Sport Medicine Studies, 2026, 18(48): 49-69. DOI: doi123kjl456789

Sport Medicine Studies

Journal hompage: https://smj.ssrc.ac.ir

Original Article

Comparison of the Effects of tDCS and tPCS Combined with Closed Kinetic Chain Exercises on Neuromuscular Balance Control in Patients with Knee Osteoarthritis: A Randomized Controlled Trial.

Niloofar Afrasiabi [1] Farzaneh Gandomi *[1], Ali Yalfani [2] Parviz Soufivand [3]

1. Department of Sports Injuries and Corrective Exercises, Faculty of Sport Sciences, Razi University, Kermanshah, Iran.
2. Department of Sports Injuries and Corrective Exercises, Faculty of Sport Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3. Department of Rheumatology, Clinical Research Development Center, Imam Reza Hospital, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran.

Received: 13-Jun-2026 | **Accepted:** 1-Sep-2026 | **Published:** 00/00/00/

* Corresponding Author: **Farzaneh Gandomi**, E-mail: gandomi777@gmail.com

How to Cite: Afrasiaby N., Gandomi F., Yalfani A., Soufivand P. Comparison of the Effects of tDCS and tPCS Combined with Closed Kinetic Chain Exercises on Neuromuscular Balance Control in Patients with Knee Osteoarthritis: A Randomized Controlled Trial. Studies in Sport Medicine. 2026;18(48):49-69. (In Persian). https://doi.org/10.22089/smj.2026.19516.1865

Extended Abstract

Background and Purpose

Knee osteoarthritis (OA) is a prevalent musculoskeletal disorder that progressively degrades articular cartilage and periarticular structures. Beyond causing chronic pain, knee OA profoundly damages joint proprioceptors, which consequently impairs the somatosensory feedback crucial for maintaining postural stability. This sensory-motor deterioration manifests objectively as increased center of pressure (COP) sway and diminished postural control, dramatically elevating the risk of falls and reducing the overall quality of life in affected older women. While closed kinetic chain (CKC) exercises are well-established for enhancing joint stability and proprioception through neuromuscular co-contraction, the central nervous system's intricate role in postural regulation necessitates a comprehensive rehabilitation approach. Non-invasive brain stimulation (NIBS) offers a novel neuro-modulatory intervention capable of facilitating neuroplasticity and cortical excitability. Therefore, this study aimed to investigate the

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

synergistic effects of combining NIBS with CKC exercises on postural control in women with knee osteoarthritis.

Materials and Methods

This study was designed as a randomized, double-blind, pre-test/post-test clinical trial aimed at evaluating the synergistic effects of non-invasive brain stimulation (NIBS) and closed kinetic chain (CKC) exercises. A total of 54 women diagnosed with knee osteoarthritis, aged 40 to 70 years with Kellgren–Lawrence grades II or III, successfully completed the study. Participants were randomly allocated into three equal groups (n = 18 per group): transcranial direct current stimulation combined with CKC exercises (tDCS + CKC), transcranial pulsed current stimulation with CKC exercises (tPCS + CKC), and a Sham stimulation group paired with CKC exercises. The neuro-modulatory intervention consisted of seven consecutive daily sessions of brain stimulation. The tDCS group received a 2-mA anodal current over the primary motor cortex (M1), whereas the tPCS group received a 1-mA current at a frequency of 5 Hz, both lasting for 20 minutes. The Sham group underwent identical electrode placement with only a brief 30-second initial current to mimic the somatic sensation of active stimulation. Concurrently, all participants engaged in a supervised, progressive CKC exercise protocol consisting of 12 sessions over four weeks (three 60-minute sessions per week). To objectively quantify postural control, center of pressure (COP) indices were recorded using a specialized PT-Scan plantar pressure distribution platform (165 Hz sampling rate). Postural sway parameters, including medial-lateral sway (SDx), anterior-posterior sway (SDy), total path length, and the 95% confidence ellipse area, were assessed during 30-second quiet standing trials under both eyes-open and eyes-closed conditions. Finally, statistical analyses were performed using a 3×2 mixed-design Analysis of Variance (ANOVA) to evaluate the main and interaction effects of group and time (pre- versus post-intervention), with the significance level set at $P < 0.05$.

Results

The statistical analysis utilizing a mixed-design ANOVA revealed compelling changes in postural stability following the four-week intervention period. Across both the eyes-open and eyes-closed conditions, a highly significant main effect of time was consistently observed for the primary center of pressure (COP) indices. This indicates that the participants experienced a substantial reduction in postural sway, reflecting enhanced sensorimotor integration and improved dynamic joint stability. Specifically, critical parameters such as the 95% confidence ellipse area—which denotes the overall magnitude of postural dispersion—and the medial-lateral (SDx) and anterior-posterior (SDy) sway amplitudes demonstrated marked pre-to-post improvements. These consistent temporal adaptations underscore the profound efficacy of the foundational closed kinetic chain (CKC) exercise regimen, which effectively stimulated proprioceptive feedback and neuromuscular co-contraction across all participant cohorts. Despite these robust time-dependent enhancements, the analysis indicated that the group-by-time interaction effect remained statistically non-significant for the majority of the spatial and temporal postural variables ($P > 0.05$). The absence of significant between-group divergence in metrics such as the 95% ellipse area and directional sway suggests a uniform trajectory of clinical improvement. This implies that the changes in postural

control during the intervention period were largely independent of the specific brain stimulation type. Consequently, the neuro-modulatory influence of active transcranial direct current stimulation (tDCS) and transcranial pulsed current stimulation (tPCS) did not yield a massive, easily distinguishable additive effect over the Sham condition for these specific macroscopic balance boundaries. However, a nuanced and highly specific neuro-physiological adaptation was successfully captured: a statistically significant group-by-time interaction was identified exclusively for the COP path length during the eyes-open condition ($P = 0.004$, $\eta^2p = 0.198$). The COP path length is a sensitive, cumulative metric representing the total displacement and the frequency of continuous regulatory micro-adjustments executed by the central nervous system to maintain the center of gravity. The manifestation of an interaction effect specifically in this metric indicates distinct temporal trajectories and varying regulatory strategies among the intervention groups. This selective modulation under the eyes-open condition is particularly noteworthy. Individuals with knee osteoarthritis characteristically exhibit an over-reliance on visual inputs to compensate for structural and proprioceptive joint degradation. The data suggest that non-invasive brain stimulation might synergistically interact with this visual dependency, potentially fine-tuning the efficiency of motor unit recruitment and reducing the overall energy expenditure required for continuous postural corrections.

Conclusion

The findings of this randomized clinical trial substantiate that a structured regimen of closed kinetic chain (CKC) exercises serves as a highly effective intervention for significantly enhancing postural control and balance performance in women with knee osteoarthritis. The substantial improvements observed uniformly across all intervention groups highlight the central, indispensable role of CKC exercises as a primary therapeutic strategy in rehabilitation programs. Furthermore, although the additive benefits of non-invasive brain stimulation (NIBS) beyond exercise alone were limited under the present overarching conditions, the significant interaction observed in specific variables indicates its potential to modulate neuromuscular responses.Consequently, while progressive CKC exercises must remain the cornerstone of postural rehabilitation, non-invasive brain stimulation exhibits promising neuro-modulatory capabilities and may be judiciously considered as a targeted, complementary approach in clinical practice to further refine sensorimotor integration.

Key Words: Knee Osteoarthritis, Postural Control, Center of Pressure, Balance, Closed Kinetic Chain Exercise

Article Message

This study confirms that closed kinetic chain (CKC) exercises are a highly effective, foundational intervention for enhancing postural control and balance in women with knee osteoarthritis. While non-invasive brain stimulation (NIBS) demonstrates potential neuro-modulatory effects on neuromuscular function, its additive therapeutic benefits beyond structured exercise were limited under the current experimental conditions. The uniform improvements observed across all cohorts underscore the indispensable role of targeted exercise regimens in orthopedic rehabilitation. Consequently, CKC exercises

should remain the primary clinical strategy for postural restoration, with NIBS serving as a judiciously applied, complementary modality to further refine sensorimotor integration in clinical settings.

Ethical Considerations

This clinical trial rigorously adhered to the ethical principles outlined in the Declaration of Helsinki. The study protocol underwent comprehensive review and was officially approved by the Ethics Committee of Razi University (Approval ID: IR.RAZI.REC.1403.014). Furthermore, to ensure methodological transparency, the trial was prospectively registered with the Iranian Registry of Clinical Trials (IRCT20240911063011N1). Prior to enrollment and any study-related procedures, detailed written informed consent was obtained from all participants, ensuring their full comprehension of the study's objectives and voluntary participation.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to this work.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

(The authors would like to express their sincere gratitude to all the participants for their time and dedication to this clinical trial. Special thanks are also extended to the clinical staff at Bostan Clinic and the technical personnel at the Exercise Physiology Laboratory of Razi University for their invaluable cooperation and provision of facilities throughout the research process.

