ در پژوهش حاضر از تعداد چهار جلسه متوالی tDCS به جای یک جلسه تحریک و آزمون یادداری (فالوآپ) تأخیری با فاصله ۴۸ ساعت از آخرین جلسه تحریک استفاده شد. با این حال، با توجه به پیشرفت همه گروه‌های تمرینی، به نظر می‌رسد تأثیر تمرین بر یادگیری تکلیف، از هر عامل دیگری از جمله موسیقی و تحریک بیشتر است. کوهن و دایان^{۴۳} (۲۰۱۱) بیان کرد که تمرین باعث قالب‌پذیری عصبی می‌شود، و توجه نمود که یادگیری حرکتی فرآیند بسیار پیچیده‌ای می‌باشد که در قسمتی از مغز در پاسخ به تمرین یا تجربه یک مهارت

²⁸ Ejaz
²⁹ Fiorente, and Calabrò
³⁰ Chen
³¹ Liu
³² Semjen
³³ Martins
³⁴ Zelaznik & Rosenbaum
³⁵ Albert & Ivry
³⁶ Shea
³⁷ Bugos
³⁸ Chang
³⁹ Hikosaka and Aramaki
⁴⁰ De Laet
⁴¹ Kimura
⁴² Ehrhardt
⁴³ Dayan and cohen
⁴⁴ Picard

¹² Transcranial direct current stimulation
¹³ Neural plasticity
¹⁴ Carter
¹⁵ Ciechanski and Kirton
¹⁶ Pixa
¹⁷ Furuya
¹⁸ Mc Cambridge
¹⁹ Vancleef
²⁰ Edinburg
²¹ Mp3 Player
²² Vangheluwe
²³ jenus
²⁴ X 608 I
²⁵ adverse effects (AEs)
²⁶ Filmer
²⁷ Electroencephalography

References:

1. Hung, Ya-Ching, et al. Relationship between integrity of the corpus callosum and bimanual coordination in children with unilateral spastic cerebral palsy. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13: 334.
2. Negatu, R, et al. Influencing Bimanual Coordination By Changing Environmental Circumstances. *Undergraduate Scholarly Showcase*, 2022, 4.1.
3. Martins, M, et al. Orff-based music training enhances children's manual dexterity and bimanual coordination. *Frontiers in psychology*, 2018, 9: 2616. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02616>
4. Doostan, M. R; Baghernezhad, Z. Behavioral and neurological investigation of learning and transfer of asymmetric bimanual task. *Neuropsychology*, 2018, 4.12: 9-30.
5. Doustan, M. R, et al. Evaluation of learning of asymmetrical bimanual tasks and transfer to converse pattern: load, temporal and spatial asymmetry of hand movements. *Acta Gymnica*, 2019, 49.3: 115-124.
6. Doustan, M. R; Baghernezhad, Z. Evaluation of learning and transfer of complex bimanual task asymmetrical in combination of features of speed,

- effect of gravity and amplitude of movement. *Journal of Sport Management and Motor Behavior*, 2020, 16.31: 252-235. <https://doi.org/10.22080/jsmb.2020.11026.2481>
7. Garbarini, F; Pia, L. Bimanual coupling paradigm as an effective tool to investigate productive behaviors in motor and body awareness impairments. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2013, 7: 737. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00737>
 8. Swinnen, Stephan P.; Gooijers, Jolien. Bimanual coordination. *Brain mapping: an encyclopedic reference*, 2015, 2: 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.03.008>
 9. Rueda-Delgado, Laura M, et al. Understanding bimanual coordination across small time scales from an electrophysiological perspective. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2014, 47: 614-635. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.03.008>
 10. Kaur, Jaskanwaljeet; Balasubramaniam, Ramesh. cTBS Over the Left Supplementary Motor Area (ISMA) Does Not Modulate Rhythmic Bimanual Coordination in the Presence and Absence of Visual Cues. *bioRxiv*, 2023, 2023.06.10.544481.

