مطالعات المپیک
دورهٔ ۲، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۳
ص ص : ۴۸- ۲۹

کارایی و اثربخشی tDCS (تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای) در ارتقای عملکرد ورزشی ورزشکاران: یک مطالعه مروری

جمیل منصوری*[۱] – صادق رنجبر [۲] – احمد شاهواروقی [۳] – رضا رستمی[۴]

۱. دانشجوی دکتری روانشناسی شناختی، گروه روانشناسی، دانشکده روانشناسی و علوم تربیتی، دانشگاه خوارزمی، کرج، البرز، ایران ۲. کاندیدای دکتری روانشناسی ورزشی، گروه علوم شناختی و رفتار، دانشکده علوم ورزشی و تندرستی، دانشگاه تهران، تهران، ایران۳. دانشجوی دکتری حقوق و روانشناسی، گروه روانشناسی، دانشکده روانشناسی، دانشگاه کی یو لوون، لوون، بلژیک۴. استاد، گروه روانشناسی، دانشکده روانشناسی و علوم تربیتی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت : ۰۳/ ۱۴۰۲/۱۲ ، تاریخ تصویب : ۰۱/ ۰۱/ ۱۴۰۳)

چکیده

عملکرد ورزشی موضوع مهمی در ورزش است که پژوهش‌ها همواره در پی آن بوده‌اند تا روش‌های مختلفی را برای ارتقای آن مشخص کنند. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر توجه خاصی را به خود اختصاص داده است، tDCS (تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای) و اثربخشی آن در بهبود عملکرد ورزشی است. tDCS از راه تحریک و بازداری سلول‌های عصبی و انعطاف‌پذیری عصبی باعث تغییر در فعالیت نواحی مغزی درگیر در عملکرد ورزشی می‌شود. پژوهش‌ها از این روش در ارتقای عملکرد ورزشی استفاده کرده‌اند و با نتایج مختلفی همراه بوده‌اند. مطالعه حاضر با هدف بررسی و مرور مطالعات انجام شده در این حوزه انجام شد. روش پژوهش از نوع توصیفی و مروری بود. به‌منظور جمع‌آوری داده‌ها کلید واژه‌های tDCS-sport، sport performance، sport-neuron plasticity، tDCS-، neurodoping از وب‌گاه‌های پژوهشی Google.scholar، apa.org (Psychinfo) و Elsevier جستجو شد. سپس چکیده، نتایج و یافته‌های هر مقاله مورد بررسی قرار گرفت. ۱۶ مقاله انتخاب و نتایج آنها گزراش شد. نتایج پژوهش نشان داد که به‌کارگیری و اثربخشی tDCS در ارتقای عملکرد ورزشی دارای نقش مثبتی است و با بهبود عملکرد نه‌تنها افراد عادی که ورزشکاران نیز همراه است؛ بااین‌حال، نتایج مطالعات مروری و فراتحلیل‌ها نشان می‌دهد که ناهمگنی در نوع فعالیت ورزشی، حجم نمونه، طرح پژوهشی، نواحی تحریک، برنامهٔ درمانی tDCS و محدودیت‌های روش‌شناختی باعث کاهش حجم اثر ارتقای عملکرد ورزشکاران با tDCS شده است. از همین رو لازم است تا مطالعاتی با تمرکز بر مکان‌های ویژهٔ عصبی و عملکردهای ورزشی خاص هر رشته انجام شوند. درمجموع، از این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که tDCS روشی ایمن و بدون عوارض و دارای اثربخشی مثبت در ارتقای عملکرد ورزشی ورزشکاران است که نیازمند تحقیقات بیشتری است.

واژه‌های کلیدی

ارتقای عملکرد، تسهیل حرکتی، تحریک الکتریکی مغز، عملکرد ورزشی، یادگیری حرکتی.

* نویسنده مسئول : پست الکترونیکی: Email: mansourijamil1992@gmail.com

مقدمه

ورزش یکی از حوزه‌های عملکردی است که محبوبیت بیش از اندازه‌ای در میان جامعه دارد. ورزشکاران همواره به دنبال بهبود عملکرد و موفقیت در رشته ورزشی خود هستند و در غالب موارد برای رسیدن به این مهم، تلاش زیادی از خود به خرج می‌دهند (۱). با اینکه تعهد، پایداری و تلاش زیاد پیش‌زمینه‌های اصلی در بهبود عملکرد ورزشی به شمار می‌روند اما ورزشکاران پیوسته به‌دنبال روش‌های جدید و مؤثر برای ارتقای عملکرد خود بوده‌اند. یافتن راهبردهای ذهنی و بدنی مؤثر که بتواند عملکرد را ارتقا بخشد، به کارآیی بالاتر و بهبود سریع‌تر کمک می‌کند. عصب‌شناسی ورزشی[1] یکی از حوزه‌های جدیدی است که برای ارتقای عملکرد ورزشکاران تلاش می‌کند. این رشته علمی از یک سو می‌کوشد تا با استفاده از روش‌های دقیق علمی، تفاوت‌های عصب‌شناختی موجود میان افراد مبتدی و حرفه‌ای را پیدا کند و از سوی دیگر تلاش دارد تا با استفاده از ابزارهای کارآمد عصب‌محور (مثل بیوفیدبک[2] نوروفیدبک[3] TMS (تحریک مغناطیسی فراجمجمه‌ای[4] و tDCS (تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای[5]) عملکرد ورزشکاران سطوح مختلف را ارتقا بخشد (۲). اثربخشی این روش‌ها به اندازه‌ای است که اخیرا دیویس[6] (۳) از عنوان نورودوپینگ[7] برای اشاره به کاربرد این روش‌ها در ارتقای عملکرد ذهنی و بدنی ورزشکاران استفاده کرد.

به باور بسیاری از دانشمندان، افراد متخصص در زمینه‌های مختلف (هنری، ورزشی و فنی) دارای تفاوت‌های عصب‌شناختی ظریفی با افراد مبتدی هستند. فارغ از علت بروز این تفاوت‌ها که ممکن است به‌دلایل مختلف مثل تمرین مستمر، تفاوت‌های ژنتیکی یا تفاوت‌های شخصیتی باشد (۲)، پژوهش‌های مختلفی وجود آن‌ها را تأیید کرده‌اند (۴). از همین روی، تعیین و تشخیص نشانگرهای[8] اختصاصی دخیل در فرآیندهای عصب‌شناختی افراد متخصص، یکی از پرسش‌های اصلی پژوهشگران حوزه عصب‌شناسی شناختی[9] محسوب می‌شود. در واقع پژوهشگران این حوزهٔ علمی تلاش می‌کنند تا با استفاده از روش‌های گوناگون به تفاوت‌های موجود میان فرایندهای شناختی و عصب‌شناختی فرد حرفه‌ای با مبتدی پی ببرند.

پژوهش‌های عصب‌شناختی در زمان کنونی و به‌طور خاص در حوزه ورزش نیز پیگیری شده است (۵)؛ تا جایی که پژوهش‌ها در این زمینه باعث شکل‌گیری مفهوم نوینی با عنوان عصب‌شناسی ورزشی[10] شده است. دو جریان عمده در این زمینه علمی پیگیری می‌شود. جریان اول می‌کوشد تا با استفاده از روش‌های تصویربرداری مغزی[11] (به طور خاص الکتروانسفالگرافی[12]) به تفاوت‌های عصب‌شناختی موجود میان ورزشکاران مبتدی و حرفه‌ای پی ببرد. در نگاه پژوهشگران این حوزه، نوعی ارتباط میان فعالیت‌های عصبی‌شناختی[13] و پیامدهای رفتاری وجود دارد که قابل ردگیری و شناسایی است (۶، ۷). از سوی دیگر، جریان دیگر در تلاش است تا با استفاده از یافته‌های به‌دست آمده در بخش قبل و همچنین به مدد پژوهش‌های جداگانه، به ارتقای عملکرد ورزشکاران و رساندن آن‌ها به سطح حرفه‌ای بپردازد (۸، ۹).

این جریان علمی از فنون ارزشمندی همچون بیوفیدبک، نوروفیدبک، TMS و tDCS استفاده می‌کند تا به‌طور مستقیم و از راه دستکاری فرآیندهای مغزی، عملکرد

1 . Sports Neuroscience
2. Biofeedback
3. Neurofeedback
4. Transcranial magnetic stimuation
5. Transcranial direct current stimulation
6 . Davis, N.J.
7. Neuro-doping

8. Indicators
9. Cognitive neuroscience
10. Sport neuroscience
11. Brain imaging
12. Electroencephalography
13. Neurocognitive

شناختی و رفتاری ورزشکاران را بهبود بخشد. نخستین تلاش‌ها جهت ارتقای عملکرد ورزشکاران در این حوزه، به دهه ۱۹۷۰ میلادی برمی‌گردد (۱۰). دورسی[1](۱۰) برای نخستین بار از ابزار بیوفیدبک در ارتقای عملکرد ورزشکاران ژیمناستیک‌کار استفاده کرد. با گذشت زمان و پیشرفت دانش در زمینه به‌کارگیری برنامه‌های مداخله‌ای مناسب، امکان اثرگذاری این ابزارها روزبه‌روز بیشتر شد و بر میزان کاربرد آن در ورزشکاران و تیم‌های ورزشی افزوده شد (۱۱، ۱۲). رواج کاربرد این ابزارها تا حدی است که امروزه بسیاری از ورزشکاران حرفه‌ای و تیم‌های ورزشی برای رسیدن به موفقیت در رقابت‌های ورزشی با استفاده از این روش‌ها به تمرین می‌پردازند (۱۳-۱۶). پژوهش‌های جدید به‌صورت متمرکزتر اثربخشی tDCS روی ارتقای مهارت‌ها و عملکرد ورزشی را نشان داده‌اند (۱۷-۱۹).

