

تأثیر اضافه کردن تمرینات عصبی - عضلانی واکنشی بر تمرینات کرفوت بر کینتیک راه رفتن در دختران دارای کف پای صاف انعطاف پذیر: یک کار آزمایشی بالینی یک سوکور

غزل تقی زاده^۱، سید صدرالدین شجاع الدین^۲، Google Scholar PubMed

مقاله پژوهشی

چکیده

مقدمه: کف پای صاف انعطاف پذیر اختلال شایعی در دوران رشد می باشد که با افت قوس طولی داخلی و تغییر الگوی راه رفتن همراه است و می تواند منجر به درد و آسیب های مزمن شود. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر ترکیب تمرینات کرفوت و تمرینات عصبی - عضلانی واکنشی بر کینتیک راه رفتن در دختران مبتلا به کف پای صاف بود.

مواد و روش ها: این کار آزمایشی بالینی یک سوکور با طرح پیش آزمون - پس آزمون در سه گروه (دو گروه تجربی، یک گروه شاهد) انجام شد. ۴۸ دختر ۱۲ تا ۱۵ ساله به صورت تصادفی در سه گروه ۱۶ نفره تمرینات کرفوت، تمرینات کرفوت به اضافه تمرینات عصبی - عضلانی واکنشی و شاهد قرار گرفتند. مداخلات به مدت هشت هفته (سه جلسه در هفته) انجام گرفت و داده های کینتیکی شامل نیروی عکس العمل زمین (GRF یا Ground reaction force)، زمان رسیدن به اوج نیروی عکس العمل زمین (T-Peak GRF) و جابه جایی مرکز فشار (COP یا Center of pressure) به کمک صفحه نیرو ثبت گردید. نرمال بودن توزیع داده ها و همگنی واریانس ها به ترتیب با استفاده از آزمون های Shapiro-Wilk و Levene مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه گروه ها در پیش آزمون، از آزمون One-way ANOVA و جهت مقایسه پس آزمون با کنترل اثر پیش آزمون از آزمون های ANCOVA و تعقیبی Bonferroni در سطح معنی داری ۰/۰۵ استفاده شد. داده ها در نرم افزار SPSS تجزیه و تحلیل گردید.

یافته ها: هشت هفته تمرینات تفاوت معنی داری در GRF، T-Peak GRF و COP ایجاد کرد ($P < 0/05$). گروه تمرینات کرفوت به اضافه تمرینات عصبی - عضلانی واکنشی نسبت به گروه کرفوت به تنهایی در GRF، T-Peak GRF و COP بهبودی بیشتری را گزارش نمودند.

نتیجه گیری: اضافه کردن تمرینات عصبی - عضلانی واکنشی به کرفوت، باعث بهبود کینتیک راه رفتن و پایداری بیشتر می شود و یک رویکرد کم هزینه و بالینی مؤثر برای مدیریت کف پای صاف انعطاف پذیر است.

کلید واژه ها: کف پای صاف؛ راه رفتن؛ تمرینات مقاومتی

ارجاع: تقی زاده غزل، شجاع الدین سید صدرالدین. تأثیر اضافه کردن تمرینات عصبی - عضلانی واکنشی بر تمرینات کرفوت بر کینتیک راه رفتن در دختران دارای کف پای صاف انعطاف پذیر: یک کار آزمایشی بالینی یک سوکور. پژوهش در علوم توانبخشی ۱۴۰۴؛ ۲۱.

تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

عقب پا مشخص می شود (۳)، از جمله ناهنجاری های شایع دوران رشد می باشد و عامل خطری برای آسیب های ناشی از بارگذاری مفرط و اختلالات عملکردی پا محسوب می شود (۴). شیوع این ناهنجاری در کودکان تا ۴۲ درصد و در بزرگسالان ۱۵ تا ۲۳ درصد گزارش شده است (۶، ۵) و می تواند منجر به عوارضی همچون التهاب فاسیای کف پا، تاندینوپاتی آشیل، کندرومالاسی پاتلا و سندرم درد کشککی - رانی شود (۷). این ناهنجاری می تواند با تطبیق وضعیتی متعددی شامل آنتی ورژن ران، روتیشن داخلی فمور، روتیشن خارجی تیبیا، والگوس زانو و

مقدمه

سیستم اسکلتی - عضلانی اندام تحتانی با یکپارچگی ساختارهای استخوانی، عضلانی و رباطی، نقش مهمی در تحمل وزن بدن، جذب نیرو و ایجاد حرکات کارا دارد. مجموعه میچ پا و پا به عنوان بخش انتهایی زنجیره حرکتی، مسؤل توزیع فشارهای مکانیکی، حفظ ثبات استاتیک و دینامیک و اجرای فعالیت هایی مانند ایستادن و راه رفتن است (۱، ۲).

کف پای صاف که با افت قوس طولی داخلی، ابداکشن جلوی پا و والگوس

۱- کارشناس ارشد، گروه بیومکانیک و آسیب شناسی ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- استاد، گروه بیومکانیک و آسیب شناسی ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

نویسنده مسؤل: سید صدرالدین شجاع الدین؛ استاد، گروه بیومکانیک و آسیب شناسی ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

Email: shojaeddin@khu.ac.ir

مواد و روش‌ها

این مطالعه یک کارآزمایی بالینی یک سوکور با طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون شامل دو گروه تجربی و یک گروه شاهد بود. جامعه مورد بررسی را دانش‌آموزان دختر ۱۲ تا ۱۵ ساله مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر در استان البرز تشکیل داد. حجم نمونه با استفاده از نرم‌افزار G-Power (G-Power 3.1.5 freeware, University of Düsseldorf, Düsseldorf, German) و بر اساس اندازه اثر ۰/۴، توان آزمون ۰/۸ و سطح معنی‌داری ۰/۰۵ محاسبه گردید و با در نظر گرفتن ۲۰ درصد ریزش، ۴۸ شرکت‌کننده تعیین شد. نمونه‌گیری به صورت تصادفی به شکل بلوک‌بندی انجام گرفت و شرکت‌کنندگان واجد شرایط به طور تصادفی در سه گروه ۱۶ نفره شامل تمرینات کرفوت، تمرینات ترکیبی کرفوت و عصبی-عضلانی واکنشی و گروه شاهد تخصیص یافتند (شکل ۱).

ملاحظات اخلاقی

تحقیق حاضر با کد IR.KHU.REC.1404.051 در کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه خوارزمی و با کد IRCT20250610066157N1 در مرکز کارآزمایی بالینی ایران ثبت گردید. افراد قبل از ورود به پژوهش فرم رضایت‌نامه آگاهانه را امضا کردند.

معیارهای ورود شامل دختران ۱۲ تا ۱۵ ساله مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر (Flexible flatfoot)، شاخص توده بدنی نرمال، اختلاف بیش از ۱۰ میلی‌متری ارتفاع استخوان ناوی هنگام تحمل وزن بدن، مثبت شدن آزمون Jack و Brody (۲۳)، عدم شرکت در برنامه‌های تمرینی مشابه یا استفاده از کفی‌های طبی طی شش ماه گذشته، تأییدیه پزشک متخصص، تکمیل فرم رضایت‌نامه و داوطلب بودن مشارکت بود. غیبت بیش از سه جلسه تمرینی، هرگونه آسیب حاد اندام تحتانی در حین مطالعه (مانند پیچ‌خوردگی مچ پا، پارگی رباط یا کشیدگی شدید عضلانی)، وجود سایر ناهنجاری‌های اسکلتی-عضلانی اندام تحتانی (از جمله زانوی پراترتزی، زانوی ضربدری یا تفاوت طول اندام تحتانی بیش از یک سانتی‌متر)، سابقه جراحی، شکستگی یا دررفتگی در مفاصل اندام تحتانی، ابتلا به بیماری‌های عصبی-عضلانی و همچنین، اعلام عدم تمایل به ادامه همکاری در هر مرحله از مطالعه به عنوان معیارهای خروج در نظر گرفته شد. افراد مبتلا به صافی کف پای سفت (Rigid flatfoot) در غربالگری اولیه به ندرت مشاهده شدند، اما برای جلوگیری از هرگونه تأثیر منفی احتمالی، از بررسی آن‌ها صرف‌نظر گردید.