11. Wu, Jingyi, et al. Neural Mechanisms underlying Bimanual Coordination in Healthy and Stroke Individuals and Application of Non-Invasive Brain Stimulation: A Scoping Review. 2024.
12. Li, Yanan, et al. Premotor function in interpersonal bimanual coordination: Neural responses to varying frequencies and spatio-temporal relationships. *Physiology & Behavior*, 2023, 270: 114303. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031938423002287>
13. Karabanov, A. N, et al. Dynamic involvement of premotor and supplementary motor areas in bimanual pinch force control. *NeuroImage*, 2023, 276: 120203. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120203>
14. Su, Yi-Huang. Visual tuning and metrical perception of realistic point-light dance movements. *Scientific reports*, 2016, 6.1: 22774.
15. Dobrota, S; Reić E, Ina; Habe, K. Gender differences in musical taste: The mediating role of functions of music. *Društvena istraživanja: časopis za opća društvena pitanja*, 2019, 28.4: 567-586.
16. Karageorghis, C. I., et al. The psychological, psychophysical and ergogenic effects of music. *Sport: A review and synthesis*, 2008, 27-50.
17. Janata, P; Tomic, S T.; Haberman, J M. Sensorimotor coupling in music and the psychology of the groove. *Journal of experimental psychology: General*, 2012, 141.1: 54. <https://doi.org/10.1037/a0024208>
18. Hoseinzadeh, B; Shetabbushehri, S N; Doustan, M.R. The effect of music on learning the spatial and temporal pattern of bimanual coordination. *Neuropsychology*, 2020, 6.22: 9-26.
19. Baumgartner, Thomas; Willi, Matthias; Jäncke, Lutz. Modulation of corticospinal activity by strong emotions evoked by pictures and classical music: a transcranial magnetic stimulation study. *Neuroreport*, 2007, 18.3: 261-265. <https://doi.org/10.1097/wnr.0b013e328012272e>
20. Chen, Joyce L.; Penhune, Virginia B.; Zatorre, Robert J. Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training. *Journal of cognitive neuroscience*, 2008, 20.2: 226-239. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/۱۸۲۷۵۳۳۱/>
21. Braun Janzen, Thenille, et al. Timing skills and expertise: discrete and continuous timed movements among musicians and athletes. *Frontiers in psychology*, 2014, 5: 1482. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01482>
22. Wisti, Andrew. *The Effects of Musical Training on Bimanual Control and Interhemispheric Transfer*. 2010. PhD Thesis.
23. Fiorente, N; Calabrò, Rocco S. Music in Parkinson's Disease Rehabilitation: Are We Heading in the Right Direction?. *Innovations in Clinical Neuroscience*, 2023, 20.4-6: 11.
24. Nitsche, M A.; Paulus, W. Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulation in humans. *Neurology*, 2001, 57.10: 1899-1901.
25. Schwell, Gidon, et al. The effect of action observation combined with high-definition transcranial direct current stimulation on motor performance in healthy adults: A randomized controlled trial. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2023, 17: 1126510. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1126510>
26. Hafezi, S, et al. 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*. 2023, 16 (1), 69-89. https://jsmdl.ut.ac.ir/article_96244.html?lang=en
27. Fritsch, Brita, et al. Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: potential implications for motor learning. *Neuron*, 2010, 66.2: 198-204. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/۲۰۴۳۴۹۹۷/>

