DOI: 10.22034/yafteh.28.2.120

Yafteh
Volume 28, Issue 2, 2026

Original Article

The Effect of Chronic Direct Transcranial Stimulation on Fatigue and Recovery among Football Players

Homeira Moradi[1], Rahim Mirnasuri[1*], Masoud Rahmati[1]

1. Department of Physical Education and Sport Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran

***Corresponding author:** Rahim Mirnasuri, Department of Physical Education and Sport Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: mirnasuri.r@lu.ac.ir

How to Cite this Article:
Moradi H, Mirnasuri R, Rahmati M. The Effect of Chronic Direct Transcranial Stimulation on Fatigue and Recovery among Football Players. Yafteh. 2026;28(2):120-131.

Received: Febuary 19, 2026
Revised: May 23, 2026
Accepted: June 04, 2026

Keywords:
Chronic
Fatigue
Football
Recovery
Transcranial Stimulation

Abstract

Background: Fatigue and recovery are determining factors in maintaining athletes' performance, especially in soccer. This study aimed to investigate the effect of chronic direct transcranial stimulation on fatigue and recovery among football players.

Materials and Methods: This quasi-experimental study utilized a pre-test and post-test design. The population consisted of male football players over 18 years old in Khorramabad, Iran, and 20 cases were randomly selected. A 20-minute anodal stimulation protocol at an intensity of 2 mA was applied to the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC). In total, 12 transcranial direct current stimulation (tDCS) sessions were administered over a four-week period, and the same variables were assessed again at the end of the intervention. The variables included HRV, HbO_2, RPE, vertical jump, salivary lactate, and recovery. Measurements were performed using pulse oximetry, RPE scale, Sargent test, saliva sampling, and TQR scale. Data analysis was performed using descriptive statistics, the Shapiro-Wilk test, and analysis of covariance through SPSS software (version 22) at the 0.05 level.

Results: The results showed that 12 sessions of tDCS resulted in a significant increase in HRV (P=0.001) and a decrease in perceived fatigue pressure (P=0.001), in addition to a significant increase in vertical jump height (P=0.001) and improved recovery (P=0.001). On the other hand, this multi-session course did not show a significant effect on HbO_2 (P=0.823) and salivary lactate (P=0.085).

Conclusion: The results of this study showed that 12 sessions were able to improve some variables, such as HRV, jump height, recovery, and perceived pressure. These findings emphasize the importance of the cumulative and adaptive effects of tDCS. Overall, tDCS can be considered an auxiliary method in optimizing the performance and recovery of athletes.

Copyright © 2026 The Author(s); Published by Lorestan University of Medical Sciences.

This is an open-access article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses /by-nc/4.0/), which permits others to copy and redistribute material just in non-commercial usages, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]

یافتـــه
دوره ۲۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵

DOI: 10.22034/yafteh.28.2.120

مقاله پژوهشی

تاثیر تحریک مزمن مستقیم فراجمجمه ای بر خستگی و ریکاوری در بازیکنان فوتبال

حمیرا مرادی[۱]، رحیم میرنصوری[۱*]، مسعود رحمتی[۱]

۱. گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

*نویسنده مسئول: رحیم میرنصور، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. ایمیل: mirnasuri.r@lu.ac.ir

استناد: مرادی، حمیرا؛ میرنصور، رحیم؛ رحمتی، مسعود. تاثیر تحریک مزمن مستقیم فراجمجمه ای بر خستگی و ریکاوری در بازیکنان فوتبال. یافته. دوره ۲۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵.

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۱۱/۳۰
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۴

واژگان کلیدی:
تحریک مزمن
فراجمجمه‌ای
خستگی
فوتبال
ریکاوری

چکیده

مقدمه: خستگی و ریکاوری از عوامل تعیین‌کننده در حفظ عملکرد ورزشکاران، به‌ویژه در فوتبال، به شمار می‌روند. هدف این مطالعه بررسی تاثیر تحریک مزمن مستقیم فراجمجمه ای بر خستگی و ریکاوری در بازیکنان فوتبال بود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از طرح نیمه‌تجربی با پیش‌آزمون و پس‌آزمون استفاده شد. جامعه شامل بازیکنان فوتبال مرد بالای ۱۸ سال خرم‌آباد بود و ۲۰ نفر به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. پروتکل تحریک ۲۰ دقیقه آندال با شدت ۲ میلی‌آمپر بر ناحیه DLPFC اجرا شد. طی چهار هفته، ۱۲ جلسه tDCS انجام و پس از پایان دوره همان متغیرها ارزیابی شد. متغیرها شامل HRV ، HbO_2، RPE، پرش عمودی، لاکتات بزاق و ریکاوری بودند. سنجش‌ها با پالس‌اکسی‌متری، مقیاسRPE ، آزمون سارجنت، نمونه‌گیری بزاق و مقیاس TQR انجام شد. تحلیل داده‌ها با آمار توصیفی، آزمون شاپیرو–ویلک و کوواریانس و با نرم‌افزار SPSS22 در سطح ۰/۰۵ انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد اجرای دوازده جلسه tDCS منجر به افزایش معنادار HRV (P=۰/۰۰۱) و کاهش درک فشار خستگی (P=۰/۰۰۱) شد و علاوه بر آن افزایش معناداری در ارتفاع پرش عمودی (P=۰/۰۰۱) و بهبود ریکاوری (P=۰/۰۰۱) مشاهده گردید. در مقابل، این دوره‌ی چندجلسه‌ای بر میزان HbO_2 (P=۰/۸۲۳) و لاکتات بزاق (P=۰/۰۸۵) اثر معناداری نشان نداد.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد دوازده‌جلسه‌ای آن توانست برخی متغیرها مانندHRV ، ارتفاع پرش، ریکاوری و فشار ادراک‌شده را بهبود دهد. این یافته‌ها بر اهمیت اثرات تجمعی و سازگاری‌زای tDCS تأکید می‌کند. در مجموع، tDCSمی‌تواند به‌عنوان روشی کمکی در بهینه‌سازی عملکرد و ریکاوری ورزشکاران مورد توجه قرار گیرد.

Copyright © 2026 The Author(s); Published by Lorestan University of Medical Sciences.

This is an open-access article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses /by-nc/4.0/), which permits others to copy and redistribute material just in non-commercial usages, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]

مقدمه

فوتبال یک ورزش تیمی خود گام، نامنظم، چند جهته و متناوب است که معمولاً در دو نیمه ٤٥ دقیقه‌ای به رقابت می‌پردازد و با یک فاصله ۱۵ دقیقه‌ای استراحت نیمه‌تایم جدا می‌شود [۱]. فوتبال نزدیک به ۳۰۰ میلیون شرکت کننده دارد و به عنوان محبوب‌ترین اما یکی از خطرناک ترین ورزش‌های المپیک شناخته می‌شود [۲]. یک بازیکن نخبه فوتبال مسافتی بین ۱۰ تا ۱۳ کیلومتر را در طول یک مسابقه با شدت متوسط نزدیک به آستانه بی‌هوازی (۸۵ ٪ حداکثر ضربان قلب) طی می‌کند. علاوه بر این، فعالیت‌های دویدن با شدت بالا، مانند برست‌ها و دوی سرعت، حدود ۱۰ درصد از زمان بازی را تشکیل می‌دهند [۳]. در طول مسابقات رسمی و بخش‌های تمرینی، بازیکنان در معرض خواسته‌های جسمانی مختلفی از جمله دویدن، پریدن، دوی سرعت، شتاب‌گیری، کاهش سرعت، و تغییرات ثابت جهت قرار می‌گیرند که منجر به تغییرات فیزیولوژیکی می‌شود. به همین ترتیب، بازیکنان باید برای حفظ سطح توجه بالا، پیش‌بینی اقدامات حریف و تصمیم‌گیری در یک مکان و زمان محدود همراه با فشار مداوم محیط (مانند موقعیت‌های بازی، حریفان، هواداران و غیره) تلاش‌های شناختی بالایی داشته باشند. پیامد این خواسته‌ها خستگی، احساس خستگی و ضعف یا عدم حفظ نیروی مورد نیاز یا مورد انتظار در طول و بعد از تمرین است که توسط پدیده‌های چند عاملی القا می‌شود [٤].

