Shenakht Journal of Psychology and Psychiatry
Vol. 12 / No .6 /2026
DOI: 10.22034/12.6.113
Page: 113-129

The effectiveness of transcranial alternating current electrical stimulation (tACS) on working memory: a review and meta-analysis

Amir Hossein Feizi[1], Ali Motie Nasrabadi[2], Soomaayeh Heysieattalab[3*]
1. PhD Student, Department of Cognitive Neuroscience, Faculty of Education and Psychology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. Full Professor, Department of Biomedical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran.
3.*Corresponding Author.Associate Professor, Department of Cognitive Neuroscience, Faculty of Education and Psychology, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: heysieattalab@gmail.com

Received: 28/09/2025 **Accepted:** 17/28/2026

Abstract

Introduction: Working memory (WM) is a core cognitive function underlying higher-order cognitive processes. Transcranial alternating current stimulation (tACS) is a non-invasive neuromodulation technique that modulates neural oscillations and has gained increasing attention for its potential to enhance WM. Nevertheless, empirical findings regarding its effectiveness remain inconsistent.

Objective: This meta-analysis aimed to synthesize existing evidence on the effects of tACS on WM performance and to examine the moderating role of stimulation parameters and methodological characteristics.

Method: A quantitative meta-analysis was conducted following the PRISMA guidelines. Systematic searches of electronic databases (SAGE Journals, ScienceDirect, SID, Magiran, Noormags, and IranDoc) identified 16 eligible studies, yielding 53 independent effect sizes. Effect sizes were calculated using Cohen's d, and a random-effects model was applied to account for between-study heterogeneity.

Results: The results indicated a statistically significant and moderate overall effect of tACS on WM performance (Cohen's $d = 0.68$, $p < .05$). Moderator analyses showed that larger effect sizes were associated with between-group study designs, stimulation durations of 15 and 30 minutes, alpha-frequency stimulation, targeting the dorsolateral prefrontal cortex, and the use of conventional electrodes. In addition, task type moderated outcomes, with stronger effects observed for the Corsi block-tapping task and change detection paradigms. Demographic variables, including age and gender, also demonstrated significant moderating effects.

Conclusion: These findings suggest that tACS can enhance WM performance, with its efficacy depending on specific stimulation parameters and study design. Future research should focus on optimizing stimulation protocols and assessing the durability of tACS effects across diverse populations.

Keywords: tACS, transcranial alternating current stimulation, working memory.

Feizi A H, Motie Nasrabadi A, Heysieattalab S. The effectiveness of transcranial alternating current electrical stimulation (tACS) on working memory: a review and meta-analysis. Shenakht Journal of Psychology and Psychiatry 2026; 12 (6): 113-129. DOI: 10.22034/12.6.113
Copyright © 2018 the Author (s). Published by Kurdistan University of Medical Sciences. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial License 4.0 (CCBY-NC), where it is permissible to download, share, remix, transform, and buildup the work provided it is properly cited. The work cannot be used commercially without permission from the journal.

مجله روانشناسی و روانپزشکی شناخت
سال دوازدهم شماره : ۶ ، ۱۴۰۴
DOI: 10.22034/12.6.113
صفحات: ۱۲۹-۱۱۳

اثربخشی تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب (tACS) بر حافظه کاری: یک مطالعه مروری و فرا تحلیل

امیرحسین فیضی[۱]، علی مطیع نصرآبادی[۲]، سمیه حیثیت‌طلب[۳]

۱. دانشجوی دکترای گروه علوم اعصاب شناختی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲. استاد تمام گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
۳. دانشیار گروه علوم اعصاب شناختی دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (مؤلف مسئول). ایمیل: heysieattalab@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶ **تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

چکیده

مقدمه: حافظه کاری (WM) یک عملکرد شناختی پایه و زیربنای فرآیندهای شناختی سطح بالاست. تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب (tACS) یک فن نورومدولاسیون غیرتهاجمی و تعدیل‌کننده نوسانات عصبی است که پتانسیل آن در بهبود WM توجه فزاینده‌ای را جلب کرده است. بااین‌وجود، یافته‌های تجربی اثربخشی آن همچنان متناقض هستند.

هدف: این متاآنالیز با هدف ترکیب یافته‌های موجود اثرات tACS بر عملکرد WM و بررسی نقش تعدیل‌کننده پارامترهای تحریک و ویژگی‌های روش‌شناختی انجام شد.

روش: متاآنالیزی کمی مطابق دستورالعمل‌های PRISMA با جستجوهای نظام‌مند در پایگاه‌های داده سیج ژورنالز، ساینس دایرکت، جهاد دانشگاهی، سایت خصوصی بانک مجلات ایران، پایگاه مجلات تخصصی نور و ایرانداک، منجر به شناسایی ۱۶ مطالعه و ۵۳ اندازه اثر گردید. اندازه‌های اثر با استفاده از d کوهن محاسبه و مدل اثرات تصادفی برای در نظر گرفتن ناهمگونی بین مطالعات اعمال شد.

نتایج: تأثیر tACS بر عملکرد WM متوسط و از نظر آماری معنادار بود (Cohen's d = 0.68، $p < .05$). تجزیه‌وتحلیل متغیرهای تعدیل‌گر نشان داد که اندازه‌های اثر بزرگتر با طرح‌های مطالعه بین‌گروهی، مدت‌زمان تحریک ۱۵ و ۳۰ دقیقه، تحریک با فرکانس آلفا، ناحیه تحریک قشر پیش‌پیشانی خلفی-جانبی، استفاده از الکترودهای استاندارد و تکالیف بلوک‌های کورسی و الگوهای تشخیص تغییر مرتبط بودند. متغیرهای جمعیت‌شناختی سن و جنسیت نیز اثرات تعدیل‌کننده معناداری نشان دادند.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها حاکی از افزایش عملکرد WM توسط tACS هستند که اثربخشی آن به پارامترهای تحریک و طراحی مطالعه بستگی دارد. پژوهش‌های آینده باید بر بهینه‌سازی پروتکل‌های تحریک و ارزیابی دوام اثرات tACS در جمعیت‌های مختلف تمرکز کنند.

کلیدواژه‌ها: تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب، حافظه فعال، حافظه کاری.

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی کردستان محفوظ است.

مقدمه

توانایی نگهداری و پردازش اطلاعات بدون حضور محرک که امکان انجام عملیات ذهنی را فراهم می‌کند حافظه کاری شناخته می‌شود (شمسی‌نژاد و موسوی‌نسب، ۱۴۰۴). حافظه کاری در بسیاری از پردازش‌های شناختی سطح بالا مانند برنامه‌ریزی، درک مطلب، تصمیم‌گیری، حل مسئله (کوان[1]، ۲۰۱۴) نقشی اساسی دارد.

حافظه کاری در مشکلات شناختی پردازش‌های شناختی سطح بالا و اختلالات عصب‌شناختی و روانی مانند نقص توجه/بیش‌فعالی (استادپور، عمادیان و فخری، ۱۴۰۳)، اختلال نافرمانی مقابله‌ای (حیدری فتسمی، زارعی و موسی‌زاده، ۱۴۰۲)، اسکیزوفرنی، افسردگی عمده، دوقطبی، آلزایمر، نقص خفیف شناختی، آسیب تروماتیک مغز (ضربه‌مغزی) و اختلالات خلقی به‌طور مشهودی افت می‌کند (القاسم، ابوبکر و کواشناک[2]، ۲۰۲۲). یکی از روش‌های نوین تحریک مغزی به‌منظور بهبود عملکرد حافظه کاری، تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب[3] (tACS) است که می‌تواند با هماهنگ‌سازی نوسانات عصبی در نواحی مغزی مرتبط با حافظه کاری، عملکرد آن را بهبود ببخشد. tACS یک روش غیرتهاجمی تحریک مغزی است که جریان متناوب ضعیفی (۱ تا ۴ میلی‌آمپر) که به‌صورت نوسانی و در یک فرکانس ثابت تغییر می‌کند را از طریق الکترودهای سطحی به جمجمه القا می‌کند (سنکووسکی، سوبیری، هسلچر و سوکادار[4]، ۲۰۲۲).