28. Karabanov, Anke, et al. Consensus paper: probing homeostatic plasticity of human cortex with non-invasive transcranial brain stimulation. *Brain stimulation*, 2015, 8.5: 993-1006.
29. Buch, Ethan R., et al. Effects of tDCS on motor learning and memory formation: a consensus and critical position paper. *Clinical Neurophysiology*, 2017, 128.4: 589-603.
30. Flöel, Agnes. tDCS-enhanced motor and cognitive function in neurological diseases. *Neuroimage*, 2014, 85: 934-947. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/۲۳۷۲۷۰۲۵/>
31. Mehrdadian, M, et al. The Effects of Anodal tDCS Combined with a Selected Balance Exercise Program on Balance Performance and Working Memory in Older Adults. *IJMCL* 2023; 5(2) 1–9 .
32. Zamani G, Doostan M. (2017). The effect of Transcranial Direct Current Stimulation on Working Memory and Reactiontime in Athlete Girls. *Neuropsychology*, 10(3), 51-62. In Persian
33. Lattari, Eduardo, et al. Effects on volume load and ratings of perceived exertion in individuals' advanced weight training after transcranial direct current stimulation. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2020, 34.1: 89-96.
34. Pixa, N. H., & Pollok, B. Effects of tDCS on bimanual motor skills: a brief review. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 2018. 12, 63. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2018.00063>
35. Swinnen, S P.; Wenderoth, N. Two hands, one brain: cognitive neuroscience of bimanual skill. *Trends in cognitive sciences*, 2004, 8.1: 18-25.
36. Swinnen, S. P., and Gooijers, J. "Bimanual coordination," in *Brain Mapping: An Encyclopedic Reference*, ed. A. W. Toga (Burlington: Elsevier Science), 2015. 475–482.
37. Carter, Michael J.; Maslovat, Dana; Carlsen, Anthony N. Anodal transcranial direct current stimulation applied over the supplementary motor area delays spontaneous antiphase-to-in-phase transitions. *Journal of neurophysiology*, 2015, 113.3: 780-785.
38. Carter, M J.; Maslovat, D; Carlsen, A N. Intentional switches between coordination patterns are faster following anodal-tDCS applied over the supplementary motor area. *Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation*, 2017, 10.1: 162-164. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.11.002>
39. Ciechanski, Patrick; Kirton, Adam. Transcranial direct-current stimulation can enhance motor learning in children. *Cerebral cortex*, 2017, 27.5: 2758-2767. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw114>
40. Pixa, Nils H.; Steinberg, Fabian; Doppelmayr, Michael. Effects of high-definition anodal transcranial direct current stimulation applied simultaneously to both primary motor cortices on bimanual sensorimotor performance. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 2017, 11: 130.
41. Pixa, N. H., Steinberg, F., and Doppelmayr, M. High-definition transcranial direct current stimulation to both primary motor cortices improves unimanual and bimanual dexterity. *Neuroscience letters*, 2017, 643: 84-88. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/۲۸۲۲۹۹۳۷/>
42. Furuya, Shinichi, et al. Ceiling effects prevent further improvement of transcranial stimulation in skilled musicians. *Journal of Neuroscience*, 2014, 34.41: 13834-13839. <https://www.jneurosci.org/content/۱۳۸۳۴/۴۱/۳۴>
43. Furuya, Shinichi, et al. Early optimization in finger dexterity of skilled pianists: implication of transcranial stimulation. *BMC neuroscience*, 2013, 14: 1-8.
44. Dehghani, A, et al. The effect of transcranial alternating current stimulation over the supplementary motor area on bimanual coordination in elderly people. *Sport Sciences and Health Research*, 2023, 15.1: 113-125. <https://doi.org/10.22059/sshr.2023.362378.1100>
45. Mccambridge, Alana B.; Stinear, James W.; Byblow, Winston D. Neurophysiological and