ابتدا روند اجرای آزمون و جزئیات طرح تحقیق به شرکت‌کنندگان و والدین به طور کامل توضیح داده شد و از آن‌ها درخواست شد که قبل از اجرای آزمون، فرم رضایت‌نامه و اطلاعات فردی خود را تکمیل و امضا نمایند. همچنین، به آن‌ها تضمین گردید که اطلاعات آن‌ها به صورت محرمانه باقی خواهد ماند و هر زمانی که بخواهند، می‌توانند از روند پژوهش خارج شوند. سپس کالیبراسیون سیستم صفحه نیرو مطابق با راهنمای سازنده انجام گردید. پس از آن، قد و وزن آزمودنی توسط آزمونگر با استفاده از ترازو و قدسنج دیجیتال اندازه‌گیری و در فرم اطلاعات فردی ثبت شد.

در مرحله پیش‌آزمون، به منظور سنجش متغیرهای کینتیکی، صفحه نیروی Bertec (Bertec Corporation, Model FP4060-10, USA, 1000 Hz) در مرکز یک مسیر مستقیم ۸ متری قرار داده شد. سطح مسیر برای به حداقل رساندن هرگونه ناهمواری یا اختلال در تماس پا، هموار و تنظیم گردید. این دستگاه قادر به اندازه‌گیری هم‌زمان مؤلفه عمودی و نیروهای برشی (قدامی-خلفی و داخلی-خارجی) طی راه رفتن می‌باشد.

هایپرلودوز کمری همراه باشد (۸).

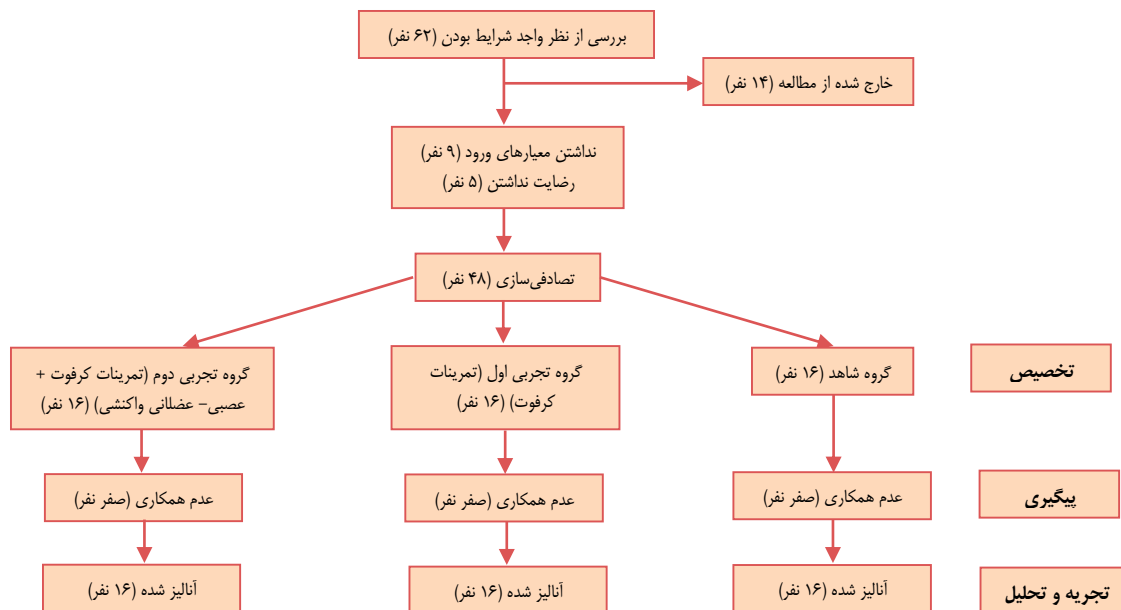
مرکز فشار شاخصی کلیدی جهت کمی‌سازی توزیع فضایی-زمانی نیروهای اعمالی است که در طول فاز استنس، به صورت مسیر خط گام نمایان می‌گردد (۹، ۱۰). افراد با کف پای صاف مسیر جانبی مرکز فشار داخلی‌تری دارند و به علت اختلال عملکرد تاندون درشت‌نئی خلفی، تغییراتی در الگوی راه رفتن ایجاد و جابه‌جایی و سرعت مرکز فشار در طول فاز استنس بیشتر در ناحیه داخلی توزیع می‌کنند (۹، ۱۱).

تحلیل دینامیک جابه‌جایی مرکز فشار (Center of pressure یا COP)، شاخص جامعی جهت ارزیابی ثبات وضعیتی و کارکرد سیستم عصبی-عضلانی در مدیریت ناهنجاری کف پای صاف و سنجش اثربخشی پروتکل‌های اصلاحی محسوب می‌شود (۱۲). همچنین، مؤلفه‌های نیروی عکس‌العمل زمین (GRF یا Ground reaction force)، از جمله شاخص‌های بالینی کلیدی در شناسایی مکانیسم‌های خطر مانند ظرفیت جذب شوک و پایداری مفصلی محسوب می‌شود. اگرچه شدت این نیروها ممکن است کمتر از آستانه آسیب حاد باشد، اما ماهیت تکرار شونده آن‌ها در طولانی مدت، منجر به ایجاد آسیب‌های ریز و وقوع آسیب‌های مزمن در زنجیره کینتیک اندام تحتانی می‌گردد (۱۳). پرونیشن بیش از حد حین راه رفتن، توزیع نامتعادل GRF و الگوی غیر فیزیولوژیک راه رفتن را به دنبال دارد که منجر به خستگی عضلانی و بروز درد می‌شود (۱۴). همچنین، افزایش مؤلفه عمودی و نرخ بارگذاری GRF و تغییر مسیر مرکز فشار، بیان‌کننده کاهش ظرفیت جذب شوک، کاهش ثبات مکانیکی و افزایش استرس وارد بر بافت‌ها است (۱۵).

برای مدیریت کف پای صاف، مداخلاتی مانند کفی طبی، تیپینگ و تمرین درمانی با نتایج مثبت گزارش شده‌اند (۱۶). تمرین درمانی به عنوان رویکرد مؤثری در درمان کف پای صاف معرفی شده است و ترکیب آن با کفی طبی، اثربخشی بیشتری نسبت به کفی طبی به تنهایی دارد (۱۷). تمرینات کرفوت با تقویت عضلات درونی پا، موجب بهبود قوس طولی داخلی و ارتقای شاخص‌های کینماتیکی و کینتیکی راه رفتن می‌شوند (۱۸). تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی نیز با اصلاح الگوهای حرکتی معیوب، تعادل و پایداری دینامیک مفاصل زانو و مچ پا را بهبود می‌بخشند و در بازتوانی اختلالات اسکلتی-عضلانی نتایج مطلوبی داشته‌اند (۱۹، ۲۰).

با وجود اثربخشی مجزای این رویکردها، هر یک به تنهایی محدودیت‌هایی دارند. تمرینات کرفوت به طور عمده بر تقویت عضلات موضعی پا تمرکز دارند و تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی بیشتر کنترل پروگزیمال را بهبود می‌بخشند (۲۱). از آن‌جا که کف پای صاف یک اختلال چند سطحی محسوب می‌شود، فرض بر این است که ترکیب این دو رویکرد به صورت سینرژیک، می‌تواند شاخص‌های کینتیکی راه رفتن را به طور مؤثرتری بهبود دهد (۲۲).

با توجه به محدود بودن تحقیقات پیشین به بزرگسالان و فقدان بررسی مداخلات ترکیبی در کودکان، نیاز به یک پروتکل جامع احساس می‌شود. از آن‌جا که این دو روش به ترتیب نواحی دیستال و پروگزیمال را هدف قرار می‌دهند، انتظار می‌رود ترکیب آن‌ها موجب بهبود کنترل عصبی-عضلانی و ارتقای شاخص‌های کینتیکی راه رفتن شود. بنابراین، هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر افزودن تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی به تمرینات کرفوت بر کینتیک راه رفتن در دختران مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر بود.



شکل ۱. نمودار تصادفی سازی

دو هفته ابتدایی بر سازگاری عصبی-عضلانی در حالت نشسته بود، سه هفته میانی به تمرینات ایستاده و تحمل وزن با افزایش دشواری اختصاص یافت و سه هفته پایانی بر تثبیت الگوهای حرکتی تک‌پایه متمرکز بود (۲۹، ۲۸). تمرینات شامل باز کردن شست، بلند کردن پاشنه‌ها، بلند کردن پاشنه‌ها روی پله، جمع کردن حوله با انگشتان پا، قوس دادن کف پا و باز کردن انگشتان بود (جدول ۱).

تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی مکمل برنامه کرفوت بود و بر اساس پروتکل‌های لطافت کار و همکاران (۳۰)، Ford و همکاران (۳۱) و مظفری‌پور و همکاران (۳۲) طراحی شد. گروه ترکیبی تمرینات را به صورت سه جلسه هفتگی ۴۰ تا ۷۰ دقیقه‌ای انجام داد. همچنین، برای حفظ همسانی حجم تمرین بین دو گروه تجربی، گروه تمرینات کرفوت به تنهایی، تمرینات پایه و کششی (شامل حرکات کششی همسترینگ و ساق پا) را به مدت زمان مشابه با گروه ترکیبی (۴۰ تا ۷۰ دقیقه) انجام دادند تا تأثیر زمان تمرین به عنوان یک متغیر مخدوشگر کنترل گردد. اضافه بار به صورت تدریجی و با افزایش مقاومت کش لوپ هر دو هفته اعمال شد و فقط در صورت اجرای صحیح حرکات، سطح مقاومت افزایش یافت (۳۳، ۳۴). تمرینات شامل اینورژن و دورسی فلکشن مچ پا با کش مقاومتی، اسکات و لانژ با کش مقاومتی، راه رفتن به پهلو، ددلیفت تک پا و پایین آمدن از جعبه با کش مقاومتی بود و بر بهبود کنترل عصبی-عضلانی و واکنش‌های حرکتی تأکید داشت (جدول ۱). از آنجایی که متغیرهای کینتیکی ممکن است تحت تأثیر عوامل محیطی یا آشنایی آزمودنی با شرایط آزمایشگاه در مرحله پس‌آزمون قرار گیرد، گروه شاهد به عنوان یک مرجع مقایسه‌ای در نظر گرفته شد تا اطمینان حاصل گردد که بهبود مشاهده شده در گروه‌های تجربی، فقط ناشی از مداخلات تمرینی بوده است و نه متغیرهای مداخله‌گر محیطی یا زمانی. مرحله پس‌آزمون نیز هشت هفته بعد، دقیقاً مطابق با پیش‌آزمون و با استفاده از همان رویه‌ها و دستگاه‌ها انجام شد.

پس از ثبت داده‌های خام، نخست جانمایی اولیه با بررسی گردید تا تقارن فشار در محورهای قدامی-خلفی و داخلی-خارجی تأیید شود.

در ادامه و پیش از شروع آزمون پویا (Dynamic test)، ابتدا تست ایستا (Static test) به مدت ۵ ثانیه با ایستادن شرکت‌کننده به صورت ساکن در مرکز صفحه نیرو انجام شد تا داده‌های پایه (Baseline) برای کالیبراسیون و تصحیح صفر (Zero correction) دستگاه ثبت گردد (۲۴). همچنین، پیش از شروع آزمون به هر یک از شرکت‌کنندگان ۵ دقیقه زمان سازگاری با مسیر و صفحه نیرو داده شد. برای انجام تست اصلی، شرکت‌کنندگان دو قدم عقب‌تر از سکو (رو به روی آن) ایستادند و سپس از آن‌ها درخواست گردید تا با پای برهنه و سرعت دلخواه راه بروند و اطلاعات کینتیکی آن‌ها ثبت شد. از مترونوم برای حفظ سرعت ثابت در طول آزمایش استفاده گردید (۲۵). سرعت راه رفتن به واحد متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد (میانگین: $1/15 \pm 1/05$ متر بر ثانیه، بدون تفاوت معنی‌دار بین گروه‌ها: $P = 0/68$). موقعیت شروع آزمودنی‌ها به گونه‌ای تعیین شد که گام اول با پای غیر غالب و گام دوم با پای غالب برداشته شود و دقیقاً روی صفحه نیرو قرار گیرد. سپس آزمودنی دو گام دیگر را ادامه داد. پای غالب با استفاده از آزمون ضربه با توپ (Kick test) شناسایی شد (۲۶). تکرار موفقیت‌آمیز زمانی ثبت گردید که شرکت‌کننده پای خود را به طور طبیعی و بدون تغییر الگوی راه رفتن، در مرکز سکو قرار دهد. بین هر تکرار، ۳۰ ثانیه استراحت در نظر گرفته شد و در نهایت، میانگین سه تکرار موفق برای هر اندام تحتانی ثبت گردید (۲۷). در ادامه، شرکت‌کنندگان به طور تصادفی در سه گروه ۱۶ نفره شامل «تمرینات کرفوت، تمرینات ترکیبی (کرفوت + عصبی-عضلانی واکنشی) و گروه شاهد» تخصیص یافتند. دو گروه تجربی به مدت هشت هفته تمرینات اختصاصی دریافت کردند؛ در حالی که گروه شاهد هیچ برنامه تمرینی نداشت.

برنامه تمرینی بر اساس پروتکل‌های Shen و همکاران (۲۸) و Kao و همکاران (۲۹) با تغییرات لازم توسط تیمی از کارشناسان شامل دو فیزیوتراپیست، یک دکتر توان‌بخشی ورزشی و یک متخصص فیزیولوژی ورزشی تدوین گردید. این برنامه هشت هفته‌ای شامل سه جلسه هفتگی ۴۰ تا ۷۰ دقیقه‌ای برگزار شد.

جدول ۱. پروتکل تمرینات کرفوت و عصبی-عضلانی واکنشی طی هشت هفته

تمرینات	هفته ۱ تا ۳	هفته ۴ تا ۵	هفته ۶ تا ۸
کرفوت			
باز کردن شست پا	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۵ × ۳
بلند کردن پاشنه‌ها	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۵ × ۳
بلند کردن پاشنه با هر دو پا روی پله	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۵ × ۳
جمع کردن حوله با انگشتان پا	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۵ × ۳
قوس دادن به کف پا	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۵ × ۳
باز کردن انگشتان پا	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۵ × ۳
تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی			
اینورژن و دورسی فلکشن با کش	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۲ × ۳
اسکات با کش دور زانو	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۲ × ۳
راه رفتن به پهلوی با کش	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۲ × ۳
ددلیفت تک پا با کش دور زانو	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۲ × ۳
لانژ جلو اصلاح شده با کش	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۲ × ۳
پایین آمدن از جعبه به جلو با کش	۸ × ۳	۱۰ × ۳	۱۲ × ۳

استفاده شد. اندازه اثر با استفاده از شاخص مجذور اتا (η^2) گزارش گردید و معیار آن بر اساس پیشنهاد Cohen (کوچک: ۰/۰۱، متوسط: ۰/۰۶، بزرگ: ۰/۱۴) تعیین شد. همچنین، به منظور سنجش تفاوت‌های هر متغیر در مراحل پیش‌آزمون و پس‌آزمون در هر گروه، از آزمون Paired t استفاده گردید. $P < ۰/۰۵$ به عنوان سطح معنی‌داری در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

نتایج آزمون Shapiro-Wilk نرمال بودن توزیع داده‌ها را تأیید کرد و آزمون Levene نشان دهنده همگنی واریانس‌ها بود. همچنین، نتایج آزمون One-way ANOVA تفاوت معنی‌داری را در متغیرهای وابسته بین گروه‌ها در مرحله پیش‌آزمون نشان نداد ($P > ۰/۰۵$). اگرچه در متغیرهای جمعیت‌شناختی (قد، وزن، سن و شاخص توده بدنی) تفاوت‌های معنی‌داری بین گروه‌ها وجود نداشت ($P > ۰/۰۵$). به منظور کنترل دقیق‌تر تأثیر این تفاوت‌های احتمالی بر نتایج اصلی، از آزمون ANCOVA با کنترل اثر پیش‌آزمون و نیز ورود شاخص توده بدنی به عنوان متغیر کمکی (Covariate) در مدل آماری استفاده گردید. بر اساس یافته‌های حاصل از آزمون‌های ANCOVA و Paired t، هشت هفته مداخله تمرینی تأثیرات متفاوتی بر متغیرهای کینتیک راه رفتن در سه گروه شاهد، تمرینات کرفوت و تمرینات ترکیبی (کرفوت + عصبی-عضلانی واکنشی) داشت. نتایج آزمون واریانس با کنترل پیش‌آزمون نشان داد که در محور قدامی-خلفی مرکز فشار، تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها مشاهده گردید ($\eta^2 = ۰/۱۹$ ، $F = ۵/۰۳$ ، $P < ۰/۰۰۱$)، اما در محور داخلی-خارجی تفاوت معنی‌دار نبود ($P > ۰/۰۵۰$). آزمون تعقیبی Bonferroni مشخص کرد که تفاوت اصلی بین گروه شاهد و گروه ترکیبی تمرینات کرفوت و عصبی-عضلانی واکنشی بود که نشان دهنده پایداری بیشتر در حین راه رفتن می‌باشد. گروه کرفوت نیز کاهش مرکز فشار را نشان داد، اما تفاوت آن با گروه شاهد معنی‌دار گزارش نشد. گروه ترکیبی در هر دو مؤلفه مرکز فشار اندازه اثر بالاتری نسبت به گروه کرفوت به تنهایی داشت که اهمیت بالینی این یافته‌ها را تأیید می‌کند (جدول ۲).

