www.mums.ac.ir
Medical Journal of Mashhad
University of Medical Sciences
Vol. 68, No.5, P: 1536-1547
Sep-Nov2025

مجله دانشکده پزشکی دانشگاه علوم پزشکی مشهد
سال ۶۸، شماره ۵
آذر-دی ۱۴۰۴، صفحه ۱۵۴۷-۱۵۳۶

مقاله اصلی

تأثیر تمرینات اصلاحی، واقعیت مجازی و ترکیبی بر کنترل پاسچرال و افت ناوی در نوجوانان مبتلا به کف‌پای صاف انعطاف‌پذیر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸- تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

مهدیه عابد[۱]
هادی میری[۲*]
مینا حقیقی[۳]

[۱] کارشناسی ارشد آسیب‌شناسی و حرکات اصلاحی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه ازاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

[۲] دانشیار، گروه علوم ورزشی و تندرستی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

[۳] استادیار آسیب شناسی ورزشی، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشکده تربیت بدنی دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان

Email: hd.miri@aut.ac.ir

خلاصه

مقدمه: کف‌پای صاف انعطاف‌پذیر، به‌عنوان یک اختلال شایع پاسچرال در اطفال، با نقص در کنترل پاسچرال و تغییر در بیومکانیک پا همراه است. علیرغم اثربخشی بالقوه تمرینات اصلاحی و تمرین با واقعیت مجازی به‌صورت مجزا، اثرات مقایسه‌ای و ترکیبی این دو روش بر کنترل پاسچرال و راستای ساختاری پا، به‌ویژه در جمعیت نوجوانان، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لذا تحقیق حاضر با هدف بررسی و مقایسه تأثیر یک برنامه هشت‌هفته‌ای تمرینات اصلاحی، تمرین با واقعیت مجازی و ترکیب آن‌ها بر کنترل پاسچرال و شاخص افت استخوان ناوی در دختران نوجوان مبتلا به کف‌پای صاف انعطاف‌پذیر انجام شد.

روش کار: تعداد ۴۸ نفر از افراد واجد شرایط (با دامنه سنی ۱۰ تا ۱۳ سال) به‌طور تصادفی در یکی از چهار گروه ۱۲ نفره شامل: ۱) تمرینات اصلاحی (بر اساس پروتکل آکادمی ملی طب ورزش آمریکا)، ۲) تمرین با واقعیت مجازی (با استفاده از دستگاه Nintendo Wii Fit)، ۳) تمرین ترکیبی و ۴) گروه کنترل، قرار گرفتند. مداخلات به مدت هشت هفته و هر هفته سه جلسه اجرا شد. متغیرهای اصلی پژوهش شامل تعادل ایستا (آزمون اصلاح‌شده لک‌لک)، تعادل پویا (آزمون تعادل Y) و شاخص افت ناوی بود که در دو مرحله پیش‌آزمون و پس‌آزمون اندازه‌گیری شدند. به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، از آزمون تحلیل کوواریانس و آزمون ناپارامتریک کروسکال-والیس همراه با تصحیح بونفرونی برای مقایسه‌های زوجی استفاده شد.

نتایج: هر سه گروه مداخله در مقایسه با گروه کنترل، بهبود معناداری را در هر دو شاخص کنترل پاسچرال ایستا و پویا نشان دادند ($P<0/05$). در این میان، گروه تمرین ترکیبی بیشترین اندازه اثر را در بهبود تعادل پویا داشت ($\eta^2= 0/66$). با وجود این، کاهش معنادار در شاخص افت ناوی (به‌عنوان نشانه‌ای از بهبود ساختاری قوس کف پا) تنها در گروه‌های تمرینات اصلاحی و تمرین ترکیبی مشاهده شد ($P=0/001$). گروه واقعیت مجازی، علی‌رغم تأثیر مثبت بر بهبود تعادل، تغییر معناداری در ساختار پا ایجاد نکرد ($P>0/05$).

نتیجه‌گیری: تمرینات اصلاحی و تمرین با واقعیت مجازی هر دو در بهبود کنترل پاسچرال نوجوانان مبتلا به کف‌پای صاف انعطاف‌پذیر مؤثر هستند؛ با این حال، دستیابی به اصلاح ساختاری معنادار در قوس کف پا مستلزم به‌کارگیری تمرینات هدفمند و تحمل‌کننده وزن نظیر پروتکل آکادمی ملی طب ورزش است. رویکرد تمرینی ترکیبی، جامع‌ترین مزایای عملکردی را در پی دارد. به‌منظور مدیریت بهینه این عارضه، به متخصصان بالینی توصیه می‌شود از رویکرد توانبخشی چندوجهی استفاده کنند که تلفیقی از اصلاح بیومکانیکی و بهبود عملکردهای حسی-حرکتی باشد.

کلمات کلیدی: کف پای صاف انعطاف‌پذیر- کنترل پاسچرال- واقعیت مجازی- تمرینات اصلاحی- شاخص افت ناوی- نوجوانان

Doi: 10.22038/MJMS.2025.27502

مقدمه

کف پای صاف انعطاف‌پذیر که با کاهش یا از بین رفتن قوس طولی داخلی پا در وضعیت تحمل وزن مشخص می‌شود، یک اختلال پاسچرال شایع در جمعیت کودکان و نوجوانان محسوب می‌گردد (۱،۲). این عارضه اغلب با پرونیشن بیش از حد مفصل ساب‌تالار و شلی لیگامانی همراه است که منجر به تغییرات بیومکانیکی نه تنها در پا و مچ پا، بلکه در سراسر زنجیره حرکتی اندام تحتانی می‌شود (۴،۳). چنین انحرافات بیومکانیکی با نقص در کنترل پاسچرال ارتباط نزدیکی دارند. کنترل پاسچرال یک عملکرد حسی-حرکتی یکپارچه و پیچیده است که برای حفظ پایداری در طی تکالیف ایستا و پویا ضروری بوده (۶،۵) و شامل توانایی تنظیم مرکز جرم بدن در داخل سطح اتکا می‌باشد. این فرآیند بر تعامل بی‌وقفه سیستم‌های بینایی، دهلیزی و حسی-پیکری، همراه با پاسخ‌های عصبی-عضلانی مناسب، استوار است (۸،۷). در میان شاخص‌های بالینی کلیدی برای ارزیابی یکپارچگی قوس کف پا، شاخص افت ناوی (NDI) به‌عنوان یک معیار کمّی برای سنجش افت بخش میانی پا در وضعیت تحمل وزن، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (۹). مقادیر بالای شاخص افت ناوی نشان‌دهنده صاف‌شدگی بیشتر قوس بوده و با اختلال در مکانیک پا و کاهش کنترل پاسچرال همراه است (۱۰). بنابراین، کنترل پاسچرال و شاخص افت ناوی، به‌عنوان متغیرهای وابسته حیاتی و مرتبط با یکدیگر، در ارزیابی پیامدهای عملکردی و ساختاری ناشی از کف پای صاف انعطاف‌پذیر تلقی می‌شوند. به‌منظور رفع این نقایص، رویکردهای توانبخشی گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته است. پروتکل‌های تمرینات اصلاحی(CE) ، به‌ویژه آن دسته که بر اساس پیوستار آکادمی ملی طب ورزش آمریکا (NASM) طراحی شده‌اند، از یک مدل چهارمرحله‌ای ساختاریافته (رهاسازی، طویل‌سازی، فعال‌سازی، یکپارچگی) بهره می‌گیرند که هدف آن بازیابی تعادل عضلانی، بهبود راستای پا و ارتقای کارایی عصبی-عضلانی است (۱۲،۱۱). مطالعاتی نظیر پژوهش عرب مومنی و همکاران (۱۴۰۱) نشان داده‌اند که تمرینات مبتنی بر مدل NASM به‌طور معناداری باعث کاهش افت ناوی و بهبود تعادل در نوجوانان مبتلا به کف پای صاف می‌گردد (۱۳). به‌طور هم‌زمان، تمرین با واقعیت مجازی (VR) به‌عنوان یک مداخله فناورمحور و نوآورانه مطرح شده است. این روش با غوطه‌ور ساختن کاربران در محیط‌های مجازی تعاملی و تکلیف‌محور، از طریق ارائه بازخورد بینایی و عمقی در زمان واقعی، فرآیند یادگیری حرکتی، یکپارچگی حسی و انگیزه مشارکت را تسهیل می‌کند (۱۵،۱۴). یافته‌های پژوهشی هوشمند فر و همکاران (۱۴۰۳) حاکی از آن است که بازی‌های تمرینی مبتنی بر واقعیت مجازی می‌توانند بهبودهایی در تعادل ایستا و پویای دختران دارای کف پای صاف ایجاد کنند که با تمرینات سنتی قابل مقایسه است، هرچند تأثیر این نوع تمرین بر ساختار پا هنوز به‌وضوح مشخص نیست (۱۶).