مطالعات بسیاری از tACS برای بهبود عملکرد حافظه کاری در جمعیت‌های دارای اختلالات مختلف بهره برده‌اند: القای tACS تتا بر قشر پیشانی-آهیانه‌ای افراد مبتلا به اسکیزوفرنی (چانگ[5] و همکاران، ۲۰۲۱)، القای tACS گاما بر قشر پیش‌پیشانی پشتی – جانبی یا شکنج زاویه‌ای چپ در افراد مبتلا به اختلال خفیف شناختی و دمانس (برچت[6] و همکاران، ۲۰۲۱)، القای tACS گاما بر قشر پیش‌پیشانی در افراد مبتلا به افسردگی مزمن (هالر، سنر، برونونی، پدبرگ و پالم[7]، ۲۰۲۰) و القای tACS تتا و نه گاما در ناحیه پیش‌پیشانی افراد دارای حافظه کاری کلامی ضعیف (زنگ، گو، وو، لو و وی ، ۲۰۲۲) منجر به بهبود عملکرد حافظه کاری شد.

همچنین، در جمعیت افراد سالم، القای tACS گاما منجر به بهبود عملکرد حافظه کاری شد (هوی و همکاران، ۲۰۱۵) و در مطالعه‌ای دیگر با القای tACS تتا بر قشر پیشانی-گیجگاهی بهبود عملکرد معنادار فقط در افراد سالمند و نه افراد جوان مشاهده شد (رینهارت و نگوین ، ۲۰۱۹).

با توجه به نتایج ضد و نقیض اثربخشی تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب بر بهبود حافظه کاری با اجرای این مطالعه مروری و فراتحلیل علاوه بر بررسی اثربخشی به‌صورت کلی، به ارزیابی پارامترهای تعدیل‌گر احتمالی نیز پرداخته شد. این پارامترها از اطلاعات مشترک مطالعات ورودی استخراج شدند و شامل نوع طراحی مطالعه، تعداد جلسات، مدت‌زمان، فرکانس، فرکانس شخصی‌سازی‌شده در مقابل استاندارد، ناحیه هدف، نوع الکترود، اجرای آنلاین در مقابل آفلاین، تکلیف‌های حافظه کاری و حوزه‌های مربوط به تکلیف و ویژگی‌های جمعیت‌شناختی شرکت‌کنندگان (میانگین سن و درصد زن در برابر مرد) می‌شدند.

[1] Cowan
[2] Al Qasem, Abubaker, & Kvašňák
[3] Transcranial alternating current stimulation (tACS)
[4] Senkowski, Sobirey, Haslacher, & Soekadar
[5] Chang
[6] Bréchet, Senner, Brunoni, Padberg, & Palm
[7] Haller

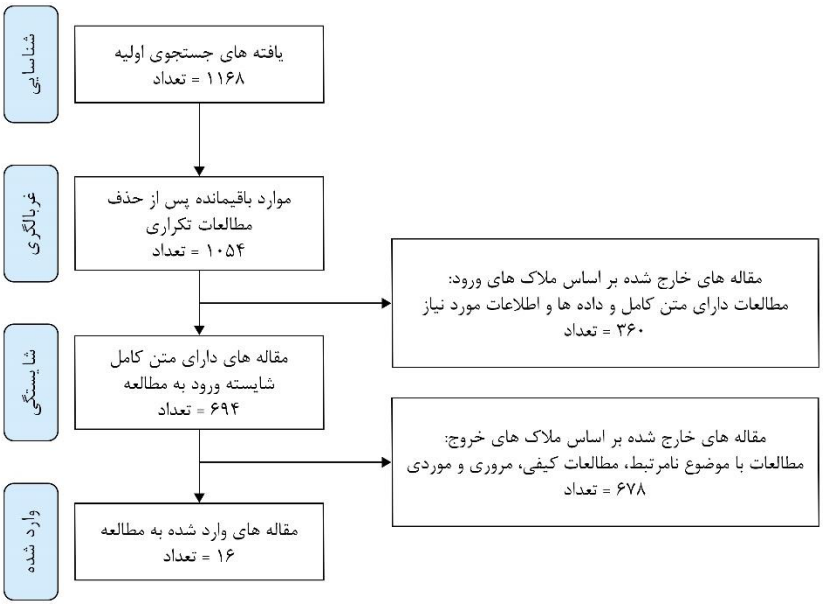
روش

این پژوهش به روش فراتحلیل کمّی مطابق تعریف کوهن[1] (۱۹۸۸) (روشی آماری که با استفاده از آماره‌های استنباطی به ترکیب ارزیابی نتایج کمّی چندین مطالعه مستقل پیشینی که فرضیه‌های مشابهی را بررسی نموده‌اند با هدف به دست آوردن یک اندازه اثر کلی) انجام شد. بدین منظور، نویسنده اول در تابستان ۱۴۰۴ به بررسی ۱۶ پژوهش در سه دهه اخیر در حوزه تأثیر تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب بر حافظه کاری در بانک‌های اطلاعاتی سیج ژورنالز[2]، ساینس دایرکت[3]، جهاد دانشگاهی، سایت خصوصی بانک مجلات ایران، پایگاه مجلات تخصصی نور و پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران (ایرانداک) به‌عنوان جامعه آماری پرداخت.

کلمات کلیدی مطالعه حاضر با تکیه‌بر پیشینه پژوهشی بدین شرح انتخاب شدند: «تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب»، «حافظه کاری»، «حافظه فعال»، « transcranial alternating current »، « tACS، stimulation» و «working memory». به‌علاوه، ملاک‌های ورود نیز به‌این ترتیب لحاظ شدند: ۱. سال انتشار مقاله بین ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۴ شمسی یا ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۵ میلادی باشد. ۲. در دسترس بودن مقاله به‌صورت کامل، (کامل بودن متن مقاله و همچنین، اطلاعات و داده‌های موردنیاز این مطالعه). ۳. آزمایشی بودن طرح مطالعه مقاله. ملاک‌های خروج عبارت بودند از: ۱. مقالات مشترک در نتایج جستجوی بانک‌های اطلاعاتی. ۲. مقاله‌هایی با موضوعات نامرتبط. ۳. مقاله‌هایی با طرح‌های غیرآزمایشی، طرح‌های کیفی، طرح‌های مطالعه موردی، کتاب یا فصلی از آن، مقالات مروری و نامه به سردبیر.

با جستجوی کلمات کلیدی در بانک‌های اطلاعاتی و اعمال ملاک‌های ورود و خروج، درنهایت ۱۶ مطالعه نمونه‌های این پژوهش را تشکیل دادند که از آن‌ها ۵۳ اندازه اثر استخراج گردید. مراحل جستجو، ارزیابی و انتخاب این موارد در شکل ۱ قابل‌مشاهده می‌باشند

[1] Cohen
[2] Sage Journals
[3] Science Direct



شکل ۱. دیاگرام فرایند گردآوری پژوهش‌های اولیه

ازآنجایی‌که نمونه‌های در نظر گرفته‌شده در این پژوهش مطالعات با طرح آزمایشی بودند، اندازه اثر d کوهن به‌عنوان ملاک ارزیابی تعیین شد. این ملاک به تفاوت استاندارد میانگین اشاره دارد. با هدف محاسبه d کوهن در مدل‌های مختلف و همچنین، بررسی میزان ناهمگنی، رسم نمودارها و دیگر تحلیل‌های موردنیاز، نرم‌افزار Comprehensive Meta-Analysis نسخه ۳.۳.۷۰ به کار گرفته شد.