مطالعات طب ورزشی، تابستان ۱۴۰۵، دوره 18، شماره ۴۸، صص ۵۹-۳۷. DOI: doi123kjl456789

Sport Medicine Studies

Journal hompage: https://smj.ssrc.ac.ir

مقاله پژوهشی

مقایسه اثربخشی tDCS و tPCS همراه با تمرینات زنجیره حرکتی بسته بر کنترل تعادل عصبی–عضلانی در استئوآرتریت زانو: یک کارآزمایی بالینی تصادفی

نیلوفرافراسیابی[۱]، فرزانه گندمی*[۲]، علی یلفانی[۳]، پرویز صوفیوند[۴]

۱. گروه آسیب‌های ورزشی و حرکات اصلاحی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲. گروه آسیب‌های ورزشی و حرکات اصلاحی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۳. گروه روماتولوژی، مرکز تحقیقات توسعه بالینی، بیمارستان امام رضا، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰ | تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

*نویسنده مسئول: **فرزانه گندمی**، ایمیل: E-mail: gandomi777@gmail.com

How to Cite: Afrasiaby N., Gandomi F., Yalfani A., Soufivand P. Comparison of the Effects of tDCS and tPCS Combined with Closed Kinetic Chain Exercises on Neuromuscular Balance Control in Patients with Knee Osteoarthritis: A Randomized Controlled Trial. Studies in Sport Medicine. 2026;18(48):49-69. (In Persian). https://doi.org/10.22089/smj.2026.19516.1865

چکیده

هدف: بررسی اثربخشی تمرینات زنجیره حرکتی بسته همراه با تحریک غیرتهاجمی مغزی بر کنترل پاسچر زنان مبتلا به استئوآرتریت زانو.

مواد و روش‌ها: این مطالعه از نوع کارآزمایی بالینی تصادفی‌سازی‌شده و دوسوکور بود. ۵۴ زن مبتلا به استئوآرتریت زانو در سه گروه تحریک الکتریکی مستقیم فراجمجمه‌ای(tDCS) ، تحریک پالسی فراجمجمه‌ای (tPCS) و گروه کنترل (Sham) قرار گرفتند. مداخله شامل هفت جلسه تحریک مغزی و دوازده جلسه تمرینات زنجیره حرکتی بسته طی چهار هفته بود. شاخص‌های مرکز فشار (COP) در شرایط چشم‌باز و چشم‌بسته، پیش و پس از مداخله ارزیابی شدند. داده‌ها با استفاده از آزمون تحلیل واریانس با طرح مختلط تجزیه‌وتحلیل شدند

یافته‌ها: نتایج نشان داد اثر اصلی زمان برای شاخص‌های مرکز فشار در هر دو شرایط بینایی معنادار بود (05/0p .(در مقابل، اثر تعاملی معناداری برای متغیر طول مسیر جابه‌جایی مرکز فشار (COP) در شرایط چشم‌باز مشاهده شد (۰p/۰۵

نتیجه‌گیری: نتیجه گرفت که تمرینات زنجیره حرکتی بسته، مداخله پایه و مؤثری برای بهبود تعادل در زنان مبتلا به استئوآرتریت زانو است. تحریک غیرتهاجمی مغزی اثرات تعدیل‌کننده عصبی-عضلانی دارد، اما مزایای افزوده آن در این شرایط محدود بود و استفاده از تمرینات زنجیره حرکتی بسته به‌عنوان استراتژی درمانی اصلی و تحریک مغزی به‌عنوان رویکردی مکمل تأیید می‌شود.

واژگان کلیدی: استئوآرتریت زانو، مرکز فشار، کنترل پاسچر، تعادل، تمرینات زنجیره حرکتی بسته.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقدمه

استئوآرتریت زانو[۱]به‌عنوان یکی از شایع‌ترین اختلالات سیستم عضلانی-اسکلتی در سالمندان و به‌ویژه زنان، با تخریب پیش‌رونده غضروف مفصلی و تغییرات ساختاری در بافت‌های اطراف مفصل همراه است (۱،۲). این عارضه نه‌تنها منجر به درد و کاهش دامنه حرکتی می‌شود، بلکه با تخریب گیرنده‌های عمقی مفصل، موجب اختلال در سیستم کنترل پاسچر و افزایش نوسانات مرکز فشار نیز می‌شود (۶-۴). نقص در ثبات تعادلی در این بیماران، ریسک سقوط و وابستگی حرکتی را به طور معناداری افزایش می‌دهد و بر کیفیت زندگی آنان تأثیر می‌گذارد (۹-۷). ارزیابی نوسانات مرکز فشار[۲]ابزاری عینی برای سنجش یکپارچگی عملکردی سیستم حسی-حرکتی فراهم می‌آورد؛ به طوری که افزایش دامنه نوسان در صفحات مختلف، نشانگر افت کارایی سازوکارهای عصبی-عضلانی در حفظ تعادل است (۷،۸).

در بیماران مبتلا به استئوآرتریت زانو، تداخل عواملی نظیر نارسایی حسی-پیکری،[۳]ضعف عضلانی و بیومکانیک تغییریافته مفصل، منجر به بی‌ثباتی پاسچرال و تشدید نوسانات COP می‌شود (۹،۱۰)؛ لذا ارتقای کنترل پاسچر به‌عنوان هدف درمانی کلیدی در مداخلات توان‌بخشی مدرن برای این بیماران جایگاهی ویژه دارد. تمرینات زنجیره حرکتی بسته[۴]به دلیل ماهیت تحمل وزن و فعال‌سازی هم‌زمان عضلات آگونیست و آنتاگونیست، نقش مؤثری در تقویت ثبات مفصلی و بهبود هماهنگی عصبی-عضلانی دارند (۱۱،۱۲). این تمرینات با افزایش تحریک گیرنده‌های حس عمقی و بهبود هم‌انقباضی عضلات اطراف زانو می‌توانند موجب ارتقای کنترل پاسچر شوند (۳،۴)؛ با این حال و با وجود شواهد مثبت درباره اثر تمرینات زنجیره حرکتی بسته بر درد و عملکرد، بررسی اثر آن‌ها بر شاخص‌های عینی COP به صورت نظام‌مند، کمتر گزارش شده است.

در سال‌های اخیر، تحریک‌های غیرتهاجمی مغزی به‌عنوان رویکردی نوین و تحول‌آفرین در توان‌بخشی اختلالات اسکلتی-عضلانی و نوروموتور جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای (tDCS)[۵]از طریق اعمال جریان الکتریکی با شدت پایین بر سطح قشر مغز، موجب تعدیل تحریک‌پذیری نورون‌های قشر حرکتی و تسهیل فرایندهای نوراپلاستیک می‌شود. این مدولاسیون الکتروفیزیولوژیک می‌تواند کارایی شبکه‌های کورتیکواسپاینال، کنترل حرکتی ارادی و پردازش‌های پیچیده حسی-حرکتی را ارتقا بخشد (۱۳،۱۴). موازی با این رویکرد، تحریک جریان پالسی فراجمجمه‌ای (tPCS)[۶]به‌عنوان مداخله‌ای نوظهور در حوزه نوروم‌ودولاسیون مطرح شده است که با اصلاح الگوهای نوسانی شبکه‌های مغزی و تقویت هم‌زمانی نورونی بر یکپارچگی سیستم‌های آوران و واوران اثرگذار است (۱۵،۱۶). با توجه به اینکه کنترل پاسچر حاصل تعامل پیچیده بین ورودی‌های بینایی، دهلیزی و پروپریوسپتیو و پردازش مرکزی در قشر حرکتی و ساختارهای زیرقشری است، مداخلاتی که بتوانند تحریک‌پذیری قشر حرکتی و کارایی مسیرهای عصبی–عضلانی را تعدیل کنند، از لحاظ نظری می‌توانند بر ثبات تعادلی نیز اثرگذار باشند؛ با وجود این، مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که عمده مطالعات صورت‌گرفته روی بیماران مبتلا به استئوآرتریت زانو، تمرکز خود را بر پیامدهایی نظیر مدیریت درد، عملکرد فیزیکی و حساسیت مرکزی معطوف کرده‌اند و بررسی اثرات این تحریکات بر شاخص‌های کینماتیکی و عینی کنترل پاسچر COP مغفول مانده یا به صورت پراکنده گزارش شده است؛ لذا با وجودپتانسیل‌های

---

۱ Knee Osteoarthritis

۲ Center of Pressure (COP)

3 Proprioceptive Deficit

4 Closed Kinetic Chain; CKC

۵ Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS)

۶ Transcranial Pulsed Current Stimulation (tPCS)

نظری موجود، شواهد متقن و منسجمی درباره نقش پروتکل‌های تحریک مغزی در بازسازی سازوکارهای کنترلی پاسچر در این جمعیت بالینی در دسترس نیست. با توجه به اینکه نقص در کنترل پاسچر یکی از پیامدهای کلیدی و ناتوان‌کننده در استئوآرتریت زانو محسوب می‌شود و نقش مستقیمی در افول عملکرد حرکتی این بیماران ایفا می‌کند، ضرورت یافتن مداخلات هم‌افزا دوچندان است. با وجود پتانسیل‌های نظری، تاکنون اثرات تعاملی پروتکل‌های ترکیبی تحریک غیرتهاجمی مغزی و تمرینات زنجیره حرکتی بسته بر شاخص‌های عینی نوسانات مرکز فشار COP به طور سیستماتیک واکاوی نشده است؛ ازاین‌رو مطالعه حاضر با هدف تعیین اثربخشی یک پروتکل ادغام‌یافته مشتمل بر تحریک‌های tDCS و tPCS به‌همراه تمرینات CKC بر ثبات پاسچر ایستا و مؤلفه‌های کینماتیکی مرکز فشار در زنان مبتلا به استئوآرتریت زانو طراحی و اجرا شد.