خستگی به عنوان شکست هموستاز داخلی ناشی از افزایش تولید انرژی مورد نیاز توسط یک محرک خارجی تعریف می‌شود [٥]. خستگی بر عوامل خطر قابل اصلاح ذاتی آینده‌نگر برای آسیب اندام تحتانی تأثیر می‌گذارد، که نشان‌دهنده تغییر پروفایل خطر آسیب برای پیچ‌خوردگی جانبی مچ پا، سندرم درد کشکک رانی و آسیب‌های همسترینگ است [٦]. تاکنون مطالعات متعددی نقش اساسی مغز را در تعیین خستگی و قدرت عضلانی و عملکرد استقامتی بررسی و نشان داده اند [۷، ۸] . مکانیسم‌های مرتبط با خستگی ممکن است در اختلالات متفاوت باشد، یک شبکه مغزی شامل مخطط، قشر جلوی پیشانی پشتی جانبی، سینگولیت قدامی پشتی، قشر جلوی پیشانی شکمی میانی و اینسولای قدامی با خستگی در چندین اختلال مرتبط است [۹].

از چند سال پیش، دانشمندان ورزش شروع به تمرکز بر مطالعه مغز به عنوان حاکم مرکزی کردند، و بنابراین، ورزش را با توجه به یک فعالیت ایمن محاسبه شده عصبی توسط بدن و اینکه چگونه مغز می‌تواند عملکرد جسمانی را محدود یا بهبود بخشد، تنظیم می کند [۷]. ایده قانع کننده گنجاندن علوم اعصاب در ورزش و همچنین رابطه بین صنعت و علم منجر به تولید محصولات مبتنی بر دانش برای بهبود عملکرد ورزشکاران حرفه‌ای شده است [۱۰]. در واقع، عواملی مانند یادگیری حرکتی، قدرت عضلانی، خستگی یا حتی سرعت پردازش برای مهارت‌های حرکتی خاص ممکن است از طریق روش‌های غیرتهاجمی تحریک مغز به دست آیند [۱۱]. تکنیک‌های تحریک غیر تهاجمی مغز (NIBS) مانند تحریک جریان مستقیم ترانس کرانیال (tDCS) اخیراً به عنوان یک گزینه درمانی مؤثر برای تغییر تحریک پذیری قشر مغز استفاده می شود. tDCS یک جریان مستقیم با دامنه کم است که مزایای زیادی مانند استفاده آسان، هزینه کم، ایمنی عالی و تحمل پذیری در مقایسه با سایر درمان ها مانند دارو هیچ شواهد منتشر شده ای از عوارض جانبی فیزیولوژیکی یا رفتاری در مورد آن وجود ندارد [۱۲]. تحریک tDCS به طور گسترده توسط دانشمندان علوم اعصاب و پزشکان برای اهداف تحقیقاتی و درمانی استفاده می شود. tDCS در حال حاضر به عنوان درمانی برای طیف وسیعی از اختلالات روانپزشکی تحت بررسی است. علیرغم محبوبیت آن، درک کاملی از مکانیسم های عصبی فیزیولوژیکی زیربنایی tDCS هنوز وجود ندارد. tDCS یک میدان الکتریکی ضعیف در قشر مغز ایجاد می کند که به طور کلی فرض می شود که اثرات مشاهده شده را ایجاد می کند [۱۳].

تحریک مستقیم فراجمجمه‌ای یک روش غیرتهاجمی برای تحریک مغز است که از طریق اعمال جریان الکتریکی ضعیف به نواحی خاصی از قشر مغز، فعالیت عصبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که tDCS می‌تواند باعث بهبود عملکرد شناختی، افزایش تحمل به خستگی، و کاهش زمان ریکاوری در ورزشکاران شود. با این حال، تأثیرات دقیق این روش، به ویژه در بازیکنان فوتبال، هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است. مطالعات موجود عمدتاً بر اثرات کوتاه‌مدت (حاد) یا بلندمدت (مزمن) tDCS بر خستگی و ریکاوری تمرکز داشته‌اند، اما یافته‌ها در این زمینه متناقض هستند. برخی تحقیقات نشان داده‌اند که تحریک مغزی می‌تواند باعث افزایش توان عضلانی و کاهش احساس خستگی شود، در حالی که برخی دیگر تأثیرات معناداری را گزارش نکرده‌اند. علاوه بر این، مشخص نیست که آیا استفاده مداوم از این روش در طول فصل مسابقات می‌تواند اثرات پایدار و سودمندی بر بازیابی بازیکنان داشته باشد یا خیر. بنابراین، هدف این پژوهش بررسی تأثیرات حاد و مزمن تحریک مستقیم فراجمجمه‌ای بر میزان خستگی و فرآیند ریکاوری در بازیکنان فوتبال است.

مواد و روش‌ها

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]

روش تحقیق حاضر از نوع نیمه‌تجربی بوده که با طرح پیش‌آزمون و پس‌آزمون انجام شده است. جامعه آماری بازیکنان فوتبال مرد بالای ۱۸ سال در شهرستان خرم آباد بودند. از بین آنها تعداد ۲۰ نفر به طور تصادفی و داوطلبانه به عنوان نمونه انتخاب و به دو گروه کنترل و تجربی تقسیم‌بندی شدند، به‌طوری‌که هر گروه شامل ۱۰ نفر شدند. معیارهای ورود به مطالعه شامل: داشتن سلامت کامل و تمایل به شرکت در پژوهش می باشد. معیارهای خروج نیز عبارتند از: تمایل نداشتن به ادامه تمرین و هر شرایط دیگری که منجر به عدم توانایی بازیکن برای شرکت در مسابقه فوتبال شود. برای اجرای پژوهش از دستگاه tDCS، دستگاه پالس اکسی متر و دستگاه نوارقلب استفاده شد. نمونه‌های بزاقی نیز جهت اندازه‌گیری متغیرهای لاکتات آزمایشگاه پاستور واقع در شهر خرم آباد فرستاده شد. جلسات آزمایشی به صورت تحریک آندال ۲۰ دقیقه ای با شدت ۲ میلی آمپر با پدهای آغشته به محلول نمک بر روی ناحیه ی DLPFC با استفاده دستگاه NEUROSTIM-۲ NEUROSTIM ساخت شرکت مدینا طب گستر برای تمامی شرکت کنندگان انجام شد.

قبل از شروع برنامه اصلی تمرین، شرکت‌کنندگان در یک جلسه توجیهی حاضر شده و ضمن آشنایی با پروتکل آزمایشی درصورت موافقت اقدام به تکمیل رضایت‌نامه حضور در پژوهش کردند. یک جلسه‌ی دیگر که پس از یک مسابقه ی فوتبال انجام شد متغیرهای خستگی و در جلسه ای دیگرپس از ۷۲ ساعت میزان ریکاوری آنان سنجیده شد. سپس یک جلسه tDCS در روز مسابقه فوتبال انجام شد، بلافاصله پس از پایان مسابقه فاکتورهای خستگی و پس از ۷۲ ساعت میزان ریکاوری سنجیده شد و با قبل از انجام tDCSمقایسه شد. همچنین ۱۱ جلسه ی دیگر نیز tDCS سه جلسه در هفته به مدت ٤هفته انجام شد و پس از پایان ۱۲جلسه ی تحریک، فاکتورهای خستگی و ریکاوری پس از پایان و ۷۲ ساعت بعد از اولین مسابقه ی فوتبالشان اندازه گیری و با قبل از شروع تحریک مقایسه شدند. در این مدت گروه کنترل تحت مداخله قرار نگرفت و تنها در مراحل پیش آزمون و پس آزمون شرکت کردند.

