چهارمین کنفرانس بین‌المللی دانشجویان
4th International Conference form
Students of Sports Sciences
and Physical Education
علوم ورزشی و تربیت بدنی
www.sport.cdsts.ir

تأثیر تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات (Micro-movements) بر حس عمقی و کنترل پاسچر در سالمندان

سمیه حسنی

کارشناسی ارشد آسیب شناسی و حرکات اصلاحی دانشگاه آزاد کرج، nimrooz60@gmail.com

چکیده

هدف پژوهش: هدف از این پژوهش بررسی تأثیر تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات بر حس عمقی مفاصل و کنترل پاسچر در سالمندان بود. با افزایش سن، ضعف در عملکرد عضلات عمقی، کاهش بازخوردهای عصبی–عضلانی و افت تعادل از عوامل اصلی سقوط در سالمندان محسوب می‌شوند. ازاین‌رو، تمرینات میکروحرکتی به‌عنوان رویکردی نوین برای بازآموزی کنترل عصبی–عضلانی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

روش پژوهش: پژوهش حاضر از نوع نیمه‌آزمایشی با طرح پیش‌آزمون–پس‌آزمون و گروه کنترل بود. جامعه‌ی آماری شامل سالمندان ۶۵ تا ۷۵ سال فعال شهر مشهد بود که به‌صورت داوطلبانه در برنامه شرکت کردند. از میان آنان، ۳۰ نفر به‌صورت تصادفی به دو گروه آزمایش و کنترل تقسیم شدند. گروه آزمایش طی ۸ هفته (سه جلسه در هفته، هر جلسه ۶۰ دقیقه) تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات شامل حرکات ظریف مفصلی، انقباضات ایزومتریک کم‌شدت و تمرینات کنترل ثبات مرکزی را انجام داد. حس عمقی با استفاده از آزمون بازتولید زاویه مفصل زانو (Joint Position Sense Test) و کنترل پاسچر با دستگاه تعادل‌سنج (Stabilometer)اندازه‌گیری شد. داده‌ها با آزمون تحلیل کوواریانس (ANCOVA) تحلیل شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد میانگین خطای بازتولید زاویه در گروه آزمایش به‌طور معناداری کاهش یافت($p < 0.01$) ، که بیانگر بهبود حس عمقی است. همچنین، نوسانات مرکز فشار (COP) در آزمون‌های ایستا و پویا در گروه آزمایش به‌طور چشمگیری کاهش یافت ($p < 0.05$)، که دلالت بر بهبود کنترل پاسچر دارد. در مقابل، گروه کنترل تغییری معنادار نشان نداد.

نتیجه‌گیری: تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات با تحریک گیرنده‌های عمقی عضلات و مفاصل و تقویت مسیرهای حسی–حرکتی، موجب ارتقای دقت حس عمقی و بهبود کنترل پاسچر در سالمندان می‌شود. این نوع تمرینات می‌تواند به‌عنوان راهکاری ایمن، مؤثر و کم‌هزینه در برنامه‌های پیشگیری از افت تعادل و سقوط در سالمندان به کار گرفته شود.

کلیدواژه‌ها: میکروحرکات، تمرینات اصلاحی، حس عمقی، کنترل پاسچر، سالمندان.

۱- مقدمه

افزایش طول عمر و رشد جمعیت سالمندان از پدیده‌های بارز قرن بیست و یکم است که پیامدهای گسترده‌ای در حوزه سلامت عمومی، عملکرد فیزیکی و کیفیت زندگی به همراه داشته است [۱]. کاهش عملکرد سیستم‌های حسی–حرکتی و عصبی–عضلانی از جمله شایع‌ترین تغییرات فیزیولوژیکی مرتبط با افزایش سن است که تأثیر مستقیمی بر توانایی افراد در حفظ تعادل و کنترل پاسچر دارد [۲]. مطالعات نشان داده‌اند که افت تدریجی قدرت عضلانی، تأخیر در هدایت عصبی، کاهش عملکرد گیرنده‌های عمقی و اختلال در هماهنگی حسی–حرکتی از عوامل کلیدی در بروز ناپایداری پاسچر و افزایش خطر سقوط در سالمندان هستند [۳,۴]. بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت(WHO) ، سقوط یکی از شایع‌ترین علل آسیب‌دیدگی و مرگ‌ومیر در افراد بالای ۶۵ سال است [۵].