روش پژوهش

این مطالعه یک کارآزمایی بالینی تصادفی دوسویه‌کور با طرح پیش‌آزمون–پس‌آزمون بود. زنان مبتلا به استئوآرتریت زانو پس از احراز شرایط ورود و اخذ رضایت آگاهانه کتبی، به صورت تصادفی در سه گروه tDCS + CKC ، tPCS + CKC و Sham + CKC تخصیص یافتند. گروه‌های مداخله هفت جلسه تحریک غیرتهاجمی مغزی tDCS با شدت ۲ میلی‌آمپر و tPCS با شدت ۱ میلی آمپر به مدت ۲۰ دقیقه بر ناحیه قشر حرکتی اولیه (M1) دریافت کردند. سپس به مدت چهار هفته (سه جلسه در هفته، هر جلسه ۶۰ دقیقه) در تمرینات زنجیره حرکتی بسته شرکت کردند. گروه Shamمراحل مشابه نصب الکترود را بدون اعمال تحریک مؤثر طی کرد. شاخص‌های مرکز فشار و نوسانات پاسچر ایستا در شرایط چشم باز و چشم بسته قبل و پس از مداخله با استفاده از دستگاه فوت‌پرشر اندازه‌گیری شد. تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ با استفاده از تحلیل واریانس مختلط (بین‌گروهی-درون‌گروهی) انجام شد و سطح معناداری ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

جامعه آماری و نمونه‌ها

پس از اخذ تأییدیه اخلاق از کمیته اخلاق دانشگاه رازی، پژوهشگر با مراجعه به مراکز ثبت و ارزیابی پیشینه بیماران مبتلا به استئوآرتریت زانو در کلینیک بوستان شهرکرمانشاه و مطب شخصی روماتولوژیست همکار در این مطالعه، فرایند شناسایی و غربالگری بیماران را آغاز کرد. معیارهای ورود و خروج به متخصصان روماتولوژی معرفی شد و بیماران واجد شرایط پس از ارجاع پزشک متخصص به پژوهشگر، به صورت داوطلبانه برای شرکت در مطالعه دعوت شدند. درمجموع، ۱۰۰ بیمار در مرحله اولیه غربالگری قرار گرفتند که از این میان ۶۰ نفر واجد شرایط ورود به مطالعه تشخیص داده شدند. پس از توضیح کامل اهداف پژوهش و اخذ رضایت‌نامه آگاهانه کتبی، شرکت‌کنندگان به صورت تصادفی در گروه‌های مداخله تخصیص یافتند. در طول اجرای مداخله، شش نفر به دلایل تکمیل نکردن جلسات یا حضور نداشتن در ارزیابی پس‌آزمون از مطالعه خارج شدند و درنهایت داده‌های ۵۴ شرکت‌کننده (۱۸ نفر در هر گروه) در تحلیل نهایی استفاده شد. معیارهای ورود به مطالعه شامل سن ۴۰ تا ۷۰ سال، تشخیص بالینی استئوآرتریت زانو براساس معیارهای کالج روماتولوژی آمریکا، درجه II یا III براساس طبقه‌بندیKallgren–Lawrence ، درد مزمن زانو به مدت حداقل سه ماه با شدت حداقل ۴ در مقیاس بصری درد (VAS) و بیماران با سابقه جراحی زانو، دریافت تزریق داخل مفصلی طی سه ماه گذشته و ابتلا به بیماری‌های عصبی یا عضلانی مؤثر بر عملکرد حرکتی از مطالعه حذف شدند.

مداخلات مطالعه

الف) تحریک‌های غیرتهاجمی مغزی (tDCS و tPCS)

به‌منظور اجرای پروتکل مداخله، شرکت‌کنندگان ابتدا در جلسه‌ای توجیهی شرکت کردند تا با نحوه اعمال تحریک غیرتهاجمی مغز آشنا شوند. در این جلسه، دوزهای کوتاهی از تحریک به‌صورت آزمایشی اعمال شد تا هرگونه واکنش غیرطبیعی سیستم عصبی ارزیابی شود. چنانچه طی ۴۸ ساعت پس از جلسه توجیهی، علائمی نظیر سرگیجه یا حالت تهوع بروز می‌کرد، آزمودنی از روند پژوهش خارج می‌شد. همچنین به‌منظور کنترل متغیرهای مخدوش‌کننده، از شرکت‌کنندگان خواسته شد تا ۲۴ ساعت پیش از ارزیابی‌ها از انجام فعالیت‌های ورزشی سنگین و مصرف کافئین، و دو ساعت پیش از آزمون از مصرف مواد غذایی خودداری کنند. جلسات مداخله در محیط کنترل‌شده آزمایشگاه و در وضعیت نشسته روی صندلی راحتی انجام گرفت. مداخله شامل هفت روز متوالی تحریک بود (۱۷) که با استفاده از دستگاه NeuroStim2(ساخت شرکت مدینا طب گستر، ایران) اعمال شد. جریان الکتریکی از طریق دو الکترود کربنی (با ابعاد ۵×۴ سانتی‌متر؛ مساحت ۲۰ سانتی‌متر مربع) که درون پدهای اسفنجی قرار داشتند، منتقل شد. برای بهینه‌سازی هدایت الکتریکی، حدود ۱۰ میلی‌لیتر محلول نمک استاندارد NaCl با غلظت ۱۴۰ میلی‌مولار حل‌شده در آب (Milli-Q) استفاده شد؛ ضمن آنکه از اشباع بیش‌ازحد پدها به‌منظور جلوگیری از پراکندگی جریان و تغییر در توزیع آن خودداری شد. برای مکان‌یابی دقیق کورتکس، از یک کلاه استاندارد EEG با نشانه‌گذاری‌های ازپیش‌تعیین‌شده استفاده شد و الکترودها به‌وسیله نوارهای الاستیک تثبیت شدند. براساس گروه‌بندی تصادفی، آزمودنی‌ها یکی از مداخلات زیر را دریافت کردند: در گروه tPCS، الکترود آند روی قشر حرکتی (C3 یا C4 براساس سیستم بین‌المللی ۱۰-۲۰) در نیمکره مخالف پای درگیر، و الکترود کاتد روی شانه موافق قرار گرفت. در این گروه، جریان پالسی با شدت ۱ میلی‌آمپر و فرکانس ۵ هرتز به مدت ۲۰ دقیقه اعمال شد (۱۸). در گروه tDCS (تحریک ناحیهM1)، جای‌گذاری الکترودها مشابه گروه قبل بود و جریان مستقیم پیوسته (آنودال) با شدت ۲ میلی‌آمپر به مدت ۲۰ دقیقه در سکوت کامل کلامی اعمال شد (۱۹). درنهایت، برای گروه تحریک کاذب (Sham) از همان چیدمان الکترودی استفاده شد؛ با این تفاوت که جریان الکتریکی تنها در ۳۰ ثانیه ابتدایی به‌تدریج افزایش یافت تا صرفاً حس پوستی ناشی از تحریک تداعی شود و سپس جریان قطع شد تا اطمینان حاصل شود هیچ تحریک درمانی واقعی به قشر مغز اعمال نمی‌شود.



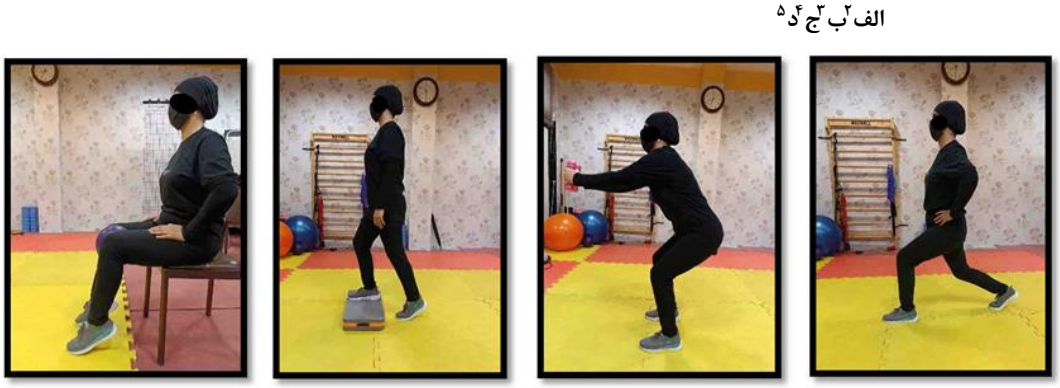
شکل ۱- نمونه‌ای از نحوه قرارگیری آزمودنی در حین اعمال تحریک‌های غیرتهاجمی مغزی (tDCS و tPCS)

Figure 1- Example of participant positioning during non-invasive brain stimulation (tDCS and tPCS)