در سال‌های اخیر، رویکردهای تمرین ترکیبی که تلفیقی از تمرینات اصلاحی و واقعیت مجازی هستند، با هدف بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای بیومکانیکی بازآموزی هدفمند عضلانی و تحریک عصب‌شناختی ناشی از بازی‌های تمرینی تعاملی، پیشنهاد شده‌اند (۱۸،۱۷). چنین مداخلات چندوجهی در پی رفع هم‌زمان کاستی‌های ساختاری و حسی-حرکتی بوده و به‌طور بالقوه می‌توانند اثرات هم‌افزایی بر کنترل پاسچرال و ساختار پا داشته باشند. علیرغم پیشرفت‌های ذکر شده، شکاف‌های پژوهشی متعددی همچنان وجود دارد. نخست آنکه، بیشتر مطالعات مقایسه‌ای بر روی جمعیت بزرگسال یا با حضور هر دو جنس متمرکز بوده‌اند و شواهد محدودی به‌طور خاص در میان افراد جوان‌تر مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر وجود دارد (۲۰،۱۹). دوم، اگرچه واقعیت مجازی و تمرینات اصلاحی به‌صورت مستقل مطالعه شده‌اند، اثرات ترکیبی آن‌ها بر کنترل پاسچرال و شاخص افت ناوی کمتر مورد کاوش قرار گرفته است. سوم، در تحقیقات پیشین اغلب از اندازه‌گیری هم‌زمان پیامدهای ساختاری (نظیر شاخص افت ناوی) و عملکردی (نظیر تعادل) در یک طرح آزمایشی واحد غفلت شده که این امر درک جامعی از اثربخشی مداخله را محدود می‌سازد (۲۱).

از این رو، مطالعه حاضر با هدف پرداختن نظام‌مند به این شکاف‌ها طراحی شده است تا اثرات سه مداخله هشت‌هفته‌ای

متمایز شامل تمرینات اصلاحی (مبتنی بر پروتکل NASM)، تمرین با واقعیت مجازی و تمرین ترکیبی را بر کنترل پاسچرال (که از طریق آزمون‌های تعادل ایستا و پویا ارزیابی می‌شود) و شاخص افت ناوی در افراد مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر مورد بررسی و مقایسه قرار دهد. انتظار می‌رود یافته‌های این پژوهش به تدوین پروتکل‌های توانبخشی هدفمندتر و مبتنی بر شواهد که هر دو مؤلفه ساختاری و حسی-حرکتی را در مدیریت کف پای صاف در جمعیت کودکان و نوجوانان تلفیق می‌نمایند، منجر شود.

روش‌شناسی

طراحی مطالعه و شرکت‌کنندگان

تحقیق حاضر یک مطالعه تصادفی‌سازی شده با گروه‌های موازی و طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون بود. جامعه هدف پژوهش را دختران نوجوان ۱۰-۱۳ ساله مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر تشکیل می‌دادند که در مدارس دولتی منطقه ۲ شهر تهران ثبت‌نام کرده بودند. حجم نمونه با استفاده از نرم‌افزار جی‌پاور (نسخه ۷.۹.۱.۳) و بر اساس اندازه اثر بزرگ مورد انتظار (f=۰/۴، دی‌کوهن معادل ۰/۸۰) توان آماری ۸۵ درصد و سطح آلفای ۰/۰۵، حداقل ۱۲ نفر در هر گروه تعیین شد (۲۲). با در نظر گرفتن احتمال ریزش نمونه، در ابتدا ۶۰ نفر غربالگری شدند. معیارهای ورود به مطالعه عبارت بودند از: (۱) سن ۱۳- ۱۰ سال؛ (۲) تشخیص بالینی کف پای صاف انعطاف‌پذیر توسط پزشک متخصص از طریق مشاهده افت قوس کف پا در وضعیت تحمل وزن و داشتن شاخص افت ناوی بزرگتر از ۱۰ میلی‌متر (۱۶،۹)؛ (۳) عدم سابقه اختلالات عصبی، مشکلات دهلیزی یا نارسایی‌های بینایی؛ (۴) عدم سابقه جراحی یا شکستگی در اندام تحتانی؛ (۵) عدم مصرف هم‌زمان داروهای مؤثر بر سیستم عصبی و (۶) نداشتن اختلالات پاسچرال تشخیص‌داده‌شده نظیر زانوی پرانتزی یا زانوی ضربدری (۱۶،۱۳). شرکت‌کنندگان در صورت غیبت بیش از دو جلسه متوالی یا سه جلسه غیرمتوالی، انصراف داوطلبانه یا آسیب ارتوپدی در طول دوره مطالعه از پژوهش حذف شدند. پس از غربالگری، تعداد ۴۸ نفر واجد شرایط با استفاده از جدول اعداد تصادفی تولیدشده توسط کامپیوتر به‌طور تصادفی در چهار گروه ۱۲ نفره: (۱) تمرینات اصلاحی، (۲) تمرین با واقعیت مجازی، (۳) تمرین ترکیبی، و (۴) کنترل، جایگزین شدند. با توجه به ماهیت مداخلات، کورسازی شرکت‌کنندگان و پژوهشگر ناظر بر اجرای تمرینات امکان‌پذیر نبود. با این حال، به منظور کاهش سوگیری در ارزیابی، فردی که مسئول انجام تمامی اندازه‌گیری‌های پیش‌آزمون و پس‌آزمون بود، تا پایان مطالعه از تخصیص گروه‌ها بی‌اطلاع باقی ماند. پروتکل پژوهش توسط کمیته اخلاق مؤسسه تأیید شد و مطابق با اصول اخلاقی بیانیه هلسینکی به اجرا درآمد. پس از توضیح کامل هدف، روش‌کار، خطرات و مزایای احتمالی پژوهش، رضایت‌نامه آگاهانه کتبی از والدین یا سرپرستان قانونی تمامی شرکت‌کنندگان اخذ گردید.

متغیرهای اندازه‌گیری‌شده

تمامی ارزیابی‌ها در محیط کنترل‌شده آزمایشگاه، یک هفته پیش از شروع مداخله (پیش‌آزمون) و یک هفته پس از پایان دوره ۸ هفته‌ای (پس‌آزمون) انجام شد. پیش از آزمون‌گیری، داده‌های آنتروپومتریک شامل قد، وزن، شاخص توده بدنی و طول پا (اندازه‌گیری از خار خاصره قدامی فوقانی تا قوزک داخلی در وضعیت طاقباز) ثبت گردید.

اندازه‌گیری شاخص افت ناوی: شاخص افت ناوی به‌عنوان شاخص اصلی یکپارچگی قوس طولی داخلی پا با استفاده از روش پایای توصیف‌شده توسط برودی اندازه‌گیری شد (۲۳،۹). در حالت نشسته شرکت‌کننده (زانوها و ران‌ها با زاویه ۹۰ درجه، مچ پا در وضعیت خنثی)، برجستگی استخوان ناوی لمس و علامت‌گذاری گردید. فاصله عمودی از سطح زمین تا این علامت با استفاده از کولیس دیجیتال (با دقت ۰/۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. سپس شرکت‌کننده در حالت ایستاده و آرام، با توزیع یکسان وزن روی هر دو پا قرار گرفت و مجدداً ارتفاع برجستگی ناوی اندازه‌گیری گردید. شاخص افت ناوی به‌عنوان تفاوت (برحسب میلی‌متر) بین اندازه‌گیری در حالت نشسته (بدون تحمل وزن) و ایستاده (با تحمل وزن) محاسبه شد. مقادیر بالاتر نشان‌دهنده افت بیشتر قوس است. برای هر پا سه بار

اندازه‌گیری انجام و میانگین مقدار مربوط به پای درگیرتر (که در مرحله غربالگری تعیین شد) برای تحلیل استفاده گردید. این روش پایایی درون‌ارزیاب بالایی را نشان داده است (ICC=۰/۹۰) (۲۳).