به‌منظور ارزیابی تغییرپذیری ضربان قلب (HRV) ، ثبت نوار قلب (ECG) در شرایط استراحت انجام شد. شرکت‌کنندگان پیش از انجام اندازه‌گیری حداقل ۱۰ دقیقه در وضعیت نشسته و در محیطی آرام، با دمای کنترل‌شده (۲۲-۲٤ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند. ثبت ECG با استفاده از دستگاه نوار قلب استاندارد سه لید و با فرکانس نمونه‌برداری حداقل ۱۰۰۰ هرتز انجام شد تا دقت ثبت فواصل بین ضربان‌های طبیعی قلب افزایش یابد. سیگنال‌های ECG ثبت‌شده پس از بررسی اولیه، برای حذف نویز و آرتیفکت‌های حرکتی فیلتر شدند و ضربان‌های غیرطبیعی به‌صورت دستی و خودکار شناسایی و حذف گردیدند. سپس فواصل بین ضربان‌های طبیعی متوالی استخراج شد. شاخص انحراف معیار فواصل طبیعی تا طبیعی (SDNN)، به‌عنوان انحراف معیار تمامی فواصل NN طی دوره ثبت محاسبه گردید و نشان‌دهنده تغییرپذیری کلی ضربان قلب است. شاخص جذر میانگین مربعات تفاوت‌های متوالی (RMSSD) به‌صورت جذر میانگین مربعات اختلاف فواصل NNمتوالی محاسبه شد که بازتاب‌دهنده فعالیت سیستم عصبی پاراسمپاتیک می‌باشد. کلیه مقادیر RMSSD و SDNN بر حسب میلی‌ثانیه (ms) گزارش شدند. تحلیل داده‌های HRV با استفاده از نرم‌افزار تخصصی تحلیل سیگنال ECG انجام گرفت و تمامی اندازه‌گیری‌ها مطابق با دستورالعمل‌های انجمن قلب و الکتروفیزیولوژی اروپا انجام شد.

در این مطالعه جهت ارزیابی سطوح هموگلوبین اکسیژنه از پالس اکسیمتری استفاده شد. جهت ارزیابی خستگی از روش ارزیابی درک فشار خستگی (RPE) استفاده شد. در این مطالعه امتیاز ۲۰ به معنی درک فشار خستگی بالا و امتیاز ۰ به معنی عدم وجود خستگی بود. در راستای ارزیابی توان انفجاری و ارزیابی عملکردی از آزمون پرش سارجنت استفاده شد. بازیابی کیفیت کلی (TQR) ابزاری معتبر در علوم ورزشی و فیزیولوژی ورزشی است که برای ارزیابی درک ذهنی ورزشکار از بهبودی پس از تمرین یا مسابقه استفاده می‌شود. TQR که به عنوان معادلی برای مقیاس رتبه‌بندی درک شده از فشار (RPE) برای شدت تمرین توسعه یافته است، به مربیان و ورزشکاران کمک می‌کند تا روند بهبودی را برای جلوگیری از تمرین بیش از حد، بهینه‌سازی عملکرد و اطمینان از بارهای تمرینی متعادل، کنترل کنند. این ابزار اولین بار در اواخر دهه ۱۹۹۰ به عنوان بخشی از تحقیقات تمرین بیش از حد معرفی شد. در این مقیاس ۲۰ به معنی ریکاوری خیلی خوب و نمره ۷ به پایین یعنی ریکاوری خیلی ضعیف بود [۱٤].

برای اندازه‌گیری سطوح لاکتات بزاق دهانی در هر یک از مراحل آزمون، از شرکت‌کنندگان مقدار کافی بزاق (حدود ٥ میلی‌لیتر) به روش غیرتهاجمی جمع‌آوری شد. بدین منظور، آزمودنی‌ها پس از شست‌وشوی دهان با آب مقطر و پرهیز از خوردن، آشامیدن و فعالیت بدنی شدید حداقل ۳۰ دقیقه پیش از نمونه‌گیری، بزاق خود را به‌صورت غیرفعال در لوله‌های استریل مخصوص جمع‌آوری بزاق تخلیه کردند. نمونه‌های بزاقی بلافاصله پس از جمع‌آوری، در شرایط استریل و دمای کنترل‌شده نگهداری و در اسرع وقت به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس نمونه‌ها برای حذف ذرات معلق و ناخالصی‌ها در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. پس از سانتریفیوژ، بخش شفاف فوقانی بزاق

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]

(سوپرناتانت) جدا شده و تا زمان آنالیز لاکتات در دمای مناسب نگهداری گردید. اندازه‌گیری غلظت لاکتات بزاقی مطابق دستورالعمل کیت آزمایشگاهی مربوطه انجام شد.

از آمار توصیفی برای انحراف استاندارد، تعیین میانگین و از آزمون شاپیرو ویلک برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و برای مقایسه‌های بین گروه‌ها از آزمون آنکوا (پیش‌آزمون به‌عنوان کوواریت) استفاده شد. کلیه محاسبات آماری با استفاده نرم‌افزار SPSS 22 در سطح P ≤۰/۰۵ تحلیل شد.

یافته‌ها

شاخص‌های توصیفی آزمودنی ها در گروه های پژوهش در جدول ۱ گزارش شده است.

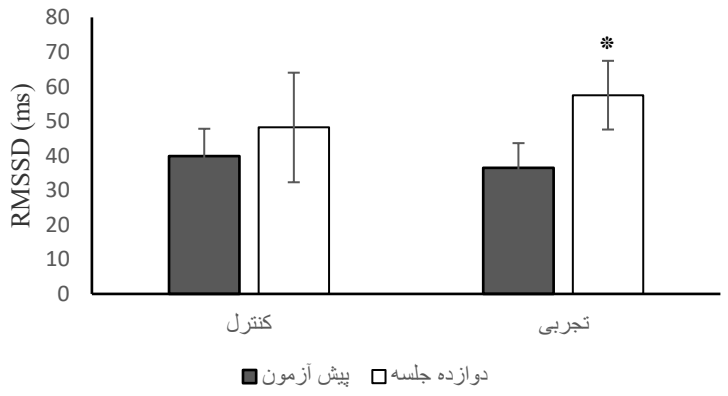
جدول ۱. شاخص های توصیفی آزمودنی ها در گروه های مورد مطالعه

متغیر	گروه کنترل	گروه تجربی
سن (سال)	۲۳/۴۰ ± ۳/۹۷	۲۳/۹۰ ± ۳/۹۰
قد (سانتی متر)	۱۷۵/۳۰ ± ۳/۴۰	۱۷۵/۵۰ ± ۴/۲۲
وزن (کیلوگرم)	۷۵/۶۰ ± ۱/۳۴	۷۳/۳۰ ± ۴/۱۹
شاخص توده بدنی (کیلوگرم بر متر مربع)	۲۴/۶۰ ± ۱/۱۷	۲۳/۸۸ ± ۱/۸۲

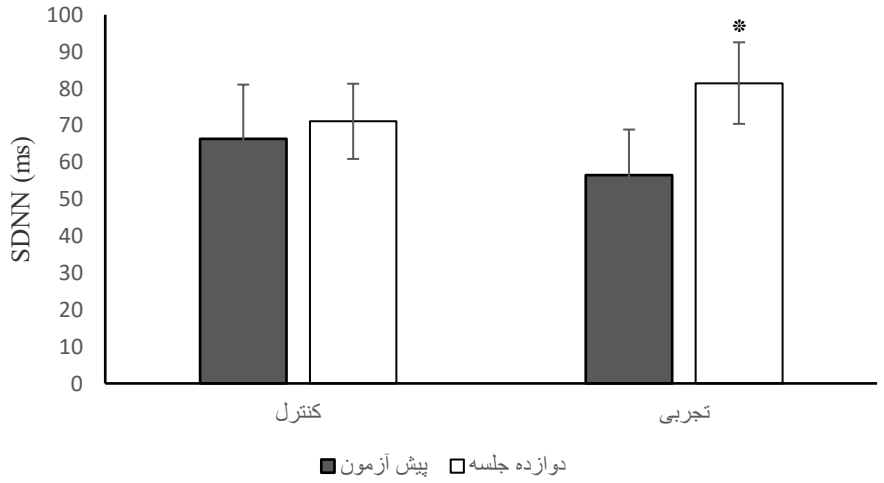
نتایج آزمون t زوجی نشان داد که میانگین RMSSD در گروه تجربی در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون افزایش معناداری یافته است (P=۰/۰۰۱). اما این تغییر در گروه کنترل در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون معنادار نبود (P=۰/۰۶۱). با بررسی بیشتر توسط آزمون آنکوا و با کواریانت قرار دادن مقادیر پایه نیز تفاوت معناداری بین پس آزمون دو گروه تجربی و شاهد مشاهده شد (P=۰/۰۳۳) (شکل ۱). نتایج آزمون t زوجی نشان داد که میانگین SDNN در گروه تجربی در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون افزایش معناداری یافته است (P=۰/۰۰۱). اما این تغییر در گروه کنترل در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون معنادار نبود (P=۰/۴۸۸). با بررسی بیشتر توسط آزمون آنکوا و با کواریانت قرار دادن مقادیر پایه نیز تفاوت معناداری بین پس آزمون دو گروه تجربی و شاهد مشاهده شد (P=۰/۰۴۲) (شکل۲).