یافته‌ها

درمجموع، ۱۶ مطالعه واجد شرایط وارد این فرایند فراتحلیل شدند که داده‌های حاصل از آن‌ها مربوط به ۳۵۵ شرکت‌کننده بود. جدول ۱ خلاصه‌ای از ویژگی‌های پژوهش‌های اولیه واردشده به این فراتحلیل شامل نام نویسنده اول و سال انتشار، طرح آزمایشی، تعداد جلسات تحریک، مدت‌زمان تحریک در هر جلسه، فرکانس تحریک و شخصی‌سازی‌شده بودن یا نبودن آن، محل قرارگیری الکترود (های) تحریک، تکلیف حافظه کاری مورداستفاده و متغیر وابسته موردمطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس این پژوهش‌ها، درمجموع ۵۳ اندازه اثر مستقل برای تحلیل محاسبه شد. اندازه اثرها بر اساس شاخص d کوهن استخراج و تحلیل شدند.

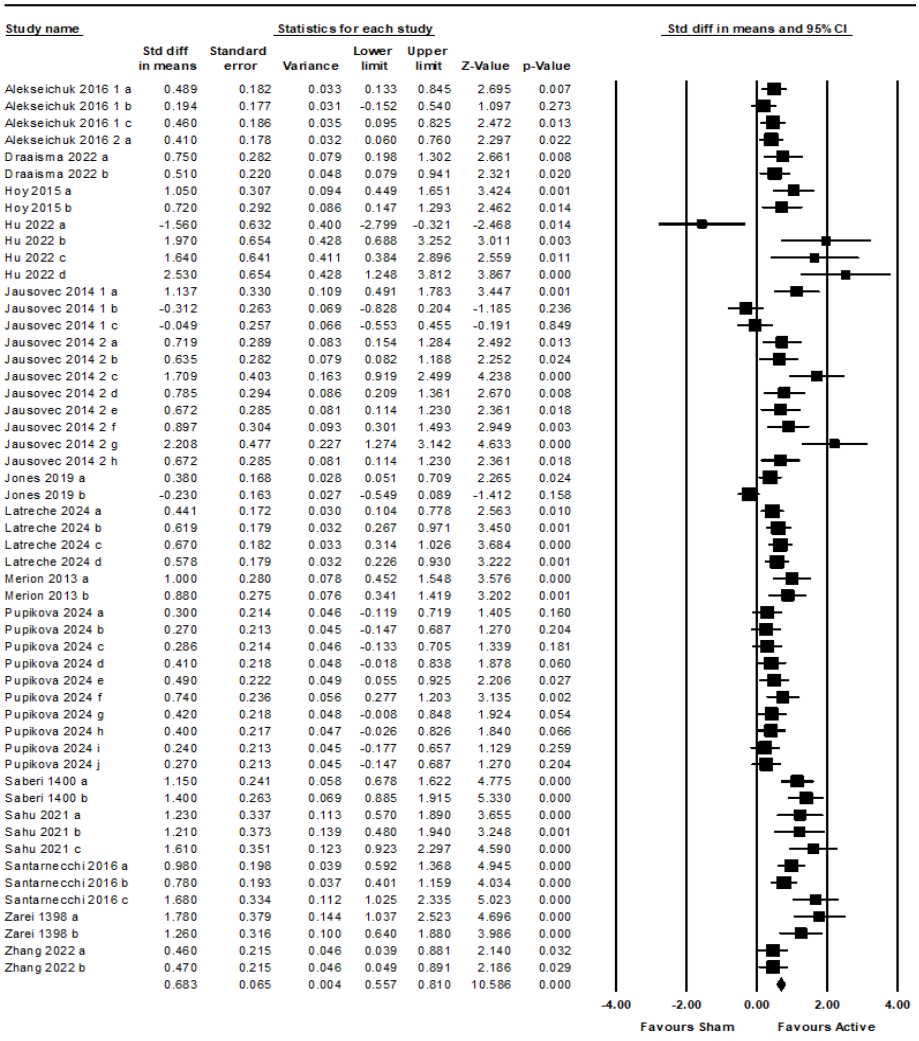
جدول ۱. خلاصه اطلاعات پژوهش‌های اولیه واردشده به مطالعه

نویسنده اول (سال)	طرح آزمایش	تعداد جلسات	مدت‌زمان تحریک	فرکانس تحریک	محل الکترود (ها)	تکلیف حافظه کاری	حوزه تکلیف	متغیر وابسته
الکسیچاک[1] a (۲۰۱۶)	درون گروهی	۱	۱۰	تتا (۶ هرتز)	پیشانی چپ (AF3)	تشخیص تغییر	فضایی	d prime
الکسیچاک (۲۰۱۶) b	درون گروهی	۱	۱۰	گاما (۸۰–۱۰۰ هرتز)	پیشانی چپ (AF3)	تشخیص تغییر	فضایی	d prime
پاپیکووا[2] (۲۰۲۴)	درون گروهی	۱	۲۰	تتا (شخصی سازی شده)	شکنج پیشانی میانی راست (rMFG)؛ لوبول آهیانه‌ای تحتانی راست (rIPL)	n-back	فضایی	دقت پاسخ
جونز[3] (۲۰۱۹)	درون گروهی	۱	۱۵	تتا (۴.۵ هرتز)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی چپ (F3)؛ آهیانه‌ای چپ (P3)	n-back	اشیاء	دقت پاسخ
درایسما[4] (۲۰۲۲)	درون گروهی	۱	۳۰	تتا (شخصی سازی شده)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی راست (F4)؛ آهیانه‌ای راست (P4)	n-back	شکل	دقت پاسخ
زارعی (۱۳۹۸)	درون گروهی	۱	۱۵	آلفا (۱۰ هرتز)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی چپ و راست (F3/F4)	n-back	شکل	دقت پاسخ؛ زمان پاسخ
ژانگ[5] (۲۰۲۲)	درون گروهی	۱	۲۵	تتا (۴.۵ هرتز)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی راست (F4)؛ آهیانه‌ای راست (P4)	تشخیص تغییر	فضایی	دقت پاسخ
سانتارنچی[6] (۲۰۱۵)	درون گروهی	۱	۳۰	تتا (۵ هرتز)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی چپ (F3)	تشخیص تغییر	رنگ	دقت پاسخ
ساهو[7] (۲۰۲۱)	درون گروهی	۱	۱۵	تتا (۶ هرتز)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی راست (F4)؛ آهیانه‌ای راست (P4)	تشخیص تغییر	رنگ	دقت پاسخ

[1] Alekseichuk
[2] Pupíková
[3] Jones
[4] Draaisma
[5] Zhang
[6] Santarnecchi
[7] Sahu