- behavioural effects of dual-hemisphere transcranial direct current stimulation on the proximal upper limb. *Experimental brain research*, 2016, 234: 1419-1428. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26749182/>
46. Vancleef, K, et al. tDCS over left M1 or DLPFC does not improve learning of a bimanual coordination task. *Scientific reports*, 2016, 6.1: 35739. VARLET, Manuel, et al. Continuity of visual and auditory rhythms influences sensorimotor coordination. 2012.
47. Oldfield, R. C. Edinburgh handedness inventory. *Journal of Abnormal Psychology*, 1971.
48. Vangheluwe, Sophie, et al. Learning and transfer of bimanual multifrequency patterns: effector-independent and effector-specific levels of movement representation. *Experimental Brain Research*, 2006, 170: 543-554.
49. Kamali, Mohammadreza, et al. Sustainability considerations in membrane-based technologies for industrial effluents treatment. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 368: 474-494.
50. Hafezi, S.; Doustan, M.; Saemi, E. The Effect of Brain Anodal and Cathodal Transcranial Direct Current Stimulation on Psychological Refractory Period at Different Stimulus-Onset Asynchrony in Non-Fatigue and Mental Fatigue Conditions. *Brain Sci.* 2024, 14, 477. <https://doi.org/10.3390/brainsci14050477>
51. Salehi, F, Doustan, M.R, and Esmaeel S. "Effect of Training with Transcranial Electrical Stimulation with Random Noise on Brain Waves and Temporal/Spatial Components in Learning a Perceptual-Motor Task." *Sports Psychology* 16.1. 2024: 1-29.
52. Filmer, Hannah L., et al. Improvements in attention and decision-making following combined behavioral training and brain stimulation. *Cerebral cortex*, 2017, 27.7: 3675-3682..
53. Nitsche, M. A., & Paulus, W. Transcranial direct current stimulation—update 2011. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 2011. 29(6), 463–492. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22085959/>
54. Ehrhardt, Shane E., et al. The influence of tDCS intensity on decision-making training and transfer outcomes. *Journal of Neurophysiology*, 2021, 125.2: 385-397. <https://doi.org/10.1152/jn.00423.2020>
55. Ejaz, Fatima, et al. Effectiveness of routine physical therapy with or without home-based intensive bimanual training on clinical outcomes in cerebral palsy children: a randomised controlled trial. *Physiotherapy Quarterly*, 2024, 32.1: 78-83.
56. Bugos, Jennifer A. The effects of bimanual coordination in music interventions on executive functions in aging adults. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 2019, 13: 68.
57. Krings, Timo, et al. Cortical activation patterns during complex motor tasks in piano players and control subjects. A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience letters*, 2000, 278.3: 189-193.
58. Gholampour, H; Doostan, M. R. The effect of dominant hand and bimanual coordination task difficulty on the brainwave of cortical areas in right and left-handed persons. *Neuropsychology*, 2017, 2.7: 47-62. In Persian
59. Kim, Sarah, et al. Quantitative analysis of piano performance proficiency focusing on difference between hands. *PloS one*, 2021, 16.5: e0250299. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250299>
60. Pang, J., Zhao, S., Wang, Y., Wang, Q., & Fang, Q. Piano practice with emphasis on left hand for right handers: Developing pedagogical strategies based on motor control perspectives. *Frontiers in Psychology*, . (2023). 14, 1124508. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1124508>
61. Hyde, Krista L., et al. Musical training shapes structural brain development. *Journal of Neuroscience*, 2009, 29.10: 3019-3025. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5118-08.2009>
62. Wilson, Emily MF; Davey, Nick J. Musical beat influences corticospinal drive to ankle flexor and extensor muscles in man. *International Journal of Psychophysiology*, 2002, 44.2: 177-184.

63. Stupacher, Jan, et al. Musical groove modulates motor cortex excitability: A TMS investigation. *Brain and cognition*, 2013, 82.2: 127-136.
64. Burger, Birgitta, et al. Influences of rhythm-and timbre-related musical features on characteristics of music-induced movement. *Frontiers in psychology*, 2013, 4: 183.
65. Godøy, Rolf Inge. Gestural affordances of musical sound. In: *Musical Gestures*. Routledge, 2010. p. 115-137.
66. Nicolaou, Nicoletta, et al. Directed motor-auditory EEG connectivity is modulated by music tempo. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2017, 11: 502. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00502>
67. Yuan, Yuan, et al. A study on melody tempo with EEG. *Journal of Electronic Science and Technology*, 2009, 7.1: 88-91.
68. Ting, C. Q., & Karthigeyan, K. K. The effects of music tempo on memory performance using maintenance rehearsal and imagery. *Sunway Academic Journal*, 2006. 6, 115.
69. Höller, Yvonne, et al. Individual brain-frequency responses to self-selected music. *International Journal of Psychophysiology*, 2012, 86.3: 206-213.
70. Hurlless, Nicole, et al. Music genre preference and tempo alter alpha and beta waves in human non-musicians. *Impulse*, 2013, 22.4: 1-11.
71. Park, M., Gutyrchik, E., Bao, Y., Zaytseva, Y., Carl, P., Welker, L., ... & Meindl, T. Differences between musicians and non-musicians in neuro-affective processing of sadness and fear expressed in music. *Neuroscience letters*, 2014. 566, 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2014.02.041>
72. Bogert, Brigitte, et al. Hidden sources of joy, fear, and sadness: Explicit versus implicit neural processing of musical emotions. *Neuropsychologia*, 2016, 89: 393-402.
73. Liu, Ying, et al. Effects of musical tempo on musicians' and non-musicians' emotional experience when listening to music. *Frontiers in Psychology*, 2018, 9: 2118. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02118>
74. Semjen, Andras. On the timing basis of bimanual coordination in discrete and continuous tasks. *Brain and Cognition*, 2002, 48.1: 133-148. <https://doi.org/10.1006/brcg.2001.1309>
75. Varlet, Manuel, et al. Continuity of visual and auditory rhythms influences sensorimotor coordination. 2012. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044082>
76. Verwey, Willem B. Chord skill: learning optimized hand postures and bimanual coordination. *Experimental brain research*, 2023, 241.6: 1643-1659. <https://doi.org/10.1007/s00221-023-06629-2>
77. Vancleef, K., Meesen, R., Swinnen, S. P., & Fujiiyama, H. tDCS over left M1 or DLPFC does not improve learning of a bimanual coordination task. *Scientific reports*, (2016). 6(1), 35739. <https://doi.org/10.1038/srep35739>
78. DREWING, Knut; ASCHERSLEBEN, Gisa; LI, Shu-Chen. Sensorimotor synchronization across the life span. *International Journal of Behavioral Development*, 2006, 30.3: 280-287.
79. Zelaznik, Howard N.; Rosenbaum, David A. Timing processes are correlated when tasks share a salient event. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2010, 36.6: 1565. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20731516/>
80. Albert, Neil B.; Ivry, Richard B. The persistence of spatial interference after extended training in a bimanual drawing task. *Cortex*, 2009, 45.3: 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.11.012>
81. Shea, Charles H.; Buchanan, John J.; Kennedy, Deanna M. Perception and action influences on discrete and reciprocal bimanual coordination. *Psychonomic bulletin & review*, 2016, 23: 361-386.
82. Bugos, Jennifer A. The effects of bimanual coordination in music interventions on executive functions in aging adults. *Frontiers in Integrative*