نتایج آزمون t زوجی نشان داد که میانگین HbO2 در گروه تجربی در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون تغییر معناداری نداشته است (P=۰/۸۲۳). همچنین این تغییر در گروه کنترل در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون معنادار نبود (P=۰/۰۵۲). با بررسی بیشتر توسط آزمون آنکوا و با کواریانت قرار دادن مقادیر پایه نیز تفاوت معناداری بین پس آزمون دو گروه تجربی و شاهد مشاهده نشد (P=۰/۴۳۹). نتایج آزمون t زوجی در رابطه با میانگین RPE در گروه تجربی در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون کاهش معناداری یافته است (P=۰/۰۰۱). اما این تغییر در گروه کنترل در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون معنادار نبود (P=۰/۷۹۸). با بررسی بیشتر توسط آزمون آنکوا و با کواریانت قرار دادن مقادیر پایه نیز تفاوت معناداری بین پس آزمون دو گروه تجربی و شاهد مشاهده شد (P=۰/۰۰۱). نتایج آزمون t زوجی در رابطه با میانگین لاکتات بزاق در گروه تجربی در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون کاهش معناداری نداشت (P=۰/۰۸۵). همچنین این تغییر در گروه کنترل در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون معنادار نبود (P=۰/۱۱۳). با بررسی بیشتر توسط آزمون آنکوا و با کواریانت قرار دادن مقادیر پایه نیز تفاوت معناداری بین پس آزمون دو گروه تجربی و شاهد مشاهده شد (P=۰/۶۸۱). نتایج آزمون t زوجی در رابطه با میانگین امتیاز ریکاوری در گروه تجربی در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون افزایش معناداری یافته است (P=۰/۰۰۱). اما این تغییر در گروه کنترل در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون معنادار نبود (P=۰/۰۷۴). با بررسی بیشتر توسط آزمون آنکوا و با کواریانت قرار دادن مقادیر پایه نیز تفاوت معناداری بین پس آزمون دو گروه تجربی و شاهد مشاهده شد (P=۰/۰۰۱) (جدول ۲).

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]



شکل ۱. تغییرات RMSSD در دو گروه پژوهش. * اختلاف معناداری بین دو گروه مشاهده شد (P<۰/۰۵).



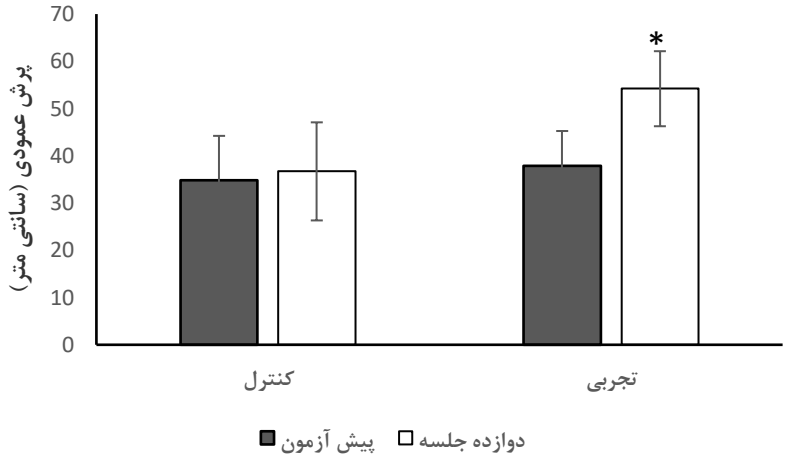
شکل ۲. تغییرات SDNN در دو گروه پژوهش. * اختلاف معناداری بین دو گروه مشاهده شد (P<۰/۰۵).

جدول ۲. مقایسه مقادیر پیش و پس از دوازده جلسه در هر دو گروه

متغیر	کنترل		تجربی		نتایج آزمون کوواریانس
	پیش آزمون	دوازده جلسه	پیش آزمون	دوازده جلسه	
درک فشار خستگی	۱/۶۱ ± ۱۶/۸۰	۰/۸۲ ± ۱۶/۷۰	۰/۸۱ ± ۱۸	۰/۷۳ ± ۱۵/۱۰	*۰/۰۰۱
نتایج آزمون t زوجی	۰/۷۹۸		*۰/۰۰۱		
میانگین لاکتات بزاق	۰/۱۶ ± ۱/۳۵	۱/22 ± ۰/20	۰/۲۲ ± ۱/۴۳	۱/30 ± ۰/23	۰/۶۸۱
نتایج آزمون t زوجی	۰/۰۸۵		۰/۱۱۳		
امتیاز ریکاوری	۱/۷۵ ± ۱۲/۲۰	۱/۶۸ ± ۱۳/۲۰	۲/۲۷ ± ۱۲/۴۰	۱/۵۸ ± ۱۷/۵۰	*۰/۰۰۱
نتایج آزمون t زوجی	۰/۰۷۴		*۰/۰۰۱		
میانگین HbO2	۰/۸۴ ± ۹۷/۴۰	۰/۳۱ ± ۹۸/۱۰	۱/۲۲ ± ۹۷/۸۰	۱/۱۹ ± ۹۷/۹۰	۰/۴۳۹
نتایج آزمون t زوجی	۰/۰۵۲		۰/۸۲۳		

نتایج آزمون t زوجی نشان داد میانگین ارتفاع پرش عمودی در گروه تجربی در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون افزایش معناداری یافته است (P=۰/۰۰۱). اما این تغییر در گروه کنترل در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون معنادار نبود (P=۰/۲۴۲). با بررسی بیشتر توسط آزمون آنکوا و با کواریانت قرار دادن مقادیر پایه نیز تفاوت معناداری بین پس آزمون دو گروه تجربی و شاهد مشاهده شد (P=۰/۰۰۱) (شکل ۳).

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]



شکل ۳. تغییرات میانگین ارتفاع پرش در دو گروه پژوهش. * اختلاف معناداری بین دو گروه مشاهده شد (P<۰/۰۵).

بحث و نتیجه گیری

هدف پژوهش حاضر بررسی و مقایسه اثرات حاد و مزمن تحریک مستقیم فراجمجمه‌ای (tDCS) بر شاخص‌های خستگی و ریکاوری در بازیکنان فوتبال بود. نتایج نشان داد اجرای ۱۲ جلسه tDCS موجب افزایش معنادارHRV ، شامل مقادیر RMSSDوSDNN ، در این ورزشکاران شد. بدین معنی که افزایش قابل توجهی در شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب، به ویژه جذر میانگین مربعات تفاوت‌های متوالی (RMSSD) و انحراف معیار فواصل طبیعی تا طبیعی (SDNN)، که نشانگرهای کلیدی فعالیت سیستم عصبی خودکار پاراسمپاتیک هستند، ایجاد کرد. این تغییرات نشان‌دهنده تغییر قابل توجه در تنظیم خودکار به سمت تسلط سمپاتیک است [۱۵-۱۸]. . به نظر می‌رسد جلسات مکرر tDCS اثرات نوروپلاستی تجمعی را القا می‌کنند که اساساً تنظیم خودکار را تغییر می‌دهند. جلسات تحریک چندگانه باعث ایجاد انعطاف‌پذیری شبیه به تقویت طولانی‌مدت (LTP) در قشر پیش‌پیشانی و شبکه‌های عصبی توزیع‌شده آن می‌شود. tDCS آندی مکرر به جای ایجاد افزایش گذرا در تحریک‌پذیری، از طریق سنتز پروتئین‌های نوروپلاستی و تثبیت تغییرات سیناپسی در جلسات متوالی که با فواصل زمانی خاص، معمولاً ۲۴ تا ۴۸ ساعت، از هم جدا می‌شوند، تغییرات پایدار در قدرت سیناپسی را ایجاد می‌کند. این فواصل بسیار مهم هستند زیرا اجازه می‌دهند سنتز پروتئین و آبشارهای سیگنالینگ مولکولی بدون دخالت تحریک بعدی تکمیل شوند و در نتیجه تبدیل تغییرات الکتروفیزیولوژیکی موقت به سازماندهی مجدد ساختاری و عملکردی پایدار مغز را ممکن می‌سازند [۱۹، ۲۰] . علاوه بر این، tDCS مکرر، اتصال عملکردی دوربرد بین قشر پیش‌پیشانی و مراکز خودکار در سراسر ساقه مغز و مجموعه واگ را تقویت می‌کند. مدارهای پیش‌پیشانی-ساقه مغز به طور فزاینده‌ای برای پشتیبانی از حالت خودکار ناشی از تحریک مکرر تنظیم می‌شوند، به طوری که افزایش RMSSD و SDNN مشاهده شده در بازیکنان فوتبال پس از ۱۲ جلسه tDCS، منعکس کننده تغییرات تثبیت شده در فرمان خودکار مرکزی است تا اثرات گذرا و شبیه دارو [۱۹، ۲۱، ۲۲].