صابری (۱۴۰۰)	بین گروهی	۱	۲۰	تا (۴ هرتز)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی راست (F4)	بلوک کورسی	فضایی	دقت پاسخ؛ زمان پاسخ
لتریچ[1] (۲۰۲۴)	درون گروهی	۱	۲۵	تا (شخصی سازی شده)	پیش‌پیشانی چپ؛ قشر گیجگاهی چپ	تطبیق متاخر با نمونه	اشیاء	دقت پاسخ
میرون[2] (۲۰۱۴)	بین گروهی	۱	۲۰	تا (۴.۵ هرتز)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی چپ و راست (F3/F4)	n-back	کلامی	دقت پاسخ؛ زمان پاسخ
هو[3] (۲۰۲۲)	درون گروهی	۱	۳۰	تا (شخصی سازی شده)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی چپ (F3)؛ آهیانه‌ای چپ (P3)	استرنبرگ	کلامی	دقت پاسخ
هوی ۲۰۱۵	درون گروهی	۱	۲۰	گاما (۴۰ هرتز)	پیش‌پیشانی خلفی جانبی چپ (F3)؛ ناحیه فوق چشمی راست	n-back	کلامی	دقت پاسخ
یائوسوویچ[4] (۲۰۱۴) a	درون گروهی	۱	۱۵	تا (شخصی سازی شده)	آهیانه‌ای چپ (P3)؛ ابروی راست	مقایسه آرایه دیداری	فضایی	دقت پاسخ؛ زمان پاسخ
یائوسوویچ (۲۰۱۴) b	درون گروهی	۲	۱۵	تا (شخصی سازی شده)	آهیانه‌ای چپ (P3)؛ ابروی راست	بلوک کورسی؛ فراخنای ارقام	کلامی – فضایی	دقت پاسخ

[1] Latrèche
[2] Meiron
[3] Hu
[4] Jaušovec



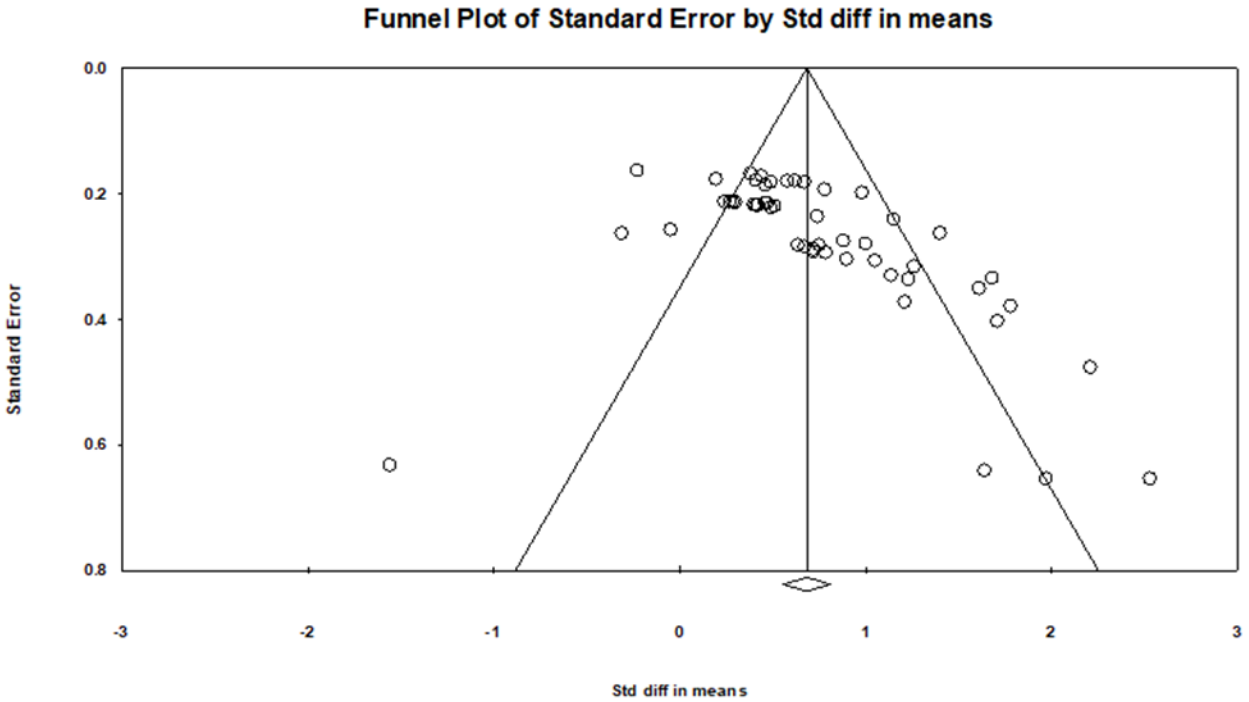
شکل ۲ . نمودار جنگلی توزیع اندازه‌های اثر و آماره‌های مربوطه

همچنین نمودار جنگلی در شکل ۲ توزیع اندازه‌های اثر و آماره‌های مربوط به این مطالعات را نشان می‌دهد:

از آنجایی که هر مطالعه‌ای که انجام می‌شود، لزوماً منتشر نمی‌شود و فرآیند انتخاب نیز تصادفی نیست و در عوض، پژوهش‌هایی که اثرات مداخله نسبتاً بزرگی را مشاهده می‌کنند با احتمال بیشتری ارسال و یا برای انتشار پذیرفته می‌شوند، توجه به مسئله سوگیری انتشار اهمیت بسزایی می‌یابد. ازاین‌رو، به‌منظور ارزیابی و پیشگیری از اثر سوگیری انتشار از ابزارهای مختلفی استفاده می‌شود که در این فراتحلیل از نمودار قیفی و شاخص امن از تخریب کلاسیک استفاده شد.

نمودار قیفی نمایشی از اندازه مطالعه (معمولاً خطای استاندارد یا دقت) روی محور عمودی به‌عنوان تابعی از اندازه اثر روی محور افقی است. پژوهش‌های دارای حجم نمونه بزرگ‌تر در بالای نمودار و نزدیک به میانگین اندازه اثر دیده می‌شوند و مطالعات دارای حجم نمونه کوچک‌تر در پایین نمودار و در محدوده‌ای از مقادیر، پراکنده می‌شوند. در صورت عدم وجود سوگیری انتشار،

پژوهش‌ها به‌طور متقارن در اطراف اندازه اثر ترکیبی توزیع می‌شوند. در مقابل، در صورت وجود سوگیری انتشار، تراکم بیشتری از مطالعات در یک‌طرف میانگین نسبت به‌طرف دیگر و در پایین نمودار دیده می‌شود. نمودار قیفی (شکل شماره ۳) اندازه‌های اثر مربوط به پژوهش‌های این فراتحلیل نشان می‌دهند که اندازه‌های اثر آن‌ها تقارن پراکندگی قابل قبولی دارند (استم و هاربورد[1]، ۲۰۰۴).



شکل ۳. نمودار قیفی توزیع اندازه‌های اثر پژوهش‌های اولیه

نگرانی دیگر در سوگیری انتشار این است که از آنجایی که ممکن است برخی پژوهش‌های غیرمعنادار در فراتحلیل در نظر گرفته نشده باشند، اگر این مطالعات در فراتحلیل لحاظ می‌شدند، ممکن بود اثر مشاهده‌شده را خنثی کنند. بدین منظور، رابرت روزنتال پیشنهاد کرد که تعداد مطالعاتی که برای خنثی کردن اثر لازم هستند را محاسبه کنیم. اگر این عدد بزرگ باشد، می‌توانیم با اطمینان بگوییم که هرچند ممکن است اثر مداخله به دلیل حذف برخی مطالعات بیش‌برآورد شده باشد، اما صفر نیست (روزنتال[2]، ۱۹۷۹).

مقدار امن از تخریب[3] این مطالعه برابر با ۴۹۷۵ است که بدین معناست که برای اینکه مقدار p دوطرفه ترکیبی بیشتر از ۰.۰۵۰ شود تا اثر موردنظر خنثی شود، باید ۴۹۷۵ مطالعه «صفر» وارد فراتحلیل کنیم. با توجه به این نتایج به نظر می‌رسد که فراتحلیل جاری سوگیری انتشار ندارد.