ب) تمرینات زنجیره حرکتی بسته

در پژوهش حاضر، فرایند تخصیص شرکت‌کنندگان به گروه‌های مداخله (tDCS، tPCS و Sham)، با بهره‌گیری از روش تصادفی‌سازی بلوکی انجام پذیرفت تا سوگیری‌های احتمالی در توزیع نمونه‌ها به حداقل برسد. به‌منظور ارتقای اعتبار درونی تحقیق و اطمینان از همسانی گروه‌ها در مرحله پایه، متغیرهای دموگرافیک و آنتروپومتریک کلیدی شامل

سن، قد، وزن، شاخص توده بدنی[1] و همچنین سطح فعالیت بدنی معمول به دقت ارزیابی شدند (۲۱)؛ تحلیل‌های اولیه نشان داد که گروه‌ها پیش از مداخله از نظر این متغیرها کاملاً همگن بودند و تفاوت معناداری نداشتند. پروتکل تمرینات زنجیره حرکتی بسته که با هدف بازسازی الگوهای عملکردی، بهبود حس عمقی و افزایش ثبات مفصل زانو طراحی شده بود، پیش از فاز اجرایی توسط فیزیوتراپیست متخصص تأیید فنی شد (۲۴). تمامی جلسات مداخله در محیط کنترل‌شده آزمایشگاه و با نظارت مستقیم و مستمر متخصص تمرینات اصلاحی برای اطمینان از اجرای دقیق تکنیک‌ها و حفظ ایمنی آزمودنی‌ها برگزار شد. برنامه تمرینی به مدت چهار هفته و شامل دوازده جلسه (سه جلسه در هفته، هر جلسه ۶۰ دقیقه) سازمان‌دهی شد. برنامه تمرینی در سه فاز و به مدت‌زمان کلی ۶۰ دقیقه اجرا شد. فاز آماده‌سازی به مدت ۱۰ دقیقه شامل نرمش‌های عمومی و حرکات کششی پویا بود که با هدف تسهیل فراخوانی واحدهای حرکتی و افزایش دمای بافت انجام شد. فاز اصلی به مدت ۴۰ دقیقه به اجرای حرکات اختصاصی زنجیره حرکتی بسته، ازجمله مینی‌اسکات و استپ‌آپ، با تمرکز بر ارتقای کنترل حرکتی و ثبات پاسچر اختصاص داشت. در این فاز، اصل بارگذاری تدریجی با تنظیم شدت و دشواری تمرینات متناسب با توانایی‌های هر آزمودنی اعمال شد (۲۵). درنهایت، فاز بازگشت به وضعیت پایه به مدت ۱۰ دقیقه و با انجام کشش‌های ایستا به‌منظور تسهیل ریکاوری و کاهش احتمال بروز آسیب‌های ناشی از تمرین انجام گرفت. استفاده از تجهیزات استاندارد و محیطی یکسان برای تمامی گروه‌ها، قابلیت تکرارپذیری این پروتکل را در محیط‌های کلینیکی تضمین می‌کند.



شکل ۲- تصویری از یکی از شرکت‌کنندگان در حین اجرای نمونه‌ای از تمرینات زنجیره حرکتی بسته

Figure 2- An example of a participant performing closed kinetic chain exercises

1 BMI

۲. لانج قدامی

۳. مینی اسکوات

۴. بالا و پایین رفتن از استپ

۵. بالا آمدن روی پنجه پا با نگه داشتن توپ بین زانوها

جدول ۱- برنامه تمرینات زنجیره حرکتی بسته

Table 1- Closed kinetic chain exercise program

	تمرینات اجراشده Exercises Performed	هدف تمرین Exercise Objective	ست × تکرار Sets × Repetitions	نکات اجرایی Implementation Notes
هفته اول Week 1	• انقباض ایزومتریک عضله چهارسر • بالا بردن پنجه پا • نشستن و برخاستن از صندلی • مینی‌اسکوات • انتقال وزن دوپا به طرفین • ایستادن تاندم (پاشنه جلوی پنجه) با چشم باز • Isometric Quadriceps Contraction • Toe Raises • Chair Sit-to-Stand • Mini-Squats • Double-Leg Lateral Weight Shifting • Tandem Stance (Heel-to-Toe) with Eyes Open	فعال‌سازی اولیه و شروع تحریک حس عمقی Initial activation and initiation of proprioceptive stimulation	3 × 10 تمرینات تعادلی: Balance Exercise 3 × 30 (s)	• در انقباض چهارسر، زانو کاملاً صاف و پاشنه روی زمین باشد. • در مینی‌اسکوات، فلکشن زانو 45–30 درجه حفظ شود. • During quadriceps contraction, the knee should remain fully extended with the heel on the ground. • During mini-squats, knee flexion should be maintained at 30–45°.
هفته دوم Week 2	• انقباض ایزومتریک چهارسر • بالا بردن پاشنه پا • مینی‌اسکوات • بالا رفتن و پایین آمدن ازاستپ (قدامی) • ایستادن تک‌پا با چشم باز • مینی‌اسکوات روی سطح نیمه‌ناپایدار • Isometric Quadriceps Contraction • Heel Raises • Mini-Squats • Anterior Step-Up and Step-Down • Single-Leg Stance with Eyes Open • Mini-Squats on a Semi-Unstable Surface	افزایش کنترل پاسچر در شرایط ایستا Improvement of Postural Control Under Static Conditions	3 × 12 تمرینات تعادلی: Balance Exercise 3 × 30 (s)	در تک‌پا، فلکشن زانو ≥ 30 درجه. تنه کاملاً صاف حفظ شود. • During single-leg stance, knee flexion should be maintained at ≤30°. • The trunk should be kept upright
هفته سوم Week 3	• انقباض ایزومتریک چهارسر • بالا بردن پنجه پا • مینی‌اسکوات با شدت 10RM • بالا و پایین رفتن ازاستپ (قدامی و خلفی) • ایستادن تک‌پا با چشم بسته	افزایش چالش تعادلی و کنترل دینامیک Increasing Balance Challenge and Dynamic Control	3 × 12 تمرینات تعادلی: Balance Exercise 3 × 30 (s)	• در تمرین چشم بسته، حمایت ایمنی فراهم شود. • فلکشن زانو حداکثر تا 45 درجه. • During eyes-closed exercises, adequate

	• انتقال وزن جانبی همراه با مینی‌اسکوات • Isometric Quadriceps Contraction • Toe Raises • Mini-Squats at 10RM Intensity • Anterior and Posterior Step-Up and Step-Down • Single-Leg Stance with Eyes Closed • Lateral Weight Shifting with Mini-Squats			safety support should be provided. • Knee flexion should not exceed 45°.
هفته چهارم Week 4	• انقباض ایزومتریک چهارسر • بالا بردن پنجه پا • مینی‌اسکوات با شدت 10RM • بالا و پایین رفتن از پله جانبی • سر خوردن روی دیوار • لانچ قدامی • نگه‌داشت مینی‌اسکوات تک‌پا • پایین آمدن کنترل‌شده از پله با مکث 3 ثانیه • Isometric Quadriceps Contraction • Toe Raises • Mini-Squats at 10RM Intensity • Lateral Step-Up and Step-Down • Wall Slides • Anterior Lunges • Single-Leg Mini-Squat Hold • Controlled Step-Down with a 3-Second Pause	تقویت پیشرفته و بهبود کنترل پاسچر Advanced Strengthening and Improvement of Postural Control	3 × 10 تمرینات تعادلی: Balance Exercise 3 × 30 (s)	در وال اسلایدینگ و لانج، فلکشن زانو ≥ 45 درجه. زانو در راستای انگشت دوم پا قرار گیرد. • During wall slides and lunges, knee flexion should be maintained at ≤45°. • The knee should remain aligned with the second toe.

اندازه‌گیری شاخص مرکز فشار

به‌منظور ارزیابی توزیع فشار کف‌پایی، نیروی عمودی عکس‌العمل زمین و شاخص‌های نوسانات پاسچر، از دستگاه توزیع فشار کف‌پایی PT-Scan؛ پایا فناوران مشهد، ساخت ایران استفاده شد. این دستگاه دارای سکوی مسطح با ابعاد ۶۶×۵۷ سانتی‌متر مربع، مجهز به ۲۳۰۰ حسگر فعال و با فرکانس نمونه‌برداری ۱۶۵ هرتز است. سیستم‌های اندازه‌گیری فشار کف‌پایی به‌عنوان ابزار معتبر در تحلیل بیومکانیکی تعادل و مرکز فشار شناخته می‌شوند و در مطالعات مربوط به استئوآرتریت زانو به طور گسترده استفاده شده‌اند (۲۰،۲۲). با استفاده از نرم‌افزار اختصاصی دستگاه، داده‌های مربوط به توزیع فشار، نیروی عمودی عکس‌العمل زمین و نوسانات مرکز فشار استخراج شد. شاخص‌های COP به‌عنوان معیارهای عینی ارزیابی کنترل پاسچر ایستا و ثبات تعادلی در بیماران مبتلا به استئوآرتریت زانو کاربرد دارند (۲۰،۲۱،۲۳).