داده‌های خام با استفاده از فیلتر پایین‌گذر Butterworth مرتبه ۴ با فرکانس قطع ۲۰ هرتز در محیط نرم‌افزار MATLAB (MATLAB R2022a, MathWorks, Natick, Massachusetts, USA) فیلتر شدند تا نویزهای فرکانس بالا حذف گردد. فاز ایستایی راه رفتن به عنوان فاصله زمانی بین لحظه برخورد پاشنه (نیروی عمودی GRF کمتر از ۲۰ نیوتن) تا لحظه جدا شدن پنجه (نیروی عمودی GRF بیشتر از ۲۰ نیوتن) تعریف شد. به منظور فراهم‌سازی امکان مقایسه بین آزمودنی‌ها، داده‌های جابه‌جایی مرکز فشار بر اساس طول پای هر شرکت‌کننده نرمال‌سازی شد و مقادیر نیروی عمودی نیز بر مبنای درصدی از وزن بدن نرمال‌سازی گردید تا اثر وزن به یک متغیر خنثی در تحلیل‌های آماری تبدیل شود (۲۳). متغیرهای کینتیک مورد بررسی در مطالعه حاضر شامل GRF، زمان رسیدن به اوج نیروی عکس‌العمل زمین (T-Peak GRF) و COP بود. GRF به عنوان حداکثر نیروی عمودی و برشی وارد شده از زمین به پا در طول فاز ایستایی راه رفتن تعریف گردید و مقادیر آن بر حسب درصد وزن بدن نرمال‌سازی شد. این متغیر در سه مؤلفه قدامی-خلفی، داخلی-خارجی و عمودی اندازه‌گیری گردید. همچنین، T-Peak GRF، شاخصی از نرخ بارگذاری بود که به عنوان زمان سپری شده از لحظه تماس پاشنه تا رسیدن به حداکثر نیروی عمودی تعریف و بر حسب میلی‌ثانیه ثبت شد. در نهایت، COP که نشان دهنده مسیر جابه‌جایی نقطه اعمال برآیند نیروهای عمودی در صفحه تماس پا با زمین است، در دو جهت قدامی-خلفی و داخلی-خارجی محاسبه گردید. مقادیر این متغیر بر حسب میلی‌متر و با نرمال‌سازی نسبت به طول پا گزارش شد و کاربرد اصلی آن در تحقیق حاضر، ارزیابی نوسانات وضعیتی و پایداری دینامیک در حین راه رفتن بود (۲۴).

به منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون Shapiro-Wilk و جهت ارزیابی همگنی واریانس‌ها از آزمون Levene استفاده شد. برای بررسی عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین گروه‌ها در ابتدای مطالعه، One-way ANOVA به کار گرفته شد. به منظور تحلیل تفاوت‌های بین گروهی در مرحله پس‌آزمون، از آزمون ANCOVA با کنترل اثر پیش‌آزمون استفاده گردید. در صورت معنی‌دار شدن تفاوت بین گروه‌ها، از آزمون تعقیبی Bonferroni برای تعیین محل دقیق تفاوت‌ها

جدول ۲. نتایج آزمون‌های ANCOVA و Paired t در مراحل پیش‌آزمون و پس‌آزمون برای شاخص‌های Center of pressure (COP) و T-Peak GRF و (GRF) Ground reaction force

متغیر	گروه	پیش‌آزمون		پس‌آزمون		بین‌گروهی		درون‌گروهی	
		(میانگین ± انحراف معیار)	(میانگین ± انحراف معیار)	F	P	اندازه اثر	T	مقدار P	اندازه اثر
COP X (میلی‌متر)	CO	۴/۹۹ ± ۱/۵۵	۴/۸۰ ± ۱/۱۲	۱/۹۹	۰/۱۴۰	۰/۰۸	۰/۳۳	۰/۷۴۰	۰/۰۸
CFE	CFE	۵/۱۲ ± ۱/۳۳	۴/۳۹ ± ۱/۰۳				۲/۰۶	۰/۰۵۰	۰/۵۳
CFE+RNT	CFE+RNT	۵/۳۴ ± ۱/۲۶	۴/۰۹ ± ۰/۹۵				۴/۱۹	۰/۰۰۱*	۱/۰۸
COP Y (میلی‌متر)	CO	۱۹/۸۸ ± ۱/۵۷	۱۹/۷۶ ± ۱/۵۲	۵/۰۳	۰/۰۱۰	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۸۰۰	۰/۰۶
CFE	CFE	۲۱/۷۴ ± ۲/۱۱	۱۹/۹۵ ± ۱/۱۷				۴/۶۵	۰/۰۰۱*	۱/۲۴
CFE+RNT	CFE+RNT	۲۱/۶۳ ± ۱/۷۷	۱۹/۱۱ ± ۰/۷۶				۶/۹۴	۰/۰۰۱*	۱/۷۹
GRF X (درصد BW)	CO	۵/۷۷ ± ۱/۰۹	۵/۶۹ ± ۱/۶۶	۳/۵۰	۰/۰۳۰	۰/۱۴	۰/۲۷	۰/۷۸۰	۰/۰۷
CFE	CFE	۶/۳۹ ± ۱/۰۳	۴/۷۹ ± ۱/۶۱				۳/۳۳	۰/۰۰۱*	۰/۸۶
CFE+RNT	CFE+RNT	۶/۳۸ ± ۱/۰۵	۴/۴۸ ± ۱/۵۰				۴/۲۱	۰/۰۰۱*	۱/۰۵
COP X (میلی‌متر)	CO	۱۵/۰۱ ± ۱/۹۵	۱۳/۹۳ ± ۲/۷۹	۴/۳۲	۰/۰۲۰	۰/۱۷	۱/۶۵	۰/۱۲۰	۰/۴۲
CFE	CFE	۱۵/۳۴ ± ۱/۵۴	۱۲/۷۵ ± ۱/۶۹				۵/۲۴	۰/۰۰۱*	۱/۳
CFE+RNT	CFE+RNT	۱۶/۳۷ ± ۱/۴۷	۱۲/۳۸ ± ۱/۹۱				۷/۹۳	۰/۰۰۱*	۲/۰۴
GRF Z (درصد BW)	CO	۹۸/۵۶ ± ۴/۲۳	۱۰۲/۴۴ ± ۷/۲۴	۸/۱۶	۰/۰۰۱*	۰/۲۸	۱/۵۵	۰/۱۴۰	۰/۴۰
CFE	CFE	۱۰۲/۸۰ ± ۷/۱۲	۹۶/۸۶ ± ۸/۰۸				۲/۲۴	۰/۰۴۰	۰/۵۷
CFE+RNT	CFE+RNT	۱۰۰/۷۶ ± ۳/۶۵	۹۰/۱۳ ± ۸/۸۰				۴/۲۸	۰/۰۰۱*	۱/۱۰
T-Peak GRF (درصد فاز استانس)	CO	۲۳/۸۶ ± ۲/۴۷	۲۳/۸۰ ± ۱/۷۹	۱۲/۱۴	۰/۰۰۱*	۰/۳۷	۰/۱۱	۰/۹۱۰	۰/۰۲
CFE	CFE	۲۱/۷۴ ± ۱/۸۱	۲۶/۱۲ ± ۲/۷۳				۶/۵۸	۰/۰۰۱*	۰/۹۵
CFE+RNT	CFE+RNT	۲۲/۸۸ ± ۲/۴۵	۲۵/۹۱ ± ۲/۶۳				۷/۵۸	۰/۰۰۱*	۱/۷۰

مرکز فشار قدامی- خلفی: COP X، مرکز فشار داخلی- خارجی: COP Y، نیروی عکس‌العمل زمین قدامی- خلفی: GRF X، نیروی عکس‌العمل زمین داخلی- خارجی: GRF Y، نیروی عکس‌العمل زمین عمودی: GRF Z، زمان رسیدن به اوج نیروی عکس‌العمل زمین: T-Peak GRF، گروه شاهد: CO، گروه تمرینات کرفوت: CFE، گروه تمرینات کرفوت + تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی: CFE + RNT، $P < ۰/۰۵^*$ به عنوان سطح معنی‌داری در نظر گرفته شد.