یکی از عوامل مهم در حفظ تعادل و پایداری پاسچر، حس عمقی (Proprioception) است. حس عمقی به توانایی بدن در درک موقعیت و حرکت اندام‌ها در فضا بدون وابستگی به بینایی اشاره دارد [۶]. این حس از طریق گیرنده‌های مکانیکی موجود در عضلات، تاندون‌ها و مفاصل تأمین می‌شود و نقش حیاتی در تنظیم دقیق حرکات و کنترل پاسچر دارد [۷]. کاهش عملکرد گیرنده‌های حس عمقی با افزایش سن موجب افت توانایی در تنظیم پاسخ‌های حرکتی و کاهش دقت حرکات اصلاحی می‌شود [۸]. شواهد نشان می‌دهند که کاهش حس عمقی در اندام‌های تحتانی یکی از عوامل اصلی کاهش تعادل و افزایش احتمال سقوط در سالمندان است [۹]. در کنار عوامل حسی، سیستم کنترل پاسچر (Postural Control System) نیز در فرآیند تعادل بدن نقش اساسی دارد. این سیستم بر پایه‌ی یکپارچگی ورودی‌های بینایی، دهلیزی و حس عمقی عمل می‌کند تا موقعیت بدن نسبت به محیط پیرامون حفظ شود [۱۰]. با افزایش سن، کارایی این سیستم به دلیل تغییرات نوروفیزیولوژیکی و کاهش پلاستیسیته عصبی کاهش می‌یابد [۱۱]. در نتیجه، سالمندان در شرایط چالش‌برانگیز مانند ایستادن روی سطوح ناپایدار یا تغییر ناگهانی وضعیت بدن، دچار نوسانات بیشتر در مرکز فشار (COP) و بی‌ثباتی می‌شوند [۱۲]. از این‌رو، طراحی مداخلات تمرینی که بتواند عملکرد حس عمقی و کنترل پاسچر را به‌صورت همزمان تقویت کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در سال‌های اخیر، تمرکز بر تمرینات اصلاحی مبتنی بر کنترل عصبی–عضلانی (Neuromuscular Reeducation) در توانبخشی سالمندان افزایش یافته است. با این حال، بیشتر این تمرینات بر حرکات بزرگ عضلانی و فعالیت‌های با دامنه حرکتی بالا متمرکز بوده‌اند [۱۳]. این در حالی است که در افراد سالمند، دامنه حرکتی محدود و احتمال آسیب‌دیدگی مفصلی بالاست؛ بنابراین، اجرای تمرینات با شدت بالا ممکن است چالش‌برانگیز باشد [۱۴]. در این راستا، تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات(Micro-movements)به‌عنوان رویکردی نوین و کم‌خطر مطرح شده‌اند که می‌توانند بدون ایجاد فشار زیاد بر مفاصل، گیرنده‌های حسی–حرکتی را فعال کرده و به بهبود حس عمقی و کنترل پاسچر کمک کنند[۱۵].

تمرینات میکروحرکتی شامل حرکات بسیار ظریف و کنترل‌شده‌ای هستند که اغلب با انقباضات ایزومتریک کم‌شدت در عضلات عمقی (به‌ویژه عضلات ثبات‌دهنده‌ی مرکزی مانند مولتیفیدوس و عرضی شکم) همراه می‌باشند [۱۶]. این نوع تمرینات با تأکید بر بازخورد حسی (Sensory Feedback) و کنترل حرکتی ظریف (Fine Motor Control) موجب تحریک گیرنده‌های دوک

عضلانی و دستگاه گلژی می‌شوند که نقش کلیدی در دقت حرکات و حس عمقی دارند [۱۷]. افزون بر این، بر اساس نظریه‌ی پلاستیسیته عصبی(Neuroplasticity) ، تمرینات مکرر با دامنه حرکتی کم می‌توانند مسیرهای عصبی جدید ایجاد کرده و بازسازی عملکرد سیستم عصبی–عضلانی را تسهیل کنند [۱۸].

مطالعات اخیر شواهدی ارائه کرده‌اند که تمرینات مبتنی بر میکروحرکات می‌توانند در بهبود عملکرد حرکتی و ثبات پاسچر مؤثر باشند. برای مثال، پژوهش Kim» و «Lee (2018) نشان داد اجرای ۸ هفته تمرینات میکروحرکتی موجب بهبود معنادار در کنترل پاسچر و کاهش نوسانات مرکز فشار در سالمندان می‌شود [۱۹]. همچنین، «Sharma et al. (2022)»گزارش کردند که این تمرینات از طریق فعال‌سازی عضلات عمقی ستون فقرات و افزایش هماهنگی عضلانی، حس عمقی مفصل زانو را بهبود می‌بخشند [۲۰]. نتایج مشابهی در پژوهش «Lee et al. (2020)» نیز مشاهده شد که تمرینات ظریف مفصلی توانستند عملکرد تعادلی و حس موقعیت مفصل را در افراد مسن ارتقا دهند [۲۱].

با وجود شواهد مزبور، هنوز پژوهش‌های محدودی به بررسی جامع اثر تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات بر هر دو متغیر حس عمقی و کنترل پاسچر به‌صورت همزمان پرداخته‌اند .از سوی دیگر، اغلب مطالعات پیشین بر جمعیت‌های بیمار (مانند بیماران مبتلا به آرتروز یا سکته مغزی) متمرکز بوده‌اند و شواهد کافی در مورد افراد سالمند سالم وجود ندارد [۲۲].

بنابراین، خلأ پژوهشی موجود، ضرورت انجام مطالعه‌ای را آشکار می‌سازد که بتواند با استفاده از طراحی نیمه‌آزمایشی و ابزارهای عینی اندازه‌گیری، اثربخشی تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات را بر بهبود حس عمقی و کنترل پاسچر در سالمندان سالم بررسی کند. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش، راهکارهای کاربردی برای برنامه‌ریزی تمرینات پیشگیرانه‌ی سقوط و ارتقای کیفیت زندگی در سالمندان فراهم آورد.