tDCS روشی امن، ارزان و غیرتهاجمی است که از راه تحریک الکتریکی ضعیفی باعث تغییر برانگیختگی مغز می‌شود. برانگیختگی مغزی توسط جریانی با شدت کم در دامنه‌ای از یک تا دو میلی‌آمپر روی می‌دهد که دستگاه از سطح جمجمه منتقل می‌کند. این جریان از راه اثری که روی پتانسیل استراحت غشا می‌گذارد، براساس قطبیت و آرایش فضایی الکترودها، می‌تواند اثر تحریکی یا بازداری داشته باشد. برانگیختگی قشری از راه الکترود آند افزایش می‌یابد درحالی‌که الکترود کاتد باعث کاهش آن می‌شود (۱۷). کاربردهای اولیه این روش در اختلالات مختلف روان‌پزشکی نتایج قابل اعتمادی داشته است (۲۰). در زمینه عملکرد ورزشی ورزشکاران نیز مطالعات پژوهشی روزافزونی در حال انجام است (۱۹-۱۷). اثربخشی tDCS تا حدی است که امروزه روش‌های خلاقانه‌ای به‌طور اختصاصی با هدف ارتقای عملکرد ورزشی و در ترکیب با تمرین‌های ورزشی طراحی شده است (مثل هالو نوروساینس[2]). در همین راستا مطالعه حاضر با توجه به اهمیت کاربرد این روش در ارتقای عملکرد ورزشی ورزشکاران و همچنین نبود مطالعه‌ای مروری در زمینه گزارش پژوهش‌های انجام شده در ادبیات پژوهش ورزشی ایران، انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر با هدف بررسی و گزارش نتایج پژوهش‌های انجام شده در رابطه با اثربخشی و کاربرد tDCS در ارتقای عملکرد ورزشی ورزشکاران انجام شد. نوع پژوهش از نوع توصیفیِ مروری‌تحلیلی بود. به‌منظور جمع‌آوری داده‌ها کلید واژه‌های tDCS-sport، sport performance،sport-neuron plasticity، tDCS-neurodoping از وب‌گاه‌های پژوهشی Google.scholar، apa.org (Psychinfo) و Elsevier جستجو شد. سپس چکیده، نتایج و یافته‌های هر مقاله مورد بررسی قرار گرفت و گزارش شد. ملاک‌های پژوهش شامل پژوهش‌های بین‌المللی خارجی مرتبط با یادگیری آشکار و ضمنی مهارت‌های حرکتی، عملکردهای شناختی مرتبط با عملکرد ورزشی، خستگی عصبی‌عضلانی و همچنین استفادهٔ tDCS در عملکرد ورزشی ورزشکاران بود. بر همین اساس تعداد ۱۶ مقاله دارای ملاک‌های پژوهش انتخاب شدند.

یافته‌ها

نیچه و همکاران (۱۷) در پژوهشی به ارزیابی اثربخشی مداخله tDCS بر روی یادگیری حرکتی ضمنی[3] پرداختند. ۸۰ آزمودنی سالم به چهار گروه مختلف تقسیم شدند.

1. Dorsey, J.A.
2 . Halo-Neuroscience
3. Implicit motor learning

مبنای گروه‌بندی محل تحریک بود. این چهار منطقه عبارت بودند از: منطقه حرکتی اولیه یا C3، منطقه پیش‌حرکتی، منطقه پیش‌پیشانی جانبی[1] و منطقه پیش‌پیشانی میانی.[2] هر یک از گروه‌ها، همه انواع تحریک شامل آندال، کاتودال و ساختگی را در جلسات جداگانه دریافت کردند و بین هر جلسه یک هفته فاصله وجود داشت. در جلسات تحریک، ۱۵ دقیقه مداخله tDCS اجرا شد که طی آن الکترود محرک در بخش مربوط به خود در نیمکره چپ قرار داده شد تا بخش مربوط به دست راست را فعال کند و الکترود مرجع نیز در بخش contralateral orbita قرار گرفت. نتایج نشان داد که همراه با گذر زمان و تمرین بیشتر، زمان واکنش کاهش می‌یابد و آزمودنی تکلیف را به‌صورت ضمنی یاد می‌گیرد. در وضعیت C3 آنوای اندازه‌گیری مکرر نشان داد که نوعی تعامل معنادار میان بلوک و نوع تحریک وجود دارد. این تعامل معنادار به جهت تفاوت میان تحریک آنودال و وضعیت بدون تحریک در قطعه‌های ۵ و ۶ به‌دست آمد؛ بطوری که در وضعیت تحریک آنودال، تفاوت بیشتری میان این دو بلوک وجود داشت. سپس پژوهشگران به بررسی زمان واکنش استاندارد شده پرداختند. در این حالت گروهی که تحریک آنودال دریافت کرده بود، کاهش معناداری را نسبت به وضعیت بدون تحریک، در قطعات ۲ تا ۵ و ۷ نشان داد. در کل نتایج این پژوهش نشان داد که ارتقای تحریک-پذیری قشر حرکتی اولیه می‌تواند به بهبود آموزش حرکتی بینجامد.

بوگویو و همکاران[3] (۲۱) در پژوهشی به بررسی این مسئله پرداختند که آیا tDCS می‌تواند به بهبود عملکرد دست غالب و غیرغالب کمک کند. بدین منظور هشت آزمودنی سالم که همگی زن بودند، انتخاب شدند. دو آزمایش در این مطالعه برگزار شد. در آزمایش اول، هر هشت آزمودنی در دو شرایط مختلف تحریکی شامل آنودال و ساختگی مورد بررسی قرار گرفتند. تحریک‌ها به قشر مخ اولیهٔ غیرغالب یعنی نیمکره راست وارد شد. آزمایش دوم نیز به مراتب مشابه آزمایش اول بود؛ با این تفاوت که این بار قشر مخ حرکتی اولیه و غالب یعنی نیمکره چپ تحریک شد. برای تحریک قشر مخ حرکتی اولیه، الکترود آنودال در بخش C3 یا C4 قرار گرفت. الکترود مرجع نیز در بخش contralateral supraorbital قرار گرفت. نتایج نشان داد که تحریک فراجمجمه‌ای از نوع آنودال، اگر برای دست غیرغالب اجرا شود، موجب بهبود عملکرد می‌گردد اما اگر برای دست غالب اجرا شود، بهبودی را در پی ندارد.

خستگی عصبی‌عضلانی[4] به کاهش توانایی رشته‌های عضلانی در تولید نیرو اطلاق می‌شود که در نتیجه تمرین و فعالیت مستمر اتفاق می‌افتد. کوجیامانیان[5] و همکاران (۲۲) در پژوهشی به بررسی این مطلب پرداختند که آیا تحریک مغز با استفاده از tDCS می‌تواند به کاهش این خستگی کمک کند. هر دو گروه آزمایشی و کنترل ابتدا به تکلیف حداکثر انقباض ارادی[6] (MVC) پرداختند که طی آن حداکثر توان وارد شده از سوی ماهیچهٔ تاکنندهٔ آرنج[7] مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. الکترود فعال روی جمجمه و در قشر مخ حرکتی راست نصب شد (چهار سانتی‌کتر تا خط وسط سر). الکترود دیگر هم روی شانه متصل شد. نتایج نشان داد که متعاقب تحریک آنودال، زمان استقامت ماهیچه‌ای به طور معنادار نسبت به تحریک کاتودال و ساختگی، کاهش کمتری را در پی دارد؛ بنابراین تحریک آنودال می‌تواند با تنظیم فرایندهای تحریک‌پذیری قشر مخ، استقامت ماهیچه‌ای را افزایش و خستگی ناشی از تمرین

1. Lateral Prefrontal area
2. Medial Prefrontal area
3. Boggio, P. S., et al.
4. Neuromuscular fatigue
5. Cogiamanian
6. maximum voluntary contraction
7. elbow flexors

زیاد را کاهش دهد. این امر می‌تواند به افزایش انگیزه افراد به‌خصوص در تکالیف ورزشی کمک کند.

ریس و همکاران (۲۳) پژوهشی را در PNAS (مجله انجمن ملی علوم آمریکا[1]) منتشر کردند که مطالعه یادگیری مهارت‌های حرکتی را به سه مقطع زمانی مختلف تقسیم می‌کرد: تاثیرات همزمان[2]، تاثیرات غیرهمزمان[3] و نگهداری درازمدت.[4] پژوهشگران برای ارزیابی میزان یادگیری مهارت‌های حرکتی از SVIPT (تکلیف فشردن ایزومتریک دیداری متوالی[5]) استفاده کردند. دو گروه متشکل از ۱۲ آزمودنی در هر گروه به‌کار گرفته شد تا معلوم شود که آیا به‌کارگیری تحریک آنودال می‌تواند به افزایش مهارت بینجامد یا خیر. در ادامه، از گروه ۱۲ نفرهٔ دیگری استفاده کردند تا اثر تحریک کاتودال را در مقایسه با تحریک آنودال مورد سنجش قرار دهند. ۲۰ دقیقه تحریک tDCS همزمان با یادگیری تکالیف حرکتی برای شرکت‌کنندگان گروه تحریکی اجرا شد و در مقابل، این زمان برای گروه ساختگی ۳۰ ثانیه بود. پنج روز تمرین برای شرکت‌کنندگان هر گروه اجرا شد. شرکت‌کنندگان نتایج نشان داد که دو گروه آنودال و ساختگی در ابتدا به لحاظ مهارتی یکسان بودند. گروه ساختگی در طول تمرین یادگیری مثبت از خود نشان داد. در مقابل هم گروه آنودال به‌صورت معنادار یادگیری بیشتری نسبت به گروه ساختگی از خود نشان داد. برتری گروه آنودال نسبت به گروه کاتودال هم دیده شد؛ درحالی‌که، دو گروه ساختگی و کاتودال تفاوت معناداری نسبت به یکدیگر نداشتند. در گام بعدی، پژوهشگران به تمییز اثرات آنلاین و آفلاین پرداختند. نتایج حاکی از این واقعیت بود که تفاوت معناداری میان گروه‌ها در باب اثرات آنلاین دیده نشد؛ اما برعکس این، در باب اثرات آفلاین تفاوت معناداری میان گروه‌ها وجود داشت. گروه ساختگی، اثرات آفلاین منفی از خود نشان داد؛ درحالی‌که، گروه آنودال نوعی اثر آفلاین مثبت به نمایش گذاشت. به بیان بهتر، وقتی جلسات تمرینی در یک روز به پایان رسید و جلسات تمرینی روز بعد آغاز شد، برای گروه ساختگی نوعی کاهش یادگیری اتفاق افتاد اما برعکس، برای گروه آنودال نوعی افزایش در یادگیری دیده شد. مسئله‌ای که در گروه ساختگی اتفاق افتاد، یک اثر رایج در یادگیری مهارت‌های حرکتی است که با عنوان زوال ابتدایی[6] شناخته می‌شود. در مقابل، به نظر می‌رسد پدیده‌ای که برای گروه آنودال اتفاق افتاد، نوعی تحکیم یادگیری است.این مسئله نشان‌دهندهٔ اثربخشی tDCS در یادگیری بلندمدت است. اثربخشی تحریک tDCS در یادگیری مهارت‌های حرکتی در این مطالعه دیده شد. نکته جالب دربارهٔ این مطالعه آن بود که وقتی با حضور یک تکلیف متوالی انتظار زوال ابتدایی داریم، تحریک آنودال موجب تحکیم یادگیری می‌شود. از این پدیده با عنوان تحکیم منتج از tDCS[7] یاد می‌شود.