اجرای ۱۲ جلسه tDCS نیز تغییری معنادار در میزان HbO_2ایجاد نکرد و این شاخص تحت تأثیر مداخله قرار نگرفت. لذا یافته‌ها نشان می‌دهد ۱۲ جلسه tDCS سطح هموگلوبین اکسیژن‌دار (HbO_2) را در بازیکنان فوتبال به طور قابل توجهی تغییر نداد، که نشان دهنده این است که اکسیژن‌رسانی مغزی که با HbO_2 اندازه‌گیری می‌شود، تحت تأثیر مداخلات tDCS در این زمینه قرار نمی‌گیرد. یک مکانیسم احتمالی که این عدم تأثیر را توضیح می‌دهد این است که tDCS در درجه اول تحریک‌پذیری عصبی و انعطاف‌پذیری سیناپسی را تعدیل می‌کند تا اینکه مستقیماً جریان خون مغزی یا متابولیسم اکسیژن را به طور حاد تغییر دهد. تغییرات در پارامترهای همودینامیکی مانند HbO_2 به اتصال عصبی عروقی و واکنش‌پذیری عروق مغزی بستگی دارد که ممکن است در مقایسه با نتایج الکتروفیزیولوژیکی یا شاخص‌های اتونومیک، حساسیت کمتری داشته باشند یا در پاسخ به تعدیل عصبی کندتر تغییر کنند. علاوه بر این، نواحی مغزی مورد هدف (مانند قشر پیش‌پیشانی پشتی-جانبی) ممکن است تأثیر زیادی بر متابولیسم اکسیژن کلی قابل اندازه‌گیری با HbO_2 در این جمعیت ورزشکار نداشته باشند [۱۷، ۲۳، ۲۴]. . علاوه بر این، اگر تغییرات عصبی تجمعی ناشی از tDCS به طور قابل توجهی بر کنترل عصبی-عروقی یا

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]

تقاضای متابولیک در مناطق تحریک شده تأثیر نگذارد، پروتکل‌های تحریک مکرر ممکن است در تغییر HbO_2 ناموفق باشند. این می‌تواند به دلیل اختصاصی بودن جریان‌های tDCS باشد که ممکن است برای ایجاد تغییرات عروقی پایدار یا تغییرات شدید در مصرف اکسیژن قشر مغز در طول استراحت یا وظایف زیر بیشینه در ورزشکاران تمرین کرده کافی نباشد [۲۵، ۲۶]. در مجموع، عدم وجود تغییرات قابل توجه در هموگلوبین اکسیژن‌دار پس از هر دو درمان tDCS تکی و چندگانه، احتمالاً نشان دهنده تأثیر مستقیم محدود این تحریک غیرتهاجمی مغز بر همودینامیک مغزی و متابولیسم اکسیژن است، علیرغم اثرات برجسته‌تر آن بر تحریک‌پذیری عصبی و مدولاسیون اتونومیک که در سایر معیارها مشاهده شده است. این تفاسیر با یافته‌های مطالعاتی که نشان می‌دهند tDCS تحریک‌پذیری و اتصال قشر مغز را بدون تغییرات موازی در اکسیژن‌رسانی قشر جلوی مغز که توسط طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک عملکردی یا روش‌های همودینامیک مرتبط در جمعیت‌های مشابه اندازه‌گیری می‌شود، تعدیل می‌کند، سازگار است [۱۷، ۲۳، ۲۴].

نتایج نشان داد که اجرای دوره ۱۲ جلسه‌ای tDCS نیز کاهش معناداری در سطح ادراک خستگی این بازیکنان ایجاد کرد. تحقیقات انجام شده در مورد tDCS با هدف قرار دادن DLPFC در بازیکنان حرفه‌ای فوتبال، اثرات قابل توجه جلسات مکرر بر خستگی ذهنی و معیارهای ریکاوری را نشان داده است، اگرچه این الگو به طور قابل توجهی با سایر نتایج فیزیولوژیکی متفاوت است. یافته‌های شیروانی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از پروتکل شبیه‌سازی مسابقه فوتبال (SMS) نشان داد یک جلسه tDCS به طور قابل توجهی RPE بازیکنان فوتبال را کاهش می‌دهد [۱۷] . نکته مهم این است که نمرات پرسشنامه سلامت (WBQ) در ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از تمرین پس از پروتکل tDCS مکرر، بهبود قابل توجهی را نشان داد، به طوری که بازیکنان در مقایسه با تحریک ساختگی، بهبودی ذهنی و حالات روانی به مراتب بهتری را گزارش کردند. این بهبود در سلامت عاطفی علیرغم عدم وجود تغییرات قابل توجه در معیارهای عینی‌تر ریکاوری، مانند نمرات ریکاوری کیفیت کلی (TQR)، فعالیت الکترومیوگرافی عضلات یا عملکرد پرش، رخ داد که نشان می‌دهد اثرات tDCS بر درک خستگی در درجه اول از طریق مسیرهای مرکزی و روانشناختی به جای مکانیسم‌های بازیابی فیزیولوژیکی محیطی اعمال می‌شود [۱۷]. . کاهش قابل توجه در میزان فشار درک شده پس از یک جلسه tDCS از طریق مکانیسم‌های نوروفیزیولوژیکی همگرا چندگانه عمل می‌کند. اول، tDCS آندی که DLPFC چپ را هدف قرار می‌دهد، تحریک‌پذیری قشر مغز را به شدت تعدیل می‌کند و شلیک نورونی منطقه‌ای را افزایش می‌دهد، که از طریق تعدیل عصبی از بالا به پایین مدارهای خستگی مرکزی، بر درک تلاش در طول فعالیت بدنی تأثیر می‌گذارد. DLPFC یک مرکز حیاتی در قشر پیش‌پیشانی است که خواسته‌های شناختی، حالات عاطفی را پردازش می‌کند و اطلاعات حسی-حرکتی مربوط به درک تلاش را ادغام می‌کند. هنگامی که توسط تحریک آندی فعال می‌شود، DLPFC کنترل مهاری بر روی نواحی لیمبیک و ساقه مغز را که احساسات ذهنی خستگی و ناراحتی ناشی از تلاش را ایجاد می‌کنند، تقویت می‌کند [۲۷-۲۹].

تحقیقات انجام شده در مورد اثرات tDCS با هدف قرار دادن نواحی قشر حرکتی در بازیکنان فوتبال، تاثیر چند جلسه‌ای در مورد عملکرد ارتفاع پرش عمودی معنادار بود. همسو با یافته‌های مطالعه حاضر، تحقیقات نشان می‌دهد جلسات مکرر tDCS به طور قابل توجهی عملکرد ارتفاع پرش عمودی را در بازیکنان فوتبال بهبود بخشیده است و اندازه‌های اثر بسته به پروتکل مطالعه، پارامترهای تحریک و زمان اندازه‌گیری از کوچک تا متوسط متغیر است [۱۷، ۳۰، ۳۱]. عملکرد پرش عمودی به هماهنگی دقیق بین سیستم‌های عصبی-عضلانی متعدد، از جمله بهبود نرخ توسعه نیرو (RFD)، تولید اوج نیرو، الگوهای جذب عضلات در طول فازهای برونگرا و درونگرا، و اتصال کارآمد چرخه کشش-کوتاه شدن بستگی دارد [۳۲، ۳۳].