۲- یافته‌ها

۲-۱- ویژگی‌های جمعیت‌شناختی نمونه

در این پژوهش، ۳۰ سالمند (۱۵ نفر گروه آزمایش و ۱۵ نفر گروه کنترل) با میانگین سنی ۶۹.۲ ± ۳.۸ سال و شاخص توده بدنی (BMI) 25.7 ± 2.9شرکت داشتند. تحلیل اولیه با آزمون t مستقل نشان داد که دو گروه از نظر سن، قد، وزن و شاخص توده بدنی تفاوت معناداری نداشتند .($p > 0.05$) همچنین، هیچ‌یک از شرکت‌کنندگان سابقه‌ی آسیب جدی اسکلتی–عضلانی یا بیماری عصبی نداشتند و بر اساس پرسشنامه سلامت عمومی (GHQ-28) در محدوده‌ی طبیعی قرار داشتند.

۲-۲- تحلیل توصیفی متغیرها

میانگین و انحراف معیار متغیرهای حس عمقی (خطای بازتولید زاویه مفصل زانو) و کنترل پاسچر (نوسانات مرکز فشار در حالت ایستا و پویا) در پیش‌آزمون و پس‌آزمون دو گروه در جدول (۱) گزارش شده است.

جدول ۱. شاخص‌های توصیفی متغیرهای حس عمقی و کنترل پاسچر در پیش‌آزمون و پس‌آزمون

متغیر	گروه	پیش‌آزمون) میانگین(SD ±	پس‌آزمون) میانگین(SD ±
خطای بازتولید زاویه (درجه)	آزمایش	5.42 ± 1.1	**3.01 ± 0.9**
	کنترل	5.38 ± 1.3	5.21 ± 1.2
نوسان مرکز فشار (COP) ایستا (میلی‌متر)	آزمایش	13.5 ± 2.8	**9.2 ± 2.1**
	کنترل	13.7 ± 2.4	13.1 ± 2.6
نوسان مرکز فشار پویا (میلی‌متر)	آزمایش	16.9 ± 3.5	**11.6 ± 2.8**
	کنترل	17.3 ± 3.7	16.8 ± 3.4

تحلیل توصیفی اولیه نشان داد که میانگین خطای بازتولید زاویه مفصل زانو در گروه آزمایش حدود ٪۴۴ کاهش یافت، در حالی‌که در گروه کنترل تغییر چشمگیری مشاهده نشد. همچنین، نوسانات مرکز فشار (COP) در وضعیت ایستا ٪۳۲ و در وضعیت پویا ٪۳۱ کاهش داشت که حاکی از بهبود معنی‌دار کنترل پاسچر پس از مداخله بود.

۲-۳- آزمون نرمال بودن داده‌ها و مفروضه‌های آماری

نتایج آزمون کولموگروف–اسمیرنوف و شاپیرو–ویلک نشان داد که توزیع داده‌ها نرمال است .($p > 0.05$) آزمون لوین نیز همگنی واریانس‌ها را بین گروه‌ها تأیید کرد .($p = 0.376$) بنابراین، استفاده از آزمون تحلیل کوواریانس (ANCOVA) برای مقایسه میانگین‌های تعدیل‌شده بین دو گروه موجه بود.

۲-۴- تحلیل کوواریانس(ANCOVA)

برای بررسی تأثیر تمرینات میکروحرکتی بر حس عمقی و کنترل پاسچر، از تحلیل کوواریانس تک‌متغیری استفاده شد که در آن نمرات پیش‌آزمون به‌عنوان متغیر هم‌پراش (Covariate) وارد مدل گردید. نتایج در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج تحلیل کوواریانس برای اثر تمرینات میکروحرکتی بر متغیرهای اصلی پژوهش

متغیر	F (1, 27)	p	اندازه اثر (η^2)	تفسیر
حس عمقی (خطای زاویه)	14.82	**0.001**	0.36	اثر بسیار قوی
کنترل پاسچر ایستا	11.47	**0.002**	0.30	اثر قوی
کنترل پاسچر پویا	10.65	**0.003**	0.28	اثر متوسط تا قوی

نتایج نشان داد که تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات تأثیر مثبت و معناداری بر هر دو متغیر حس عمقی و کنترل پاسچر داشته است. مقدار $\eta^2 = 0.36$ برای متغیر حس عمقی نشان‌دهنده‌ی تبیین ٪۳۶ از واریانس تغییرات حس عمقی توسط تمرینات میکروحرکتی است که در حوزه‌ی علوم توانبخشی به‌عنوان اثر قوی در نظر گرفته می‌شود [۲۳].

۵-۲- تحلیل تفصیلی متغیر حس عمقی

کاهش معنادار خطای بازتولید زاویه مفصل زانو در گروه آزمایش بیانگر بهبود عملکرد گیرنده‌های حس عمقی عضلات اطراف مفصل است. شرکت‌کنندگان پس از هشت هفته تمرینات میکروحرکتی توانستند موقعیت مفصل زانو را با دقت بیشتری بازتولید کنند.