دینامیک، کاهش فشارهای مکانیکی و بهینه‌سازی الگوی بارگذاری هنگام راه رفتن در دختران مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر است (جدول ۲).

بحث

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر افزودن تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی به تمرینات کرفوت بر متغیرهای کینتیک راه رفتن شامل COP، GRF و زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی T-Peak GRF در دختران ۱۲ تا ۱۵ ساله مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر بود. یافته‌های اصلی نشان داد که هر دو پروتکل تمرینی (کرفوت و ترکیبی)، منجر به بهبود معنی‌داری در بیشتر متغیرهای کینتیک شدند، اما گروه ترکیبی (کرفوت + عصبی-عضلانی واکنشی) بهبودهای چشمگیرتر و پایدارتری را در تمامی شاخص‌ها نسبت به گروه کرفوت به تنهایی نشان داد. این یافته‌ها از نظر بالینی حایز اهمیت می‌باشد؛ چرا که حاکی از آن است که یک رویکرد درمانی چند سطحی که هم عضلات درونی کف پا و هم زنجیره حرکتی پروگزیمال را هدف قرار می‌دهد، می‌تواند کارایی راه رفتن را در این جمعیت بیشتر بهبود بخشد.

COP: شاخص معتبری جهت ارزیابی کنترل وضعیتی و پایداری دینامیک در حین راه رفتن است (۳۵). افراد دارای کف پای صاف به دلیل ضعف عضلات درونی پا و اختلال در حس عمقی، اغلب دامنه COP بیشتری به ویژه در محور داخلی-خارجی نشان می‌دهند که بیان‌کننده ناپایداری جانبی می‌باشد (۳۶). در مطالعه حاضر، هر دو گروه تجربی کاهش معنی‌داری را در محور داخلی-خارجی COP

با کنترل پیش‌آزمون، تفاوت معنی‌دار در هر سه محور GRF شامل قدامی-خلفی ($\eta^2 = ۰/۱۴$ ، $P = ۰/۰۳۰$ ، $F = ۳/۵۰$)، داخلی-خارجی ($\eta^2 = ۰/۱۷$ ، $P = ۰/۰۲۰$ ، $F = ۴/۳۲$) و عمودی ($\eta^2 = ۰/۲۸$ ، $P = ۰/۰۰۰$ ، $F = ۸/۱۶$) مشاهده شد. آزمون تعقیبی Bonferroni نشان داد که تفاوت اصلی بین گروه شاهد و گروه ترکیبی وجود داشت. گروه ترکیبی کاهش ۳۰ درصدی در محور قدامی-خلفی، ۲۴ درصدی در محور داخلی-خارجی و ۱۰ درصدی را در مؤلفه عمودی تجربه کرد؛ در حالی که گروه کرفوت کاهش‌های ۲۵ و ۶ درصدی را در همان محورها داشت، اما در برخی مؤلفه‌ها تفاوت معنی‌دار با گروه شاهد مشاهده نگردید که نشان دهنده کاهش فشار مکانیکی بر مفاصل اندام تحتانی، بهبود راستای حرکتی و افزایش جذب شوک در گروه ترکیبی می‌باشد. همچنین، در T-Peak GRF تفاوت معنی‌دار بین گروه‌ها وجود داشت ($\eta^2 = ۰/۳۷$ ، $P < ۰/۰۰۱$ ، $F = ۱۲/۱۴$)؛ به طوری که گروه کرفوت ۲۰ درصد و گروه ترکیبی ۱۳ درصد افزایش را گزارش نمودند که بیانگر تدریجی‌تر شدن نرخ بارگذاری و کاهش فشارهای ناگهانی بر ساختارهای پا است. آزمون تعقیبی Bonferroni تفاوت معنی‌دار این تغییر را بین هر دو گروه تمرینی و گروه شاهد تأیید کرد و اندازه اثر بزرگ گروه ترکیبی، اهمیت بالینی آن را نشان می‌دهد. به طور کلی، اگرچه تمرینات کرفوت به تنهایی منجر به بهبودهایی در بیشتر متغیرها شد، اما گروه ترکیبی (کرفوت + عصبی-عضلانی واکنشی) بهبودهای بیشتری را در تمامی شاخص‌ها نشان داد و تفاوت معنی‌داری با گروه شاهد در متغیرهای COP Y، GRF X، GRF Y، GRF Z و T-Peak GRF داشت که نشان دهنده برتری این رویکرد ترکیبی در بهبود پایداری

کاهش ضربه ناگهانی به ساختارهای پا و میج پا می‌باشد که عامل محافظتی مهمی در برابر آسیب‌های ناشی از استفاده مفرط همچون التهاب فاشیای کف پا و استرس فرکتور محسوب می‌شود (۵۲). یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که هر دو گروه تجربی، افزایش معنی‌داری در T-Peak GRF داشتند (گروه کرفوت ۱۸ درصد و گروه ترکیبی: ۱۴ درصد) و آزمون ANCOVA تفاوت بسیار معنی‌داری بین گروه‌ها به نفع گروه‌های تمرینی نسبت به گروه شاهد نشان داد. نکته قابل توجه این که اندازه اثر درون گروهی گروه ترکیبی ($d = ۱/۷۰$) بزرگ‌تر از گروه کرفوت ($d = ۰/۹۵$) بود که نشان دهنده پایداری بیشتر این تغییرات در گروه ترکیبی می‌باشد. این یافته با نتایج مطالعه Padrón و همکاران که نشان دادند افراد با کف پای صاف زمان تماس بیشتری در فاز ایستایی دارند (۵۳) و همچنین، با یافته‌های تحقیق کریم‌زاده و همکاران که دریافته‌اند تمرینات کرفوت به تنهایی قادر به تغییر معنی‌دار شاخص‌های کینتیک پا نیست (۵۴)، قابل مقایسه است. با این حال، برتری گروه ترکیبی در اندازه اثر، حاکی از آن است که کنترل عصبی-عضلانی بهبود یافته در سطح ران و لگن (از طریق تمرینات واکنشی) به زمان بندی دقیق‌تر تماس پاشنه و انتقال تدریجی وزن کمک می‌کند که نتیجه آن، کاهش نرخ بارگذاری و افزایش زمان اوج نیرو است (۵۶، ۵۵). از منظر بالینی، یافته‌های بررسی حاضر حایز اهمیت است؛ چرا که نشان می‌دهد افزودن تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی به تمرینات کرفوت، یک راهکار درمانی مقرون به صرفه و مؤثر برای مدیریت کف پای صاف انعطاف‌پذیر در دختران نوجوان می‌باشد. اندازه اثرهای بزرگ تا بسیار بزرگ (از ۰/۵۷ تا ۲/۰۴ برای اثرات درون گروهی و از ۰/۱۴ تا ۰/۳۷ برای اثرات بین گروهی) تأیید می‌کنند که این بهبودها نه تنها از نظر آماری، بلکه از نظر بالینی نیز معنی‌دار می‌باشد (بر اساس معیار Cohen). کاهش نیروهای وارده و بهبود تدریجی بارگذاری می‌تواند خطر ابتلا به آسیب‌های ثانویه همچون درد پاتلوفمورال، تاندینوپاتی آشیل و التهاب فاشیای کف پا را در این افراد کاهش دهد (۵۷).