ارزیابی کنترل پاسچرال: کنترل پاسچرال از طریق آزمون‌های تعادل ایستا و پویا مورد ارزیابی قرار گرفت.

تعادل ایستا: برای ارزیابی پایداری پاسچرال ایستا روی یک پا از آزمون اصلاح‌شده لک‌لک استفاده شد (۲۴،۱۹). شرکت‌کنندگان با پای برهنه روی پای برتر خود ایستاده، کف پای مخالف را کنار زانوی پای ایستاده قرار داده و دست‌ها را روی تهی‌گاه (ایلیاک کرست) می‌گذاشتند. با فرمان "شروع"، پاشنه پای خود را از زمین بلند کرده و روی پنجه می‌ایستادند. مدت زمان (برحسب ثانیه) حفظ این وضعیت، بدون حرکت دادن دست‌ها، جابجایی پای ایستاده یا از دست رفتن تماس پای مخالف، ثبت می‌گردید. در صورت وقوع هر یک از این خطاها، آزمون متوقف می‌شد. سه کوشش با ۶۰ ثانیه استراحت بین آنها انجام شد. میانگین زمان سه کوشش برای تحلیل استفاده گردید. این آزمون در جمعیت نوجوانان پایایی قابل قبولی را نشان داده است (ICC=۰/۶۶) (۲۰).

تعادل پویا: از آزمون تعادل Y برای ارزیابی کنترل پاسچرال پویا و مسافت دستیابی اندام تحتانی استفاده شد (۲۵،۱۷). شرکت‌کنندگان با پای برهنه روی پای برتر خود در مرکز کیت آزمون تعادل ایستاده و دست‌ها را روی تهی‌گاه قرار می‌دادند. از آنها خواسته می‌شد تا با پای غیرایستاده، شاخص را تا آنجا که ممکن است در سه جهت قدامی، خلفی-داخلی و خلفی-خارجی هل داده و سپس با حفظ تعادل روی پای ایستاده به وضعیت شروع بازگردند. پس از سه کوشش آشناسازی، سه کوشش ثبت‌شده در هر جهت انجام گرفت. حداکثر مسافت دستیابی (برحسب سانتی‌متر) در هر جهت ثبت گردید. به منظور هنجارسازی بر اساس طول اندام، نمره ترکیبی با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (۱۷):

نمره ترکیبی (درصد) = [مجموع مسافت‌های قدامی، خلفی-داخلی و خلفی-خارجی / (۳ × طول اندام)] × ۱۰۰

آزمون تعادل Y از پایایی بین‌ارزیاب و درون‌ارزیاب عالی برخوردار است (دامنه ۰/۹۹ - ۰/۹۱=ICC) (۱۷، ۱۸).

پروتکل‌های مداخله

تمامی گروه‌های مداخله، جلسات تمرینی را سه بار در هفته و به مدت هشت هفته (مجموعاً ۲۴ جلسه) زیر نظر مستقیم پژوهشگر انجام دادند. مدت هر جلسه تقریباً ۴۵-۵۵ دقیقه بود و در یک مرکز تخصصی تمرینات اصلاحی برگزار گردید. به گروه کنترل توصیه شد که فعالیت‌های روزمره عادی خود را حفظ کرده و در طول دوره مطالعه از هرگونه برنامه تمرین ساختاریافته یا توانبخشی پرهیز نمایند.

گروه تمرینات اصلاحی: این گروه از پیوستار تمرینات اصلاحی آکادمی ملی طب ورزش آمریکا (NASM) پیروی کردند که بر اساس پروتکل‌های معتبر در مطالعات پیشین بر روی کف پای صاف، بومی‌سازی شده بود (۱۳،۱۱). هر جلسه شامل ۵ دقیقه گرم‌کردن پویا (مانند دویدن سبک، چرخش مچ پا، تاب‌دادن پاها) و به دنبال آن پروتکل چهارمرحله‌ای NASM، مطابق با جدول ۱، بود.

جدول ۱. پروتکل تمرینات اصلاحی **NASM** برای کف پای صاف انعطاف‌پذیر (۲۶،۱۳،۱۱).

مرحله	هدف	نمونه تمرینات	تعداد ست × مدت یا تکرار
۱. رهاسازی	کاهش هیپرتونیسیته و تنش میوفاشیال در عضلات بیش‌فعال	غلتاندن روی فوم: پرونئال‌ها، گاستروکنمیوس، سولئوس	۱-۲ ست × ۳۰ ثانیه برای هر عضله
۲. طویل‌سازی	بهبود قابلیت انبساط عضلات کوتاه‌شده و نیام کف‌پایی	کشش ایستا: کشش گاستروکنمیوس/سولئوس (با تسمه). کشش عصبی-عضلانی: کشش خودالقای نیام کف‌پایی	۲-۳ ست × ۳۰ ثانیه نگه‌داشتن
۳. فعال‌سازی	تقویت ایزوله عضلات درونی و بیرونی کف پا که کم‌فعال هستند	تمرین کوتاه‌کننده پا (گنبدی کردن کف پا)، یوگای انگشتان پا (دور و نزدیک کردن انگشتان)، تقویت تیبیالیس خلفی (وارونگی با کش).	۲-۳ ست × ۱۰-۱۵ تکرار (انقباض ایزومتریک)

۴. یکپارچگی	ارتقای کنترل عصبی-عضلانی و راستای عملکردی در طی حرکات پویا	ایستادن روی یک پا روی سطح ناپایدار، اسکات روی یک پا همراه با دستیابی، راه رفتن پنجه-پاشنه روی خط	۲-۳ ست × ۸-۱۲ تکرار

گروه واقعیت مجازی: این گروه با استفاده از سیستم Nintendo Wii Fit Plus و تخته تعادل وی (شرکت Nintendo، ژاپن) که بستری معتبر برای تمرین تعادل در تحقیقات توانبخشی است، تمرین کردند (۱۶،۱۴). هر جلسه با یک دوره ۱۰ دقیقه‌ای آماده‌سازی شامل حرکات کششی سبک و آشنایی با تخته تعادل آغاز می‌شد. بخش اصلی تمرین به مدت ۳۵-۴۰ دقیقه شامل بازی‌های ساختاریافته (بازی‌های تمرینی) بود که به‌منظور به‌چالش‌کشیدن کنترل پاسچرال، حس عمقی و انتقال وزن انتخاب شده بودند. روند پیشرفت بازی‌ها و مؤلفه‌های هدف آن‌ها در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲. پروتکل تمرین با واقعیت مجازی با استفاده از نینتندو وی فیت پلاس (۲۷،۱۶،۱۴)

تمرکز جلسه	نمونه بازی‌ها/فعالیت‌ها	مؤلفه اصلی کنترل پاسچرال هدف‌گیری‌شده	مدت زمان در هر جلسه
هفته‌های ۱-۲: ثبات پایه	ضربه به سر با توپ (Soccer Heading) ، کج کردن میز (Table Tilt) ، تعادل پایه (حباب تعادل)	ثبات ایستا، توزیع وزن، کنترل مرکز فشار	دقیقه ۱۵-۲۰
هفته‌های ۳-۵: کنترل پویا	اسکی مارپیچ (Ski Slalom) ، حلقه‌ی هولا (Hula Hoop)، راه رفتن روی طناب (Tightrope Walk)	انتقال وزن پویا، تنظیمات پاسچرال پیش‌بینانه	دقیقه ۱۵-۲۰
هفته‌های ۶-۸: یکپارچگی پیشرفته	حرکات یوگا (درخت، جنگجو)، اسنوبرد مارپیچ (Snowboard Slalom) ، پنگوئن لغزان (Penguin Slide)	کنترل ترکیبی ایستا-پویا، ایستادن روی یک پا، یکپارچگی حسی	دقیقه ۱۵-۲۰

پژوهشگر بر تمامی جلسات نظارت داشت و ایمنی را تضمین کرده و با توجه به عملکرد فردی، سطح دشواری بازی‌ها (مانند سرعت، مدت) را برای حفظ چالش مناسب تنظیم می‌کرد.