همچنین، به‌منظور در نظر گرفتن ناهمگنی میان مطالعات به دلیل تفاوت در روش‌ها و ویژگی‌های نمونه، رویکرد مدل اثرات تصادفی[4] برای تمامی تحلیل‌ها به کار گرفته شد. فرض مدل اثرات تصادفی بر این است که با توجه به ویژگی‌های متفاوت جامعه و نمونه و ویژگی‌های دیگر در

[1] Steme, & Harbord
[2] Rosenthal
[3] fail-safe N
[4] random effects model

مطالعات مختلف، اندازه اثر واقعی متفاوت است (هگز و ووی[1]، ۱۹۹۸). جدول شماره ۲ نتایج مربوط به‌اندازه اثر ترکیبی اثربخشی تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب بر عملکرد حافظه کاری را بر اساس مدل اثرات تصادفی نشان می‌دهد. در این جدول، تعداد کل اندازه‌های اثر واردشده به تحلیل، مقدار اندازه اثر ترکیبی برحسب شاخص d کوهن، خطای استاندارد، فاصله اطمینان ۹۵ درصد و آماره آزمون Z به همراه سطح معناداری گزارش‌شده‌اند. قرار گرفتن فاصله اطمینان به‌طور کامل بالاتر از صفر و معناداری آماره Z نشان می‌دهند که اثر کلی tACS بر عملکرد حافظه کاری ازنظر آماری معنادار بوده و جهت اثر مثبت است.

جدول ۱. اندازه اثر ترکیبی اثربخشی تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب بر حافظه کاری

تعداد اندازه اثر	اندازه اثر ترکیبی	خطای استاندارد	فاصله اطمینان ۹۵٪		Z	P
			حد پایین	حد بالا		
۵۳	۶۸۳.۰	۰۶۵.۰	۵۵۷.۰	۸۱۰.۰	۵۸۶.۱۰	۰۰۰۰.۰

با هدف مشخص کردن مدل نهایی فراتحلیل و همچنین بررسی میزان پراکندگی اندازه‌های اثر حاصل از مطالعات اولیه تحلیل‌های ناهمگنی Q کوکران و مجذور I انجام شد. آماره Q نشان‌دهنده مجموع انحرافات وزنی اندازه‌های اثر هر مطالعه از اندازه اثر ترکیبی است و همراه با p-value گزارش می‌شود که درصورتی‌که p-value کوچک‌تر از ۰.۰۵ باشد، ناهمگنی معنی‌دار خواهد بود (یوانیدیس، پاتسوپولوس و اوانجلو[2]، ۲۰۰۷). آماره مجذور I درصدی از واریانس کل است که به ناهمگنی میان مطالعات نسبت داده می‌شود و مقادیر زیر ۲۵، ۲۵ تا ۵۰، ۵۰ تا ۷۵ و بالای ۷۵ درصد به ترتیب ناهمگنی کم، متوسط، بالا و بسیار بالا تلقی می‌شوند (هیگینز، تامپسون، دیکز و آلتمن[3]، ۲۰۰۳). جدول شماره ۳ شاخص‌های ناهمگنی اندازه اثر ترکیبی شامل آماره Q کوکران، درجه آزادی، سطح معناداری و شاخص مجذور I را گزارش می‌کند. معنادار بودن آماره Q بیانگر وجود تفاوت معنادار میان اندازه‌های اثر مطالعات اولیه است، درحالی‌که مقدار شاخص مجذور I میزان نسبی واریانس کل مربوط به ناهمگنی بین مطالعات را نشان می‌دهد. مقدار به‌دست‌آمده برای مجذور I در این فراتحلیل نشان‌دهنده ناهمگنی بالا میان مطالعات واردشده است و استفاده از مدل اثرات تصادفی را برای برآورد اندازه اثر ترکیبی توجیه می‌کند.

جدول ۳. شاخص‌های ناهمگنی اندازه اثر ترکیبی اثربخشی تحریک الکتریکی فراجمجمه‌ای با جریان متناوب بر حافظه کاری

مقدار Q	درجه آزادی	سطح معناداری	مجذور I
۱۸۴.۰۳۶	۵۲	۰.۰۰۰	۷۱.۷۴۵

مقدار ۱۸۴.۰۳۶ برای آماره Q به همراه p-value کمتر از ۰.۰۵ (۰.۰۰۰) تفاوت اندازه‌های اثر پژوهش‌های اولیه را نشان می‌دهد. همچنین، مقدار مجذور I برای فراتحلیل حاضر ۷۱.۷۴۵ به‌دست‌آمده است که بر اساس معیارهای

[1] Hedges, & Vevea
[2] Ioannidis, Patsopoulos, & Evangelou
[3] Higgins, Thompson, Deeks, & Altman

بیان‌شده، این مقدار نشان‌دهنده ناهمگنی بالا در مطالعات واردشده به این فراتحلیل است؛ بنابراین، استفاده از مدل اثرات تصادفی به‌عنوان مدل نهایی این فراتحلیل به‌درستی در نظر گرفته‌شده است.

از طرفی، با توجه به امکان بررسی تأثیرگذاری احتمالی برخی متغیرها بر میزان اثربخشی لازم است تحلیل‌های ثانویه انجام شوند تا تأثیر احتمالی برخی از متغیرها به‌عنوان متغیر تعدیل‌کننده بررسی‌شده و تفاوت‌های مشاهده‌شده در میان اندازه‌های اثر مطالعات اولیه نیز تبیین شوند. بر این اساس، با توجه به ارائه اطلاعات موجود در خصوص نوع طراحی مطالعه (درون‌گروهی در مقابل بین گروهی)، تعداد جلسات، مدت‌زمان تحریک، فرکانس تحریک، فرکانس تحریک شخصی‌سازی‌شده در مقابل استاندارد، ناحیه هدف تحریک (محل الکترودها)، نوع الکترود (معمولی در مقابل HD-tACS)، اجرای آنلاین در مقابل آفلاین، تکلیف حافظه کاری و حوزه‌های مربوط به تکلیف (کلامی، فضایی و شیء) در مطالعات اولیه امکان انجام تحلیل‌های بیشتر مقدور بود؛ بنابراین این متغیرها به‌عنوان متغیر تعدیل‌کننده احتمالی در نظر گرفته شدند و تحلیل‌های ثانویه با بهره‌گیری از این متغیرها انجام گرفتند. همچنین، فراتحلیل رگرسیونی برای بررسی متغیرهای پیوسته انجام شد که شامل مدت‌زمان تحریک و ویژگی‌های جمعیت‌شناختی شرکت‌کنندگان (میانگین سن و درصد زن در برابر مرد) می‌شد.

تحلیل‌های تعدیل‌گر

نوع طراحی مطالعه (درون‌گروهی در مقابل بین گروهی)

تجزیه‌وتحلیل نوع طراحی مطالعه نشان داد که مطالعات بین گروهی (k=4; d=1.118; 95% CI=0.860-1.376) نتایج بهتری بر عملکرد حافظه کاری را نسبت به مطالعات درون‌گروهی (k=49; d=0.645; 95% CI = 0.516-0.774) نشان می‌دهند (Q-stat=10.337; df=1; p<0.05). کاهش قابل‌توجه مقدار شاخص مجذور I پس از تفکیک نیز می‌تواند بخشی از ناهمگنی موجود در میان اندازه های اثر حاصل از مطالعات اولیه را تبیین نماید.