محدودیت‌ها

پژوهش حاضر دارای محدودیت‌هایی بود که باید در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرد. اول، حجم نمونه نسبتاً کوچک (۴۸ نفر) و محدود بودن جامعه آماری به دختران ۱۲ تا ۱۵ ساله، قابلیت تعمیم نتایج به پسران، سایر گروه‌های سنی و بیماران با کف پای صاف سفت را محدود می‌کند. دوم، سطح فعالیت بدنی روزانه و نوع کنش‌های مورد استفاده شرکت‌کنندگان در طول دوره مطالعه به طور کامل کنترل نشد که ممکن است به عنوان متغیرهای مخدوشگر عمل کرده باشند. سوم، متغیرهای میانجی مهمی مانند قدرت ایزومتریک و ایزوکینتیک عضلات درونی و بیرونی پا، ارتفاع قوس طولی داخلی (با روش‌های دقیق‌تر مانند رادیوگرافی یا اسکتر سه بعدی)، فعالیت الکترومیوگرافی عضلات کلیدی (همچون تیبیالیس خلفی، پرونوس لونگوس و گاستروکنمیوس) و میزان درد (با مقیاس‌های استاندارد) در تحقیق حاضر اندازه‌گیری نشد. چهارم، پیگیری طولانی مدت برای ارزیابی ماندگاری اثرات تمرینی پس از پایان مداخله انجام نگرفت.

پیشنهادها

بر اساس یافته‌ها و محدودیت‌های پژوهش، پیشنهادها زیر مطرح می‌شود:

- انجام مطالعات مشابه با حجم نمونه بزرگ‌تر شامل هر دو جنس و گروه‌های سنی گسترده‌تر

نشان دادند، اما گروه ترکیبی با اندازه اثر بسیار بزرگ و تفاوت معنی‌دار با گروه شاهد، برتری آشکاری داشت. این یافته با نتایج تحقیق Kao و همکاران که نشان دادند تمرینات کرفوت به تنهایی می‌تواند دامنه COP را کاهش دهد (۲۸)، همسو است. با این حال، برتری گروه ترکیبی در بررسی حاضر نشان می‌دهد که افزودن تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی، از طریق بهبود کنترل عصبی-عضلانی در مفاصل ران و زانو، ثبات پروگزیمال را افزایش و به دنبال آن، نوسانات دیستال را کاهش می‌دهد (۳۹). این یافته با نتایج پژوهش Yulianti و همکاران که به این نتیجه رسیدند ضعف کنترل پروگزیمال به طور مستقیم با ناپایداری پا در کودکان دارای کف پای صاف مرتبط است (۴۰)، همخوانی داشت. اگرچه هر دو گروه تجربی در محور قدامی-خلفی COP کاهش نشان دادند، اما تفاوت بین گروه‌ها معنی‌دار نبود. این موضوع ممکن است به این دلیل باشد که کنترل قدامی-خلفی COP بیشتر به راهکارهای میج پا وابسته است تا ران و لگن (۴۱) و هر دو پروتکل به یک اندازه عضلات دورسی فلکسور و پلانتر فلکسور میج پا را درگیر کرده‌اند. این یافته با نتایج مطالعه Rossi و همکاران که نشان داد تمرینات موضعی پا تأثیر بیشتری بر کنترل جانبی دارد تا قدامی-خلفی (۴۱)، مطابقت دارد.

تأثیر مداخلات بر GRF. این نیرو بازتابی از بارهای مکانیکی وارد بر سیستم اسکلتی-عضلانی در طی تماس پا با زمین است (۴۲). پرونیشن بیش از حد در کف پای صاف، منجر به افزایش مؤلفه داخلی و عمودی GRF و کاهش ظرفیت جذب شوک می‌شود (۴۳، ۴۴). در تحقیق حاضر، گروه ترکیبی کاهش معنی‌دارتری را در هر سه مؤلفه GRF نسبت به گروه کرفوت نشان داد. به طور مشخص، کاهش ۳۲ درصدی در مؤلفه قدامی-خلفی، ۲۶ درصدی در مؤلفه داخلی-خارجی و ۱۱ درصدی در مؤلفه عمودی GRF در گروه ترکیبی مشاهده شد؛ در حالی که گروه کرفوت به تنهایی کاهش‌های ۷، ۲۲ و ۵ درصدی را به ترتیب در این مؤلفه‌ها گزارش کرد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش Utsahachant و همکاران که نشان دادند ترکیب تمرینات کرفوت با تمرینات اندام تحتانی تأثیر بیشتری بر دینامیک پا دارد (۴۵) و همچنین، با یافته‌های مطالعه یدالهی و همکاران که بر نقش تمرینات عصبی-عضلانی در بهبود توزیع نیرو تأکید کردند (۴۶)، هم‌راستا می‌باشد.

مکانیسم فیزیولوژیکی این بهبود را می‌توان در دو سطح تبیین کرد:

- سطح دیستال: تمرینات کرفوت با تقویت عضلات قوس دهنده همچون عضله خم‌کننده کوتاه انگشتان و عضله دورکننده شست، سفتی دینامیک قوس طولی داخلی را افزایش می‌دهد و از فروافتادگی بیش از حد آن جلوگیری می‌کند (۴۷، ۴۸). طبق یافته‌های تحقیق Okamura و همکاران، فعال‌سازی عضلات درونی کف پا، ظرفیت حمایت از قوس طولی داخلی را دارد و می‌تواند کینماتیک پا را در حین راه رفتن تغییر دهد (۴۹).

- سطح پروگزیمال: تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی با بهبود الگوی فعال‌سازی عضلات دور مفصل ران (به ویژه عضلات سرینی و چرخش دهنده‌های خارجی) و کنترل والگوس زانو، زنجیره حرکتی را پایدارتر و نیروهای برشی و عمودی را به طور متوازن‌تری در کل اندام تحتانی توزیع می‌کند (۵۰، ۵۱). Ford و همکاران به این نتیجه دست یافتند که تمرینات عصبی-عضلانی متمرکز بر هیپ، می‌تواند والگوس دینامیک اندام تحتانی را کاهش دهد و کنترل عصبی-عضلانی را بهبود بخشد (۵۱). اثر هم‌افزای این دو سطح از مداخله، توضیح دهنده برتری معنی‌دار گروه ترکیبی می‌باشد.

تأثیر مداخلات بر T-Peak GRF. این شاخص حساس از نرخ بارگذاری (Loading rate) است. افزایش این زمان به معنی توزیع تدریجی‌تر نیرو و

پژوهش همکاری صمیمانه داشتند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید. همچنین، از تمامی کسانی که در انجام این تحقیق همکاری نمودند، سپاسگزاری می‌گردد.

نقش نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی پروژه: غزل تقی‌زاده، سید صدرالدین شجاع‌الدین
جذب منابع مالی برای انجام پروژه: سید صدرالدین شجاع‌الدین
خدمات پشتیبانی و اجرایی و علمی پروژه: سید صدرالدین شجاع‌الدین
فراهم کردن تجهیزات و نمونه‌های پروژه: غزل تقی‌زاده، سید صدرالدین شجاع‌الدین
جمع‌آوری داده‌ها: غزل تقی‌زاده، سید صدرالدین شجاع‌الدین
تحلیل و تفسیر نتایج: غزل تقی‌زاده
خدمات تخصصی آمار: غزل تقی‌زاده، سید صدرالدین شجاع‌الدین
تنظیم دست‌نوشته: غزل تقی‌زاده، سید صدرالدین شجاع‌الدین
ارزیابی تخصصی دست‌نوشته از نظر مفاهیم علمی: غزل تقی‌زاده، سید صدرالدین شجاع‌الدین
تأیید دست‌نوشته نهایی جهت ارسال به دفتر مجله: غزل تقی‌زاده، سید صدرالدین شجاع‌الدین
مسئولیت حفظ یکپارچگی فرایند انجام مطالعه از آغاز تا انتشار و پاسخگویی به نظرات داوران: غزل تقی‌زاده، سید صدرالدین شجاع‌الدین

منابع مالی

مطالعه حاضر مستخرج از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد با کد اخلاق IR.KHU.REC.1404.051، مصوب کمیته اخلاق دانشگاه خوارزمی می‌باشد و با شماره IRCT20250610066157N1 مورد تأیید مرکز ثبت کارآزمایی بالینی ایران قرار گرفت.

تعارض منافع

نویسندگان دارای تعارض منافع نمی‌باشند.