توزیع فشار در وضعیت ایستا

جمع‌آوری داده‌ها در وضعیت ایستاده دوپا انجام شد. آزمودنی‌ها با پای برهنه روی ناحیه مشخص‌شده دستگاه قرار گرفتند، بازوها در کنار بدن آویزان شد و فاصله پاها به عرض لگن تنظیم شد. به‌منظور کنترل اثر آزمون، از شرکت‌کنندگان خواسته شد در طول اجرای تست به یک نشانگر دایره‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر که در فاصله ۲ متری و متناسب با قد هر فرد روی دیوار نصب شده بود، نگاه کنند. هر آزمون به مدت ۲۰ ثانیه اجرا شد و سه تکرار با فاصله استراحت دو دقیقه‌ای بین هر تکرار انجام گرفت. میانگین سه تکرار به‌عنوان مقدار نهایی برای تحلیل آماری در نظر گرفته شد. پیش از هر مرحله اندازه‌گیری، دستگاه توسط مسئول آزمایشگاه کالیبره شد.

نوسانات مرکز فشار

برای تحلیل نوسانات پاسچر، آزمودنی‌ها به مدت ۳۰ ثانیه در وضعیت ایستاده دوپا و بدون حرکت اضافی روی سکوی دستگاه قرار گرفتند و داده‌های جابه‌جایی مرکز فشار با فرکانس نمونه‌برداری ۱۶۵ هرتز ثبت شد. از سیگنال خام مرکز فشار، پارامترهای زمانی–فضایی زیر استخراج شد:

۱. نوسانات مرکز فشار در راستای داخلی–خارجی:[1] شاخصی از تغییرات در صفحه فرونتال و کنترل جانبی تعادل.

۲. نوسانات مرکز فشار در راستای قدامی–خلفی:[2] نمایانگر کنترل پاسچر در صفحه ساژیتال.

۳. طول مسیر جابه‌جایی[3] مرکز فشار: مجموع جابه‌جایی‌های مرکز فشار در طول زمان که بیانگر میزان فعالیت سیستم کنترلی برای حفظ تعادل است.

۴. مساحت بیضی اطمینان ۹۵ درصد:[4] محدوده‌ای که ۹۵ درصد نوسانات مرکز فشار در آن قرار می‌گیرند و نشان‌دهنده دامنه کلی پراکندگی پاسچر است.

افزایش SDx وSDy ، طول مسیر و مساحت بیضی اطمینان، نشان‌دهنده کاهش ثبات تعادلی است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بیماران مبتلا به استئوآرتریت زانو به دلیل ضعف عضلانی، کاهش حساسیت گیرنده‌های حس عمقی و اختلال در یکپارچگی حسی–حرکتی، نوسانات COP بیشتری نسبت به افراد سالم دارند (۲۰،۲۱،۲۴)؛ بنابراین کاهش این شاخص‌ها پس از مداخله می‌تواند به‌عنوان شاخصی عینی از بهبود کنترل پاسچر و کارایی سیستم عصبی–عضلانی در نظر گرفته شود.



شکل ۳- تصویری از توزیع فشار کف‌پایی یکی از شرکت‌کنندگان در مطالعه

Figure 3- Plantar pressure distribution of a study participant

1 SDx
2 SDy
3 Path Length
4 Confidence Ellipse Area 95%

تجزیه و تحلیل آماری

تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPS نسخه ۲۷ انجام شد. پیش از اجرای آزمون‌های پارامتریک، نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون شاپیرو–ویلک بررسی شد. همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون لوین ارزیابی شد. به‌منظور بررسی اثر مداخله بر شاخص‌های مرکز فشار، از تحلیل واریانس مختلط با اندازه‌گیری مکرر[1] با طرح ۳×۲ استفاده شد؛ به گونه‌ای که عامل بین‌گروهی شامل سه سطح tDCS، tPCS و Sham و عامل درون‌گروهی شامل دو سطح (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) بود. در صورت نقض فرض کرویت، اصلاح گرین‌هاوس-گیزر اعمال شد. برای بررسی اثرات اصلی و تعامل گروه × زمان، مقادیر F، درجه آزادی (df)، سطح معناداری (P-value) و اندازه اثر[2] (η^2p) گزارش شد. در صورت مشاهده اثر معنادار، مقایسه‌های زوجی با استفاده از آزمون تعقیبی بونفرونی انجام شد. سطح معناداری آماری در تمامی آزمون‌ها ۰/۰۵≥ p در نظر گرفته شد.

نتایج

ویژگی‌های دموگرافیک و شاخص‌های پایه شرکت‌کنندگان در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین سه گروه tPCS، tDCS و Sham از نظر سن، شاخص توده بدنی و سایر متغیرهای پایه تفاوت معناداری وجود نداشت (۰/۰۵< p)، که بیانگر همگنی اولیه گروه‌ها پیش از مداخله است.

جدول ۲- توصیف ویژگی‌های دموگرافیک شرکت‌کنندگان در سه گروه مطالعه (میانگین ± انحراف معیار) (n = 54)

Table 2- Demographic characteristics of participants in the three study groups (mean ± standard deviation) (n = 54)

گروه group	سن (سال) Age (years) انحراف استاندارد± میانگین Mean± Std. Deviation	قد (سانتی متر) Height (cm) میانگین±انحراف استاندارد Mean± Std. Deviation	وزن (کیلوگرم) Weight (kg) میانگین±انحراف استاندارد Mean± Std. Deviation	شاخص توده بدنی (کیلوگرم بر مترمربع) BMI (kg/m2) میانگین±انحراف استاندارد Mean± Std. Deviation
تمرین ورزشی + (tDCS) (n=18) Exercise Training + tPCS (n=18)	53.00 ± 9.00	161.00 ± 5.00	73.00 ± 7.00	29.56 ± 4.52
تمرین ورزشی + (tPCS) (n=18) Exercise Training + tPCS (n=18)	56.00 ± 7.00	162.00 ± 6.00	72.00 ± 11.00	32.27 ± 2.46
تمرین ورزشی + Sham (n=18) Exercise Training + Sham (n=18)	55.00 ± 8.00	160.00 ± 6.00	74.00 ± 8.00	31.88 ± 3.42

۱ Mixed Repeated Measures ANOVA

۲ Partial Eta Squared

سطح معناداری p p-value	0.66	0.11	0.55	0.22

شاخص‌های مرکز فشار در وضعیت چشم باز

براساس نتایج تحلیل شاخص‌های مرکز فشار در وضعیت ایستاده با چشم باز در شاخص طول مسیر جابه‌جایی مرکز فشار، اثر اصلی زمان ($F(۱،۵۱)=۲۲۰۲/۰۹$ ، $p<۰/۰۰۱$، $\eta^2p=۰/۹۹۸$)، اثر اصلی گروه ($F(۲،۵۱)=۱۱۲۳/۶۵$ ،$p<۰/۰۰۱$، $\eta^2p=۰/۹۷۸$) و اثر تعامل گروه × زمان ($F(۲،۵۱)=۶/۲۹$ ،$p=۰/۰۰۴$، $\eta^2p=۰/۱۹۸$) معنادار گزارش شد. درمقابل نوسانات داخلی–خارجی (SDx)، در اثر اصلی زمان معنادار بود ($F(۱،۵۱)=۱۰/۹۴$ ،$p=۰/۱۷۳$، $\eta^2p= ۰/۱۷۷$)، اما در اثر اصلی گروه ($p=۰/۸۳۹$) و تعامل گروه × زمان ($p=۰/۴۹۱$) معنادار نبود. همچنین نوسانات قدامی–خلفی (SDy)، در اثر اصلی زمان ($F(۱،۵۱)=۰/۹۰$ ، $p=۰/۳۴۶$)، اثر اصلی گروه ($F(۲،۵۱)= ۲/۴۰$ ، $p= ۰/۱۰۰$) و تعامل گروه × زمان ($F(۲،۵۱)=۲/۶۵$ ،$p=۰/۰۸۰$) به سطح معناداری آماری نرسیدند.

جدول ۳- نتایج تحلیل واریانس مختلط (گروه × زمان) برای شاخص‌های مرکز فشار در وضعیت چشم باز (n = 54)

Table 3- Results of mixed ANOVA (group × time) for center of pressure indices in the eyes-open condition (n = 54)

وضعیت Status	متغیر Variable	تحلیل واریانس Analysis of Variance	df1	df2	F	سطح معناداری P P-value	مربع اتا جزئی η^2p Partial Eta Squared
جفت پا با چشمان باز در حالت استاتیک Double-Leg Static Stance with Eyes Open	نوسانات قدامی خلفی (SDy) Anteroposterior Sway (SDy)	زمان	1	51	0.90	0.346	0.017
		گروه Group	2	51	2.40	0.100	0.086
		گروه*زمان Group × Time	2	51	2.65	0.080	0.094
	نوسانات داخلی خارجی (SDx) Mediolateral Sway (SDx)	زمان	1	51	10.94	0.173	0.177
		گروه	2	51	1.79	0.839	0.028
		گروه*زمان Group × Time	2	51	0.18	0.491	0.007
	طول مسیر جابه جایی مر کز فشار Center of Pressure (CoP) Path Length	زمان	1	51	222.09	<0.001	0.998
		گروه Group	2	51	1123.65	<0.001	0.978
		گروه*زمان Group × Time	2	51	6.29	0.004	0.198
	مساحت بیضی اطمینان ٪95 مرکز فشار 95% Confidence Ellipse Area of the Center of Pressure (CoP)	گروه Group	1	51	625.99	<0.001	0.93
		زمان	2	51	0.92	0.157	0.017
		گروه*زمان Group × Time	2	51	0.70	0.492	0.013

به طور کلی، نتایج نشان داد که در وضعیت چشم باز، تغییرات معناداری در طول زمان برای برخی شاخص‌های مرکز فشار مشاهده شد؛ به‌ویژه در طول مسیر جابه‌جایی مرکز فشار که تعامل گروه × زمان نیز معنادار بود. این یافته نشان می‌دهد که الگوی تغییر این شاخص در بین گروه‌ها متفاوت بود؛ در حالی‌که در سایر شاخص‌ها تفاوت بین‌گروهی مشاهده نشد.