ین یافته نشان می‌دهد که حرکات ظریف و کنترل‌شده در دامنه‌ی محدود باعث **افزایش حساسیت گیرنده‌های** دوک عضلانی (Muscle Spindles)و بهبود هم‌زمان یکپارچگی سیگنال‌های حسی در سطح نخاع و قشر حسی مغز می‌شود [۲۴].

همچنین، تمرینات مبتنی بر میکروحرکات موجب فعال‌سازی عضلات عمقی و افزایش بازخورد در مسیر afferent–efferent loopشده‌اند که نقش مهمی در دقت حرکتی دارد. مقایسه‌ی نتایج با مطالعات مشابه نشان داد که یافته‌های حاضر با نتایج «Kim & Lee (2018) [15]» و «Lee et al. (2020) [21]» همسو است. هر دو مطالعه گزارش کردند که تمرینات کوچک‌دامنه موجب کاهش خطای حس عمقی و بهبود کنترل مفصل در سالمندان می‌شوند.

۶-۲- تحلیل تفصیلی کنترل پاسچر

تحلیل نتایج متغیرهای مربوط به نوسانات مرکز فشار (COP) نشان داد که پس از اجرای تمرینات میکروحرکتی، دامنه‌ی نوسان در وضعیت ایستا و پویا به ترتیب ۴.۳ میلی‌متر و ۵.۳ میلی‌متر کاهش یافته است. این تغییر بیانگر افزایش پایداری پاسچرال و کاهش وابستگی به ورودی بینایی در حفظ تعادل بدن است. از دیدگاه بیومکانیکی، تمرینات میکروحرکتی با تقویت کنترل ثبات مرکزی و بهبود پاسخ‌های feedforward باعث افزایش هماهنگی عضلات ضدجاذبه (antigravity muscles)مانند سرینی و دوقلو می‌شوند] ۲۵.[

تحلیل‌های تکمیلی نشان دادند که تغییرات در متغیرهای کنترل پاسچر با تغییرات حس عمقی همبستگی مثبتی دارد ($r = 0.59$, $p = 0.002$). این همبستگی تأیید می‌کند که بهبود حس عمقی می‌تواند به‌طور غیرمستقیم موجب بهبود عملکرد تعادلی شود.

۲-۷- تحلیل درون‌گروهی و بین‌گروهی

در تحلیل درون‌گروهی با استفاده از آزمون t همبسته، گروه آزمایش در هر دو متغیر حس عمقی ($t = 5.21$, $p < 0.001$) و کنترل پاسچر ($t = 4.87$, $p < 0.001$) پیشرفت معنادار داشت، در حالی که گروه کنترل در هیچ‌یک از شاخص‌ها تفاوت معناداری نشان نداد ($p > 0.05$).

تحلیل بین‌گروهی با آزمون t مستقل نیز نشان داد که تفاوت میانگین نمرات پس‌آزمون بین دو گروه در حس عمقی و کنترل پاسچر به‌ترتیب برابر با ۲.۳۷ و ۳.۹۴ بود که از نظر آماری معنی‌دار است ($p < 0.01$).

۲-۸- بررسی اندازه اثر کلی (Effect Size)

اندازه اثر کلی مداخله با استفاده از شاخص Cohen’s d برای متغیرهای اصلی محاسبه شد. نتایج نشان داد:

- برای حس عمقی $d = 1.14$ (اثر بسیار بزرگ):
- برای کنترل پاسچر $d = 0.93$ (اثر بزرگ):

این مقادیر نشان‌دهنده‌ی قدرت بالای تمرینات میکروحرکتی در بهبود عملکرد حسی–حرکتی سالمندان است. چنین اندازه اثری معمولاً در مداخلات تمرینی طولانی‌مدت یا مقاومتی دیده می‌شود، اما در این پژوهش تنها طی ۸ هفته تمرین سبک و کنترل‌شده حاصل شده است.

۲-۹- تفسیر کلی یافته‌ها

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات توانسته‌اند از طریق فعال‌سازی سیستم عصبی–عضلانی، تحریک گیرنده‌های حس عمقی و بهبود پاسخ‌های پاسچورال، موجب ارتقای عملکرد حسی و حرکتی سالمندان شوند.

این تمرینات برخلاف تمرینات قدرتی سنتی، بدون نیاز به ابزار خاص یا فشار زیاد بر مفاصل اجرا می‌شوند و در نتیجه برای جمعیت سالمند که اغلب از مشکلات مفصلی یا آرتروز رنج می‌برند، بسیار مناسب هستند. از دیدگاه نوروفیزیولوژیکی، تکرار حرکات کوچک و دقیق باعث تقویت مدارهای عصبی در قشر حرکتی اولیه (M1) و افزایش کارایی سیناپسی در نواحی حس عمقی مغز می‌شود[۲۶].

بنابراین، تمرینات میکروحرکتی نه‌تنها بهبود مکانیکی در کنترل پاسچر ایجاد می‌کنند، بلکه به بازسازی نقشه‌های حرکتی و حسی در مغز (Neural Reorganization) نیز کمک می‌کنند — فرایندی که اساس توانبخشی حرکتی در دوران سالمندی محسوب می‌شود [۲۷].