مدت‌زمان تحریک

مدت‌زمان تحریک در ۵ دسته اجراشده بود: تحریک به مدت ۱۰ دقیقه (k=4; d=0.385; 95% CI=0.208-0.562) اثری کوچک تا متوسط و معنی‌دار، تحریک به مدت ۱۵ دقیقه (k=18; d=0.850; 95% CI=0.534-1.167) اثری بزرگ و معنی‌دار، تحریک به مدت ۲۰ دقیقه (k=16; d=0.595; 95% CI=0.421-0.770) و ۲۵ دقیقه (k=6; d=0.546; 95% CI=0.395-0.696) اثری متوسط و معنی‌دار و تحریک به مدت ۳۰ دقیقه (k=9; d=0.979; 95% CI=0.525-1.432) اثری بزرگ و معنی‌دار را نشان داده بودند (Q-stat=10.453; df=4; p<0.05).

فرکانس تحریک

اکثر مطالعات اولیه از فرکانس تحریک در دامنه تتا (۴ تا ۸ هرتز) استفاده کرده بودند. تحریک در فرکانس تتا (k=48; d=0.653; 95% CI=0.522-0.785) اثری متوسط و معنی‌دار، تحریک در فرکانس آلفا (k=2; d=1.478; 95% CI=0.975-1.981) اثری بزرگ و معنی‌دار و تحریک در فرکانس گاما (k=3; d=0.662; 95% CI=0.286-1.038) اثری متوسط و معنی‌دار نشان داده بودند (Q-stat=9.715; df=2; p<0.05).

ناحیه هدف تحریک (محل الکترودها)

محل تحریک در مطالعات اولیه دارای تنوعی نسبی بود ولی بااین‌حال، نواحی قشر پیش‌پیشانی خلفی جانبی چپ (F3) و راست (F4) و برخی نواحی نزدیک آن‌ها (مانند AF3، قشر پیش‌پیشانی سمت چپ یا lPFC، ناحیه فوق حدقه‌ای سمت راست یا rSA، ابروی سمت راست یا rE) درمجموع بیشتر مورد هدف تحریک قرارگرفته بودند. نتایج در مورد تحریک ناحیه F4 (k=2; d=1.264; 95% CI=0.916-1.612)، تحریک F3 و F4 (k=4; d=1.169; 95% CI=0.815-1.523)، تحریک ناحیه F3 (k=3; d=1.073; 95% CI=0.638-1.508) و تحریک نواحی F3 و rSA (k=2; d=0.877; 95% CI=0.462-1.292) نشان‌دهنده یک اثر بزرگ و معنی‌دار بود؛ اما تحریک F3 و P3 (k=4; d=1.140; 95% CI=-0.684-2.964) یک اثر بزرگ اما غیر معنی‌دار را نشان دادند. تحریک rEb و P3 (k=11; d=0.763; 95% CI=0.395-1.131) حاکی از یک اثر متوسط تا بزرگ معنی‌دار و تحریک F4 و P4 (k=9; d=0.644; 95% CI=0.300-0.988) و تحریک lPFC و قشر گیجگاهی سمت چپ یا lTC (k=4; d=0.573; 95% CI=0.399-0.748) نشان‌دهنده یک اثر متوسط معنی‌دار بودند. تحریک AF3 (k=4; d=0.385; 95% CI=0.208-0.562) و تحریک شکنج پیشانی میانی سمت راست یا rMFG و لوبول آهیانه‌ای زیرین سمت راست یا rIPL (k=10; d=0.374; 95% CI=0.240-0.509) اثر کوچک تا متوسط معنی‌داری را نشان داده بودند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که tACS در ناحیه‌های پیشانی (F4، F3) و ترکیب‌های آن‌ها تأثیرات قوی‌تری دارد، درحالی‌که ناحیه‌های آهیانه‌ای و ترکیب‌های پیچیده‌تر اثرات متوسط‌تری نشان می‌دهند (Q-stat=47.449; df=9; p<0.05).

نوع الکترود (معمولی در مقابل HD-tACS)

نتایج نشان دادند که تحریک tACS با الکترودهای استاندارد (k=27; d=0.915; 95% CI=0.689-1.141) تأثیر قوی‌تری نسبت به الکترودهای HD (k=26; d=0.464; 95% CI=0.354-0.574) دارند (Q-stat=12.340; df=1; p<0.05).

تکلیف حافظه کاری

تکالیف حافظه کاری مورداستفاده در مطالعات اولیه از تنوع نسبی (۶ گروه) برخوردار بودند. نتایج در مورد تکلیف استرنبرگ (k=4; d=1.140; 95% CI=-0.684-2.964) حاکی از یک اثر بزرگ اما غیر معنی‌دار بودند؛ اما در تکلیف بلوک‌های کورسی (k=10; d=1.014; 95% CI=0.749-1.279) شاهد یک اثر بزرگ و معنی‌دار بودیم. در تکلیف تشخیص تغییر (k=12; d=0.750; 95% CI=0.514-0.986) یک اثر متوسط تا بزرگ معنی‌دار و برای تکلیف تطبیق متأخر با نمونه (k=4; d=0.573; 95% CI=0.339-0.748) اثری متوسط و معنی‌دار مشاهده شد. در تکلیف n-back (k=20; d=0.535; 95% CI=0.363-0.707) یک اثر متوسط معنی‌دار به دست آمد. درنهایت، تکلیف مقایسه آرایه‌های دیداری (k=3; d=0.236; 95% CI=-0.565-1.036) نشان‌دهنده یک اثر کوچک و غیر معنی‌دار بود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که اندازه اثر بین تکالیف مختلف حافظه کاری متفاوت است و ناهمگنی معنی‌داری بین زیرگروه‌ها مشاهده شد (Q-stat=11.672; df=4; p<0.05). به عبارتی، tACS تأثیرات متفاوتی بر تکالیف مختلف حافظه

کاری دارد که در تکلیف‌های بلوک‌های کورسی و تشخیص تغییر قوی‌تر هستند.

حوزه‌های مورد آزمون در تکالیف حافظه کاری

تحلیل مربوط به حوزه‌های مورد آزمون در تکالیف حافظه کاری شامل پنج سطح بود: کلامی، فضایی، رنگ، شکل و اشیاء. تحریک tACS به ترتیب تأثیر بیشتری در تکالیف حافظه کاری مربوط به رنگ (k=6; d=1.165; 95% CI=0.873-1.457)، شکل (k=4; d=1.019; 95% CI=0.493-1.546)، محرک‌های کلامی (k=16; d=0.969; 95% CI=0.684-1.253)، مکان فضایی (k=21; d=0.442; 95% CI=0.301-0.582) و اشیاء (k=6; d=0.404; 95% CI=0.129-0.680) را نشان داده بودند (Q-stat=29.889; df=4; p<0.05).

متغیرهای تعدیل‌گر غیر معنادار شامل این موارد بودند: تعداد جلسات (یک جلسه: k=40, d=0.636؛ دو جلسه: k=13, d=0.859؛ Q-stat=1.377, df=1, p=0.241)؛ اجرای تحریک (آنلاین: k=31, d=0.664؛ آفلاین: k=22, d=0.716؛ Q-stat=0.144, df=1, p=0.705)؛ و شخصی‌سازی فرکانس تحریک (شخصی‌سازی‌شده: k=31, d=0.575؛ استاندارد: k=22, d=0.822؛ Q-stat=3.442, df=1, p=0.064).