شاخص‌های مرکز فشار در وضعیت چشم بسته

نتایج مربوط به وضعیت چشم بسته در جدول (۴) ارائه شده است. در فاصله اطمینان ۹۵ درصد مرکز فشار، اثر اصلی زمان معنادار بود ($F(۱،۵۱)=۶۵۹/۹۹$ ، $p<۰/۰۰۱$ ، $\eta^2p=۰/۹۳۰$)؛ در حالی که اثر اصلی گروه ($F(۲،۵۱)=۰/۴۵$ ، $p=۰/۶۳۹$) و تعامل گروه × زمان (F (۲،۵۱)=۰/۵۱ ، $p=۰/۶۰۶$) معنادار نبود. در شاخص طول مسیر جابه‌جایی مرکز فشار، اثر اصلی زمان معنادار گزارش شد ($p<۰/۰۵$)، اما اثر اصلی گروه و تعامل گروه × زمان به سطح معناداری آماری نرسیدند ($p>۰/۰۵$). در نوسانات داخلی–خارجی (SDx) اثر اصلی زمان معنادار بود ($p<۰/۰۵$)؛ در حالی که اثر اصلی گروه و تعامل گروه × زمان معنادار نبودند ($p>۰/۰۵$) در نوسانات قدامی–خلفی (SDy)، اثر اصلی زمان، اثر اصلی گروه و تعامل گروه × زمان تفاوت معناداری نشان ندادند. ($p>۰/۰۵$)

جدول ۴- نتایج تحلیل واریانس مختلط (گروه × زمان) برای شاخص‌های مرکز فشار در وضعیت چشم بسته(n =54)

Table 4- Results of mixed ANOVA (group × time) for center of pressure indices in the eyes-closed condition (n =54)

وضعیت Status	متغیر Variable	تحلیل واریانس Analysis of Variance	df1	df2	F	سطح معناداری P P-value	مربع اتا جزئی η^2p Partial Eta Squared
جفت پا با چشمان بسته در حالت استاتیک Double-Leg Static Stance with Eyes Close	نوسانات قدامی خلفی (SDy) Anteroposterior Sway (SDy)	زمان Time	1	51	0.92	0.34	0.02
		گروه Group	2	51	0.63	0.43	0.01
		گروه*زمان Group × Time	2	51	1.12	0.30	0.02
	نوسانات داخلی خارجی (SDx) Mediolateral Sway (SDx)	زمان Time	1	51	1.05	<0.001	0.02
		گروه Group	2	51	0.20	0.65	0.05
		گروه*زمان Group × Time	2	51	2.34	0.13	0.05
	طول مسیر جابه جایی مر کز فشار Center of Pressure (CoP) Path Length	زمان Time	1	51	8.00	<0.001	0.00
		گروه Group	2	51	0.85	0.36	0.02
		گروه*زمان Group × Time	2	51	1.39	0.43	0.03
		زمان Time	1	51	695.99	<0.001	0.930

	مساحت بیضی اطمینان95% مرکز فشار 95% Confidence Ellipse Area of the Center of Pressure (CoP)	گروه Group	2	51	0.45	0.639	0.017
		گروه*زمان Group × Time	2	51	0.51	0.606	0.019

نتایج نشان داد که در وضعیت چشم بسته، اثر اصلی زمان برای مساحت بیضی اطمینان ۹۵ درصد مرکز فشار معنادار بود ($p<۰/۰۰۱$)؛ در حالی که اثر اصلی گروه و تعامل گروه × زمان معنادار نبود ($p>۰/۰۵$). همچنین در سایر شاخص‌های مرکز فشار تفاوت معناداری بین گروه‌ها یا در تعامل گروه × زمان مشاهده نشد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییرات ایجادشده در کنترل پاسچر طی دوره مداخله، مستقل از نوع تحریک مغزی بود.

بحث و نتیجه گیری

هدف این پژوهش بررسی اثر پروتکل ترکیبی تحریک‌های غیرتهاجمی مغزی و تمرینات زنجیره حرکتی بسته بر شاخص‌های مرکز فشار در زنان مبتلا به استئوآرتریت زانو بود. نتایج نشان داد که مداخله انجام‌شده با بهبود کلی کنترل پاسچر همراه بود؛ به طوری که اثر اصلی زمان در برخی شاخص‌های مرکز فشار، به‌ویژه مساحت بیضی اطمینان ۹۵ درصد و طول مسیر جابه‌جایی مرکز فشار، معنادار بود؛ با این حال، در اغلب متغیرها تعامل گروه × زمان معنادار نبود و تفاوت مشخصی بین گروه‌های تحریک مشاهده نشد. تنها در شاخص طول مسیر جابه‌جایی مرکز فشار در وضعیت چشم باز، تعامل معناداری مشاهده شد که نشان‌دهنده تفاوت در الگوی تغییر این متغیر بین گروه‌ها است. به طور کلی، این یافته‌ها نشان می‌دهد که بهبود کنترل پاسچر در این بیماران بیشتر تحت‌تأثیر اجرای تمرینات زنجیره حرکتی بسته بوده و نقش افزایشی تحریک‌های غیرتهاجمی مغزی محدود یا وابسته به شرایط خاص است.

تحلیل مکانیکی و عصبی-عضلانی تمرینات زنجیره حرکتی بسته بر پایداری قامتی

یافته‌های پژوهش حاضر به‌روشنی مؤید آن است که اجرای پروتکل ساختارمند تمرینات زنجیره حرکتی بسته، به طور معنادار موجب تعدیل شاخص‌های نوسان مرکز فشار و ارتقای سطح کنترل پاسچر در زنان مبتلا به استئوآرتریت زانو می‌شود. در تبیین این یافته باید توجه داشت که در بیماران مبتلا به استئوآرتریت، تخریب پیش‌رونده غضروف و تغییرات پاتولوژیکِ بافت‌های اطراف مفصل، منجر به اختلال در عملکرد گیرنده‌های مکانیکی[1]و افت شدید بازخوردهای حس عمقی می‌شود؛ پدیده‌ای که پیامد مستقیم آن افزایش نوسانات پاسچرال و بی‌ثباتی مفصلی است. در این راستا، تمرینات زنجیره حرکتی بسته با ایجاد فشار محوری[2]و شبیه‌سازی شرایط تحمل وزن،[3]نقش بی‌بدیلی در جبران این نقایص ایفا می‌کنند. یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های توجیه‌کننده این اثربخشی، تسهیل هم‌انقباضی[4]عضلات آگونیست و آنتاگونیست (به‌ویژه فعال‌سازی هم‌زمان عضلات چهارسران و همسترینگ) است. این هم‌انقباضی کنترل‌شده، نیروهای برشی[5]مخرب واردشده به مفصل زانو را کاهش می‌دهد و ثبات دینامیک مفصل را به طور چشمگیری ارتقا می‌بخشد. این یافته‌ها با

1 Mechanoreceptors
2 Axial Loading
3 Weight-Bearing
4 Co-Contraction
5 Shear Forces

نتایج مطالعات پیشین که برتری مداخلات زنجیره بسته را در مقایسه با الگوهای زنجیره باز[1]گزارش کردند، کاملاً همسوست (۲۶). برتری تمرینات زنجیره حرکتی بسته ناشی از آن است که درگیری هم‌زمان چندین مفصل در الگوهای حرکتی بسته، موجب تحریک گسترده‌تر مسیرهای آوران حسی می‌شود و فرایند یکپارچگی حسی-حرکتی[2]را در سیستم عصبی مرکزی تسریع می‌کند. درنهایت، این تطابق بهینه عصبی-عضلانی نه‌تنها نوسانات مرکز فشار را مهار می‌کند، بلکه با ایجاد استراتژی‌های جبرانی کارآمد، کنترل قامتی را بهبود می‌بخشد و خطر سقوط را که یکی از پیامدهای خطرناک و شایع در این جمعیت بالینی است، کاهش می‌دهد (۲۵).