گروه تمرین ترکیبی: این گروه در یک پروتکل تلفیقی شرکت کردند که مؤلفه‌های کلیدی پروتکل‌های تمرینات اصلاحی و واقعیت مجازی را در هر جلسه با هم ادغام می‌نمود. ساختار جلسات به‌گونه‌ای طراحی شد که مواجهه متوازن با هر دو شیوه را فراهم آورد: *بخش اول (۲۰-۲۵ دقیقه:* پروتکل خلاصه‌شده NASM): این بخش شامل تمرینات اصلی از مراحل رهاسازی، طویل‌سازی، فعال‌سازی و یکپارچگی (مطابق جدول ۱) بود که بر مؤثرترین تمرینات برای راستای پا و فعال‌سازی عصبی-عضلانی تمرکز داشت. *بخش دوم (۲۰-۲۵ دقیقه:* تمرین با واقعیت مجازی): این بخش شامل انجام بازی‌های تمرینی وی فیت (مطابق جدول ۲) با تأکید بر به‌کارگیری کنترل عضلانی و راستای بهبودیافته حاصل از بخش اول، در طی تکالیف تعادلی پویا و واکنشی بود. این ساختار با هدف ایجاد اثر هم‌افزایی طراحی شد، به‌گونه‌ای که اصلاحات بیومکانیکی حاصل از تمرینات NASM از طریق چالش‌های حسی-حرکتی جذاب محیط واقعیت مجازی، تقویت و خودکار گردند (۱۸،۱۷).

تحلیل آماری

تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۶، شرکت IBM) انجام شد. شاخص‌های توصیفی (میانگین ± انحراف معیار) برای تمامی متغیرها محاسبه گردید. نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. همگنی گروه‌ها در ابتدای مطالعه برای متغیرهای جمعیت‌شناختی و پیش‌آزمون با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه برای داده‌های پارامتریک و آزمون کروسکال-والیس برای داده‌های ناپارامتریک بررسی گردید. برای تحلیل اصلی پیامدهای کنترل

پاسچرال (تعادل ایستا و پویا) که دارای توزیع نرمال بودند، از تحلیل کوواریانس یک‌راهه استفاده شد که در آن نمره پس‌آزمون به‌عنوان متغیر وابسته و نمره پیش‌آزمون به‌عنوان کوواریانت در نظر گرفته شد. سپس برای شناسایی تفاوت‌های خاص بین گروهی، از آزمون‌های تعقیبی مقایسه زوجی با تصحیح بونفرونی استفاده گردید. اندازه اثرها به صورت مجذور اتای جزئی گزارش شد. برای داده‌های شاخص افت ناوی که فرض نرمال بودن را نقض کردند، از آزمون ناپارامتریک کروسکال-والیس برای مقایسه نمرات پس‌آزمون در بین چهار گروه استفاده شد. متعاقباً، برای مقایسه‌های زوجی، آزمون‌های یو من-ویتنی با تصحیح بونفرونی به‌کار گرفته شدند. سطح معناداری برای تمامی آزمون‌ها P<۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج

در مجموع، ۴۸ دختر نوجوان مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر، پروتکل مداخله ۸ هفته‌ای را تکمیل کرده و در تحلیل نهایی وارد شدند که در هر یک از چهار گروه تمرینات اصلاحی، واقعیت مجازی، تمرین ترکیبی و کنترل، ۱۲ شرکت‌کننده حضور داشتند. روند جریان شرکت‌کنندگان در طول مطالعه در شکل ۱ خلاصه شده است. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و آنتروپومتریک شرکت‌کنندگان در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج تحلیل واریانس یک‌راهه نشان داد که تفاوت آماری معناداری بین چهار گروه در ابتدای مطالعه از نظر سن، قد، وزن و شاخص توده بدنی وجود نداشت (P>۰/۰۵ برای تمامی متغیرها)، که تأییدی بر همگنی گروه‌ها پیش از آغاز مداخله است.

جدول ۳. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و آنتروپومتریک پایه شرکت‌کنندگان (میانگین ± انحراف معیار)

متغیر	تمرینات اصلاحی (n =۱۲)	واقعیت مجازی (۱۲ n =)	تمرین ترکیبی (۱۲ n =)	کنترل (n =۱۲)	سطح معناداری
سن (سال)	۱۱/۲۰ ± ۱/۱۱	۰۹۹۱۰ ± ۰/۱	۱۱/۶۶ ± ۰/۱۱	۱۱/۰۸ ± ۱/۱۱	۰/۱۴
قد (متر)	۱/۴۵ ± ۰/۱۶	۱/۴۷ ± ۰/۱	۱/۴۶ ± ۰/۱۱	۱/۴۹ ± ۰/۱۵	۰/۷۲
وزن (کیلوگرم)	۴۶/۶ ± ۴/۰۷	۴۶/۲۴ ± ۴/۱۶	۴۷/۶۶ ± ۴/۳۶	۴۶/۰۷ ± ۵/۱۸	۰/۸۱
شاخص توده بدنی (کیلوگرم/متر مربع)	۱۹/۵۹ ± ۱/۲۲	۲۰/۲۵ ± ۲/۲۱	۲۰/۸۴ ± ۱/۶۷	۲۱/۲۲ ± ۱/۸۴	۰/۶۰

علاوه بر این، مقایسه پایه متغیرهای وابسته شامل شاخص‌های کنترل پاسچرال (تعادل ایستا و پویا) و شاخص افت ناوی با استفاده از تحلیل واریانس یک‌راهه و آزمون کروسکال-والیس (متناسب با نوع داده) نیز عدم وجود تفاوت معنادار بین گروه‌ها را در پیش‌آزمون نشان داد (P>۰/۰۵). این امر اطمینان می‌دهد که هرگونه تغییر پس از مداخله می‌تواند به اثرات پروتکل‌های تمرینی اختصاص‌یافته نسبت داده شود.