استگ و همکاران[8] (۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی اثر زمان به‌کارگیری tDCS بر میزان تغییرات در یادگیری مهارت‌های حرکتی آشکار[9] پرداختند. بدین منظور سه دسته آزمودنی کوهورت برای شرکت در سه آزمایش انتخاب شدند (به ترتیب: ۷، ۷ و ۸ شرکت‌کننده در هر آزمایش). بدین منظور دو الکترود برای ارائه تحریک tDCS روی سر آزمودنی‌ها نصب شد. الکترود تحریکی در ناحیه حرکتی اولیه یا M1 نیمکره چپ قرار گرفت و الکترود مرجع در بخش contralateral supraorbital ridge قرار گرفت. همان‌طور که اشاره شد، این مطالعه برای بررسی اثر

1. Proceedings of the National Academy of Sciences
2. Online effect
3. Offline effect
4. Long-term retention
5. Sequential Visual Isometric Pinch Task
6. Warm-up decrement
7. tDCS induced consolidation
8. Stagg, C. J., et al.
9. Explicit motor learning

زمان به‌کارگیری tDCS بر میزان تغییرات در یادگیری مهارت‌های حرکتی انجام گرفت. یک تکلیف یادگیری حرکتی آشکار را یک بار همزمان با tDCS و بار دیگر بعد از پایان tDCS به‌کار بردند. نتایج نشان داد که وقتی تحریک در حین اجرای تکلیف به‌کار می‌رود، تحریک آنودال، زمان واکنش را کاهش می‌دهد و تحریک کاتودال این زمان را افزایش می‌دهد. اما وقتی tDCS قبل از تکلیف به‌کار رفت، در هر دو حالت آنودال و کاتودال زمان واکنش را افزایش داد (یعنی یادگیری را کاهش داد). بنابراین، این پژوهش علاوه‌بر اینکه شواهدی دال بر اثربخشی تحریک آنودال در یادگیری حرکتی ارائه می‌کند، این نکته را نیز گوش‌زد می‌کند که افزایش قابلیت‌های یادگیری هنگامی اتفاق می‌افتد که تحریک در حین اجرای تکلیف باشد نه قبل از آن.

ریس و همکاران (۲۵) در مقاله دیگری به بررسی این نکته پرداختند که تحکیم یادگیری توالی حرکتی آشکار به گذشت زمان بستگی دارد یا اینکه لزوماً باید با خواب همراه شود. بسیاری از مطالعات قبلی به این مسئله پرداخته بودند و نتیجه آنها این بود که گذشت زمان عامل اصلی تحکیم مهارت‌های حرکتی است؛ با این‌حال، این مطالعه به این پرسش اساسی نیز می‌پردازد که جهت بهره‌گیری از اثرات tDCS تمرینات باید با گذشت زمان همراه شوند یا خواب هم جهت مشاهده اثرات این ابزار لازم است؟ جهت پاسخ به این پرسش، ۱۰۹ آزمودنی ۱۸ تا ۵۳ سال در این پژوهش شرکت کردند. آزمایش در سه روز متوالی برگزار شد و هر روز نزدیک به ۴۰ دقیقه وقت برای آزمایش صرف می‌شد. روزانه ۱۶۰ کوشش تمرینی که در پنج بلوک تنظیم شده بودند، برای آزمودنی‌ها اجرا شد. مداخله tDCS از نوع آنودال و ساختگی، روزانه برای ۲۰ دقیقه روی قشر حرکتی چپ اعمال شد.

مکان مربوط به ماهیچه dorsal interosseus به‌وسیلهٔ TMS شناسایی شد. الکترود آنودال در این بخش از قشر مخ حرکتی اولیه نیمکره چپ قرار گفت و در مقابل الکترود کاتد روی contralateral supraorbital قرار گرفت. ۲۰ دقیقه تحریک برای گروه آنودال و ۳۰ ثانیه برای گروه ساختگی به اجرا درآمد. نتایج نشان داد که یک افزایش تدریجی در یادگیری مهارت‌های حرکتی در طول آزمایش دیده می‌شود که برای هر دو گروه آنودال و ساختگی قابل ردیابی است؛ بااین‌حال، دو گروه تفاوت معناداری در باب اثرات همزمان نداشتند. در فاصله‌های بازآزمون (اثر غیرهمزمان)، آزمودنی‌هایی که تحریک آنودال دریافت کرده بودند، بهبود بالاتری نسبت به گروه ساختگی نشان دادند. با گذشت زمان، میزان افزایش مهارت در گروه آنودال و نیز فقدان مهارت در گروه ساختگی قابل تشخیص است. نتایج دیگر نشان داد که اثرات غیرهمزمان به گذشت زمان بستگی دارد و ارتباطی با خواب ندارد. این آزمایش از یک طرف شواهدی را در باب اثربخشی tDCS در یادگیری مهارت‌های حرکتی ارائه داد و از طرف دیگر نشان داد که این تاثیر با گذشت زمان اعمال می‌شود و ارتباطی با خواب ندارد. بنابراین، ارتقای قدرت تحریک‌پذیری قشر مخ با استفاده از tDCS می‌تواند قابلیت‌های فرد را در یادگیری مهارت‌های حرکتی در طول زمان بعد از تمرین افزایش دهد.

از گذشته مداخلات متنوعی با هدف کاهش خستگی و افزایش بهره‌وری طراحی شده‌اند. ویلیامز و همکاران[1] (۲۶) نیز آزمایشی طراحی کردند که هدف آن استفاده از تحریک tDCS برای کاهش خستگی و افزایش مقاومت ماهیچه‌ای[2] بود. ۱۸ آزمودنی سالم و غیرورزشکار در این پژوهش شرکت کردند. آزمودنی‌ها در هر جلسه یکی از این دو نوع تحریک را دریافت می‌کردند. تحریک آنودال برای مدت ۲۰ دقیقه و

1 . Williams, P.S., et al.

2. Muscle Endurance

تحریک ساختگی برای مدت ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که تحریک آنودال تغییری در TTF در تمام آزمودنی‌ها ایجاد نکرده است اما با توجه به اینکه گرایشاتی در برخی از آزمودنی‌ها دیده شد، آنها به دو گروه تمام‌وقت و نیمه‌وقت تقسیم شدند. تحلیل‌ها نشان داد که گروه تمام-وقت هنگام دریافت تحریک آنودال حدود ۳۱ درصد افزایش در تکلیف TTF تجربه کردند اما چنین اثری دربارهٔ گروه نیمه‌وقت به‌دست نیامد. نتایج همچنین نشان داد که گروه تمام‌وقت به‌طور معنادار کاهش بیشتری در MVC داشت. این نتایج مؤید این واقعیت است که زمان منتهی به خستگی با استفاده از تحریک tDCS افزایش می‌یابد و افراد مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند؛ بااین‌حال، کاهش بیشتری نیز در نیروی فرد اتفاق می‌افتد. بنابراین تحریک tDCS در کاهش خستگی مؤثر است.

اوکانو و همکاران[1](۱۸) مطالعه‌ای انجام دادند که از معدود مطالعات انجام گرفته در ورزشکاران به‌شمار می‌رود. آنها در این آزمایش به ارزیابی تاثیر tDCS بر سیستم عصبی خودکار و نیز تحمل فرد در کوشش‌های فیزیکی و درنتیجه افزایش عملکرد ورزشی پرداختند. بدین منظور، ۱۰ مرد دوچرخه‌سوار جاده‌ای در سطح ملّی برای شرکت در آزمایش داوطلب شدند. الکترود آند در قشر گیجگاهی و در ناحیه T3 قرار گرفت. الکترود کاتد هم در بخشcontralateral supraorbital قرار گرفت. در حالت تحریک واقعی به‌مدت ۲۰ دقیقه تحریک دو میلی‌آمپر به بخش T3 وارد شد و در حالت ساختگی به‌رغم جای‌گذاری مشابه الکترودها، جریان تحریکی بعد از ۳۰ ثانیه متوقف شد. نتایج حاکی از تأثیر موفق tDCS بود. همچنین تحلیل‌ها نشان داد که در شرایط آنودال در مقایسه با ساختگی، میزان ضربان قلب در تمرین بیشینه کاهش می‌یابد. همچنین میزان RPE در دریافت تحریک آنودال، پائین‌تر از حالت ساختگی است. اوکانو و همکاران (۲۰۱۳) نتیجه گرفتند که تحریک آنودال در قشر گیجگاهی می‌تواند با تنظیم سیستم عصبی خودکار به ارتقای عملکرد ورزشی افراد کمک کند.

مطالعهٔ دیگری که درباره اثربخشی tDCS بر خستگی و مقاومت تمرینی انجام گرفت، توسط ویتورکاستا و همکاران[2](۲۷) به چاپ رسید. آنها در این مطالعه به ارزیابی اثربخشی تحریک‌های فراجمجمه‌ای بر عملکرد ۱۱ دوچرخه‌سوار مرد ورزشکار پرداختند. بدین منظور، چهار جلسه آزمایشی تدارک دیده شد. سه شرایط تحریکی مختلف شامل آنودال، کاتودال و ساختگی به طور تصادفی برای جلسات بعدی چیده شد. آزمودنی‌ها در هر جلسه یکی از این شرایط آزمایشی را دریافت کردند. جهت تعیین کارگذاری الکترودها محل Cz برای کارگذاری الکترودی فعال به اندازه ۳۶ سانتی‌متر مربع و الکترود مرجع نیز در ناحیه occipital protuberance قرار گرفت. آزمودنی‌ها به مدت ۱۳ دقیقه و قبل از اجرای آزمون بار ثابت، تحریکی به میزان دو میلی‌آمپر دریافت کردند. نتایج نشان داد که شرکت‌کنندگان هنگام دریافت تحریک آنودال عملکرد بهتری نسبت به شرایط کاتودال و ساختگی دارند اما داده‌های مربوط به دو حالت کاتودال و ساختگی تفاوت معناداری با یکدیگر نشان ندادند. نتیجه محققان این بود که تحریک آنودال می‌تواند مقاومت تمرینی افراد و زمان منتهی به خستگی آنها را افزایش دهد.