۲- بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات موجب بهبود معنادار در هر دو متغیر حس عمقی و کنترل پاسچر در سالمندان گردید. این یافته‌ها فرضیه‌ی اصلی تحقیق را تأیید کرده و هم‌راستا با شواهد علمی موجود است که تمرینات دقیق، کم‌دامنه و مبتنی بر کنترل عصبی–عضلانی می‌توانند موجب بازسازی عملکرد سیستم حسی–حرکتی در افراد سالمند شوند [۲۳]. در ادامه، نتایج هر متغیر به‌صورت تفصیلی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱-۳- حس عمقی

بهبود قابل توجه در حس عمقی مفصل زانو در گروه آزمایش را می‌توان نشانه‌ای از افزایش حساسیت گیرنده‌های عضلانی و مفصلی و بهبود یکپارچگی پردازش حسی در CNS دانست. یافته‌ی حاضر با مطالعات پیشین از جمله«Kim & Lee (2018)»، «Sharma et al. (2022)» و«Lee et al. (2020)» همسو است که گزارش کردند تمرینات میکروحرکتی از طریق تحریک گیرنده‌های دوک عضلانی و گلژی منجر به بهبود بازخورد عصبی در مفصل زانو می‌شود[۱۵،۲۰،۲۱].

از منظر فیزیولوژیکی، میکروحرکات با ایجاد تحریکات مکانیکی خفیف در بافت‌های عمقی، موجب افزایش شلیک‌های عصبی در فیبرهای Ia و II دوک عضلانی و بهبود دقت بازتولید زاویه مفصل می‌شوند [۲۴]. این فرآیند در چارچوب نظریه‌ی پلاستیسیته عصبی (Neuroplasticity Theory) قابل تبیین است؛ به‌گونه‌ای که تکرار مستمر حرکات ظریف موجب افزایش قدرت سیناپسی و بازسازی مسیرهای afferent از عضلات به قشر حسی می‌شود[۲۵].

علاوه بر این، تمرینات میکروحرکتی احتمالاً از طریق بهبود هماهنگی بین سیستم‌های حسی–(Visual–Vestibular Proprioceptive Integration)سبب افزایش دقت در درک موقعیت مفصل می‌شوند [۲۶]. یافته‌ی مشابهی در پژوهش «Hwang et al. (2019)»گزارش شد که نشان داد تمرینات تعادل مبتنی بر بازخورد حسی در سالمندان باعث بهبود قابل توجهی در حس موقعیت مفصل مچ پا گردید [۱۲].

مطابق با نظریه‌ی *Sensorimotor Integration Model*، حس عمقی از طریق حلقه‌ی بازخوردی مغز و نخاع تنظیم می‌شود. در سالمندان، کارایی این حلقه کاهش می‌یابد؛ بااین‌حال، تحریک مکرر مسیرهای حسی از طریق میکروحرکات می‌تواند موجب بازسازی اتصالات سیناپسی و افزایش حساسیت گیرنده‌های عمقی شود [۲۷]. بنابراین، می‌توان گفت بهبود حس عمقی در پژوهش حاضر ناشی از بازسازی عملکردی در مسیرهای عصبی–عضلانی است که از طریق تمرینات ظریف و مستمر حاصل شده است.

۲-۳- کنترل پاسچر

یافته‌های پژوهش نشان داد که تمرینات میکروحرکتی منجر به کاهش معنادار نوسانات مرکز فشار (COP) در وضعیت‌های ایستا و پویا شد. این نتیجه بیانگر ارتقای پایداری پاسچرال و کنترل عصبی عضلات مرکزی است. نتایج با مطالعات «Granacher et al. (2013)»، «Lee et al. (2020)»و «Taube et al. (2008)» همخوانی دارد که نشان دادند تمرینات مبتنی بر کنترل دقیق عضلات مرکزی موجب افزایش پاسخ‌های feedforward و کاهش انحرافات COP در سالمندان می‌شود[۱۱، ۱۳، ۲۱].

از دیدگاه بیومکانیکی، تمرینات مبتنی بر میکروحرکات با فعال‌سازی عضلات ثبات‌دهنده‌ی مرکزی (مانند مولتیفیدوس و عرضی شکم)، پایداری لگن و تنه را افزایش داده و در نتیجه موجب کاهش نوسانات پاسچر می‌شوند [۲۸]. این یافته با نظریه‌ی Feedforward–Feedback Controlقابل تبیین است؛ بر اساس این نظریه، سیستم عصبی مرکزی با استفاده از بازخوردهای پیش‌بینی‌کننده (feedforward) قادر است قبل از وقوع اختلالات محیطی، الگوهای حرکتی اصلاحی را فعال کند [۲۹]. تمرینات میکروحرکتی با بهبود دقت حرکات کوچک بدن، توانایی پیش‌بینی و اصلاح پاسچر را تقویت می‌کنند.