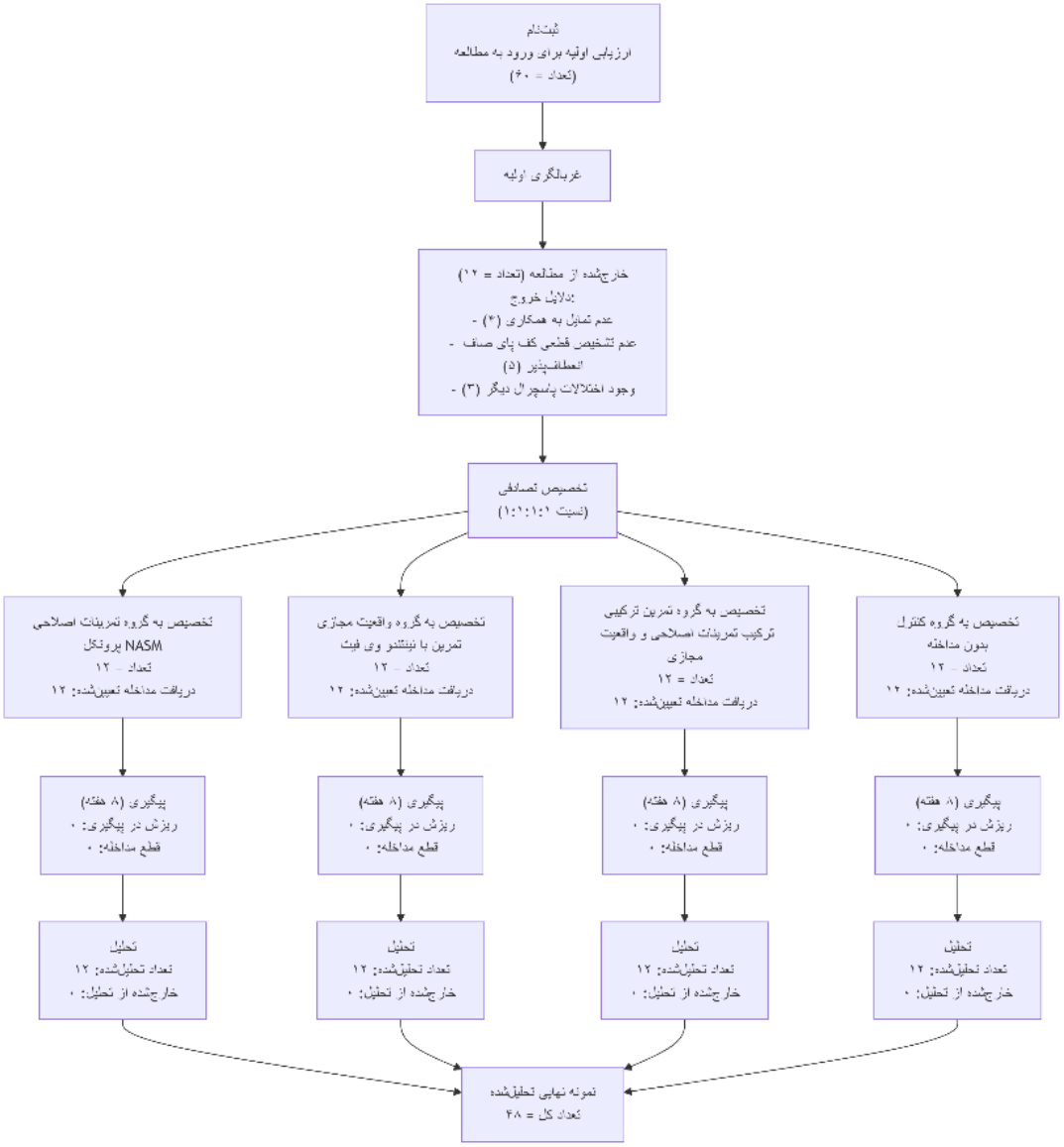
اثرات مداخلات بر کنترل پاسچرال

اثرات مداخلات ۸ هفته‌ای بر کنترل پاسچرال با استفاده از تحلیل کوواریانس یک‌راهه و با در نظر گرفتن نمرات پیش‌آزمون به عنوان کوواریانت مورد تحلیل قرار گرفت.

تعادل پویا: نتایج تحلیل کوواریانس برای نمره ترکیبی آزمون تعادل Y، به عنوان معیاری برای کنترل پاسچرال پویا، یک اثر اصلی معنادار برای گروه نشان داد (P=۰/۰۰۱ ،η^2= ۰/۶۶، F۳،۴۳=۸۳/۲۸) که حاکی از اندازه اثر بزرگ است. میانگین‌های تعدیل‌شده و انحراف معیار پس‌آزمون برای هر گروه در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه‌های زوجی تعقیبی با تصحیح بونفرونی (جدول ۵) نشان داد که هر سه گروه مداخله (تمرینات اصلاحی، واقعیت مجازی و تمرین ترکیبی) نمرات تعادل پویای معنادار بالاتری را در مقایسه با گروه کنترل کسب کردند. با این حال، تفاوت آماری معناداری بین خود سه گروه مداخله یافت نشد (P>۰/۰۵). اگرچه گروه تمرین ترکیبی

بالاترین میانگین نمره عددی را نشان داد (۴/۰۶ ± ۵۸/۱۱ سانتی‌متر).

تعادل ایستا: به طور مشابه، نتایج تحلیل کوواریانس برای مدت زمان آزمون اصلاح‌شده لک‌لک، که ارزیابی‌کننده کنترل پاسچرال ایستا است، یک اثر اصلی معنادار برای گروه را نشان داد ($F_{3,43}=69/11$، $P=0/001$، $\eta^2=0/44$) که بیانگر اندازه اثر بزرگ است. نتایج تعدیل‌شده پس‌آزمون در جدول ۴ تفکیک شده است. آزمون‌های تعقیبی متعاقب با تصحیح بونفرونی (جدول ۵) نشان داد که گروه‌های تمرینات اصلاحی و تمرین ترکیبی به طور معناداری از گروه کنترل بهتر عمل کردند ($P<0/05$). گروه واقعیت مجازی نیز بهبود معناداری را نسبت به گروه کنترل نشان داد ($P=0/003$). مجدداً، تفاوت معناداری در پیامدهای تعادل ایستا بین گروه‌های تمرینات اصلاحی، واقعیت مجازی و تمرین ترکیبی پس از مداخله مشاهده نشد ($P>0/05$).



شکل ۱. نمودار جریان **CONSORT** از روند غربالگری، تخصیص و تحلیل شرکت‌کنندگان

جدول ٤. نتایج تحلیل کوواریانس برای پیامدهای کنترل پاسچرال (میانگین‌های تعدیل‌شده پس‌آزمون ± انحراف معیار)

متغیر	گروه	میانگین تعدیل‌شده پس‌آزمون ± انحراف معیار	F	سطح معناداری	اندازه اثر (η^2)
تعادل پویا (سانتی‌متر)	تمرینات اصلاحی	۵۲/۲۵ ± ۳/۱۰	۲۸/۸۳	۰/۰۰۱	۰/۶۶
	واقعیت مجازی	۵۴/۱۶ ± ۴/۰۸			
	تمرین ترکیبی	۵۸/۱۱ ± ۶/۰۴			
	کنترل	۵۲/۵۰ ± ۲/۹۶			
تعادل ایستا (ثانیه)	تمرینات اصلاحی	۵/۲۵ ± ۱/۸۶	۱۱/۶۹	۰/۰۰۱	۰/۴۴
	واقعیت مجازی	۳/۷۵ ± ۱/۳۵			
	تمرین ترکیبی	۵/۵۰ ± ۱/۶۷			
	کنترل	۳/۹۱ ± ۱/۹۶			

جدول ۵. مقایسه‌های زوجی تعقیبی بونفرونی برای شاخص‌های کنترل پاسچرال

متغیر	مقایسه بین گروهی	تفاوت میانگین	سطح معناداری
تعادل ایستا	کنترل در مقابل تمرینات اصلاحی	-۲/۱۶	۰/۰۰۱
	کنترل در مقابل تمرین ترکیبی	-۱/۹۸	۰/۰۰۱
	کنترل در مقابل واقعیت مجازی	۳/۵۳	۰/۰۰۳
	تمرینات اصلاحی در مقابل تمرین ترکیبی	۰/۱۸	۰/۶۴۱
	تمرینات اصلاحی در مقابل واقعیت مجازی	۰/۷۸	۰/۵۶۷
	واقعیت مجازی در مقابل تمرین ترکیبی	۰/۹۱	۰/۳۲۱
تعادل پویا	کنترل در مقابل تمرینات اصلاحی	۳/۵۴	۰/۰۰۱
	کنترل در مقابل تمرین ترکیبی	۶/۰۵	۰/۰۰۴
	کنترل در مقابل واقعیت مجازی	۴/۳۶	۰/۰۰۱
	تمرینات اصلاحی در مقابل تمرین ترکیبی	۰/۳۱	۰/۲۷۳
	تمرینات اصلاحی در مقابل واقعیت مجازی	۰/۲۰	۰/۹۹۱
	واقعیت مجازی در مقابل تمرین ترکیبی	۰/۵۶	۰/۳۱۱

اثرات مداخلات بر شاخص افت ناوی

نتایج آزمون شاپیرو-ویلک نشان داد که داده‌های شاخص افت ناوی در مرحله پس‌آزمون دارای توزیع نرمال نبودند (P>۰/۰۵). از این رو، برای ارزیابی تفاوت‌های بین‌گروهی از آزمون ناپارامتریک اچ کروسکال-والیس استفاده شد. نتایج، یک اثر آماری معنادار مداخله را بر مقادیر شاخص افت ناوی نشان داد (P=۰/۰۰۱، χ^2=۲۰/۲۶). آمار توصیفی شاخص افت ناوی در پس‌آزمون در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ٦. مقادیر شاخص افت ناوی در پس‌آزمون در گروه‌های مختلف (میانگین ± انحراف معیار)