برخی مطالعات با استفاده از شدت جریان بالاتر (٤ میلی‌آمپر) بهبودهای قوی‌تری در یادگیری حرکتی در مقایسه با پروتکل‌های استاندارد ۲ میلی‌آمپر گزارش کرده‌اند، که نشان می‌دهد پارامترهای بهینه tDCS برای بهبود عملکرد ورزشی ممکن است شامل سطوح شدتی بالاتر از سطوحی باشد که معمولاً در کاربردهای شناختی یا عصبی-روانی به کار می‌روند. با این حال، این موضوع همچنان یک حوزه تحقیقاتی در حال انجام است و موقعیت مونتاژ، وضعیت تمرین شرکت‌کننده و وظیفه حرکتی خاص انجام شده، همگی رابطه بین شدت تحریک و نتایج عملکرد را تعدیل می‌کنند [۳٤] . یک ملاحظه مکانیکی مهم مختص جمعیت‌های ورزشی شامل «سطوح عملکرد پایه و اثر سقف» است. جلسات مکرر می‌توانند از طریق تثبیت تجمعی یادگیری حرکتی و تغییرات انعطاف‌پذیری سیناپسی بر این اثر سقف غلبه کنند که علیرغم سطح مهارت پایه بالای ورزشکار، همچنان بهبودهای عملکردی قابل اندازه‌گیری ایجاد می‌کند. این نشان می‌دهد که حتی در جمعیت‌های تمرین کرده، کاربردهای مکرر tDCS می‌تواند سازماندهی مجدد عصبی کافی را برای افزایش تولید قدرت انفجاری القا کند، اگرچه میزان بهبودها ممکن است کمتر از افراد تمرین نکرده یا تمرین متوسط باشد[۱۷]. در نهایت، جلسات مکرر tDCS مدولاسیون قابل توجه‌تر و پایدارتری از سیستم‌های انتقال‌دهنده عصبی نسبت

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]

به جلسات تکی ایجاد می‌کند. tDCS آندی، انتقال عصبی گلوتاماترژیک (تحریک‌کننده) و گاباارژیک (مهارکننده) را در قشر حرکتی و مناطق متصل تعدیل می‌کند. اثرات تک جلسه‌ای بر این سیستم‌های انتقال‌دهنده عصبی گذرا هستند و تا زمانی که توسط مکانیسم‌های جبرانی هموستاتیک متعادل نشوند، ادامه می‌یابند. با این حال، جلسات مکرر اعمال شده در طول چند روز، امکان تغییرات پایدار در تعادل تحریک‌پذیری قشر مغز و عملکرد سطح شبکه را فراهم می‌کند. این تعدیل پایدار سیستم‌های انتقال‌دهنده عصبی، از پیشرفت‌های قوی‌تر و پایدارتری در تولید فرمان حرکتی و عملکرد عصبی-عضلانی پشتیبانی می‌کند [۲۰، ۳۵، ۳۶].

اجرای دوازده جلسه tDCS بر کاهش میزان لاکتات بزاق در بازیکنان فوتبال تاثیر معناداری نداشت. منابع موجود بر تحریک‌پذیری قشر مغز، عملکرد حرکتی و نشانگرهای بهبودی مانند پرسشنامه‌های ریکاوری و مقیاس‌های بهبودی ادراک‌شده تمرکز دارند، اما شامل اندازه‌گیری لاکتات بزاق نمی‌شوند [۱۷، ۲۳، ۲۴]. در همین راستا، در مورد جلسات مکرر tDCS در بازیکنان فوتبال شواهدی ارائه می‌دهد که دوازده جلسه tDCS سطح لاکتات بزاق را کاهش می‌دهد اما به سطح معناداری نرسید. این نشان دهنده یک شکاف قابل توجه در ادبیات علوم ورزشی tDCS است، زیرا متابولیسم و پاکسازی لاکتات از نشانگرهای مهم ریکاوری ورزشی و مدیریت خستگی در ورزشکاران هستند [۳۷، ۳۹، ۴۰]. درک اینکه چرا tDCS ممکن است از نظر تئوری بر نشانگرهای زیستی مرتبط با خستگی تأثیر بگذارد، نیاز به بررسی مکانیسم‌های فیزیولوژیکی آن دارد. تحریک tDCS از طریق مجموعه‌ای از مسیرهای عصبی به‌هم‌پیوسته عمل می‌کند و می‌تواند به‌طور غیرمستقیم بر شاخص‌های متابولیک و عملکردی مرتبط با فرایند ریکاوری در بازیکنان فوتبال اثرگذار باشد، حتی در شرایطی که لاکتات بزاقی به‌طور مستقیم مورد اندازه‌گیری قرار نگرفته باشد. سازوکار اصلی اثرگذاری tDCS بر عملکرد ورزشی به تغییر در پتانسیل غشای استراحت نورون‌ها در نواحی هدف مغزی مربوط می‌شود، به‌گونه‌ای که تحریک‌پذیری قشری و کارایی شبکه‌های عصبی مرتبط با کنترل حرکتی و تنظیم خستگی تعدیل می‌گردد. این تعدیل عصبی می‌تواند زمینه‌ساز بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیکی، تسریع بازگشت به حالت تعادل و ارتقای عملکرد در مراحل ریکاوری پس از فعالیت‌های ورزشی شدید باشد. هنگامی که tDCS آندی اعمال می‌شود، نورون‌ها را دپلاریزه می‌کند، تحریک‌پذیری قشر مغز را افزایش می‌دهد و جذب واحدهای حرکتی را تقویت می‌کند. این افزایش تحریک عصبی به عضلات می‌تواند قدرت و توان خروجی را بهبود بخشد، که برای فعالیت‌های خاص فوتبال حیاتی هستند. tDCS با بهبود کارایی عصبی-عضلانی و تولید توان، می‌تواند از نظر تئوری تجمع فرآورده‌های جانبی متابولیک را در طول ورزش شدید کاهش دهد، اگرچه این رابطه به طور مستقیم در زمینه لاکتات بزاق آزمایش نشده است [۳۹، ۴۰]. نتایج نشان می‌دهد جلسات مکرر tDCS بهبودهای قابل توجه قوی‌تر و پایدارتری را در معیارهای مربوط به بهبودی در بازیکنان فوتبال ایجاد می‌کند. یک مطالعه دقیق تصادفی، متقاطع، دوسوکور و کنترل‌شده با شم، سه جلسه متوالی tDCS آندی (بلافاصله پس از، ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت پس از شبیه‌سازی مسابقه فوتبال اعمال شد) را در ۱۶ بازیکن حرفه‌ای فوتبال مرد بررسی کرد. نکته مهم این است که tDCS چند جلسه‌ای می‌تواند اثرات تجمعی را ایجاد کند که بسته به تعداد جلسات متوالی اعمال شده، روزها یا حتی هفته‌ها طول می‌کشد و این رویکرد را برای موقعیت‌های ریکاوری واقعی در فوتبال حرفه‌ای عملی‌تر می‌کند [۳۷]. با این حال، قابل توجه است که علیرغم بهبود در ریکاوری و عملکرد فنی، جلسات مکرر a-tDCS به طور قابل توجهی کیفیت ریکاوری درک شده را که توسط مقیاس ریکاوری کیفیت کلی (TQR) اندازه‌گیری می‌شود، افزایش نداد [۳۷، ۳۹].

به نظر می‌رسد مکانیسم اصلی که از طریق آن جلسات مکرر tDCS بهبودی را افزایش می‌دهد، شامل تحریک قشر جلوی مغز پشتی-جانبی (DLPFC)، ناحیه‌ای از مغز است که به طور حیاتی در عملکرد اجرایی، تنظیم خلق و خو و انگیزه‌های انگیزشی نقش دارد. هنگامی که tDCS آندی بر DLPFC چپ اعمال می‌شود، نورون‌ها را دپلاریزه می‌کند و تحریک‌پذیری قشر مغز را در این ناحیه افزایش می‌دهد و ارتباط و فعالیت عصبی بهبود یافته را تسهیل می‌کند. این فعال‌سازی قشر مغز افزایش یافته با تعدیل گسترده جریان خون مغزی در سراسر شبکه‌های عصبی جلوی مغز و متصل همراه است. افزایش پرفیوژن خون، اکسیژن و سوبستراهای متابولیکی بیشتری را برای فعال کردن بافت عصبی فراهم می‌کند و از بهبود عملکرد جلوی مغز در طول دوره بهبودی پشتیبانی می‌کند. نقش قشر پیش‌پیشانی خلفی-جانبی (DLPFC) در تنظیم عاطفی و انگیزش نشان می‌دهد که تحریک این ناحیه مستقیماً جنبه‌های مرکزی خستگی پس از ورزش را مورد توجه قرار می‌دهد اغلب توسط مداخلات ریکاوری محیطی که فقط عضلات و بافت‌ها را هدف قرار می‌دهند، نادیده گرفته می‌شوند. tDCS با افزایش عملکرد DLPFC از طریق جلسات مکرر، احتمالاً اجزای روانی و انگیزشی خستگی مرکزی را که پس از شبیه‌سازی شدید مسابقه فوتبال تجمع می‌یابند، کاهش می‌دهد [۳۷، ۳۹، ۴۱، ۴۲].