وید و هاموند[3](۲۸) در مطالعه‌ای به بررسی این پرسش پرداختند که آیا امکان ارتقای یادگیری مشاهده‌ای با استفاده از تحریک tDCS وجود دارد؟ ۴۰ فرد بزرگسال سالم و راست دست برای شرکت در این آزمایش انتخاب

1. Okano, A. H., et al
2. Vitor-Costa, M., et al.
3. Wade, S., & Hammond, G.

شدند. تحریک tDCS حین مشاهده برای افراد اجرا شد. شرکت‌کنندگان به دو گروه آنودال و ساختگی تقسیم شدند. با توجه به تقسیم‌بندی قبلی در باب توالی منظم و بی‌قاعده، در کل چهار گروه شرکت‌کننده در این آزمایش وجود داشت: آنودال منظم، آنودال بی‌قاعده، ساختگی منظم و ساختگی بی‌قاعده. الکترود آند در ناحیهٔ پیش‌حرکتی و الکترود مرجع در ناحیهٔ right supraorbital قرار گرفت. تحریک آنودال برای مدت ۱۴ دقیقه و در مقابل تحریک ساختگی برای مدت ۳۰ ثانیه تنظیم شد. نتایج حاکی از این واقعیت بود که با پیشرفت تمرینات، دقت شرکت‌کنندگان کاهش یافت. بااین‌حال، این کاهش دقت در گروه آنودال کمتر از گروه ساختگی بود. زمان واکنش نیز با پیشرفت تمرینات کاهش یافت. نوع تحریک هم تاثیر معناداری بر زمان واکنش داشت. تحلیل‌های مربوط به اثر تعاملی نوع توالی مورد مشاهده و نوع تحریک دریافتی نشان داد که برتری گروهی که حین مشاهده توالی منظم، تحریک آنودال دریافت کرده است، در طول تمرین عملی و فیزیکی خود را نشان می‌دهد. دو یافته اصلی از این پژوهش به‌دست آمد: اول اینکه ناحیه پیش‌حرکتی در یادگیری مشاهده‌ای دخیل است و دوّم اینکه تحریک آنودال در این بخش می‌تواند به ارتقای این نوع یادگیری کمک کند. از این یافته می‌توان جهت طراحی برنامه‌های تمرینی ورزشکاران و همچنین برنامه‌های مداخله استفاده کرد.

ژو و همکاران[1](۲۹) به طراحی آزمایشی پرداختند که در آن با استفاده از تحریک کاتودال تلاش کردند که از راه بازداری DLPFC (پیش‌پیشانی خلفی‌جانبی [2]) حین یادگیری حرکتی، جلوی دخالت حافظه فعال را بگیرند و یادگیری حرکتی ضمنی را تقویت کنند. ۲۷ دانشجوی راست دست و بدون تجربه گلف، برای یادگیری یک تکلیف ضربه زدن در گلف[3] همزمان با اجرای tDCS در این آزمایش شرکت کردند. افراد شرکت‌کننده به دو گروه کاتودال و ساختگی تقسیم شدند. الکترود کاتد در بخش DLPFC چپ (F3) و الکترود آنود در بخش supraorbital راست (Fp2) قرار گرفت. اجرای tDCS برای گروه تحریک واقعی، تقریباً ۱۵ تا ۲۰ دقیقه و برای گروه ساختگی، ۱۵ ثانیه طول کشید. نتایج نشان داد که گروه تحریک واقعی در مقایسه با گروه ساختگی، فعالیت حافظه فعال کلامی را بعد از مرحله تمرینی سرکوب کرد. این نتیجه به جهت دریافت تحریک کاتودال در بخش DLPFC بود. از سوی دیگر، دربارهٔ عملکرد ضربه در گلف، گروه کاتودال در هر دو مرحلهٔ آموزش و آزمون به‌طور معنادار بهتر از گروه ساختگی عمل کرد. در مورد بلوک چندگانه نیز نتایج نشان داد که گروه تحریک واقعی عملکرد بهتری نسبت به گروه ساختگی دارد. با توجه به این نتایج به نظر می‌رسد که فرضیه پژوهشگران تائید شده است و تحریک کاتودال در بخش F3 چپ می‌تواند از راه سرکوب حافظه فعال، یادگیری حرکتی ضمنی را ارتقا بخشد.

بوردوچی و همکاران[4] (۱۹) پژوهشی را به انجام رساندند که در آن برای نخستین بار به ارزیابی تحریک‌های tDCS بر عملکرد شناختی ورزشکاران پرداختند. بدین منظور، از ۱۰ ورزشکار حرفه‌ای در رشته‌های مختلف، شامل چهار جودوکار، سه شناگر و سه ژیمناست استفاده شد. تحریک‌ها برای ۱۰ روز پیاپی و به‌مدت ۲۰ دقیقه در هر روز ارائه شدند. الکترود آند در بخش DLPFC چپ (F3) و الکترود کاتد در همین بخش از نیمکره راست (F4) قرار گرفت. عملکردهای شناختی مورد ارزیابی شامل حافظه و توجه بود. نتایج نشان داد که تحریک tDCS اثر مثبت و معناداری روی ابعاد خُلق و عملکرد شناختی ورزشکاران

1. Zhu, F. F., et al.
2. Dorsolateral prefrontal cortex
3. Gulf Putting Task
4. Borducchi, D. M., et al.

دارد. نمرات افسردگی ۴,۵ نمره کاهش نشان داد. همچنین نمرات مربوط به توجه پایدار، تقسیم‌شده و متمرکز نیز افزایش نشان داد. حافظه بازشناسی هم بهبود معناداری نشان داد. هیچ گونه کاهشی در هیچ یک از دیگر ابعاد دیده نشد. این مطالعه اولین پژوهش در نوع خود بود که نشان داد تحریک tDCS می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر عملکردهای شناختی ورزشکاران بگذارد.

ناروس و همکاران[1](۳۰) پژوهشی را انجام دادند که در آن به مقایسه اثربخشی tDCS یک طرفه و دو طرفه در ارتقای مهارت‌های حرکتی پرداخته بودند. بدین منظور ۵۰ آزمودنی راست دست و سالم، انتخاب و به‌صورت تصادفی براساس طرح گروه همتا، به پنج گروه ۱۰ نفره تخصیص پیدا کردند. ملاک تقسیم‌بندی نوع تحریک دریافتی بود. در کل چهار الکترود روی سر هر آزمودنی نصب شد: دو الکترود مرجع[2]بالای پیشانی راست و چپ و دو الکترود فعال روی نواحی C3 و C4 قرار گرفت. هر گروه یکی از اشکال تحریکی روبه‌رو را دریافت کرد: یک طرفه: ۱) تحریک آندی در ناحیه C4 و الکترود مرجع در پیشانی چپ ۲) تحریک کاتدی در ناحیه C3 و الکترود مرجع در پیشانی راست. دو طرفه: ۳) تحریک دو طرفه عادی شامل تحریک آند در ناحیه C4 و تحریک کاتدی در ناحیه C3 ۴) تحریک دو طرفه دو مرجعی شامل تحریک آندی در ناحیه C4 با الکترود مرجع در پیشانی چپ و تحریک کاتدی در ناحیه C3 به همراه الکترود مرجع در پیشانی راست. گروه ساختگی: دریافت ۳۰ ثانیه تحریک براساس گروه شماره ۱ تحریک‌های tDCS درست قبل از اجرای تمرینات ارائه شدند. ۲۰ دقیقه تحریک یک میلی‌آمپر برای گروه‌های تحریک واقعی و ۳۰ ثانیه تحریک برای گروه ساختگی به اجرا درآمد. نتایج نشان داد که عملکرد حرکتی در طول دوره تمرین بهبود پیدا کرده است اما فقط دو گروه تحریکی دو طرفه بودند که در پایان عملکرد بهتری نسبت به وضعیت ساختگی نشان دادند. نتیجه این بود که تحریک دو طرفه ارتقای عملکرد بیشتری نسبت به تحریک ساختگی ایجاد می‌کند و دو گروه تحریکی یک طرفه در پایان تفاوت معناداری نسبت به گروه ساختگی ندارند. همچنین مقایسه دو گروه تحریکی دو طرفه نشان داد که این دو شکل از تحریک، تفاوت معناداری با یکدیگر ندارند.در جدول شماره ۱، نتایج این پژوهش‌ها گزارش شده است. هولگادو و همکاران[3](۳۱) در یک مطالعهٔ فراتحلیل و مروری نظام‌مند به بررسی تأثیرات tDCS بر شاخص‌های عملی و انتزاعی عملکرد ورزشی پرداختند. مطالعهٔ آنها شامل ۴۲۰ مطالعه بود که ۳۱ مطالعه آن بررسی شد. آنها در محاسبهٔ حجم اثر مطالعات مختلف و در ۳۸۶ شرکت‌کننده به این نتیجه رسیدند که tDCS آندی اثر کم ولی مثبتی روی این دو شاخص ورزشی داشت (g=۰,۳۴، فاصله اطمینان ۹۵ درصد [۰,۵۲-۰,۱۲]، z=۳,۲۴، p=۰,۰۰۱۲). اثرات در این مطالعه به‌صورت معناداری با متغیرهای دیگری مانند نتایج مطالعات، جایگذاری الکترودی، ماهیچه‌های درگیر، تعداد جلسات یا شدت و مدت زمان تحریک میانجی‌گری نمی‌شد. هولگارو و همکاران (۲۰۱۹) درنهایت به این نتیجه رسیدند که یافته‌ها نشان می‌دهد که tDCS می‌تواند اثرات مثبتی روی عملکرد ورزشی داشته باشد؛ بااین‌حال، این اثربخشی احتمالاً کوچک است و این مسئله به احتمال زیاد به‌دلیل سوگیری‌هایی ناشی از کیفیت پایین مطالعات و انتخاب مطالعات منتشرشده‌ای بوده است که نتایج معناداری داشته‌اند. آنها نتیجه می‌گیرند که در حال حاضر، tDCS ابزاری با شواهد کافی برای به‌کارگیری در بهبود عملکرد ورزشی نمی‌تواند باشد و نیاز است تا مطالعات دقیق‌تر و

1. Naros, G., et al.
2. Return Electrode
3. Holgado, D. et al.

بیشتری با تنوع بیشتری از عملکردهای ورزشی انجام شوند.