گروه	میانگین ± انحراف معیار شاخص افت ناوی در پس‌آزمون (میلی‌متر)	مقدار χ^2 کروسکال-والیس	درجه آزادی	سطح معناداری
تمرینات اصلاحی	۵/۰۳ ± ۱/۱۲	۲۰/۲۶	۳	۰/۰۰۱
واقعیت مجازی	۷/۵۶ ± ۱/۳۴			
تمرین ترکیبی	۴/۵۵ ± ۱/۰۸			

کنترل	۹/۲۰ ± ۱/۴۵

آزمون‌های تعقیبی یومن-ویتنی و تصحیح بونفرونی به منظور شناسایی تفاوت‌های خاص بین گروهی انجام شد (جدول ۷). تحلیل‌های پس‌آزمون یک الگوی مشخص را در رابطه با تأثیر پروتکل‌های مختلف بر شاخص افت ناوی نشان داد. مقایسه‌های تعقیبی نشان داد که هر دو گروه تمرینات اصلاحی و تمرین ترکیبی در مقایسه با گروه کنترل، کاهش معنادار و قابل توجهی در شاخص افت ناوی داشتند. در این میان، گروه تمرین ترکیبی با میانگین شاخص افت ناوی ۱/۰۸ ± ۴/۵۵ میلی‌متر، بارزترین بهبود ساختاری را در قوس طولی داخلی پا نشان داد و پس از آن گروه تمرینات اصلاحی با میانگین ۱/۱۲ ± ۵/۰۳ میلی‌متر قرار داشت. در مقابل، یافته‌های مربوط به گروه واقعیت مجازی نشان داد که اگرچه این مداخله برای کنترل پاسچرال مؤثر بود، تأثیر معناداری بر کاهش شاخص افت ناوی نداشت. مقادیر شاخص افت ناوی در گروه واقعیت مجازی نه تنها در مقایسه با گروه کنترل بهبود معناداری را نشان نداد، بلکه به طور معناداری بالاتر از مقادیر هر دو گروه تمرینات اصلاحی و تمرین ترکیبی باقی ماند. این نتایج حاکی از آن است که تمرین مبتنی بر واقعیت مجازی به تنهایی برای ایجاد تغییرات ساختاری مطلوب در مورفولوژی قوس کف پا ناکافی است. در نهایت، تفاوت آماری معناداری در شاخص افت ناوی پس از مداخله بین دو گروهی که مؤلفه تمرینات اصلاحی مبتنی بر NASM را دریافت کردند (یعنی گروه‌های تمرینات اصلاحی و تمرین ترکیبی) مشاهده نشد که این موضوع نقش مرکزی و کافی این نوع تمرین را در ایجاد بهبود ساختاری برجسته می‌سازد.

جدول ۷. مقایسه‌های تعقیبی با تصحیح بونفرونی برای شاخص افت ناوی

مقایسه گروه‌ها	تفاوت میانگین (میلی‌متر)	سطح معناداری
کنترل در مقابل تمرینات اصلاحی	-۴/۰۰	۰/۰۰۱
کنترل در مقابل تمرین ترکیبی	-۲/۶۵	۰/۰۰۱
واقعیت مجازی در مقابل تمرینات اصلاحی	-۲/۳۶	۰/۰۰۱
واقعیت مجازی در مقابل تمرین ترکیبی	-۳/۱۵	۰/۰۰۱
واقعیت مجازی در مقابل کنترل	۰/۵۵	۰/۲۶
تمرینات اصلاحی در مقابل تمرین ترکیبی	۰/۲۳	۰/۹۱

بحث

هدف از مطالعه حاضر، مقایسه اثرات سه روش مداخله‌ای هشت‌هفته‌ای شامل تمرینات اصلاحی (مبتنی بر پروتکلNASM) ، تمرین با واقعیت مجازی و تمرین ترکیبی بر کنترل پاسچرال و افت استخوان ناوی در دختران نوجوان مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر بود. نتایج نشان داد که اگرچه هر سه مداخله فعال در مقایسه با گروه کنترل، به‌طور معناداری باعث بهبود کنترل پاسچرال ایستا و پویا شدند، تنها پروتکل‌های حاوی مؤلفه ساختاریافته تمرینات اصلاحی (یعنی گروه‌های تمرینات اصلاحی و تمرین ترکیبی) در کاهش معنادار شاخص افت ناوی مؤثر بودند. این پیامد افتراقی، بر وجود مسیرهای مکانیسمی مجزایی که این مداخلات از طریق آنها عمل می‌کنند، تأکید کرده و بینش‌های ارزشمندی را برای تجویز بالینی فراهم می‌آورد.

بهبودهای معنادار در کنترل پاسچرال که در تمامی گروه‌های مداخله مشاهده شد، با مجموعه رو به رشدی از شواهد مبنی بر اثربخشی رویکردهای مبتنی بر تمرینات عصبی-عضلانی و فناورمحور در ارتقای تعادل، همسو است (۹، ۴). بهبودهای حاصله در گروه تمرینات اصلاحی را می‌توان عمدتاً به پروتکل نظام‌مند NASM نسبت داد که به‌طور مستقیم نقایص بیومکانیکی و عصبی-عضلانی زمینه‌ساز کف پای صاف انعطاف‌پذیر را هدف قرار می‌دهد (۳). مراحل ابتدایی رهاسازی و طویل‌سازی، احتمالاً با کاهش هیپرتونیسیته در عضلات پرونئال و گاستروکنمیوس، نیروهای مؤثر در پرونیشن بیش از

حد مفصل ساب‌تالار و افت قوس را کاهش داده است (۲۲). مرحله متعاقب فعال‌سازی، که بر عضلات کم‌فعال نظیر تیبیالیس خلفی و عضلات درونی کف پا از طریق تمریناتی مانند مانور کوتاه‌کننده پا تمرکز دارد، برای حمایت فعال از قوس طولی داخلی و فراهمسازی ثبات پویای بخش میانی پا در طی فعالیت‌های تحمل‌کننده وزن، حیاتی است (۲۳). این کنترل عضلانی موضعیِ ارتقا یافته، مستقیماً به دقت حس عمقی بهتر و پاسخ‌های عصبی-عضلانی کارآمدتر در طی تکالیف تعادلی منجر می‌شود و از این رو، بهبودهای مشاهده‌شده را در هر دو آزمون اصلاح‌شده لک‌لک و آزمون تعادل Y تبیین می‌کند.

در مقابل، موفقیت گروه واقعیت مجازی در بهبود کنترل پاسچرال، احتمالاً ناشی از مکانیسمی متفاوت اما مکمل است که بر ارتقای یکپارچگی حسی-حرکتی و یادگیری حرکتی انطباقی متمرکز می‌باشد (۱۱، ۴). بازی‌های تمرینی مبتنی بر واقعیت مجازی، یک محیط تعاملی را فراهم می‌آورند که از طریق بازخورد بینایی زمان‌واقعی و تکالیف تعادلی واکنشی، سیستم‌های کنترل پاسچرال کاربر را به چالش می‌کشد (۲۱). این شرایط، مستلزم یکپارچگی مداوم ورودی‌های بینایی، دهلیزی و حس عمقی برای اجرای حرکات دقیق و هدف‌مند است و بدین ترتیب، پردازش مرکزی و هماهنگی پاسخ‌های پاسچرال را بهبود می‌بخشد. بنابراین، بهبودهای تعادلی مشاهده‌شده، احتمالاً بازتاب‌دهنده افزایش قابلیت انطباق سیستم عصبی مرکزی و راهبردهای حرکتی ظریف‌تری برای حفظ پایداری هستند تا تغییرات ساختاری در سطح پا (۱۵). این تفسیر با پژوهش‌های پیشین که بهبودهای عملکردی را بدون تغییر ساختاری همراه متعاقب مداخلات مبتنی بر واقعیت مجازی گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد (۲۴، ۱۱، ۵).