خستگی پس از ورزش در فوتبال شامل عوامل محیطی (آسیب عضلانی، تجمع متابولیک) و عوامل مرکزی (خستگی ذهنی، کاهش انگیزه، اختلال خلقی، تغییر ظرفیت تصمیم‌گیری)

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]

است. DLPFC به عنوان یک مرکز عصبی حیاتی برای پردازش سیگنال‌های خستگی، حفظ انگیزه و تنظیم پاسخ‌های خلقی و عاطفی عمل می‌کند. پس از ورزش شدید مانند شبیه‌سازی مسابقه فوتبال، خستگی مرکزی به صورت افزایش خستگی ذهنی، نقص در توجه و هوشیاری، اختلال در تصمیم‌گیری و کاهش سلامت روانی بروز می‌کند. نشان داده شده است که این اجزای خستگی مرکزی، درک تلاش را در طول فعالیت بدنی افزایش داده و هم ظرفیت دویدن و هم عملکرد فنی را در فوتبال کاهش می‌دهند. وقتی جلسات مکرر tDCS، DLPFC چپ را تحریک می‌کنند، عملکرد پیش‌پیشانی را به روش‌هایی افزایش می‌دهند که مستقیماً با بهبود خلق و خو، توجه، انگیزه و رفاه روانی، این تظاهرات خستگی مرکزی را خنثی می‌کنند. نکته مهم این است که یافته‌های مطالعه نشان می‌دهد که a-tDCS مکرر، رفاه را به طور قابل توجهی با اندازه اثر بزرگ بهبود می‌بخشد، که نشان‌دهنده افزایش معنادار بهبودی روانی است. علاوه بر این، بهبود در عملکرد فنی خاص فوتبال (دقت و سرعت پاس) نشان می‌دهد که عملکرد پیش‌پیشانی افزایش یافته از تصمیم‌گیری و کنترل حرکتی بهتر در طول ارزیابی بهبودی پشتیبانی می‌کند. یک جلسه tDCS باعث بهبود حاد در این عملکردهای مرکزی می‌شود، اما ماهیت گذرای اثرات، کاربرد عملی آنها را برای پشتیبانی از بهبودی پایدار در روزهای پس از مسابقه محدود می‌کند [۳۷، ۴۱، ۴۲].

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد اثرات tDCS به‌صورت دوره‌ای بلندمدت الگوهای متفاوتی از پاسخ‌دهی فیزیولوژیک و عملکردی در بازیکنان فوتبال ایجاد می‌کند. اجرای دوره‌ای و منظم دوازده جلسه tDCS توانست برخی شاخص‌ها مانند HRV ، ارتفاع پرش و میزان ریکاوری را بهبود دهد و فشار ادراک‌شده را کاهش دهد که نشان‌دهنده نقش تجمعی و سازگاری‌زای این روش تحریک غیرتهاجمی است. عدم تغییر در HbO_2 و لاکتات بزاق نیز نشان می‌دهد که tDCS به‌تنهایی ممکن است بر برخی مسیرهای متابولیکی یا اکسیژن‌رسانی اثر مستقیمی نداشته باشد. به طور کلی، tDCS می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کمکی در بهبود برخی عوامل عملکردی و ریکاوری مورد توجه قرار گیرد، اما کارایی آن وابسته به تداوم جلسات و نوع شاخص‌های مورد بررسی است. با این حال، نتایج پژوهش حاضر باید با احتیاط تفسیر شود، زیرا محدود بودن تعداد آزمودنی‌ها ممکن است بر قابلیت تعمیم یافته‌ها تأثیر گذاشته باشد. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با حجم نمونه بزرگ‌تر و در گروه‌های ورزشی متنوع‌تر انجام گیرد تا درک دقیق‌تری از اثرات tDCS حاصل شود.

تشکر و قدردانی

از تمامی شرکت‌کنندگان و افرادی که در انجام این پژوهش همکاری داشتند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند هیچ‌گونه تعارض منافعی در این پژوهش وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی از نهادهای دولتی یا خصوصی انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در طراحی، اجرا، تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله مشارکت داشته و نسخه نهایی را تأیید کرده‌اند.

ملاحظات اخلاقی

این پژوهش با رعایت اصول اخلاقی و با کسب رضایت آگاهانه از شرکت‌کنندگان با کد اخلاق SSRI.REC-25123105 انجام شده است.

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]