نتیجه تحلیل رگرسیون فرا تحلیلی برای متغیرهای پیوسته حاکی از آن بود که ویژگی‌های جمعیت‌شناختی مانند سن (میانگین ۸.۷۳ – ۶۹.۶ سال) (z=3.38, p<0.05) و درصد نسبت شرکت‌کنندگان زن به مرد (z=8.91, p<0.05) ازنظر آماری به‌عنوان تعدیل‌گرهای معنادار اندازه اثر شناسایی شدند.

بحث

اندازه اثر ترکیبی متوسط (۰/۶۸۳) مطالعه در مطالعه حاضر حاکی از اثربخشی مناسب و قابل‌توجه tACS بر حافظه کاری است. علاوه بر این، در مورد متغیرهای تعدیل‌گر، نتیجه بررسی نقش نوع طراحی مطالعه نشان داد که مطالعات بین گروهی نسبت به مطالعات درون‌گروهی اندازه اثری بزرگ‌تر، یعنی نتایجی با اثربخشی بیشتر بر عملکرد حافظه کاری دارند. نتایج بررسی مدت‌زمان تحریک در هر جلسه نیز نشان دادند که تحریک به مدت ۱۰ دقیقه اندازه اثر کوچک، ۲۰ و ۲۵ دقیقه اندازه اثرهایی متوسط و ۱۵ و ۳۰ دقیقه اندازه اثرهایی بزرگ داشتند. همچنین، فرکانس تحریک در اکثر مطالعات اولیه دامنه تتا (۴ تا ۸ هرتز) با اندازه اثری متوسط بود. تحریک در فرکانس‌های آلفا اندازه اثر بزرگ و گاما اندازه اثر متوسط نشان دادند که باوجود تعداد اندک مطالعات (به ترتیب ۲ و ۳ مطالعه برای هرکدام) به نظر می‌رسد که معناداری آن‌ها باید محتاطانه در نظر گرفته شود. در ضمن، مناطق متنوعی برای قرار دادن الکترودهای تحریک استفاده‌شده بودند که نواحی قشر پیش‌پیشانی خلفی جانبی در هر دو نیمکره و مناطق نزدیک آن‌ها بیشترین هدف تحریک با اندازه اثرهایی بزرگ بودند. در مورد مناطق تحریک نواحی آهیانه‌ای یا ترکیب‌های دیگر اندازه اثرها متوسط بودند. به‌علاوه، بررسی نقش تعدیل‌گر اندازه و نوع الکترود نیز نشان داد که استفاده از الکترودهای استاندارد اندازه اثر بزرگ‌تر معناداری در مقایسه با استفاده از الکترودهای HD دارد. در مورد تأثیر احتمالی تکالیف حافظه کاری ناهمگنی معناداری مشاهده شد که تکالیف بلوک‌های کورسی و تشخیص تغییر، اندازه اثرهای بزرگ‌تری نشان دادند. همچنین، نتایج بررسی حوزه‌های مورد آزمون در تکالیف حافظه کاری نیز نشان دادند که حوزه‌های رنگ،

شکل، محرک‌های کلامی، موقعیت فضایی و اشیاء به ترتیب، اندازه اثرهای بزرگ‌تری دارند. درنهایت، نتایج رگرسیون فراتحلیلی متغیرهای پیوسته سن و جنسیت بر اندازه اثر ترکیبی نیز معنادار بودند.

یافته‌های مطالعه حاضر با پژوهش‌های مروری فراتحلیل در همین حوزه همسویی نسبی نشان دادند. نیسیم، مک‌اینتایر، اسکار، کراوفورد و مک‌کینلی[1] (۲۰۲۳) اندازه اثر ترکیبی تأثیر tACS بر حافظه کاری در ۱۰ مطالعه ورودی و مجموع ۳۲ اندازه اثر را ۰/۵۱۴ و چودرسکی و چینتا[2] (۲۰۲۴) این مقدار در ۴۲ مطالعه ورودی و مجموع ۱۴۲ اندازه اثر را ۰/۰۷۶ گزارش کرده‌اند. پژوهش جاری و مطالعه اول به بررسی کلی این پدیده پرداخته‌اند، ولی هدف مطالعه دوم بررسی تأثیر همگام‌سازی تحریک در جمعیت سالم بوده است. بااین‌حال، وجه تمایز قابل‌تأمل در انجام مطالعه حاضر، علاوه بر وارد شدن دو مطالعه با جمعیت ایرانی، اضافه شدن چندین مقاله و اندازه اثر جدید بود.

نتیجه‌گیری

به نظر می‌رسد با توجه به اثربخشی قابل‌قبول tACS بر عملکرد حافظه کاری، با دقت در انتخاب مؤلفه‌های تعدیل‌گر (فرکانس، محل یا ناحیه، مدت‌زمان و تعداد جلسات تحریک)، استفاده از تکالیف سنجش عملکرد دقیق‌تر و دارای سطح‌بندی و امکان ارزیابی حوزه‌های مختلف حافظه کاری در مطالعات مداخلاتی آینده، در جمعیت افراد دارا و فاقد اختلالات مختلف و همچنین در آزمودنی‌هایی از سنین مختلف نتایجی با امکان تعمیم‌پذیری قابل‌قبول‌تر به دست آیند.

از محدودیت‌های این پژوهش، اندک بودن مطالعاتی با جمعیت ایرانی و نبود هیچ مطالعه‌ای که به بررسی ماندگاری تأثیر برای مدت‌های طولانی‌تر پرداخته باشد (به‌منظور بررسی امکان ارتباط تأثیر tACS بر حافظه کاری با زیربناهای عصبی مانند نوروپلاستیسیتی) بود. همچنین، بررسی تأثیر tACS بر همبسته‌های عصبی الکتروفیزیولوژیک حافظه کاری نیز مشاهده نشد.

پیشنهاد می‌شود تا در پژوهش‌های آینده مطالعاتی لحاظ شوند که به بررسی همبسته‌های عصبی در این حوزه پرداخته‌اند و ترجیحاً مطالعات بیشتر انجام‌شده با جمعیت ایرانی و در صورت امکان پژوهش‌هایی که ارزیابی‌های پیگیری بلندمدت داشته‌اند.

سپاسگزاری

این مقاله در راستای رساله دکتری نویسنده اول در رشته علوم اعصاب شناختی (مغز و شناخت) دانشگاه تبریز نوشته شد. این رساله دارای کد اخلاق IR.TABRIZU.REC.1402.082 از کمیته اخلاق دانشگاه تبریز است. به‌علاوه، این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی انجام شد. همچنین، اجرای این پژوهش برای نویسندگان هیچ تعارض منافعی را در پی نداشته و نتایج آن به‌طور کامل شفاف و فاقد سوگیری گزارش‌شده‌اند.

References

Al Qasem, W., Abubaker, M., & Kvašňák, E. (2022). Working memory and transcranial-alternating current stimulation—State of the art: Findings, missing, and challenges. *Frontiers in Psychology*, 13, 822545. Doi: 10.3389/fpsyg.2022.822545

Alekseichuk, I., Pabel, S. C., Antal, A., & Paulus, W. (2017). Intrahemispheric theta rhythm desynchronization impairs working memory. *Restorative*

[1] Nissim, McIntire, Skaar, Crawford, & McKinley

[2] Chuderski, & Chinta

Neurology and Neuroscience, 35(2), 147-158.

Alekseichuk, I., Turi, Z., Amador de Lara, G., Antal, A., & Paulus, W. (2016). Spatial working memory in humans depends on theta and high gamma synchronization in the prefrontal cortex. *Current Biology*, 26(12), 1513-1521.

Bréchet, L., Yu, W., Biagi, M. C., Ruffini, G., Gagnon, M., Manor, B., & Blanke, O. (2021). Patient-tailored, home-based non-invasive brain stimulation for memory deficits in dementia due to Alzheimer's disease. *Frontiers in Neurology*, 12, 598135.