برجسته‌ترین یافته این مطالعه، جدایی بین پیامدهای عملکردی و ساختاری است. ناتوانی تمرین با واقعیت مجازی به تنهایی در کاهش معنادار شاخص افت ناوی، محدودیت حیاتی این روش را هنگامی که به‌صورت مجزا برای توانبخشی ساختاری کف پای صاف انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود، برجسته می‌سازد (۲۵). تکالیف واقعیت مجازی، اگرچه برای ارتقای تعادل پویا و جلب مشارکت عالی هستند، معمولاً شامل فعالیت‌های با بار کم، زنجیره باز یا تحمل‌کننده وزن با حداقل بار می‌باشند (۱۵). این فعالیت‌ها محرک مکانیکی لازم را از نظر بارگذاری مفصلی خاص، مقاومت و مدت‌زمان، برای ایجاد هایپرتروفی یا بازسازی ساختاری پایدار در عضلات تثبیت‌کننده کلیدی نظیر تیبیالیس خلفی و عضلات درونی کف پا، فراهم نمی‌کنند (۲۴، ۵). برای دستیابی به اصلاح ساختاری معنادار قوس کف پا، تمرینات باید بار و ویژگی کافی را برای تقویت این عضلات به روشی عملکردی و در زنجیره حرکتی بسته فراهم آورند، آن‌گونه که در مراحل فعال‌سازی و یکپارچگی پروتکل NASM محقق شده است (۲۳، ۲۲). این یافته به‌شدت با ادبیات پژوهشی اخیری که بر پیامدهای مورفومتریک برتر تمرینات متمرکز بر عضلات درونی پا در مقایسه با مداخلات عملکردی عمومی‌تر تأکید دارند، همخوانی دارد (۲۳).

گروه تمرین ترکیبی که با کسب بالاترین نمرات تعادل و پایین‌ترین شاخص افت ناوی، جامع‌ترین پیامدها را نشان داد، به نظر می‌رسد که از یک اثر هم‌افزایی بهره‌مند شده است. احتمالاً مؤلفه ابتدایی تمرینات اصلاحی، سیستم عصبی-عضلانی را از طریق بهبود راستای اولیه پا، بهینه‌سازی توالی‌های فعال‌سازی عضلانی و افزایش حساسیت حس عمقی، آماده‌سازی کرده است (۲۲). سپس، مواجهه بعدی با محیط واقعیت مجازی، بستری چالش‌برانگیز و جذاب برای تمرین، تثبیت و خودکارسازی این مهارت‌های حرکتی تازه‌اکتساب‌یافته تحت شرایط پیچیده، متغیر و دارای نیازمندی‌های شناختی فراهم آورده است (۲۴، ۱۱، ۵). این توالی با اصول تثبیت‌شده یادگیری حرکتی همخوانی دارد که در آن، اکتساب اولیه مهارت به‌صورت مجزا، با تداخل زمینه‌ای و تمرین متغیر برای ارتقای حفظ مهارت و انتقال آن به فعالیت‌های روزمره دنبال می‌شود (۲۴). این رویکرد چندوجهی به‌طور مؤثری شکاف بین اصلاح عضلانی موضعی و کنترل حسی-حرکتی کلی را پر کرده و بدین ترتیب، به ماهیت چندعاملی ناپایداری پاسچرال در کف پای صاف انعطاف‌پذیر می‌پردازد (۲۶). روند برتری مداوم، هرچند از نظر آماری معنادار نبود، در تعادل پویای گروه تمرین

ترکیبی نشان می‌دهد که این ترکیب ممکن است به‌طور ویژه برای ارتقای کنترل پاسچرال واکنشی و سطح‌بالاتر، قوی باشد.

این مطالعه دارای محدودیت‌هایی است که باید در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرند. نمونه پژوهش منحصراً شامل دختران نوجوان از یک منطقه جغرافیایی خاص بود که ممکن است قابلیت تعمیم‌پذیری یافته‌ها را به پسران، سایر گروه‌های سنی یا جمعیت‌های قومی متفاوت محدود کند. دوره مداخله هشت‌هفته‌ای، اگرچه برای نشان دادن تغییرات معنادار پیش‌آزمون-پس‌آزمون کافی بود، اطلاعاتی در مورد ماندگاری بلندمدت مزایا یا دوز بهینه برای اصلاح پایدار ارائه نمی‌دهد. علاوه بر این، اتکا بر معیارهای پیامد بالینی، اگرچه معتبر و پایا هستند، می‌تواند با تحلیل‌های بیومکانیکی پیشرفته‌تری نظیر ضبط حرکت سه‌بعدی، پدوباروگرافی پویا یا الکترومیوگرافی تکمیل شود تا بینش عمیق‌تری در مورد تغییرات زیربنایی در کینماتیک، کینتیک و الگوهای فعال‌سازی عضلانی فراهم آورد. ماهیت ذاتی مداخلات مبتنی بر تمرین نیز کورسازی شرکت‌کنندگان و درمانگران را غیرممکن ساخت که این یک چالش روش‌شناختی رایج در کارآزمایی‌های توانبخشی است، هرچند کورسازی ارزیاب به‌طور دقیق برای به حداقل رساندن سوگیری اندازه‌گیری حفظ شد.

علیرغم این محدودیت‌ها، مطالعه دارای نقاط قوت قابل توجهی از جمله استفاده از معیارهای پیامد معتبر و مرتبط بالینی، توصیف دقیق و قابل تکرار تمامی پروتکل‌های مداخله، و مقایسه مستقیم و نوآورانه سه روش درمانی معاصر در یک گروه بیمار همگن است. بررسی یک پارادایم تمرین ترکیبی به یک شکاف آشکار در ادبیات موجود در زمینه مدیریت کف پای صاف کودکان می‌پردازد.

پژوهش‌های آینده باید با انجام مطالعات طولی با دوره‌های پیگیری گسترده‌تر، بر روی این یافته‌ها بنا شوند تا دوام بهبودهای ایجادشده در ساختار قوس کف پا و کنترل پاسچرال تعیین گردد. ادغام تحلیل‌های بیومکانیکی دستگاهی، امکان کمّی‌سازی عینی تغییرات در عملکرد پا و الگوهای بارگذاری را فراهم خواهد آورد. مطالعات مکانیسمی با استفاده از الکترومیوگرافی سطحی می‌توانند انطباق‌های خاص فعال‌سازی عضلانی ناشی از هر روش تمرینی را مشخص سازند. همچنین نیاز به توسعه و ارزیابی سیستم‌های واقعیت مجازی نسل جدیدی وجود دارد که قادر به ارائه تمرینات تحمل‌کننده وزن و مخصوص پا باشند تا پتانسیل آن‌ها برای ایجاد انطباق‌های ساختاری بررسی شود. در نهایت، تکرار این پژوهش در جمعیت‌های گسترده‌تر، شامل پسران، گروه‌های سنی مختلف و شدت‌های گوناگون کف پای صاف، اعتبار خارجی و قابلیت کاربرد بالینی نتایج را افزایش خواهد داد.

برای عملکرد بالینی، یافته‌ها حاکی از آن است که تمرکز اولیه بر برنامه‌های تمرینات اصلاحی مبتنی بر شواهد، نظیر پیوستار NASM، برای دستیابی به اصلاح ساختاری در کف پای صاف انعطاف‌پذیر ضروری است. تمرین با واقعیت مجازی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل برای ارتقای کنترل پاسچرال عملکردی، یکپارچگی حسی-حرکتی و مشارکت بیمار، به‌طور مؤثری ادغام شود. یک راهبرد توانبخشی بهینه ممکن است شامل یک رویکرد ترکیبی متوالی یا تلفیقی باشد، که در آن تمرینات اصلاحی اولیه، راستای مناسب و فعال‌سازی عضلانی را ایجاد کرده و سپس این دستاوردها از طریق تکالیف تعادلی پیش‌رونده و جذاب مبتنی بر واقعیت مجازی، تقویت و به چالش کشیده می‌شوند. برای مدیریت شخصی‌سازی‌شده و مؤثر، توصیه می‌شود تأکید برنامه توانبخشی بر اساس ارزیابی فردی بیمار تنظیم گردد و برای افت شدید قوس، اولویت با تمرینات ساختاری و برای نقص‌های تعادلی بارز، اولویت با تمرینات حسی-حرکتی باشد.