- Neuroscience*, 2019, 13: 68.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2019.00068>
83. Chang, Xin, et al. The effect of music training on unimanual and bimanual responses. *Musicae Scientiae*, 2014, 18.4: 464-472.
<https://doi.org/10.1177/1029864914547147>
84. Azarpaikan, Atefeh, et al. Power spectral parameter variations after transcranial direct current stimulation in a bimanual coordination task. *Adaptive Behavior*, 2021, 29.1: 25-38.
85. Hikosaka, Mikito; Aramaki, Yu. Effects of bilateral transcranial direct current stimulation on simultaneous bimanual handgrip strength. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2021, 15: 674851.
86. Rahman, Simin, et al. tDCS Anodal tDCS increases bilateral corticospinal excitability irrespective of hemispheric dominance. *The Journal of Science and Medicine*, 2020, 2.2: 1-17.
87. De Laet, Chloë, et al. Bimanual motor skill learning after stroke: Combining robotics and anodal tDCS over the undamaged hemisphere: An exploratory study. *Frontiers in neurology*, 2022, 13: 882225.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2022.882225>
88. Kimura, Takehide; Kaneko, Fuminari; Nagamine, Takashi. The effects of transcranial direct current stimulation on dual-task interference depend on the dual-task content. *Frontiers in human neuroscience*, 2021, 15: 653713.
89. Berryhill, Marian E.; Martin, Donel. Cognitive effects of transcranial direct current stimulation in healthy and clinical populations: an overview. *The journal of ECT*, 2018, 34.3: e25-e35.
90. Dayan, Eran; Cohen, Leonardo G. Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron*, 2011, 72.3: 443-454.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008>
91. Umphred, Darcy A. Umphred's Neurological Rehabilitation. 7th edition. St. Louis, Mo: Elsevier/Mosby, 2013. update Brain Stimulat. 2016.9 (5), 641-661.
<https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.06.004>.
92. Picard, Nathalie; Matsuzaka, Yoshiya; STRICK, Peter L. Extended practice of a motor skill is associated with reduced metabolic activity in M1. *Nature neuroscience*, 2013, 16.9: 1340-1347.
93. Wu, Howard G., et al. Temporal structure of motor variability is dynamically regulated and predicts motor learning ability. *Nature neuroscience*, 2014, 17.2: 312-321.
94. Floyer-Lea, Anna; Matthews, Paul M. Distinguishable brain activation networks for short-and long-term motor skill learning. *Journal of neurophysiology*, 2005, 94.1: 512-518.