تبیین اثرات تعدیل‌کننده عصبی و چالش‌های تعامل آن با تمرینات ورزشی

یافته‌های پژوهش حاضر حاکی از آن است که در تحلیل‌های بین‌گروهی، برتری معناداری به نفع مداخلات ترکیبی (تحریک مغزی همراه با تمرین) نسبت به تمریناتزنجیره حرکتی بسته مشاهده نشد، اما بهبود چشمگیر درون‌گروهی در تمامی گروه‌ها، ظرفیت‌های بالقوه این مداخلات را برجسته می‌سازد. از منظر عصب‌شناختی، تحریک‌های غیرتهاجمی مغزی با هدف قرار دادن قشر حرکتی اولیه (M1)، پتانسیل غشای نورون‌ها را تعدیل می‌کنند و با تسهیل فرایندهای نوروپلاستیسیته، بهینه‌سازی شبکه‌های یکپارچگی حسی-حرکتی را به همراه دارند. این مکانیسم‌ها با شواهد پیشین همخوانی دارند که نشان داده‌اند اعمال تحریک جریان مستقیم فراجمجمه‌ای، از طریق فعال‌سازی مسیرهای نزولی کنترل درد و ارتقای تحریک‌پذیری قشری-نخاعی[3] بستر فیزیولوژیک مناسبی را برای بهبود عملکردهای حرکتی در بیماران فراهم می‌آورد (۱۷)؛ با وجود این، فقدان تفاوت بارز بین‌گروهی در مطالعه حاضر را می‌توان از دو منظر متدولوژیک و فیزیولوژیک تبیین کرد: نخست آنکه، تمرینات زنجیره حرکتی بسته (به‌عنوان مداخله پایه) احتمالاً اثربخشی مکانیکی و عصبیِ بسیار زیادی داشته است و با ایجاد اثر سقف[4] فضای محدودی را برای بروز تغییراتِ افزوده[5]ناشی از تحریک مغزی باقی گذاشته است؛ دوم آنکه، دوره کوتاه‌مدت مداخله (چهار هفته) ممکن است برای ایجاد تطابق‌های ساختاری پایدار در سطح کورتکس مغز کافی نبوده باشد؛ بنابراین تحریک مغزی به‌عنوان رویکرد مکملِ نویدبخش تأیید می‌شود، اما کشف دقیق اثرات هم‌افزایی[6]آن، مستلزم طراحی کارآزمایی‌هایی با دوره‌های مداخله طولانی‌تر، بررسی دوز-پاسخ[7]تحریکات و بهره‌گیری از ارزیابی‌های دقیق‌تر عصب‌شناختی در مطالعات آتی است.

تحلیل مکانیسم‌های وزن‌دهی حسی و غلبه بینایی در کنترل پاسچر

در شرایط چشم‌باز، سیستم کنترل پاسچر به‌شدت بر مکانیسم‌های یکپارچگی حسی متکی است؛ جایی که سیستم بینایی به‌عنوان قدرتمندترین و غالب‌ترین منبع اطلاعات فضایی، نقش محوری در تنظیم تعادل ایفا می‌کند. براساس پارادایم «وزن‌دهی مجدد حسی»[8]، در بیماران مبتلا به استئوآرتریت زانو که گیرنده‌های مفصلی[9]آن‌ها دچار تخریب پیش‌رونده شده است، سیستم عصبی مرکزی به طور جبرانی اتکای خود را به ورودی‌های بینایی افزایش داده و وابستگی به اطلاعات مختل‌شده پروپریوسپتیو و دهلیزی را کاهش می‌دهد (۲۰،۲۱). با در نظر گرفتن این استراتژی جبرانی، می‌توان تبیین کرد که چرا اثرات تعدیل‌کننده ناشی از تحریک‌های غیرتهاجمی مغزی، در شرایط چشم‌باز به طور مجزا در شاخص‌های

---

1 Open Kinetic Chain
2 Sensorimotor Integration
3 Corticospinal excitability
4 Ceiling Effect
5 Add-on Effects
6 Synergistic Effects
7 Dose-Response
8 Sensory Reweighting
9 Mechanoreceptors

مرکز فشار بازتاب نیافته است (۱۷). درواقع، تحریک کورتکس حرکتی (M1) پتانسیل تسهیل مسیرهای قشری-نخاعی را دارد، اما حضور ورودی‌های قدرتمند بینایی، «اثر پوششی»[1] ایجاد می‌کند و مانع از بروز تفاوت‌های ظریف ناشی از تحریکات مرکزی افزوده بر نوسانات پاسچرال می‌شود. این یافته با نتایج مطالعه آسار و همکاران (۲۰۲۰) همسوست که نشان دادند در حضور فیدبک‌های بینایی کامل، اثر مداخلات عصبی-عضلانی بر پایداری ایستا ممکن است به پایداری اشباع‌شده[2]منجر شود و تفاوت‌های بین‌گروهی را پنهان کند (۲۴). در پژوهش حاضر نیز فقدان تعامل معنادار گروه در زمان برای شاخص‌های انحراف معیار جابه‌جایی مرکز فشار (SDx و SDy) در شرایط بینایی طبیعی، به‌روشنی مؤید همین پدیده است. این نتایج نشان می‌دهد که سیستم کنترل پاسچر با اتکا به فیدبک‌های بینایی توانسته ثبات نسبی خود را حفظ کند و بهبودهای ساختاری مشاهده‌شده، عمدتاً ریشه در اثربخشی مکانیکی تمرینات زنجیره حرکتی بسته دارد. این تمرینات با تقویت هم‌انقباضی عضلات و ارتقای هماهنگی عصبی-عضلانی، پایه‌ای مستحکم برای ثبات مفصلی فراهم آورده‌اند؛ در حالی که تحریک مغزی در حضور این مداخله تمرینی قدرتمند و فیدبک غالب بینایی، اثر افزایشی درخورتوجهی به همراه نداشته است. این استنتاج با شواهد مستحکم پیشین مشابه با گزارش وانگ و همکاران همسوست؛ زمانی که مداخله فیزیکی قدرتمندی (مانند تمرینات زنجیره بسته) اجرا می‌شود، بهبودهای محیطی حاصل از آن می‌تواند بر اثرات مدولاسیون مرکزی پیشی بگیرد (۲۵).

واکاوی کنترل پاسچر در شرایط حذف بینایی و محدودیت‌های مداخلات ترکیبی

در شرایط حذف بینایی، سیستم کنترل پاسچر با چالش حسی جدی روبه‌رو می‌شود؛ زیرا وزن‌دهی حسی به‌ناچار به سمت سیستم‌های دهلیزی و به‌ویژه پروپریوسپتیو تغییر می‌یابد. در این وضعیت، استراتژی‌های تعادلی به‌شدت به اطلاعات آوران از گیرنده‌های مفصلی و دوک‌های عضلانی پیرامون زانو وابسته می‌شوند (۲۰،۲۱)؛ با این حال، در بیماران مبتلا به استئوآرتریت، نقص در عملکرد مکانورسپتورها منجر به افت کیفیت فیدبک‌های حیاتی و افزایش تصاعدی نوسانات مرکز فشار می‌شود (۲۴). از منظر تئوریک، حذف بینایی باید بستر مناسبی را برای ظهور اثرات تحریک‌های غیرتهاجمی مغزی فراهم می‌آورد. این فرضیه با یافته‌های پژوهش آسار و همکاران همسوست که گزارش کردند مداخلات عصبی-عضلانی در شرایط چالش‌برانگیز حسی، اثرات بارزتری بر پایداری بدن دارند (۲۴)؛ با وجود این، دست‌نیافتن به تعامل معنادار بین‌گروهی در مطالعه حاضر، فرضیه اثر اشباع ناشی از تمرینات را تقویت می‌کند. به نظر می‌رسد، پروتکل تمرینات زنجیره حرکتی بسته به قدری در بهبود ثبات مکانیکی مفصل قدرتمند عمل کرده که اثرات افزایشی تحریک مغزی را تحت‌تأثیر قرار داده است. این پدیده در مطالعه وانگ و همکاران نیز مشاهده شد؛ جایی که تمرینات فیزیکیِ شدید توانستند بخش بزرگی از تغییرات عملکردی را به خود اختصاص دهند و نقش مداخلات جانبی را در کوتاه‌مدت کمرنگ کنند (۲۵). علاوه بر این، حساسیت محدود شاخص‌های تعادل ایستا و محدودیت در توان آماری[3]ناشی از اندازه نمونه، ممکن است مانع از شناسایی تفاوت‌های ظریف بین‌گروهی شده باشد؛ با این حال، بهبود معنادار درون‌گروهی نشان‌دهنده آن است که مداخلات ترکیبی مسیری درست را در بازیابی پایداری پاسچرال طی کرده‌اند. در تبیین این مطلب، مشابه با نتایج برخی مطالعات کلاسیک در حوزه مدولاسیون عصبی، به نظر می‌رسد برای خروج از اثر سقف، نیاز به طراحی تمرینات چالش‌برانگیزتر (مانند تمرین بر روی سطوح ناپایدار) در ترکیب با دوره‌های طولانی‌ترِ تحریک مغزی است تا تفاوت‌های بین‌گروهی فرصت ظهور پیدا کنند.