ماکادو و همکاران[1] (۳۲) در مطالعهٔ مروری نظام‌مندی به بررسی اثربخشی tDCS بر عملکرد ورزشی پرداختند. این مطالعه بر تحقیقات انجام شده تا سال ۲۰۱۷ متمرکز بود. آنها در مطالعه خود به مقایسهٔ اثرات tDCS آندی و کاتدی با تحریک ساختگی یا شرایط گروه گواه و تاثیرگذاری آنها روی نتایج (ورزش ایزومتریک، ایزوکینتیک و قدرت دینامیک و عملکرد کلی‌جسمانی ورزشی[2]) پرداختند. در این مطالعه ۲۲ پژوهش (۳۹۳ شرکت کننده) در فرآیند تحلیل قرار رفتند و ۱۱ مطالعه (۲۳۶ شرکت‌کننده) در فرآیند فراتحلیل وارد شدند. قشر حرکتی اولیه (M1) اصلی‌ترین ناحیه تحریک در مطالعات tDCS بود (n=۱۶؛ ۷۲٫۵٪) اثر معناداری در باب tDCS آندیِ به کار گرفته‌شدهٔ قبل از ورزش در ناحیه حرکتی اولیه در یک زمان دوره‌ای خستگی (تفاوت میانگین=۹۳٫۴۱ ثانیه؛ فاصله اطمینان ۹۵٪ [۲۷٫۳۹-۱۵۹٫۴۳]) به‌دست آمد؛ بااین‌حال، این یافته تحت تاثیر قدرتمند یک مطالعه بود (با وزن ۸۴ درصد)، که هیچ اثربخشی در تحریک کاتدی حاصل نشده بود. اثربخشی معناداری برای تحریک آندی قبل یا حین ورزش قدرت ایزومتریک عضلانی در ناحیه M1 در اندام‌های فوقانی یا تحتانی مشاهده نشد. مطالعاتی که تحریک آندی روی M1 در قدرت عضلانی ایزوکینتیک را بررسی کرده بودند، نتایج ناهمگونی داشتند. مطالعات تکی که از تحریک آندی روی قشر پیش‌پیشانی و حرکتی قبل یا حین آزمون ارزیابی قدرت دینامیک عضلانی استفاده کرده بودند با نتایج مثبتی همراه بودند که البته در این مطالعه اجرای فراتحلیل در این زمینه امکان پذیر نبود. نویسندگان در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که در زمینهٔ بررسی برنامه تحریک به کار گرفته شده، تحریک آندی و نه تحریک کاتدی درمقایسه با گروه ساختگی و روی ناحیه M1 فقط در دوچرخه‌سواری عملکرد ورزشی را بهبود داد. این نتیجه البته فقط در یک مطالعه به‌دست آمد که زمانی که از تحلیل‌ها کنار گذاشته شد، بهبودی گزارش شده دیگر معنادار نبود. در آخر آنها بیان می‌کنند که در این زمینه، دیگر مطالعاتی که به‌خوبی و با گروه گواه درجه کنترل را در پژوهش خود بالا برده باشند و دارای حجم نمونه‌های بیشتر و به‌کارگیری وسیع‌تری از tDCS هستند، نیاز است تا بتوان نتایج و یافته‌های دقیق‌تری داشت.

درنهایت، فریس و همکاران[3] (۳۳) در مطالعهٔ مروری نظام‌مندی به بررسی روش‌های تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای بر عملکرد ورزشی در ورزش‌های المپیکی پرداختند. هدف از این مطالعه ایجاد دیدگاهی انتقادی به حوزهٔ جدید tES در عملکرد ورزشی بود. آنها همچنین به بررسی رویکردهای روش‌شناختی، الزامات پژوهشی و جهت‌گیری‌های پژوهشی آتی پرداختند. نتایج مطالعهٔ آنها نشان داد که تنوع زیادی در روش‌شناسی و فقدان پژوهش‌های کافی در این حوزه وجود دارد. به‌علاوه، انتخاب‌های جزئی و غیربهینه در طرح پژوهش، روش‌شناسی و فقدان پایداری گزارش در فرآیند به‌کارگیری تحریک‌ها باعث آسیب به نتیجه‌گیری‌ها و حجم اثر این مطالعات در اثرگذاری روی عملکرد ورزشی در ورزش‌های المپیکی شده است. درمجموع، محققان در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که درحالی‌که این ادعا که tES می‌تواند باعث ارتقای عملکرد ورزشی المپیکی شود، رسیدن به نتیجه‌گیری مطمئن در این زمینه نیازمند مطالعات بیشتری است. مطالعات آتی باید روی مشکلات روش‌شناختی و انتخاب نظریه‌های بنیادین در تحلیل نتایج بیشتر تمرکز کنند.

1. Machado, D. G. D. S., et al
2. Whole-Body Exercise
3. Friehs, M. A. Et al.

جدول شماره ۱: خلاصهٔ نتایج پژوهش‌های اثربخشی tDCS در ارتقای عملکرد ورزشی

نویسنده	شرکت‌کنندگان	متغیر هدف	نوع مطالعه	مداخله	مکان الکترود	مشخصات تحریک	نتیجه
نیچه و همکاران (۱۷)	افراد سالم و غیر ورزشکار	یادگیری حرکتی ضمنی	آزمایشی تصادفی با چهار گروه مداخله–مبنای گروه‌بندی: ناحیه نصب الکترود.	سه نوع تحریک آنودال، کاتودال و شم در جلسات جداگانه به شرکت‌کنندگان ارائه شد.	نواحی نصب الکترود محرک در گروه‌های مختلف: ناحیه حرکتی اولیه، ناحیه پیش‌حرکتی، ناحیه پیش‌پیشانی جانبی و ناحیه پیش‌پیشانی میانی الکترود مرجع: در ناحیه contralateral supraorbital قرار گرفت.	۱۵ دقیقه جریان 1 mA با استفاده از الکترودهای 35 cm^2	ارتقای تحریک‌پذیری قشر حرکتی اولیه (C3) با استفاده از تحریک آنودال می‌تواند به بهبود یادگیری حرکتی ضمنی کمک کند.
بوجیو و همکاران (۲۱)	افراد سالم و غیر ورزشکار	بهبود عملکرد دست غالب و غیرغالب	آزمایشی با یک گروه مداخله که دو نوع شرایط مختلف را تجربه کردند.	دو نوع تحریک آنودال و شم در جلسات جداگانه به شرکت‌کنندگان ارائه شد. در یک آزمایش کرتکس غیرغالب برای تحریک دست غالب و در آزمایش دیگر کرتکس غالب برای تحریک دست غیرغالب تحریک شد.	الکترود محرک: ناحیه C4 (آزمایش اول) یا C3 (آزمایش دوم) الکترود مرجع: ناحیه contralateral supraorbital	تحریکی: ۲۰ دقیقه جریان 1 mA با استفاده از الکترودهای 35 cm^2 ساختگی: ۳۰ ثانیه تحریک	تحریک قشر غیرغالب موجب بهبود عملکرد دست غیرغالب می‌گردد (۹,۴۱ درصد) اما بر عکس تحریک قشر غالب، بهبودی را برای دست غالب درپی ندارد (۰,۸۱ درصد).
کوگیامانیان و همکاران (۲۲)	افراد سالم و غیر ورزشکار	خستگی عصبی–عضلانی	آزمایشی از نوع پیش‌آزمون–پس‌آزمون با گروه کنترل	برای گروه آزمایشی تحریک آنودال و کاتودال در دو جلسه جداگانه اجرا شد که حداقل یک هفته بین جلسات فاصله بود. برای گروه شم هیچ تحریکی در نظر گرفته نشد.	الکترود محرک: کرتکس حرکتی راست الکترود مرجع: شانه راست	تحریکی: ۱۰ دقیقه جریان 1.5 mA با استفاده از الکترودهای 35 cm^2	پس از تحریک آنودال، زمان استقامت ماهیچه‌ای نسبت به تحریک کاتودال و شم، کاهش کمتری را در پی دارد؛ بنابراین تحریک آنودال می‌تواند استقامت ماهیچه‌ای را افزایش و خستگی ناشی از تمرین زیاد را کاهش دهد.

ریس و همکاران (۲۳)	افراد سالم و غیر ورزشکار	یادگیری حرکتی آشکار	آزمایشی با گروه ساختگی –همراه با سه نقطه زمانی برای اندازه‌گیری یادگیری حرکتی: اثرات آنلاین، آفلاین و نگهداری درازمدت	دو گروه مداخله و یک گروه ساختگی مورد ارزیابی قرار گرفت. تحریک tDCS در حین اجرای تکالیف حرکتی ارائه شد. این تکالیف در ۵ روز جداگانه انجام شدند.	از راه تحریک منفرد TMS مکان مرتبط با ماهیچه‌های FDI[1] دست شناسایی شدند. سپس الکترود آنود در بخش شناسایی شده و الکترود کاتود نیز در بخش contralateral supraorbital قرار گرفت. در مورد گروه کاتودال هم برعکس این جایگذاری استفاده شد.	تحریکی: ۲۰ دقیقه جریان 1 mA با استفاده از الکترودهای $25\ cm^2$ ساختگی: ۳۰ ثانیه	تفاوت معناداری میان گروه‌ها در رابطه با اثرات آنلاین (یادگیری در طول جلسه) دیده نمی‌شود؛ اما در رابطه با اثرات آفلاین (یادگیری در بین جلسات) تفاوت معناداری میان گروه‌ها وجود دارد. گروه شم، اثرات آفلاین منفی از خود نشان داد؛ درحالیکه گروه آنودال نوعی اثر آفلاین مثبت به نمایش گذاشت. در ارتباط با نگهداری بلندمدت نیز تفاوت معناداری بین دو گروه آنودال و شم وجود داشت.
استگ و همکاران (۲۴)	افراد سالم و غیر ورزشکار	یادگیری حرکتی آشکار	سه مطالعه مستقل و هر مطالعه شامل یک گروه تقریبا مجزا	۳ دسته کوهورت انتخاب شد که در جلسات مختلف، انواع تحریک‌ها (شامل آنودال، کاتودال و شم) را دریافت کردند. در آزمایش دوم، تحریک و تکلیف تقریبا همزمان بود اما در آزمایش ۱ و ۳، تکلیف همزمان با توقف تحریک آغاز می‌شود	الکترود محرک: ناحیه حرکتی اولیه یا M1 در نیمکره چپ الکترود مرجع: contralateral supraorbital ridge	تحریکی: ۱۰ دقیقه جریان 1 mA با استفاده از الکترودهای $35\ cm^2$ ساختگی: ۱۰ ثانیه تحریک ساختگی	وقتی tDCS در حین اجرای تکلیف بکار می‌رود، تحریک آنودال موجب افزایش یادگیری و تحریک کاتودال موجب کاهش یادگیری می‌شود. اما وقتی این تحریک قبل از اجرای تکلیف بکار می‌رود، هر دو حالت آنودال و کاتودال یادگیری را کاهش می‌دهد.
ریس و همکاران (۲۵)	افراد سالم و غیر ورزشکار	یادگیری حرکتی آشکار	آزمایشی با گروه ساختگی – همراه با نقاط زمانی مجزا برای اندازه‌گیری اثر مداخله‌گر گذشت زمان و خواب بر رابطه میان tDCS و یادگیری حرکتی	افراد به دو گروه آنودال و ساختگی تقسیم شدند. همچنین بر اساس زمان اجرای آزمون مجدد، هر گروه به سه بخش ۱۵ دقیقه‌ای، ۳ ساعته و ۶ ساعته تقسیم شدند.	از راه تحریک منفرد TMS مکان مرتبط با ماهیچه dorsal interosseus شناسایی شد. سپس الکترود آنود در بخش شناسایی شده در کرتکس حرکتی اولیه نیمکره چپ و الکترود کاتود نیز در بخش contralateral supraorbital قرار گرفت.	تحریکی: ۲۰ دقیقه جریان 1 mA با استفاده از الکترودهای $16\ cm^2$ ساختگی: ۳۰ ثانیه	دو گروه تفاوت معناداری در باب اثرات آنلاین نداشتند. در گروه آنودال، ارتقای یادگیری تنها در بازآزمایی‌های ۳ ساعته و ۶ ساعته دیده شد. هیچ نوع اثری از یادگیری شبانه مشاهده نشد.