References

1. Field A, Naughton RJ, Haines M, Lui S, Corr LD, Russell M, et al. The demands of the extra-time period of soccer: a systematic review. *J Sport Health Sci.* 2022;11(3):403-414. DOI: 10.1016/j.jshs.2020.03.008
2. Soligard T, Steffen K, Palmer D, Alonso JM, Bahr R, Lopes AD, et al. Sports injury and illness incidence in the Rio de Janeiro 2016 Olympic summer games: a prospective study of 11274 athletes from 207 countries. *Br J Sports Med.* 2017;51(17):1265-1271. DOI: 10.1136/bjsports-2017-097956
3. Pérez-Castillo ÍM, Rueda R, Bouzamondo H, López-Chicharro J, Mihic N. Biomarkers of post-match recovery in semi-professional and professional football (soccer). *Front Physiol.* 2023;14:1167449. DOI: 10.3389/fphys.2023.1167449
4. Dambroz F, Clemente FM, Teoldo I. The effect of physical fatigue on the performance of soccer players: a systematic review. *PLoS One.* 2022;17(7):e0270099. DOI: 10.1371/journal.pone.0270099
5. Abd-Elfattah HM, Abdelazeim FH, Elshennawy S. Physical and cognitive consequences of fatigue: a review. *J Adv Res.* 2015;6(3):351-358. DOI: 10.1016/j.jare.2015.01.011
6. Verschueren J, Tassignon B, De Pauw K, Proost M, Teugels A, Van Cutsem J, et al. Does acute fatigue negatively affect intrinsic risk factors of the lower extremity injury risk profile? A systematic and critical review. *Sports Med.* 2020;50:767-784. DOI: 10.1136/bjsports-2021-IOC.27
7. Noakes TD. Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the protection of whole body homeostasis. *Front Physiol.* 2012;3:82. DOI: 10.3389/fphys.2012.00082
8. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev.* 2001;81(4):1725-1789. DOI: 10.1152/physrev.2001.81.4.1725
9. Oliver-Mas S, Delgado-Alonso C, Delgado-Álvarez A, Díez-Cirarda M, Cuevas C, Fernández-Romero L, et al. Transcranial direct current stimulation for post-COVID fatigue: a randomized, double-blind, controlled pilot study. *Brain Commun.* 2023;5(2):fcad117. DOI: 10.1093/braincomms/fcad117
10. Davis NJ. Neurodoping: brain stimulation as a performance-enhancing measure. *Sports Med.* 2013;43:649-653. DOI: 10.1007/s40279-013-0027-z
11. Colzato LS, Nitsche MA, Kibele A. Noninvasive brain stimulation and neural entrainment enhance athletic performance—a review. *J Cogn Enhanc.* 2017;1:73-79. DOI: 10.1007/s41465-016-0003-2
12. Ashrafi A, Mohseni-Bandpei MA, Seydi M. The effect of tDCS on the fatigue in patients with multiple sclerosis: a systematic review of randomized controlled clinical trials. *J Clin Neurosci.* 2020;78:277-283. DOI: 10.1016/j.jocn.2020.04.106
13. van Boekholdt L, Kerstens S, Khatoun A, Asamoah B, Mc Laughlin M. tDCS peripheral nerve stimulation: a neglected mode of action? *Mol Psychiatry.* 2021;26(2):456-461. DOI: 10.1038/s41380-020-00962-6
14. Kenttä G, Hassmén P. Overtraining and recovery: a conceptual model. *Sports Med.* 1998;26(1):1-16. DOI: 10.2165/00007256-199826010-00001
15. Maqsood R, Khattab A, Bennett AN, Boos CJ. Association between non-acute traumatic injury (TI) and heart rate variability (HRV) in adults: a systematic review and meta-analysis. *PLoS One.* 2023;18(1):e0280718. DOI: 10.1371/journal.pone.0280718
16. Machado S, de Oliveira Sant'Ana L, Travassos B, Monteiro D. Anodal transcranial direct current stimulation reduces competitive anxiety and modulates heart rate variability in an eSports player. *Clin Pract Epidemiol Ment Health.* 2022;18:e174501792209270. DOI: 10.2174/17450179-v18-e2209270
17. Shiravand F, Motamedi P, Amani-Shalamzari S, Amiri E, da Silva Machado DG. Effect of repeated sessions of transcranial direct current stimulation on subjective and objective measures of recovery and performance in soccer players following a soccer match simulation. *Sci Rep.* 2024;14(1):20809. DOI: 10.1038/s41598-024-71701-y
18. Gomez-Alvaro MC, Gusi N, Cano-Plasencia R, Leon-Llamas JL, Murillo-Garcia A, Melo-Alonso M, et al. Effects of different transcranial direct current stimulation intensities over dorsolateral prefrontal cortex on brain electrical activity and heart rate variability in healthy and fibromyalgia women: a randomized crossover trial. *J Clin Med.* 2024;13(24):7526. DOI: 10.3390/jcm13247526
19. Jog MS, Kim E, Anderson C, Kubicki A, Kayathi R, Jann K, et al. In-vivo imaging of targeting and modulation of depression-relevant circuitry by transcranial direct current stimulation: a randomized clinical trial. *Transl Psychiatry.* 2021;11(1):138. DOI: 10.1038/s41398-021-01264-3
20. Yamada Y, Sumiyoshi T. Neurobiological mechanisms of transcranial direct current stimulation for psychiatric disorders; neurophysiological, chemical, and anatomical considerations. *Front Hum Neurosci.* 2021;15:631838. DOI: 10.3389/fnhum.2021.631838
21. Antonenko D, Fromm AE, Thams F, Grittner U, Meinzer M, Flöel A. Microstructural and functional plasticity following repeated brain stimulation during cognitive training in older adults. *Nat Commun.* 2023;14(1):3184. DOI: 10.1038/s41467-023-38910-x
22. Ke Y, Liu S, Chen L, Wang X, Ming D. Lasting enhancements in neural efficiency by multi-session transcranial direct current stimulation during working memory training. *NPJ Sci Learn.* 2023;8(1):48. DOI: 10.1038/s41539-023-00200-y
23. Orcioli-Silva D, Islam A, Baker MR, Gobbi LTB, Rochester L, Pantall A. Bi-anodal transcranial direct current stimulation combined with treadmill walking decreases motor cortical activity in young and older adults. *Front Aging Neurosci.* 2021;13:739998. DOI: 10.3389/fnagi.2021.739998
24. Macedo MdCGS, Ferreira KRdR, Meira PA, Esquírio AF, Barbosa MCSA, Gama GL, et al. Do progressive intensities of transcranial direct current stimulation with and without 40 Hz binaural beats change pre-frontal cortex hemodynamics? A randomized controlled trial. *Behav Sci (Basel).* 2024;14(11):1001. DOI: 10.3390/bs14111001
25. Yu D, Wang S, Song F, Liu Y, Zhang S, Wang Y, et al. Research on user experience of the video game difficulty based on flow theory and fNIRS. *Behav Inf Technol.* 2023;42(6):789-805. DOI: 10.1080/0144929X.2022.2043442
26. Thongsawang S. Effects of cordyceps sinensis supplementation combined with repeated sprint training in hypoxia on markers of oxidative stress and physical performance in female soccer. 2023. Link
27. Souron R, Voirin AC, Kennouche D, Espeit L, Millet GY, Rupp T, et al. Task failure during sustained low-intensity contraction is not associated with a critical amount of central fatigue. *Scand J Med Sci Sports.* 2020;30(12):2329-2341. DOI: 10.1111/sms.13815
28. Teymoori H, Amiri E, Tahmasebi W, Hoseini R, Grospretre S, Machado DGdS. Effect of tDCS targeting the M1 or left DLPFC on physical performance, psychophysiological responses, and cognitive function in repeated all-out cycling: a randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil.* 2023;20(1):97. DOI: 10.1186/s12984-023-01221-9

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]

29. Pageaux B, Marcora SM, Rozand V, Lepers R. Mental fatigue induced by prolonged self-regulation does not exacerbate central fatigue during subsequent whole-body endurance exercise. *Front Hum Neurosci.* 2015;9:108187. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00067
30. Zhou Y, Zhai H, Wei H. Acute effects of transcranial direct current stimulation combined with high-load resistance exercises on repetitive vertical jump performance and EEG characteristics in healthy men. *Life (Basel).* 2024;14(9):1106. DOI: 10.3390/life14091106
31. Rocha JVDS, Almeida RFd, de Lima Cordeiro BN, Cardoso Sarcinelli CH, Zimerer C, Arêas FZ. Effects of bi-hemispheric anodal transcranial direct current stimulation on soccer player performance: a triple-blinded, controlled, and randomized study. *Front Sports Act Living.* 2024;6:1350660. DOI: 10.3389/fspor.2024.1350660
32. Kidgell DJ, Goodwill AM, Frazer AK, Daly RM. Induction of cortical plasticity and improved motor performance following unilateral and bilateral transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex. *BMC Neurosci.* 2013;14(1):64. DOI: 10.1186/1471-2202-14-64
33. Saucedo Marquez CM, Zhang X, Swinnen SP, Meesen R, Wenderoth N. Task-specific effect of transcranial direct current stimulation on motor learning. *Front Hum Neurosci.* 2013;7:333. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00333
34. Hsu G, Shereen AD, Cohen LG, Parra LC. Robust enhancement of motor sequence learning with 4 mA transcranial electric stimulation. *Brain Stimul.* 2023;16(1):56-67. DOI: 10.1016/j.brs.2022.12.011
35. Vestring S, Wolf E, Dinkelacker J, Frase S, Hessling-Zeinen C, Insan S, et al. Lasting effects of transcranial direct current stimulation on the inducibility of synaptic plasticity by paired-associative stimulation in humans. *J Neuroeng Rehabil.* 2024;21(1):162. DOI: 10.1186/s12984-024-01459-x
36. Dadgar H, Majidi H, Aghaei S. Biological and neurobiological mechanisms of transcranial direct current stimulation. *Iran J Psychiatry.* 2022;17(3):350. DOI: 10.18502/ijps.v17i3.9735
37. Cicero D, Di Marino S, Dinallo V, Pieri M, Summa V, Desideri A, et al. A small sided game session affects salivary metabolite levels in young soccer players. *Biomed Spectrosc Imaging.* 2016;5(1):55-70. DOI: 10.3233/BSI-150132
38. Russell M, Birch J, Love T, Cook CJ, Bracken RM, Taylor T, et al. The effects of a single whole-body cryotherapy exposure on physiological, performance, and perceptual responses of professional academy soccer players after repeated sprint exercise. *J Strength Cond Res.* 2017;31(2):415-421. DOI: 10.1519/JSC.0000000000001505
39. Sparkes W, Turner A, Weston M, Russell M, Johnston M, Kilduff L. Neuromuscular, biochemical, endocrine, and mood responses to small-sided games' training in professional soccer. *J Strength Cond Res.* 2018;32(9):2569-2576. DOI: 10.1519/JSC.0000000000002424
40. Akenhead R, Nassis GP. Training load and player monitoring in high-level football: current practice and perceptions. *Int J Sports Physiol Perform.* 2016;11(5):587-593. DOI: 10.1123/ijspp.2015-0331
41. Bogataj S. A single session of hyperbaric oxygen therapy does not affect recovery after a soccer match: 340. *Med Sci Sports Exerc.* 2023;55(9S):115-116. DOI: 10.1249/01.mss.0000980776.23005.a1
42. Castilla-López C, Romero-Franco N. Blood flow restriction is not useful as soccer competition recovery in youth male national-level soccer players: a crossover randomised controlled trial. *Sports (Basel).* 2023;11(5):99. DOI: 10.3390/sports11050099

[Downloaded from yafte.lums.ac.ir on 2026-10-22]