۲. اندازه‌گیری هم‌زمان متغیرهای کینتیک با متغیرهای الکترومیوگرافی و سینماتیک برای درک بهتر مکانیسم‌های عصبی-عضلانی زمینه‌ساز بهبودها
۳. طراحی تحقیقات با دوره پیگیری حداقل ۳ تا ۶ ماهه به منظور ارزیابی پایداری و ماندگاری اثرات تمرینی
۴. مقایسه مستقیم اثر تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی به تنهایی با تمرینات کرفوت و رویکرد ترکیبی در یک کارآزمایی بالینی سه بازویی جهت شناسایی مؤثرترین رویکرد درمانی
۵. بررسی تأثیر این پروتکل‌های تمرینی بر متغیرهای عملکردی مرتبط با فعالیت‌های روزمره مانند تعادل پویا، توان پرش و حس عمقی

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اگرچه تمرینات کرفوت به تنهایی می‌تواند منجر به بهبود برخی از متغیرهای کینتیک راه رفتن در دختران مبتلا به کف پای صاف انعطاف‌پذیر شود، اما رویکرد ترکیبی (کرفوت همراه با تمرینات عصبی-عضلانی واکنشی) به طور قابل توجهی مؤثرتر است و بهبودهای بیشتری را در پایداری دینامیک (کاهش COP)، کاهش بارهای مکانیکی مضر (کاهش GRF در هر سه جهت) و بهینه‌سازی الگوی بارگذاری (افزایش T-Peak GRF) ایجاد می‌کند. این یافته‌ها از دیدگاه بالینی تأکید می‌کند که مدیریت مؤثر کف پای صاف انعطاف‌پذیر در کودکان و نوجوانان، نیازمند یک رویکرد یکپارچه و چند سطحی است که هم‌زمان نقص‌های موضعی پا و ناکارآمدی‌های عصبی-عضلانی در بخش‌های پروگزیمال زنجیره حرکتی را هدف قرار دهد.

تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر برگرفته از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد با کد اخلاق IR.KHU.REC.1404.051 از کمیته اخلاق در دانشگاه خوارزمی می‌باشد و با کد IRCT20250610066157N1 مورد تأیید مرکز ثبت کارآزمایی بالینی ایران قرار گرفت. بدین وسیله از تمام شرکت‌کنندگانی که با صبر و حوصله در تمام مراحل





References

1. Moeini S, Roostayi MM, Akbarzadeh Baghban A. Effect of insole and exercise therapy on correction of foot longitudinal arch, pelvic tilt, and lumbar lordosis in flat foot people: a systematic review. *J Rehabil Med*. 2019; 7(4): 261-7.
2. Gooding TM, Feger MA, Hart JM, Hertel J. Intrinsic foot muscle activation during specific exercises: a T2 time magnetic resonance imaging study. *J Athl Train*. 2016; 51(8): 644-50.
3. Koh HLA, Lin WH, Kong PW. Comfort and ground reaction forces in flat-footed female runners: comparison of low-dye taping versus sham taping. *J Sports Sci Med*. 2020; 19(3): 620-6.
4. Sung PS. The ground reaction force thresholds for detecting postural stability in participants with and without flat foot. *J Biomech*. 2016; 49(1):60-5.
5. Shahriari F, Roshani S, Mohammad Ali Nasab Firouzjah E. Effect of 8 weeks foot reflexology massage on balance, foot arch, and pain in girls aged 14 to 18 years with flat foot. *Sci J Rehabil Med*. 2024; 13(2): 364-77.
6. Xu L, Gu H, Zhang Y, Sun T, Yu J. Risk factors of flatfoot in children: a systematic review and meta-analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2022; 19(14): 8247.
7. Molina-García C, Banwell G, Rodríguez-Blanque R, Sánchez-García JC, Reinoso-Cobo A, et al. Efficacy of plantar orthoses in paediatric flexible flatfoot: a five-year systematic review. *Children*. 2023; 10(2): 371.
8. Marouvo J, Sousa F, Fernandes O, Castro MA, Paszkiel S. Gait kinematics analysis of flatfoot adults. *Appl Sci*. 2021; 11(15): 7077.
9. Padrón L, Bayod J, Becerro-de-Bengoa-Vallejo R, Losa-Iglesias M, López-López D, Casado-Hernández I. Influence of the center of pressure on baropodometric gait pattern variations in the adult population with flatfoot: a case-control study. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023; 11: 1147616.

10. Buldt AK, Allan JJ, Landorf KB, Menz HB. The relationship between foot posture and plantar pressure during walking in adults: a systematic review. *Gait Posture*. 2018; 62: 56-67.
11. Sung PS. The ground reaction force thresholds for detecting postural stability in participants with and without flat foot. *J Biomech*. 2016; 49: 60-5.
12. Yulianti A, Efendi ARD, Lubis ZI. Comparative analysis of the components of a child's gait pattern with flat foot disorder. *KnE Med*. 2023: 231-42.
13. Tajdini Kakavandi H, Sadeghi H, Abbasi A. Investigation of ground reaction force components in active men with and without genu varum deformity during the stance phase of running. *J Sport Biomech*. 2018; 4(1): 17-27.
14. Bandholm T, Boysen L, Haugaard S, Zebis MK, Bencke J. Foot medial longitudinal-arch deformation during quiet standing and gait in subjects with medial tibial stress syndrome. *J Foot Ankle Surg*. 2008; 47(2): 89-95.
15. Yulianti A, Efendi ARD, Lubis ZI. Comparative analysis of gait pattern components in children with flat foot disorder. *KnE Med*. 2023: 231-42.
16. Bari AZ, Ahmed N, Farhan M, Al-Shenqiti A, Zafar MS. Comparing prefabricated and 3D-printed foot orthoses for flat foot management: a randomized controlled trial. *Am J Phys Med Rehabil*. 2025; 104(4): 298.
17. Okamura K, Fukuda K, Oki S, Ono T, Tanaka S, Kanai S. Effects of plantar intrinsic foot muscle strengthening on static and dynamic foot kinematics. *Gait Posture*. 2020; 75: 40-5.
18. Lynn SK, Padilla RA, Tsang KK. Differences in static- and dynamic-balance task performance after intrinsic foot muscle training. *J Sport Rehabil*. 2012; 21(4): 327-33.
19. Noori H, Sheikhhoseini R, Eslami R, Ghorbani MR. Effects of reactive neuromuscular training on upper quarter posture. *Int J Sch Health*. 2020; 7(2): 54-60.
20. Seada Y, Elsayed E, Talat W. Impact of reactive neuromuscular training on falling in Parkinson's disease. *Indian J Physiother Occup Ther*. 2013; 8(2): 202-6.
21. Mirzaee F, Sheikhhoseini R, Piri H. Acute effects of one session reactive neuromuscular training on balance and knee joint position sense. *Acta Gymnica*. 2020; 50(3): 122-9.
22. Yadollahi A, Zarei M, Gheitasi M. Effect of eight weeks reactive neuromuscular training on lower extremity kinematics. *Stud Sport Med*. 2022; 14(33): 59-80.
23. Alam MF, Zaki S, Sharma S, Ghareeb M, Nuhmani S. Reliability and validity of navicular drop test in pronated feet. *Clin Epidemiol Glob Health*. 2025; 32: 101939.
24. Zuñil-Escobar JC, Martínez-Cepa CB, Martín-Urrialdel JA, Gómez-Conesa A. Reliability and accuracy of static parameters obtained from ink and pressure platform footprints. *J Manipulative Physiol Ther*. 2016; 39(7): 510-7.
25. Monteiro RL, Ferreira JS, Silva ÉQ, Donini A, Cruvinel-Júnior RH, et al. Feasibility and Preliminary Efficacy of a Foot-Ankle Exercise Program Aiming to Improve Foot-Ankle Functionality and Gait Biomechanics in People with Diabetic Neuropathy: A Randomized Controlled Trial. *Sensors*. 2020; 20(18): 5129.
26. Jafarnehadgero AA, Shad MM, Majlesi M. Effect of foot orthoses on the medial longitudinal arch in children with flexible flatfoot deformity: A three-dimensional moment analysis. *Gait Posture*. 2017; 55: 75-80.
27. Gurney JK, Kersting UG, Rosenbaum D. Between-day reliability of repeated plantar pressure distribution measurements in a normal population. *Gait Posture*. 2008; 27(4): 706-9.
28. Shen B, Zhang S, Cui K, Zhang X, Fu W, et al. Effects of gait retraining combined with foot core exercise. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022; 10: 1022910.
29. Kao SL, Hsiao ML, Wang JH, Chen CS, Chen SY, et al. Effects of intrinsic foot muscle exercise on balance in older adults. *BMC Geriatr*. 2024; 24(1): 403.
30. Letafatkar A, Rabiei P, Afshari M. Effect of neuromuscular training with knee valgus control instructions. *Phys Ther Sport*. 2020; 43: 89-99.
31. Ford KR, Nguyen AD, Dischiavi SL, Hegedus EJ, Zuk EF, et al. Hip-focused neuromuscular exercise interventions. *Open Access J Sports Med*. 2015; 6: 291-303.
32. Mozafaripour E, Seidi F, Minoonejad H, Bayattork M, Khoshroo F. Corrective exercise program in dynamic knee valgus. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022; 23(1): 700.
33. Suzuki M, Kuruma H, Kato K, Gota Y, Kase H, et al. Effect of short foot exercise on lower-limb motor control. *J Bodyw Mov Ther*. 2024; 39: 293-8.
34. Zarali A, Raeisi Z, Aminmahalati A. Effects of combined exercises on navicular drop and postural sway. *BMC Sports Sci Med Rehabil*. 2024; 16(1): 233.
35. Payandeh M, Khoshraftar Yazdi N, Ebrahimi Atri A, Damavandi M, Soghayek M. Investigation of Horizontal Components of Ground Reaction Force during Walking in Children with Flatfoot. *J Paramed Sci Rehabil*. 2015; 4(3): 21-30.
36. Winter DA, Prince F, Frank JS, Powell C, Zabjek KF. Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *J Neurophysiol*. 1996; 75(6): 2334-43.
37. Zhao Y, Yan S, Zhang L, Shi B, Yang L. Do gait patterns normalize concurrently with the recovery of foot arches in children