1. First Dorsal Interosseus

ویلیامز و همکاران (۲۶)	افراد سالم و غیر ورزشکار	خستگی عصبی – عضلانی	آزمایشی با یک گروه مداخله که دو نوع شرایط مختلف را تجربه کردند.	آزمایش در دو جلسه با فاصله حداقل ۷ روز برگزار شد. آزمودنی‌ها در هر جلسه یکی از این دو نوع تحریک آنودال یا ساختگی را دریافت کردند. تحریک در حین اجرای تکالیف به آزمودنی‌ها ارائه شد اما در برخی موارد تحریک زودتر به پایان رسید.	از راه تحریک TMS ماهیچه مربوط به عضله دوسر بازو شناسایی و الکترود مربوطه در این بخش جایگذاری شد.	تحریکی: ۲۰ دقیقه جریان 1.5 mA با استفاده از الکترودهای 35 cm^2 ساختگی: ۳۰ ثانیه تحریک	نتایج نشان داد که تحریک آنودال تغییری در تکلیف زمان منتهی به خستگی ایجاد نمی‌کند. اما با توجه به نتایج برخی شرکت کنندگان، افراد به دو گروه تمام وقت و نیمه وقت تقسیم شدند. تمام وقت آنها بودند که در سراسر زمان اجرای تکلیف، تحریک را دریافت کرده بودند. اما در گروه نیمه وقت حداقل در یک جلسه، تحریک زودتر به پایان رسیده بود. نتایج گروه تمام وقت معنادار بود؛ یعنی این گروه هنگام دریافت تحریک آنودال، حدود ۳۱ درصد افزایش در تکلیف زمان منتهی به خستگی تجربه می‌کنند.
اوکانو و همکاران (۱۸)	ورزشکاران دوچرخه سواری جاده‌ای در سطح ملی	ضربان قلب، HRV، PRE، PPO و TE	آزمایشی با یک گروه مداخله که دو نوع شرایط مختلف شامل آنودال و ساختگی را تجربه می‌کنند.	آزمایش در دو جلسه با فاصله حداقلی ۴۸ ساعته انجام شد. آزمودنی‌ها در هر جلسه ابتدا یکی از شرایط آزمایشی آنودال یا ساختگی را دریافت کردند. سپس تکلیف تمرین تدریجی بیشینه به اجرا درآمد.	الکترود آنود: در قشر گیجگاهی و در بخش T3 قرار گرفت. الکترود کاتود: در منطقه contralateral supraorbital قرار گرفت.	تحریکی: ۲۰ دقیقه جریان 2 mA با استفاده از الکترودهای 35 cm^2 ساختگی: ۳۰ ثانیه تحریک	نتایج حاکی از تاثیر موفق tDCS در ارتقای عملکرد ورزشی است. در هنگام دریافت تحریک آنودال، HRV، PPO و TE به طور معنادار بالاتر از حالت ساختگی است. همچنین در این حالت میزان ضربان قلب و PRE نیز کاهش می‌یابد.

ویتورکاستا و همکاران (۲۷)	ورزشکاران (افرادی که در مدت حداقل ۶ ماه گذشته، سه بار در هفته ورزش کرده اند)	عملکرد دوچرخه سواری، ضربان قلب، RPE ،EMG و ارزیابی خلق	آزمایشی با یک گروه مداخله که سه نوع شرایط مختلف شامل آنودال، کاتودال و ساختگی را تجربه کردند.	تحریک‌های مختلف در جلسات گوناگون برای آزمودنی‌ها اجرا شد. ابتدا تحریک tDCS اجرا شد و سپس آزمودنی‌ها به انجام آزمون‌های مختلف پرداختند.	الکترود آنود: در بخش Cz قرار گرفت. الکترود مرجع: در منطقه occipital protuberance تعبیه شد.	تحریکی: ۱۳ دقیقه جریان 2 mA با استفاده از یک الکترود 36 cm^2 به عنوان الکترود محرک و یک الکترود 35 cm^2 به عنوان الکترود مرجع ساختگی: ۳۰ ثانیه تحریک	نتایج نشان داد که شرکت کنندگان در هنگام دریافت تحریک آنودال عملکرد بهتری نسبت به شرایط کاتودال و ساختگی دارند؛ اما داده‌های مربوط به دو حالت کاتودال و ساختگی تفاوت معناداری با یکدیگر نشان ندادند. از سوی دیگر در ارتباط با دو مقیاس ضربان قلب و RPE، تفاوت معنادار میان تحریک‌های مختلف مشاهده نشد.
وید و هاموند (۲۸)	افراد سالم و غیر ورزشکار	یادگیری مشاهده‌ای	آزمایشی با یک گروه مداخله و یک گروه ساختگی.	هر گروه بر اساس نوع توالی مورد مشاهده به دو بخش تقسیم شد و در کل چهار گروه شکل گرفت: آنودال/منظم، آنودال/بی‌قاعده، ساختگی/منظم و ساختگی/بی‌قاعده. تحریک tDCS در حین مشاهده کلیپ‌ها برای افراد اجرا شد.	الکترود آنود در بخش PM قرار گرفت: ۲ سانتیمتر جلو و دو سانتیمتر به سمت وسط از نقطه C3. الکترود مرجع: در بخش right supraorbital قرار گرفت.	تحریکی: ۱۴ دقیقه جریان 1 mA با استفاده از الکترود 24 cm^2 ساختگی: ۳۰ ثانیه تحریک	نتایج نشان داد که با پیشرفت تمرینات، دقت شرکت کنندگان کاهش می‌یابد. با اینحال این کاهش دقت در گروه آنودال کمتر از گروه ساختگی بود. زمان واکنش هم با پیشرفت تمرینات کاهش یافت و تحلیل‌ها نشان از برتری گروه آنودال/منظم داشت. این برتری در طول زمان خود را نشان می‌دهد.
ژو و همکاران (۲۹)	افراد سالم و غیر ورزشکار	یادگیری حرکتی ضمنی	آزمایشی از نوع پیش آزمون- پس‌آزمون با گروه ساختگی	آزمایش در دو روز جداگانه آموزش و آزمون برگزار شد. تحریک tDCS به صورت پرتابل در سرتاسر مرحله آموزشی اجرا شد.	الکترود کاتود: DLPFC چپ (F3) الکترود آنود: بخش supraorbital راست (Fp2)	تحریکی: ۱۵ تا ۲۰ دقیقه جریان 1.5 mA با استفاده از الکترود 25 cm^2 ساختگی: ۱۵ ثانیه تحریک	نتایج نشان داد که در هر دو مرحله آموزش و آزمون، عملکرد گروه تحریکی بهتر از گروه ساختگی بود.
بوردوچی و همکاران (۱۹)	ورزشکاران رشته جودو، شنا و ژیمناستیک	توجه، حافظه و خلق	مطالعه موردی	تحریک‌ها برای ۱۰ روز پیاپی و بدون تکلیف همزمان اجرا شدند. جهت ارزیابی عملکرد شناختی ورزشکاران، آزمون‌های شناختی یک بار قبل از اجرای مداخلات و یک بار پس از اجرا گرفته شد.	الکترود آنود: در بخش DLPFC چپ (F3) الکترود کاتود: در بخش DLPFC راست (F4)	۲۰ دقیقه جریان 2 mA با استفاده از الکترودهای 25 cm^2	نتایج نشان داد که تحریک tDCS اثر مثبت و معناداری بر ابعاد خلق و عملکرد شناختی ورزشکاران دارد. اکثر موارد مورد ارزیابی بهبود پیدا کردند و هیچگونه کاهشی در هیچ یک از ابعاد دیده نشد.

ناروس و همکاران (۳۰)	**افراد سالم و غیر ورزشکار**	**مهارت‌های حرکتی**	**آزمایشی با استفاده از طرح گروه همتا- ۴ گروه مداخله و یک گروه ساختگی**	دو شکل کلی تحریک فعال، شامل تحریک یک‌جانبه و دوجانبه اجرا شد. هر شکل هم دو نوع مختلف داشت که روی هم رفته ۴ گروه تحریک فعال را تشکیل دادند. تحریک‌ها درست قبل از اجرای تکالیف ارائه شدند.	دو الکترود بازگشتی بالای پیشانی راست و چپ و دو الکترود فعال هم در نواحی C3 و C4 قرار گرفت. جزئیات مربوط به نحوه ارائه تحریک‌ها در هر گروه را در متن مشاهده کنید.	تحریکی: ۲۰ دقیقه جریان 1 mA با استفاده از الکترودهای $16\ cm^2$ ساختگی: ۳۰ ثانیه با استفاده از الکترودهای $35\ cm^2$	نتایج نشان داد که عملکرد حرکتی در طول دوره تمرین بهبود پیدا کرده است؛ اما فقط دو گروه تحریکی دو جانبه بودند که در پایان عملکرد بهتری نسبت به وضعیت ساختگی نشان دادند.

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعهٔ حاضر مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده دربارهٔ اثربخشی tDCS، به‌عنوان ابزاری بالقوه، در ارتقای عملکرد ورزشی ورزشکاران بود. براساس ادبیات پژوهش، tDCS دارای کمترین حد از عوارض جانبی است. سهولت به‌کارگیری و قابل حمل بودن tDCS بر جذابیت آن به‌عنوان ابزاری مکمل در رشته‌ها و تیم‌های ورزشی افزوده است که به‌دنبال بهینه‌سازی تمرینات و نتایج عملکرد خود در رقابت‌های حرفه‌ای هستند (۲۷).