نتیجه‌گیری

در پایان، این مطالعه نشان می‌دهد که یک دوره مداخله هشت‌هفته‌ای با استفاده از تمرینات اصلاحی (پروتکل NASM)، تمرین با واقعیت مجازی یا ترکیب آن‌ها می‌تواند به‌طور مؤثری کنترل پاسچرال را در دختران نوجوان مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر بهبود بخشد. با این حال، برای دستیابی به هدف حیاتی اصلاح ساختاری قوس طولی داخلی پا، آن‌گونه که با کاهش افت استخوان ناوی به‌صورت عینی کمّی‌سازی می‌شود،

مداخلات باید شامل تمرینات اصلاحی هدفمند و تحمل‌کننده وزن باشند که به‌طور ویژه عضلات حمایت‌کننده درونی و بیرونی پا را تقویت کنند. تمرین با واقعیت مجازی به‌عنوان یک ابزار کمکی قدرتمند برای بهبود عملکرد حسی–حرکتی، انگیزه بیمار و پیامدهای عملکردی عمل می‌کند، اما به‌عنوان یک درمان مجزا برای ناهنجاری ساختاری کافی نیست. بنابراین، به پزشکان و متخصصان بالینی توصیه می‌شود که از راهبردهای توانبخشی تلفیقی و چندوجهی استفاده کنند که به‌طور هم‌زمان به نقایص بیومکانیکی، عصبی–عضلانی و حسی–حرکتی مرتبط با کف پای صاف انعطاف‌پذیر کودکان بپردازد تا بهبود ساختاری و عملکردی بهینه گردد.

References

1. Zolfeghary M, Roshani S, Mohammad Ali Nasab Firouzjah E. Effect of Eight Weeks of Corrective Exercises on Navicular Drop, Proprioception, and Balance in 10–13-Year-Old Girls with Flat Foot with and Without Genu Valgum: A Clinical Trial Study. Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences. 2025;24(3):215-27.
2. Brijwasi T, Borkar P. A comprehensive exercise program improves foot alignment in people with flexible flat foot: a randomised trial. Journal of physiotherapy. 2023;69(1):42-6.
3. Ketabchi J, Seidi F, Haghighat S, Falsone S, Moghadas-Tabrizi Y, Khoshroo F. Differential effects of intrinsic-versus extrinsic-first corrective exercise programs on morphometric outcomes and navicular drop in pediatric flatfoot. Scientific Reports. 2024;14(1):31393.
4. Hooshmand Far F, Ebrahimi Atri A, Shahtahmassebi B, Bambeichi S. Comparison of Corrective Exercises with Xbox Kinect Exercises on Static and Dynamic Balance in Teenage Girls with Flat Feet Deformity. Journal of Paramedical Sciences & Rehabilitation. 2024;13(3):22-31.
5. Kalahrodi OG, Piri H, Ebrahimi E. The Effect of Eight Weeks of Corrective Games on the Functional Assessment, Navicular Drop Index, and Balance in Male Students Aged 9 to 12 with Flexible Flatfoot. Journal of Clinical Research in Paramedical Sciences. 2025;14(14).
6. Golchini A, Rahnama N, Lotfi-Foroushani M. Effect of systematic corrective exercises on the static and dynamic balance of patients with pronation distortion syndrome: A randomized controlled clinical trial study. International Journal of Preventive Medicine. 2021;12(1):129.
7. Okamura K, Fukuda K, Oki S, Ono T, Tanaka S, Kanai S. Effects of plantar intrinsic foot muscle strengthening exercise on static and dynamic foot kinematics: A pilot randomized controlled single-blind trial in individuals with pes planus. Gait & posture. 2020;75:40-5.
8. Mousavi A, Arabmomeni A. The Effects of Three Comprehensive Corrective Exercise Protocols on the Correction of Flexible Flat Foot in Boy Students with Overweight. J Ardabil Univ Med Sci. 2021;21(2):157-70.
9. Arabmomeni A, Mousavi SA. Effectiveness of Corrective Exercises Based the National Academy of Sports Medicine's Protocol in Correcting Flexible Flatfoot and Postural Control in Male High School Students With Overweight. Journal of Preventive Medicine. 2022;9(4):376-89.
10. Kazemi Pakdel F, Sedaghati P. The Effect of Corrective Exercises on the Foot Posture and Balance in Female Karate Athletes With Flat Foot. The Scientific Journal of Rehabilitation Medicine. 2023;12(1):114-31.
11. Şahan TY, Arslan SA, Demirci C, Oktaş B, Sertel M. Comparison of short-term effects of virtual reality and short foot exercises in pes planus. The Foot. 2021;47:101778.
12. Kim K, Choi B, Lim W. The efficacy of virtual reality assisted versus traditional rehabilitation intervention on individuals with functional ankle instability: a pilot randomized controlled trial. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology. 2019;14(3):276-80.
13. Neri SG, Cardoso JR, Cruz L, Lima RM, De Oliveira RJ, Iversen MD, et al. Do virtual reality games improve mobility skills and balance measurements in community-dwelling older adults? Systematic review and meta-analysis. Clinical Rehabilitation. 2017;31(10):1292-304.
14. Kamińska MS, Miller A, Rotter I, Szylińska A, Grochans E. The effectiveness of virtual reality training in reducing the risk of falls among elderly people. Clinical interventions in aging. 2018:2329-38.
15. De Natale G, Qorri E, Todri J, Lena O. Impact of Virtual Reality Alone and in Combination with Conventional Therapy on Balance in Parkinson's Disease: A Systematic Review with a Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. Medicina. 2025;61(3):524.
16. Zuil-Escobar JC, Martínez-Cepa CB, Martín-Urrialde JA, Gómez-Conesa A. Evaluating the medial longitudinal arch of the foot: correlations, reliability, and accuracy in people with a low arch. Physical therapy. 2019;99(3):364-72.
17. Plisky P, Schwartkopf-Phifer K, Huebner B, Garner MB, Bullock G. Systematic review and meta-analysis of the Y-balance test lower quarter: reliability, discriminant validity, and predictive validity. International journal of sports physical therapy. 2021;16(5):1190.

18. Plisky PJ, Gorman PP, Butler RJ, Kiesel KB, Underwood FB, Elkins B. The reliability of an instrumented device for measuring components of the star excursion balance test. North American journal of sports physical therapy: NAJSPT. 2009;4(2):92.
19. Kalantariyan M, Rahmani N, Samadi H. The effects of TRX-based movement pattern correction exercises on the landing biomechanics and balance of female volleyball players susceptible to knee injuries. Journal of Sport Biomechanics. 2023;9(2):112-27.
20. Curnow D, Cobbin D, Wyndham J. Reliability of the stork test: is starting stance important? Chiropractic Journal of Australia. 2010;40(4):137-41.
21. Lee J, Yu J, Hong J, Lee D, Kim J, Kim S, editors. The effect of augmented reality-based proprioceptive training program on balance, positioning sensation and flexibility in healthy young adults: a randomized controlled trial. Healthcare; 2022: MDPI.
22. Park D-J, Hwang Y-I. Comparison of the intrinsic foot muscle activities between therapeutic and three-dimensional foot-ankle exercises in healthy adults: An explanatory study. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020;17(19):7189.
23. de Souza TMM, de Oliveira Coutinho VG, Tessutti VD, de Oliveira NRC, Yi LC. Effects of intrinsic foot muscle strengthening on the medial longitudinal arch mobility and function: A systematic review. Journal of Bodywork and Movement Therapies. 2023;36:89-99.
24. Kantha P, Hsu W-L, Chen P-J, Tsai Y-C, Lin J-J. A novel balance training approach: Biomechanical study of virtual reality-based skateboarding. Frontiers in bioengineering and biotechnology. 2023;11:1136368.
25. Hoang N-T-T, Chen S, Chou L-W. The impact of foot orthoses and exercises on pain and navicular drop for adult flatfoot: A network meta-analysis. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021;18(15):8063.
26. Kachouri H, Jouira G, Laatar R, Borji R, Rebai H, Sahli S. Different types of combined training programs to improve postural balance in single and dual tasks in children with intellectual disability. Journal of Intellectual Disabilities. 2024;28(1):225-39.