- with flatfoot? A prospective cohort study. *Gait Posture*. 2023; 100: 154-61.
38. Kao SL, Hsiao ML, Wang JH, Chen CS, Chen SY, et al. Effects of integrated intrinsic foot muscle exercise with foot core training device on balance and body composition among community-dwelling adults aged 60 and above. *BMC Geriatr*. 2024; 24(1): 403.
 39. Mirzaee F, Sheikhhoseini R, Piri H. Acute effects of one session reactive neuromuscular training on balance and knee joint position sense. *Acta Gymnica*. 2020; 50(3): 122-9.
 40. Yulianti A, Efendi AR, Lubis ZI. Comparative analysis of gait pattern components in children with flat foot disorder. *J Phys Ther Sci*. 2021; 33(10): 745-50.
 41. Rossi LP, Pereira R, Brandalize M, Gomes AR. The effects of a perturbation-based balance training on the reactive neuromuscular control in community-dwelling older women: a randomized controlled trial. *Clin Interv Aging*. 2019; 14: 1823-34.
 42. Winter DA. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2009.
 43. Ground reaction force analysis in flexible and rigid flatfoot.
 44. Padrón L, Bayod J, Becerro-de-Bengoa-Vallejo R, Losa-Iglesias M, López-López D, et al. Influence of the center of pressure on baropodometric gait pattern variations in adults with flatfoot.
 45. Utsahachant N, Sakulsriprasert P, Sinsurin K, Jensen MP, Sungkue S. Effects of short foot exercise combined with lower extremity training on dynamic foot function in individuals with flexible flatfoot. *J Phys Ther Sci*. 2023; 35(11): 798-804.
 46. Yadollahi A, Zarei M, Gheitasi M. Effect of eight weeks reactive neuromuscular training on lower extremity kinematics. *Stud Sport Med*. 2022; 14(33): 59-80.
 47. Karimzadeh A, Mohammadi HK, Mehravar M, Zahednejad S, Taheri N, et al. Effects of intrinsic foot muscle strengthening on foot kinetic parameters. *J Bodyw Mov Ther*. 2024; 38: 112-8.
 48. Okamura K, Fukuda K, Oki S, Ono T, Tanaka S, Kanai S. Effects of plantar intrinsic foot muscle strengthening on static and dynamic foot kinematics. *Gait Posture*. 2020; 75: 40-5.
 49. Okamura K, Fukuda K, Oki S, Ono T, Tanaka S, Kanai S. The effect of additional activation of the plantar intrinsic foot muscles on foot kinematics in flat-footed subjects. *Foot (Edinb)*. 2019; 39: 1-5.
 50. Ghanati HA, Letafatkar A, Almonroeder TG, Rabiei P. Examining the influence of attentional focus on the effects of a neuromuscular training program in male athletes. *Phys Ther Sport*. 2020; 45: 114-21.
 51. Ford KR, Nguyen AD, Dischiavi SL, Hegedus EJ, Zuk EF. An evidence-based review of hip-focused neuromuscular exercise interventions to address dynamic lower extremity valgus. *Open Access J Sports Med*. 2015; 6: 291-303.
 52. Hoseini Y, Karimi MT. Ground reaction force analysis in flexible and rigid flatfoot subjects during gait. *J Foot Ankle Res*. 2018; 11: 15.
 53. Padrón L, Bayod J, Becerro-de-Bengoa-Vallejo R, Losa-Iglesias M, López-López D, Casado-Hernández I. Influence of the center of pressure on baropodometric gait pattern variations in the adult population with flatfoot: A case-control study. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023; 11: 1147616.
 54. Karimzadeh A, Mohammadi HK, Mehravar M, Zahednejad S, Taheri N, Sadeghi M. The effects of intrinsic foot muscles strengthening exercises on foot kinetic parameters in pronated foot subjects during forward jump landing. *J Bodyw Mov Ther*. 2024; 38: 112-8.
 55. Ford KR, Nguyen AD, Dischiavi SL, Hegedus EJ, Zuk EF. An evidence-based review of hip-focused neuromuscular exercise interventions to address dynamic lower extremity valgus. *Open Access J Sports Med*. 2015; 6: 291-303.
 56. GPonline. Anterior knee pain in adolescents. [Internet]. 2007 [cited 2026 May 8]. Available from: <https://www.gponline.com>
 57. OrthoKids. Patellofemoral knee pain. American Academy of Orthopaedic Surgeons. [Internet]. 2026 Jan [cited 2026 May 8]. Available from: <https://orthokids.org>

Effect of Adding Reactive Neuromuscular Exercises to Core Foot Training on Gait Kinetics in Girls with Flexible Flatfoot: A Single-Blind Clinical Trial

Ghazal Taghizadeh¹  , Seyed Sadredin Shojaedin²  

Original Article

Abstract

Introduction: Flexible flatfoot is a common disorder during growth, characterized by a decreased medial longitudinal arch and altered gait patterns, which can lead to pain and chronic injuries. This study aimed to investigate the effect of combining core foot exercises (CFE) and reactive neuromuscular training (RNT) on gait kinetics in girls with flexible flatfoot.

Materials and Methods: A single-blind clinical trial with a pre-test–post-test design was conducted involving three groups (two intervention groups and one control group). Forty-eight girls aged 12–15 years were randomly assigned into three groups of 16: core foot exercise (CFE), core foot exercise plus reactive neuromuscular training (CFE + RNT), and control. Interventions were performed for eight weeks (three sessions per week). Kinetic data, including ground reaction force (GRF), time to peak ground reaction force (T-Peak GRF), and center of pressure (COP) displacement, were recorded using a force plate. Normality of data distribution was assessed using the Shapiro-Wilk test, and homogeneity of variances was examined using Levene's test. One-way ANOVA was used to compare groups at pre-test, and analysis of covariance (ANCOVA) with Bonferroni post-hoc test was used for post-test comparisons after controlling for pre-test effects, at a significance level of 0.05. Data were analyzed using SPSS.

Results: The results showed that eight weeks of training produced significant differences in GRF, T-Peak GRF, and COP ($P < 0.05$). The combined training group (CFE + RNT) experienced greater improvements in GRF, T-Peak GRF, and COP compared to the core foot exercise group alone.

Conclusion: Adding reactive neuromuscular training to core foot exercises improves gait kinetics and enhances stability, representing a cost-effective and clinically effective approach for managing flexible flatfoot.

Keywords: Flexible flatfoot; Gait; Resistance exercises

Citation: Taghizadeh G, Shojaedin SS. Effect of Adding Reactive Neuromuscular Exercises to Core Foot Training on Gait Kinetics in Girls with Flexible Flatfoot: A Single-Blind Clinical Trial. *J Res Rehabil Sci* 2025; 21.

Received date: 31.12.2024

Accept date: 04.02.2025

Published: 03.04.2025

1- MSc, Department of Biomechanics and Sports Injury, Schol of Physical Education and Sport Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Biomechanics and Sports Injury, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Corresponding Author: Seyed Sadredin Shojaedin; Professor, Department of Biomechanics and Sports Injury, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran; Email: shojaeddin@khu.ac.ir