مرور مطالعات نشان داد که tDCS ابزاری قابل استفاده در ارتقای جنبه‌های خاصی از عملکرد ورزشی است. هر چند نتایج پژوهش‌ها در مواقعی ناهمگن هستند (نک. ۳۳-۳۱) اما در یک دههٔ اخیر، حجم زیادی از مطالعات منتشر شده در ادبیات پژوهشی بر اثرگذاری tDCS روی انواعی از سطوح عملکرد ورزشی از جمله یادگیری و کسب مهارت‌های حرکتی، عملکرد شناختی و تحمل عصبی‌عضلانی تمرکز داشته‌اند (نک. جدول ۱). برای نمونه، tDCS می‌تواند باعث بهبود عملکرد در ارتقای مهارت‌های حرکتی ورزشی‌ای شود که نیازمند کنترل مهارت‌های ظریف حرکتی، دقت و وضوح عمل هستند (۲۳). ریس و همکاران (۲۳) در همین باره با پدیدهٔ «تحکیم حاصل از tDCS» روبه‌رو شدند که به‌معنای تحکیم و عدم زوال ابتداییِ فرآیند یادگیری حرکتی پس از تحریک آندی است: تحریک آندی با حفظ مهارت حرکتی آموخته‌شده و جلوگیری از قدرت آن در رفتار ورزشکار و با وجود گذشت زمان، همراه است.

مطالعات در سطح شناختی نشان داده‌اند که tDCS این ظرفیت را دارد تا روی عملکردهای شناختی مرتبط با عملکرد ورزشی از جمله توجه، زمان واکنش، تصمیم‌گیری، خودتنظیمی و حافظهٔ کاری اثرگذاری مثبتی داشته باشد (۲۲). هیل و همکاران[1] (۳۴) در فراتحلیلی بهبودی معناداری را در زمان واکنش و کارکردهای اجرایی ورزشکاران بعد از به‌کارگیری tDCS گزارش کردند. وودز و همکاران[2] (۳۵) نیز در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که tDCS اِعمال شده بر قشر پیش‌پیشانی باعث ارتقای توانایی تصمیم‌گیری و رفتار خطر کردن در ورزشکاران می‌شود. یافته‌های ذکر شده نشان‌دهندهٔ تأکید بر اثربخشی چند جانبهٔ tDCS بر فرآیندهای یادگیری حرکتی و شناختی ضروری در موفقیت ورزشی هستند.

یکی دیگر از موضوعات قابل توجه در زمینهٔ اثرگذاری مثبت tDCS بر ارتقای عملکرد ورزشکاران، خستگی است. خستگی پدیده‌ای است که افراد درنتیجهٔ کار بیش‌ازحد و طولانی تجربه می‌کنند. خستگی در بعد فیزیولوژیکی (یا همان خستگی عصبی‌عضلانی) خود را با کاهش نیروی وارد شده نشان می‌دهد؛ یعنی ماهیچه‌ها و بدن فرد قادر به ارائهٔ نیروی قبلی و ادامه اجرای تکلیف نیستند. خستگی ادراکی

1. Hill, A. T., et al.
2. Woods, A. J., et al.

به افزایش نیروی وارد شده به حیطهٔ ادراک اشاره دارد؛ یعنی در خستگی ادراکی فرد به‌گونه‌ای است که انگار برای انجام تکالیف قبلی، به نیروی بیشتری نیاز دارد (۲۶). نتایج پژوهش‌ها (۱۸، ۲۶، ۲۷) نشان داده است که زمان منتهی به خستگی با استفاده از tDCS افزایش می‌یابد و ورزشکار مقاومت بیشتری را از خود در برابر خستگی نشان می‌دهد.

دربارهٔ نحوهٔ اثربخشی tDCS بر عملکرد ورزشی، جابرزاده و زوقی[1](۳۶) اشاره می‌کنند که به‌صورت کلی tDCS از دو مسیر باعث تسهیل عملکرد نواحی عصبی در عملکرد ورزشی می‌شوند: ۱. تحریک‌پذیری[2] سلول عصبی ۲. انعطاف‌پذیری عصبی[3] (شامل LTP (پتانسیل‌های طولانی‌مدت[4] و LTD (پتانسیل طولانی‌مدت سرکوبی[5]). این دو سازوکار با تأثیرگذاری بر عملکرد تکلی سلول عصبی و همچنین ارتباطات سیناپسی باعث تغییرات عملکردی در آن‌ها می‌شوند. آن‌ها همچنین سه ناحیهٔ عصبی M1، DLPFC و TC (قشر گیجگاهی[6]) را از جمله نواحی معرفی می‌کنند که در مطالعات مختلف روی آن‌ها تحریک انجام شده است و توانسته‌اند باعث تغییر سازوکار عصبی این نواحی در بهبود عملکرد ورزشی شوند.

نه‌تنها دو سازوکار کلیِ عصبی ذکر شده که خود این سازوکارها از راه‌های مختلف دیگری می‌توانند عملکرد ورزشی را تحت تأثیر قرار دهند. تسهیل عملکرد ناحیه M1 و بهبود تحریک‌پذیری قشری‌نخاعی (۲۲، ۲۶، ۳۷)، کاهش خستگی از مسیر تأثیرگذاری بر کنترل‌گر مرکزی (۲۲، ۲۶، ۲۷)، کاهش خستگی روان‌شناختی و ذهنی (۴۱-۳۸)، تعدیل فعالیت سیستم اعصاب خودکار (۱۸)، کاهش RPE (درجه‌بندی تلاش درک‌شده[7] ۴۲) و کاهش درد ادراک‌شده (۴۳-۴۵) از جمله مسیرهایی هستند که tDCS می‌تواند از طریق آنها باعث تغییر مثبت در عملکرد ورزشی شود.

مرور مطالعات نشان داد که علاوه‌بر نتایج مثبت حاصل از tDCS در ارتقای عملکرد ورزشکاران لازم است تا به محدودیت‌های این مطالعات نیز توجه داشت. بسیاری از پژوهش‌های این حوزه دارای محدودیت‌های روش‌شناختی از جمله حجم نمونه پایین، نمونه‌های غیرهمگن، برنامه‌های مداخله‌ای غیرهمگن و ابزارهای متفاوتی در سنجش عملکرد ورزشی هستند (۴۶). لازم است تا به این موضوع هم اشاره کرد که سازوکارهای فیزیولوژیکی و روانشناختیِ اثرگذاری tDCS در ارتقای عملکرد ورزشی، از یک سو تاحدودی نامشخص است و نیاز به مطالعات بیشتری در گروه‌های مختلف ورزشی دارد و از سوی دیگر باید به متغیرهای فردی ورزشکاران در پاسخ به مداخله‌های tDCS هم توجه داشت؛ این مهم، اجرای تحقیقات متمرکزتری را می‌طلبد (۴۷).

براساس مطالب ذکر شده، لازم است تا مطالعات آتی روی کاهش محدودیت‌های روش‌شناختی بیشتر متمرکز شوند و شواهد مستحکم‌تری را در باب کارآمدی و امنیت tDCS در ارتقای ورزشکاران امکان‌پذیر کنند. آزمایه‌های تصادفی با طرح پژوهشی مناسب با حجم نمونه‌های بالاتر، برنامه‌های تحریکی استاندارد و ارزشیابی‌های جامع عملکردی در گروه‌های مختلف ورزشی مولفه‌های مهمی در بهینه‌سازی به‌کارگیری tDCS در ورزشکاران هستند (۲۷).

درنهایت و در همان حال که شواهد نشان می‌دهند که tDCS می‌تواند ابزارِ امن و نتیجه‌بخشی در ارتقای عملکردهای خاصی در ورزشکاران باشد، ادبیات پژوهشی

1. Jaberzadeh, S., & Zoghi, M.
2. Exitability
3. Neuro plasticity
4. Long-term potential (LTP)
5. Long-term depression (LTD)
6. Temporal Lobe
7. Rating of perceived exertion

نیازمند پژوهش‌های بیشتری است تا بتوان به‌درستی سازوکار عمل و کاربردهای دقیق‌تر آن را درک کرد (۳۳-۳۱). می‌توان ادعا کرد که کاربرد tDCS در ارتقای عملکرد ورزشکاران حوزه‌ای است که جای نوآوری فراوانی در آن هست و استفادهٔ درست از آن در ورزشکاران می‌تواند با بهبود نتایج ورزشی در سطح ملی و بین‌المللی همراه باشد؛ این به‌ویژه با تمرکز مطالعات بر رشته‌های ورزشی خاصی ممکن است که در هر کدام نیازمند نوع خاصی از یادگیری حرکتی و عملکردهای شناختی هستیم. این کار می‌تواند باعث شود تا مناطق مغزی خاصی تحریک شوند که با عملکرد ورزشی ویژه‌ای همبسته است و درنتیجه شاهد برنامه‌های مکان‌ویژه و تخصص‌ویژه‌ای در هر رشتهٔ ورزشی باشیم.

References

1.Strack BW. Effect of heart rate variability (HRV) biofeedback on batting performance in baseball. Alliant International University, San Diego; 2003.

2.Park JL, Fairweather MM, Donaldson DI. Making the case for mobile cognition: EEG and sports performance. Neuroscience & Biobehavioral Reviews. 2015, 1(52):117-30.

3.Davis NJ. Neurodoping: brain stimulation as a performance-enhancing measure. Sports Medicine. 2013, 5(43):649-53.

4.Ericsson KA. The acquisition of expert performance: An introduction to some of the issues. InThe road to excellence 2014, (pp. 1-50). Psychology Press.

5.Yarrow K, Brown P, Krakauer JW. Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. Nature Reviews Neuroscience. 2009, 10(8):585-96.

6.Babiloni C, Marzano N, Iacoboni M, Infarinato F, Aschieri P, Buffo P, Cibelli G, Soricelli A, Eusebi F, Del Percio C. Resting state cortical rhythms in athletes: a high-resolution EEG study. Brain Research Bulletin. 2010, 15(81):149-56.

7.Del Percio C, Babiloni C, Marzano N, Iacoboni M, Infarinato F, Vecchio F, Lizio R, Aschieri P, Fiore A, Toràn G, Gallamini M. "Neural efficiency" of athletes' brain for upright standing: a high-resolution EEG study. Brain research bulletin. 2009, 29(79():193-200.

8.Dekker MK, Van den Berg BR, Denissen AJ, Sitskoorn MM, Van Boxtel GJ. Feasibility of eyes open alpha power training for mental enhancement in elite gymnasts. Journal of Sports Sciences. 2014m 32(16):1550-60.

9.Arns M, Kleinnijenhuis M, Fallahpour K, Breteler R. Golf performance enhancement and real-life neurofeedback training using personalized event-locked EEG profiles. Journal of Neurotherapy. 2008, 11(4):11-8.

10.Dorsey JA. The effects of biofeedback-assisted desensitization training on state anxiety and performance of college age male gymnast (Doctoral dissertation, ProQuest Information & Learning), 1977.