1 Masking Effect
2 Saturated Stability
۳ Statistical Power

پیام مقاله

این مطالعه تأیید می‌کند که تمرینات زنجیره حرکتی بسته، مداخله‌ای پایه و بسیار مؤثر برای ارتقای کنترل پاسچر و تعادل در زنان مبتلا به استئوآرتریت زانو است. تحریک غیرتهاجمی مغزی اثرات بالقوه تعدیل‌کننده عصبی بر عملکرد عصبی-عضلانی نشان می‌دهد، اما مزایای درمانی افزوده آن فراتر از تمرینات ساختارمند، در شرایط تجربی حاضر محدود بود. بهبودهای یکسانی که در تمامی گروه‌ها مشاهده شد، بر نقش اجتناب‌ناپذیر برنامه‌های تمرینی هدفمند در توانبخشی ارتوپدی تأکید می‌ورزد؛ درنتیجه تمرینات زنجیره حرکتی بسته باید به‌عنوان استراتژی بالینی اصلی در بازسازی وضعیت پاسچرال باقی بمانند و از تحریک غیرتهاجمی مغزی می‌توان به‌عنوان یک روش مکمل و هوشمندانه برای بهبود هرچه بیشتر یکپارچگی حسی-حرکتی در محیط‌های بالینی بهره جست.

ملاحظات اخلاقی

این کارآزمایی بالینی با پایبندی دقیق به اصول اخلاقی بیانیه هلسینکی انجام شد. پروتکل مطالعه بازبینی جامع شد و به صورت رسمی توسط کمیته اخلاق دانشگاه رازی با کد شناسه IR.RAZI.REC.1403.014 تأیید شد. علاوه بر این، به‌منظور تضمین شفافیت روش‌شناختی، این کارآزمایی در مرکز ثبت کارآزمایی‌های بالینی ایران با شماره ثبت IRCT20240911063011N1 به ثبت رسید. پیش از ورود به مطالعه و اجرای هرگونه فرایند پژوهشی، رضایت‌نامه کتبی و آگاهانه از تمامی شرکت‌کنندگان دریافت شد تا از درک کامل اهداف مطالعه و داوطلبانه بودن مشارکت آن‌ها اطمینان حاصل شود.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در انجام این پژوهش مشارکت داشتند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از تمامی شرکت‌کنندگان در این پژوهش و همچنین مسئولان کلینیک درمانی بوستان و آزمایشگاه دانشکده علوم ورزشی دانشگاه رازی که در اجرای این مطالعه همکاری داشتند، صمیمانه قدردانی می‌کنند.

منابع

1. Abramoff B, Caldera FE. Osteoarthritis: pathology, diagnosis, and treatment options. Med Clin North Am. 2020;104(2):293-311. https://doi.org/10.1016/j.mcna.2019.10.007
2. Katz JN, Arant KR, Loeser RF. Diagnosis and treatment of hip and knee osteoarthritis: a review. JAMA. 2021;325(6):568-78. https://doi.org/10.1001/jama.2020.22171
3. Reid KF, Price LL, Harvey WF, Driban JB, Hau C, Fielding RA, et al. Muscle power is an independent determinant of pain and quality of life in knee osteoarthritis. Arthritis Rheumatol. 2015;67(12):3166-73. https://doi.org/10.1002/art.39336
4. Davison MJ, Maly MR, Keir PJ, Hapuhennedige SM, Kron AT, Adachi JD, et al. Lean muscle volume of the thigh has a stronger relationship with muscle power than muscle strength in women with knee osteoarthritis. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2017;41:92-7. https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2016.11.005

5. Creaby MW, Wrigley TV, Lim BW, Hinman RS, Bryant AL, Bennell KL. Self-reported knee joint instability is related to passive mechanical stiffness in medial knee osteoarthritis. BMC Musculoskelet Disord. 2013;14:326. https://doi.org/10.1186/1471-2474-14-326

6. Felson DT, Niu J, McClennan C, Sack B, Aliabadi P, Hunter DJ, et al. Knee buckling: prevalence, risk factors, and associated limitations in function. Ann Intern Med. 2007;147(8):534-40. https://doi.org/10.7326/0003-4819-147-8-200710160-00005

7. Lawson T, Morrison A, Blaxland S, Wenman M, Schmidt CG, Hunt MA. Laboratory-based measurement of standing balance in individuals with knee osteoarthritis: a systematic review. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2015;30(4):330-42. https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2015.02.011

8. Turcot K, Aissaoui R, Boivin K, Pelletier M, Hagemeister N, de Guise JA. Evaluation of unipodal stance in knee osteoarthritis patients using knee accelerations and center of pressure. Osteoarthritis Cartilage. 2011;19(3):281-6. https://doi.org/10.1016/j.joca.2010.12.007

9. Chaharmahali L, Gandomi F, Yalfani A. The effect of self-reported knee instability on plantar pressure and postural sways in women with knee osteoarthritis. J Orthop Surg Res. 2021;16:677. https://doi.org/10.1186/s13018-021-02823-6

10. Masouros SD, Bull AMJ, Amis AA. Biomechanics of the knee joint. Orthop Trauma. 2010;24(2):84-91. https://doi.org/10.1016/j.mporth.2010.03.005

11. Lin DH, Lin YF, Chai HM, Han YC, Jan MH. Comparison of proprioceptive functions between computerized proprioception facilitation exercise and closed kinetic chain exercise in patients with knee osteoarthritis. Clin Rheumatol. 2007;26:520-528. https://doi.org/10.1007/s10067-006-0324-0

12. Susanto T, Gunardi S. Closed kinetic chain exercise affects reduction in knee joint pain levels in elderly with osteoarthritis. J Complement Nurs. 2022;1(2):32-45.

13. Ke Y, Liu S, Chen L, Wang X, Ming D. Lasting enhancements in neural efficiency by multi-session transcranial direct current stimulation during working memory training. NPJ Sci Learn. 2023;8(1):48. https://doi.org/10.1038/s41539-023-00200-y

14. Ljubisavljevic M, Maxood K, Bjekic J, Oommen J, Nagelkerke N. Long-term effects of repeated prefrontal cortex transcranial direct current stimulation on food craving in normal and overweight young adults. Brain Stimul. 2016;9(6):826-33. https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.07.002

15. Wang WJ, Zhong YB, Zhao JJ, et al. Transcranial pulse current stimulation improves the locomotor function in a rat model of stroke. Neural Regen Res. 2021;16(7):1229-35. https://doi.org/10.4103/1673-5374.301018

16. Vasquez A, Malavera A, Doruk D, Morales-Quezada L, Carvalho S, Leite J, et al. Duration dependent effects of transcranial pulsed current stimulation indexed by electroencephalography. Neuromodulation. 2016;19(7):679-88. https://doi.org/10.1111/ner.12457

17. Wu YL, Luo Y, Yang JM, Wu YQ, Zhu Q, Li Y, et al. Effects of transcranial direct current stimulation on pain and physical function in patients with knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. BMC Musculoskelet Disord. 2024;25:703. https://doi.org/10.1186/s12891-024-07805-3

18. Lima VB, Silva CAM, da Silva SGD, Macedo LB, de Souza MC, Lins CAA, et al. Transcranial direct current stimulation combined with physical exercise in knee osteoarthritis: a protocol for a randomised controlled clinical trial. BMJ Open. 2025;15(9):e100229. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2025-100229

19. Cutts S, Sack AT. tDCS for pain management in knee osteoarthritis: a plea for noninvasive brain stimulation techniques in neuromusculoskeletal rehabilitation. Neurophysiol Clin. 2023;53(6):102922. https://doi.org/10.1016/j.neucli.2023.102922

20. Zhang X, Wang D, Song Q, Luo X, Ge Y, Shen P, et al. Effects of tDCS combined with TENS in relieving pain and improving gait patterns during stepping over obstacles among older adults with knee osteoarthritis. Front Sports Act Living. 2025;7:1631357. https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1631357

21. Na A, Buchanan TS. Validating wearable sensors using self-reported instability among patients with knee osteoarthritis. PM R. 2021;13(2):119-27. https://doi.org/10.1002/pmrj.12393

22. Nie Q, He F, Dong L, Lin X, Lin J, Wang Y, et al. Effects of transcranial direct current stimulation combined with acupuncture therapy on brain network functional connectivity in patients with knee osteoarthritis: a single-center randomized controlled trial. J Neuroeng Rehabil. 2025;22:160. https://doi.org/10.1186/s12984-025-01692-y

23. Adams W, Idnani S, Kim J. Transcranial direct current stimulation for orthopedic pain: a systematic review with meta-analysis. Brain Sci. 2024;14(1):66. https://doi.org/10.3390/brainsci14010066

24. Assar S, Gandomi F, Mozafari M, Sohaili F. The effect of total resistance exercise vs aquatic training on self-reported knee instability, pain, and stiffness in women with knee osteoarthritis: a randomized controlled trial. BMC Sports Sci Med Rehabil. 2020;12:27. https://doi.org/10.1186/s13102-020-00175-y

25. Wang X, Chen Z, Liang Y, Su H, Wang T, Lv Y, et al. Effects of exercise on balance function in people with knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. Healthcare (Basel). 2025;13(11):1312. https://doi.org/10.3390/healthcare13111312

26. Kang J, Lee JY, Park IB. Open versus closed kinetic chain: exercise effects on center of pressure and Y-balance in middle-aged women with knee osteoarthritis—a randomized controlled trial. Healthcare (Basel). 2025;13(17):2173. https://doi.org/10.3390/healthcare13172173