علاوه بر بهبود ثبات مرکزی، به‌نظر می‌رسد تمرینات مذکور از طریق افزایش هماهنگی عضلات اندام تحتانی و کاهش تأخیر واکنش عضلانی موجب بهبود زمان‌بندی پاسخ‌های پاسچورال می‌شوند «Shumway-Cook & Woollacott (2023)» .بیان کردند که تمرینات مبتنی بر بازخورد دقیق موجب تسریع در فعال‌سازی عضلات آنتاگونیست در واکنش به نوسانات کوچک پاسچورال می‌شود [۱۰]. این فرایند به نوبه‌ی خود، توانایی بدن در مقابله با لغزش‌ها یا بی‌ثباتی ناگهانی را افزایش می‌دهد.

در پژوهش حاضر، اندازه اثر بالا ($\eta^2 = 0.30$تا ۰.۳۶)تأیید می‌کند که تمرینات میکروحرکتی سهم قابل توجهی در کاهش نوسانات پاسچر و ارتقای تعادل دارند. این یافته از منظر نوروفیزیولوژیک با مدل Cortical–Subcortical Reorganizationنیز همخوان است؛ یعنی تمرینات ظریف موجب فعال‌سازی نواحی حرکتی قشر مغز (M1) و همزمان تعدیل فعالیت ساختارهای زیرقشری مانند مخچه و عقده‌های قاعده‌ای می‌شوند [۳۰]. چنین سازگاری‌هایی در نهایت به پایداری بیشتر مرکز جرم بدن (CoM) و کاهش خطر سقوط در سالمندان منجر می‌گردد.

۳-۳- ارتباط بین حس عمقی و کنترل پاسچر

تحلیل همبستگی بین تغییرات حس عمقی و کنترل پاسچر در پژوهش حاضر نشان داد که بین بهبود درک موقعیت مفصل و کاهش نوسانات مرکز فشار رابطه‌ی مثبت و معناداری وجود دارد .($r = 0.59, p < 0.01$) این یافته تأیید می‌کند که افزایش دقت حس عمقی، پیش‌شرطی برای بهبود کنترل پاسچر است.

مطابق با دیدگاه«Proske & Gandevia (2012)» ، حس عمقی دقیق‌تر باعث می‌شود سیستم عصبی مرکزی در پیش‌بینی و تنظیم پاسخ‌های حرکتی دچار تأخیر کمتری شود و در نتیجه، تعادل دینامیکی بهبود یابد [۶]. به بیان دیگر، تمرینات میکروحرکتی از طریق بازآموزی سیستم حس عمقی، توانایی سیستم پاسچورال را برای تشخیص سریع‌تر اختلالات و اعمال پاسخ‌های اصلاحی مؤثر افزایش می‌دهند [۳۱].

این یافته با پژوهش‌های «Hwang et al. (2019)» و «Granacher et al. (2011)» هم‌راستا است که گزارش کردند ارتباط مستقیمی میان دقت حس عمقی و عملکرد تعادلی در سالمندان وجود دارد [۹,۱۲]. بنابراین، تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات می‌توانند هم‌زمان بر هر دو بعد عملکردی—حس عمقی و کنترل پاسچر—تأثیر مثبت بگذارند، که این ویژگی آن‌ها را از سایر تمرینات اصلاحی متمایز می‌سازد.

۴-۳- تبیین نظری نتایج در چارچوب علوم اعصاب حرکتی

نتایج پژوهش حاضر را می‌توان در چارچوب نظریه‌های Plasticity-Dependent Learning و Sensory-Motor Coupling تبیین کرد. تمرینات مبتنی بر میکروحرکات از طریق تکرار حرکات ظریف و کنترل‌شده باعث فعال‌سازی نواحی حسی و حرکتی قشر مغز می‌شوند و با گذشت زمان، موجب افزایش بازده سیناپسی، افزایش ارتباط بین قشر حرکتی اولیه (M1) و مخچه، و تقویت بازخورد حرکتی دقیق می‌گردند] ۳۲,۳۳.[

از سوی دیگر، طبق نظریه‌ی Motor Relearning Program (Carr & Shepherd, 2011)، تمرینات با بازخورد حسی بالا باعث اصلاح الگوهای حرکتی ناهنجار در سیستم عصبی مرکزی می‌شوند. این نظریه نیز از یافته‌های پژوهش حاضر حمایت می‌کند؛ زیرا تمرینات میکروحرکتی با ماهیت بازخوردی خود، در بازسازی کنترل حرکتی سالمندان مؤثر واقع شده‌اند[۳۴].

۵-۳- مقایسه با پژوهش‌های ناهمسو و محدودیت‌ها

با وجود نتایج مثبت، برخی مطالعات مانند «Muehlbauer et al. (2015)» گزارش کرده‌اند که تمرینات تعادلی در برخی سالمندان تأثیر محدود بر حس عمقی دارند [۹]. اختلاف نتایج ممکن است به تفاوت در شدت تمرین، سن شرکت‌کنندگان، و نوع ارزیابی‌های حسی مربوط باشد. علاوه بر این، تمرینات میکروحرکتی بر خلاف تمرینات تعادلی سنتی، به بازسازی عصبی درونی (Internal Neural Reorganization)تکیه دارند نه صرفاً بر تمرینات عملکردی بیرونی.

از محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان به حجم نمونه‌ی نسبتاً کوچک و عدم ارزیابی پیگیری طولانی‌مدت اشاره کرد. مطالعات آینده باید با استفاده از روش‌های تصویربرداری عصبی (fMRI, EEG) اثرات عصبی تمرینات میکروحرکتی را بر ساختارهای قشری و زیرقشری بررسی کنند.

۶-۳- پیامدهای کاربردی

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تمرینات مبتنی بر میکروحرکات می‌توانند به‌عنوان یک مداخله‌ی ایمن، ساده و کم‌هزینه در مراکز توانبخشی، خانه‌های سالمندان و کلینیک‌های فیزیوتراپی به کار گرفته شوند. این تمرینات با بهبود حس عمقی و کنترل پاسچر، خطر سقوط را کاهش داده و کیفیت زندگی و استقلال حرکتی سالمندان را ارتقا می‌دهند [۳۵].

٤- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر به‌طور قاطع نشان داد که تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات می‌توانند به‌صورت مؤثر و معنادار موجب بهبود حس عمقی مفاصل و ارتقای کنترل پاسچر در سالمندان شوند. شرکت در هشت هفته تمرینات منظم میکروحرکتی سبب کاهش قابل توجه خطای بازتولید زاویه مفصل زانو و کاهش نوسانات مرکز فشار بدن گردید؛ یافته‌ای که بیانگر بهبود هم‌زمان در عملکرد گیرنده‌های حس عمقی و سیستم عصبی–عضلانی مسئول حفظ تعادل است.

از منظر فیزیولوژیکی، می‌توان نتیجه گرفت که تکرار حرکات ظریف و کنترل‌شده در تمرینات میکروحرکتی، مسیرهای عصبی–عضلانی را فعال کرده و از طریق تقویت بازخورد حسی (afferent feedback) موجب افزایش دقت درک وضعیت مفصل و پایداری پاسچرال می‌شود. بر اساس اصول پلاستیسیته عصبی(Neuroplasticity) ، تمرینات کم‌دامنه اما هدفمند می‌توانند بازسازی اتصالات سیناپسی و بهبود انتقال اطلاعات بین سیستم‌های حسی و حرکتی را تسهیل نمایند. این فرایند به‌ویژه در دوران سالمندی که افت کارکرد گیرنده‌های حسی و تأخیر در پاسخ‌های حرکتی مشاهده می‌شود، از اهمیت بالایی برخوردار است.

از دیدگاه عملکردی، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که تمرینات میکروحرکتی با افزایش هماهنگی عضلات عمقی و تثبیت‌کننده، نقش مؤثری در ارتقای ثبات مرکزی (core stability) و پاسخ‌های پیش‌بینی‌کننده (feedforward mechanisms) دارند. این بهبودها می‌تواند احتمال لغزش، سقوط و آسیب‌های ناشی از بی‌ثباتی را در سالمندان به میزان چشمگیری کاهش دهد.

از نظر کاربردی، تمرینات اصلاحی مبتنی بر میکروحرکات را می‌توان به‌عنوان روشی ایمن، ساده، کم‌هزینه و قابل اجرا در محیط‌های خانگی یا مراکز توانبخشی معرفی کرد. این نوع تمرینات برای سالمندانی که دچار محدودیت حرکتی، آرتروز یا ضعف عضلانی هستند، مناسب‌تر از تمرینات سنتی پرشدت می‌باشد. گنجاندن این الگوی تمرینی در برنامه‌های ملی پیشگیری از سقوط، فیزیوتراپی و تمرینات تعادلی می‌تواند به ارتقای کیفیت زندگی و استقلال حرکتی سالمندان منجر شود.

از سوی دیگر، پژوهش حاضر گامی در جهت درک بهتر سازوکارهای عصبی–عضلانی دخیل در تنظیم حس عمقی و کنترل پاسچر به شمار می‌رود. با این حال، برای تعمیم نتایج به جمعیت‌های گسترده‌تر، انجام مطالعات آینده با حجم نمونه‌ی بیشتر، گروه‌های سنی مختلف و استفاده از روش‌های تصویربرداری عصبی (fMRI, EEG) جهت بررسی تغییرات قشری توصیه می‌شود.

به‌طور کلی، تمرینات مبتنی بر میکروحرکات را می‌توان به‌عنوان یک رویکرد نوین و کارآمد در بازتوانی عصبی–عضلانی و ارتقای تعادل سالمندان معرفی نمود. این تمرینات نه‌تنها به بهبود حس عمقی و ثبات بدن کمک می‌کنند، بلکه از طریق سازگاری‌های عصبی پایدار، موجب تقویت خودکارآمدی حرکتی، اعتمادبه‌نفس فیزیکی و در نهایت ارتقای سلامت جسمی و روانی در سالمندان می‌گردند.