11.Blumenstein B, Orbach I. Case 6–The road to Olympic medal. Case Studies in Applied Psychophysiology. 2012a:120.

12.Blumenstein B, Orbach I. Case 7–Biofeedback Training at Sea. Case studies in applied psychophysiology: Neurofeedback and biofeedback treatments for advances in human performance. 2012b:134-43.
13.Derfel A. Italy's weapon is all in their heads: A Montreal firm developed the Mind Room, which helps Azzurri players put soccer into focus, 2006. The Gazette.
14.Beauchamp MK, Harvey RH, Beauchamp PH. An integrated biofeedback and psychological skills training program for Canada's Olympic short-track speedskating team. Journal of clinical sport psychology. 2012, 6(1):67-84.
15.Blumenstein B, Lidor R. The road to the Olympic Games: A four-year psychological preparation program. Athletic insight. 2007, 9(4):15-28.
16.Harkness T. Psykinetics and biofeedback: Abhinav Bindra wins India's first-ever individual gold medal in Beijing Olympics. Biofeedback. 2009, 37(2):48-52.
17.Nitsche MA, Schauenburg A, Lang N, Liebetanz D, Exner C, Paulus W, Tergau F. Facilitation of implicit motor learning by weak transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex in the human. Journal of cognitive neuroscience. 2003, 15(4):619-26.
18.Okano AH, Fontes EB, Montenegro RA, Farinatti PD, Cyrino ES, Li LM, Bikson M, Noakes TD. Brain stimulation modulates the autonomic nervous system, rating of perceived exertion and performance during maximal exercise. British journal of sports medicine. 2015, 49(18):1213-8.
19.Borducchi DM, Gomes JS, Akiba H, Cordeiro Q, Borducchi JH, Borducchi GM, Dias AM. Transcranial direct current stimulation effects on athletes' cognitive performance: an exploratory proof of concept trial. Frontiers in psychiatry. 2016, 30(7):227-233.
20.Demirtas-Tatlidede A, Vahabzadeh-Hagh AM, Pascual-Leone A. Can noninvasive brain stimulation enhance cognition in neuropsychiatric disorders? Neuropharmacology. 2013, 64(5):566-78.
21.Boggio PS, Castro LO, Savagim EA, Braite R, Cruz VC, Rocha RR, Rigonatti SP, Silva MT, Fregni F. Enhancement of non-dominant hand motor function by anodal transcranial direct current stimulation. Neuroscience letters. 2006, 4(1-2):232-6.
22.Cogiamanian F, Marceglia SA, Ardolino G, Barbieri S, Priori AJ. Improved isometric force endurance after transcranial direct current stimulation over the human motor cortical areas. European Journal of Neuroscience. 2007, 26(1):242-9.
23.Reis J, Schambra HM, Cohen LG, Buch ER, Fritsch B, Zarahn E, Celnik PA, Krakauer JW. Noninvasive cortical stimulation enhances motor skill acquisition over multiple days through an effect on consolidation. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009, 106(5):1590-5.
24.Stagg CJ, Jayaram G, Pastor D, Kincses ZT, Matthews PM, Johansen-Berg H. Polarity and timing-dependent effects of transcranial direct current stimulation in explicit motor learning. Neuropsychologia. 2011, 49(5):800-4.

25.Reis J, Fischer JT, Prichard G, Weiller C, Cohen LG, Fritsch B. Time-but not sleep-dependent consolidation of tDCS-enhanced visuomotor skills. Cerebral cortex. 2015, 25(1):109-17.
26.Williams PS, Hoffman RL, Clark BC. Preliminary evidence that anodal transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a sustained submaximal contraction. PloS one. 2013, 8(12):814-818.
27.Vitor-Costa M, Okuno NM, Bortolotti H, Bertollo M, Boggio PS, Fregni F, Altimari LR. Improving cycling performance: transcranial direct current stimulation increases time to exhaustion in cycling. PloS one. 2015, 10(12): e0144916.
28.Wade S, Hammond G. Anodal transcranial direct current stimulation over premotor cortex facilitates observational learning of a motor sequence. European Journal of Neuroscience. 2015, 41(12):1597-602.
29.Zhu FF, Yeung AY, Poolton JM, Lee TM, Leung GK, Masters RS. Cathodal transcranial direct current stimulation over left dorsolateral prefrontal cortex area promotes implicit motor learning in a golf putting task. Brain stimulation. 2015, 8(4):784-6.
30.Naros G, Geyer M, Koch S, Mayr L, Ellinger T, Grimm F, Gharabaghi A. Enhanced motor learning with bilateral transcranial direct current stimulation: impact of polarity or current flow direction? Clinical Neurophysiology. 2016, 127(4):2119-26.
31.Holgado D, Vadillo MA, Sanabria D. The effects of transcranial direct current stimulation on objective and subjective indexes of exercise performance: A systematic review and meta-analysis. Brain stimulation. 2019, 12(2):242-50.
32.Machado DG, Unal G, Andrade SM, Moreira A, Altimari LR, Brunoni AR, Perrey S, Mauger AR, Bikson M, Okano AH. Effect of transcranial direct current stimulation on exercise performance: a systematic review and meta-analysis. Brain stimulation. 2019, 12(3):593-605.
33.Friehs MA, Whelan E, Güldenpenning I, Krause D, Weigelt M. Stimulating performance: A scoping review on transcranial electrical stimulation effects on olympic sports. Psychology of Sport and Exercise. 2022, 1(59):102-130.
34.Hill AT, Fitzgerald PB, Hoy KE. Effects of anodal transcranial direct current stimulation on working memory: a systematic review and meta-analysis of findings from healthy and neuropsychiatric populations. Brain stimulation. 2016, 9(2):197-208.
35.Woods AJ, Antal A, Bikson M, Boggio PS, Brunoni AR, Celnik P, Cohen LG, Fregni F, Herrmann CS, Kappenman ES, Knotkova H. A technical guide to tDCS, and related non-invasive brain stimulation tools. Clinical neurophysiology. 2016, 127(2):1031-48.
36.Jaberzadeh S, Zoghi M. Transcranial direct current stimulation enhances exercise performance: a mini review of the underlying mechanisms. Frontiers in Neuroergonomics. 2022, ;3(84):11-19.
37.Abdelmoula A, Baudry S, Duchateau J. Anodal transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a submaximal contraction of elbow flexors without changing corticospinal excitability. Neuroscience. 2016, 3(22):94-103.

38.Martin K, Meeusen R, Thompson KG, Keegan R, Rattray B. Mental fatigue impairs endurance performance: a physiological explanation. Sports medicine. 2018, 48(9):2041-51.

39.Nikooharf Salehi E, Jaydari Fard S, Jaberzadeh S, Zoghi M. Transcranial direct current stimulation reduces the negative impact of mental fatigue on swimming performance. Journal of Motor Behavior. 2022, 54(3):327-36.

40.Boksem MA, Meijman TF, Lorist MM. Mental fatigue, motivation and action monitoring. Biological psychology. 2006, 72(2):123-32.

41.Van Cutsem J, De Pauw K, Marcora S, Meeusen R, Roelands B. A caffeine-maltodextrin mouth rinse counters mental fatigue. Psychopharmacology. 2018, 2(35):947-58.

42.Zénon A, Sidibé M, Olivier E. Disrupting the supplementary motor area makes physical effort appear less effortful. Journal of Neuroscience. 2015, 35(23):8737-44.

43.Mauger AR, Jones AM, Williams CA. Influence of acetaminophen on performance during time trial cycling. Journal of Applied Physiology. 2010, 108(1):98-104.

44.Flood A, Waddington G, Cathcart S. High-definition transcranial direct current stimulation enhances conditioned pain modulation in healthy volunteers: a randomized trial. The Journal of Pain. 2016, 17(5):600-5.

45.Flood A, Waddington G, Keegan RJ, Thompson KG, Cathcart S. The effects of elevated pain inhibition on endurance exercise performance. PeerJ. 2017, 5(6): e3028.

46.Angius L, Hopker JG, Marcora SM, Mauger AR. The effect of transcranial direct current stimulation of the motor cortex on exercise-induced pain. European journal of applied physiology. 2015, 1(15):2311-9.

47.Guleyupoglu B, Schestatsky P, Edwards D, Fregni F, Bikson M. Classification of methods in transcranial electrical stimulation (tES) and evolving strategy from historical approaches to contemporary innovations. Journal of neuroscience methods. 2013.

Application and Effectiveness of TDCS (transcranial direct current stimulation) in sport performance enhancement of athletes: A Review Study

Jamil Mansouri[*1] - Sadegh Ranjbar[2] - Ahmad Shahvaroughi[3]- Reza Rostami[4]

1. Ph. D student in Cognitive Psychology, Department of Psychology, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Kharazmi University, Karaj, Alborz, Iran 2. Ph. D candidate in Sport Psychology, Departmenr of Cognitive and behavioral science, Faculty of Sport and Health Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran3. Ph. D student in Law and Psychology, Department of Psychology, Faculty of Psychology, KU Leuven, Leuven, Belgium 4. Professor, Department of Psychology, Faculty of Psychology and Educational Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received:2024/02/22;Accepted:2024/05/20)

Abstract

Enhancing sports performance is a critical concern, and researchers continually explore various methods to achieve this goal. One such method that has garnered significant attention in recent years is transcranial direct current stimulation (tDCS). tDCS changes the activity of brain areas involved in sports performance by stimulating and inhibiting nerve cells and neural plasticity. Numerous studies have investigated its effects, yielding diverse outcomes. The present study was conducted with the aim of reviewing the studies conducted in this field. The research method was descriptive and review. In order to collect data, the keywords tDCS-sport, sport performance, sport-neuron plasticity, tDCS-neurodoping were searched by Google scholars, apa.org (Psychinfo) and Elsevier research websites. Then the abstract, results and findings of each article were examined. 16 articles were selected, and their results were analyzed. The results of the research showed that the use and effectiveness of tDCS in improving sports performance has a positive role and is associated with improving the performance of not only ordinary people but also athletes. However, the results of review studies and meta-analyses show that heterogeneity in the type of sports activity, sample size, research design, stimulation areas, tDCS protocols and methodological limitations reduce the effect size of improving athletes' performance with tDCS. Therefore, it is necessary to conduct studies focusing on specific neural sites and specific sports functions of each discipline. In general, from these findings, it can be concluded that tDCS is a safe method without side effects and has a positive effect on improving the sports performance of athletes, which requires more research.

Keyword

Electrical brain stimulation, motor learning, motor facilitation**,** Performane enhancement, sport performance.

[*] Corresponding Author: E-Mail: mansourijamil1992@gmail.com