Chang, C. C., Huang, C. C., Chung, Y. A., Im, J. J., Lin, Y. Y., Ma, C. C., Tzeng, N. S., & Chang, H. A. (2021). Online left-hemispheric in-phase frontoparietal theta tACS for the treatment of negative symptoms of schizophrenia. *Journal of Personalized Medicine*, 11(11), 1114. Doi: 10.3390/jpm11111114

Chuderski, A., & Chinta, S. R. (2024). Transcranial alternating current stimulation barely enhances working memory in healthy adults: A meta-analysis. *Brain Research*, 1839, 149022. Doi: 10.1016/j.brainres.2024.149022

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Routledge.

Cowan, N. (2014). Working memory underpins cognitive development, learning, and education. *Educational Psychology Review*, 26(2), 197-223.

Draaisma, L. R., Wessel, M. J., Moyne, M., Morishita, T., & Hummel, F. C. (2022). Targeting the frontoparietal network using bifocal transcranial alternating current stimulation during a motor sequence learning task in healthy older adults. *Brain Stimulation*, 15(4), 968-979.

Haller, N., Senner, F., Brunoni, A. R., Padberg, F., & Palm, U. (2020). Gamma transcranial alternating current stimulation improves mood and cognition in patients with major depression. *Journal of Psychiatric Research*, 130, 31-34.

Hedges, L. V., & Vevea, J. L. (1998). Fixed- and random-effects models in meta-analysis. *Psychological Methods*, 3(4), 486-504. Doi: 10.1037/1082-989X.3.4.486

Heidarifatasmi, M., Zarei, H. A., & Mosazadeh, T. (2023). Effectiveness of cerebellar education training in theory of mind and working memory of children with oppositional defiant disorder. *Shenakht Journal of Psychology and Psychiatry*, 10(2), 1-15. Doi: 10.32598/shenakht.10.2.1 (In Persian)

Higgins, J. P. T., Thompson, S. G., Deeks, J. J., & Altman, D. G. (2003). Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ*, 327(7414), 557-560. Doi: 10.1136/bmj.327.7414.557

Hoy, K. E., Bailey, N., Arnold, S., Windsor, K., John, J., Daskalakis, Z. J., & Fitzgerald, P. B. (2015). The effect of γ-tACS on working memory performance in healthy controls. *Brain and Cognition*, 101, 51-56.

Hu, Z., Samuel, I. B. H., Meyyappan, S., Bo, K., Rana, C., & Ding, M. (2022). Aftereffects of frontoparietal theta tACS on verbal working memory: Behavioral and neurophysiological analysis. *IBRO Neuroscience Reports*, 13, 469-477.

Ioannidis, J. P. A., Patsopoulos, N. A., & Evangelou, E. (2007). Uncertainty in heterogeneity estimates in meta-analyses. *BMJ*, 335(7626), 914-916.

Jaušovec, N., & Jaušovec, K. (2014). Increasing working memory capacity with theta transcranial alternating

current stimulation (tACS). *Biological Psychology*, 96, 42-47.

Jaušovec, N., Jaušovec, K., & Pahor, A. (2014). The influence of theta transcranial alternating current stimulation (tACS) on working memory storage and processing functions. *Acta Psychologica*, 146, 1-6.

Jones, K. T., Arciniega, H., & Berryhill, M. E. (2019). Replacing tDCS with theta tACS provides selective, but not general WM benefits. *Brain Research*, 1720, 146324. Doi: 10.1016/j.brainres.2019.146324

Latrèche, C., Mancini, V., Rochas, V., Maeder, J., Cantonas, L. M., Férat, V., Eliez, S., & Zöller, D. (2024). Using transcranial alternating current stimulation to enhance working memory skills in youths with 22q11.2 deletion syndrome: A randomized double-blind sham-controlled study. *Psychiatry Research*, 335, 115835.

Meiron, O., & Lavidor, M. (2014). Prefrontal oscillatory stimulation modulates access to cognitive control references in retrospective metacognitive commentary. *Clinical Neurophysiology*, 125(1), 77-82.

Nissim, N. R., McIntire, J. R., Skaar, J., Crawford, J. L., & McKinley, R. A. (2023). Effects of transcranial alternating current stimulation on working memory: A meta-analysis. *Neuromodulation*, 26(7), 1319-1330.

Ostadpour, M., Emadian, O., & Fakhri, M. K. (2024). Comparing the effectiveness of computerized cognitive rehabilitation and practical neuropsychological exercises on working memory and clinical symptoms of children with attention deficit/hyperactivity disorder. *Shenakht Journal of Psychology and Psychiatry*, 11(2), 18-33. DOI: 10.32598/shenakht.11.2.18 (In Persian)

Pupíková, M., Maceira-Elvira, P., Harquel, S., Šimko, P., Popa, T., Gajdoš, M., & Bocková, M. (2024). Physiology-inspired bifocal fronto-parietal tACS for working memory enhancement. *Heliyon*, 10(18), e37427. Doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37427

Reinhart, R. M. G., & Nguyen, J. A. (2019). Working memory revived in older adults by synchronizing rhythmic brain circuits. *Nature Neuroscience*, 22(5), 820-827.

Rosenthal, R. (1979). The file drawer problem and tolerance for null results. *Psychological Bulletin*, 86(3), 638-641. Doi: 10.1037/0033-2909.86.3.638

Saberi Kakhki, P. (2022). *The effect of transcranial alternating current stimulation (tACS) on the encoding of visuo-spatial working memory* [Master's thesis, Shahid Beheshti University]. (In Persian)

Sahu, P. P., & Tseng, P. (2021). Frontoparietal theta tACS nonselectively enhances encoding, maintenance, and retrieval stages in visuospatial working memory. *Neuroscience Research*, 172, 41-50.

Santarnecchi, E., Muller, T., Rossi, S., Sarkar, A., Polizzotto, N. R., Rossi, A., & Cohen Kadosh, R. (2016). Individual differences and specificity of prefrontal gamma frequency-tACS on fluid intelligence capabilities. *Cortex*, 75, 33-43.

Senkowski, D., Sobirey, R., Haslacher, D., & Soekadar, S. R. (2022). Boosting working memory: Uncovering the differential effects of tDCS and tACS. *Cerebral Cortex*

Communications, 3(2), tgac018. Doi: 10.1093/cercor/tgac018

Shamsi Nezhd, M., & Mousavi Nasab, S. H. (2025). Evaluation of the age and gender differences in the updating component of executive functions in adults. *Shenakht Journal of Psychology and Psychiatry*, 12(2), 67-81. Doi: 10.32598/shenakht.12.2.67 (In Persian)

Sterne, J. A. C., & Harbord, R. M. (2004). Funnel plots in meta-analysis. *The Stata Journal*, 4(2), 127-141. Doi: 10.1177/1536867X0400400204

Zarei, Z. (2019). *Comparison the effectiveness of trans-cranial direct current stimulation (tDCS) method & trans-cranial alternating current stimulation (tACS) method for improvement of children's executive function with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD)* [Doctoral dissertation, Shahid Beheshti University]. (In Persian)

Zeng, L., Guo, M., Wu, R., Luo, Y., & Wei, P. (2022). The effects of electroencephalogram feature-based transcranial alternating current stimulation on working memory and electrophysiology. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 14, 828377. Doi: 10.3389/fnagi.2022.828377

Zhang, D., Moraidis, A., & Klingberg, T. (2022). Individually tuned theta HD-tACS improves spatial performance. *Brain Stimulation*, 15(6), 1439-1447.