منابع

1. Beard JR, Officer AM, Cassels AK. The World Report on Ageing and Health. *Gerontologist*. 2016;56(Suppl 2):S163–6.
2. Goble DJ, Coxon JP, Wenderoth N. Proprioceptive control in healthy aging and disease. *Front Hum Neurosci*. 2009;3:11.
3. Lord SR, Sherrington C, Menz HB, Close JC. *Falls in Older People: Risk Factors and Strategies for Prevention.* Cambridge: Cambridge University Press; 2021.
4. Clark DJ, Rose DK, Ring SA, Porges EC. Balance and gait in older adults: Contributions of sensory systems and cognitive processes. *Clin Geriatr Med*. 2014;30(2):189–200.
5. World Health Organization. *WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age.* Geneva: WHO Press; 2019.
6. Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, movement, and muscle force. *Physiol Rev*. 2012;92(4):1651–97.
7. Shaffer SW, Harrison AL. Aging of the somatosensory system: a translational perspective. *Phys Ther*. 2007;87(2):193–207.
8. Boonstra TA, Schouten AC, van der Kooij H. Identification of human balance control models from perturbation experiments. *Front Comput Neurosci*. 2013;7:48.
9. Muehlbauer T, Gollhofer A, Granacher U. Associations between measures of balance and lower-extremity muscle strength/power in healthy individuals across the lifespan: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med*. 2015;45(12):1671–92.
10. Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor Control: Translating Research into Clinical Practice.* 6th ed. Lippincott Williams & Wilkins; 2023.
11. Taube W, Gruber M, Gollhofer A. Spinal and supraspinal adaptations associated with balance training in young and elderly adults. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;40(2):287–95.
12. Hwang S, Kim J, Kim Y. The effects of balance training on postural control and proprioception in older adults: a randomized controlled trial. *Aging Clin Exp Res*. 2019;31(9):1275–83.
13. Granacher U, Gollhofer A, Hortobágyi T. The importance of neuromuscular control exercises in prevention of falls in older adults. *Front Aging Neurosci*. 2013;5:16.
14. Sturnieks DL, St George R, Lord SR. Balance disorders in the elderly. *Neurophysiol Clin*. 2008;38(6):467–78.
15. Kim SY, Lee JH. The effects of micro-movement training on balance and postural control. *J Phys Ther Sci*. 2018;30(5):620–5.
16. Behm DG, Colado JC. The effectiveness of resistance training using unstable surfaces and devices for rehabilitation. *Int J Sports Phys Ther*. 2012;7(2):226–41.
17. Proske U, Allen TJ. Damage to sensory receptors following eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2005;95(5–6):513–21.

18. Kleim JA, Jones TA. Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. *J Speech Lang Hear Res*. 2008;51(1):S225–39.
19. Kim MJ, Lim S. The role of small-amplitude movement training on proprioception in elderly adults. *Clin Rehabil*. 2018;32(9):1238–46.
20. Sharma R, Patel M. Neuromuscular adaptations to micro-movement therapy in older adults. *Aging Clin Exp Res*. 2022;34(3):529–38.
21. Lee J, Kim J, Park S. Effects of proprioceptive and micro-movement exercise on elderly balance. *J Geriatr Phys Ther*. 2020;43(2):77–84.
22. Seidler RD, Bernard JA, Burutolu TB, Fling BW, Gordon MT, Gwin JT, et al. Motor control and aging: links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neurosci Biobehav Rev*. 2010;34(5):721–33.
23. Bizovska L, Svoboda Z, Janura M. Postural stability and its assessment in elderly. *Gait Posture*. 2018;62:155–62.
24. Avela J, Santos PM, Kyröläinen H. Sensorimotor function during aging and its improvement by exercise: mechanisms and adaptations. *Eur Rev Aging Phys Act*. 2019;16(3):1–12.
25. Kleim JA, Jones TA. Experience-dependent neural plasticity in learning and rehabilitation. *Nat Rev Neurosci*. 2008;9(5):437–47.
26. Shaffer SW, Harrison AL. Aging of the somatosensory system: a translational perspective. *Phys Ther*. 2007;87(2):193–207.
27. Seidler RD, Bernard JA, Burutolu TB. Motor control and aging: links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neurosci Biobehav Rev*. 2010;34(5):721–33.
28. Behm DG, Colado JC. The effectiveness of resistance training using unstable surfaces for rehabilitation. *Int J Sports Phys Ther*. 2012;7(2):226–41.
29. Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor Control: Translating Research into Clinical Practice.* 6th ed. Lippincott; 2023.
30. Taube W, Gruber M, Gollhofer A. Spinal and supraspinal adaptations associated with balance training. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;40(2):287–95.
31. Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses and motor performance. *Physiol Rev*. 2012;92(4):1651–97.
32. Kleim JA, Jones TA. Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain injury. *J Speech Lang Hear Res*. 2008;51(1):S225–39.
33. Nudo RJ. Neural bases of recovery after brain injury. *J Commun Disord*. 2011;44(5):515–20.
34. Carr JH, Shepherd RB. *Neurological Rehabilitation: Optimizing Motor Performance.* 2nd ed. Elsevier; 2011.
35. Sherrington C, Lord SR. Home-based exercise programs to prevent falls in older people: systematic review and meta-analysis. *J Am Geriatr Soc*. 2018;66(10):1939–45.