

Effect Of Combined Exercises on Plantar Pressures During Walking in Men with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Pronated Foot

Amirali Jafarnezhadgero^{1*} , Sara Imani Brouj¹ , Hamed Sheikhalizadeh¹ 

¹ Dept of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Article Info

Article type:

Research article

Article History:

Received: Jul. 03, 2025

Received in revised form:

Dec. 04, 2025

Accepted: Apr. 08, 2026

Published Online: May. 26, 2026

* Correspondence to:

Amirali Jafarnezhadgero

Dept of Sports Biomechanics,
Faculty of Educational Sciences
and Psychology, University of
Mohaghegh Ardabili, Ardabil,
Iran

Email:

amirali.jafarnezhad@gmail.com

ABSTRACT

Introduction: Anterior cruciate ligament reconstruction is a common surgery for ACL injuries, improving knee function in 90% of patients, but only 65% return to their previous level of athletic performance. The aim of this study was to investigate the effect of combined exercises on plantar pressures in individuals with ACL reconstruction and pronation during gait.

Materials & Methods: The method of this study was a clinical trial. Using G*Power software, the sample size for each group was determined to be 15 people. The subjects of the study had undergone anterior cruciate ligament reconstruction and had pronation of the foot. The subjects were randomly divided into two groups: control and exercise. The intervention group underwent a combined exercise protocol for 8 weeks. After the intervention period, the post-test assessments were repeated in both groups in a similar manner to the pre-test in SPSS V.26.

Results: The results of repeated measures analysis of variance showed the main effect of time on the peak vertical ground reaction force in the heel strike phase was significant ($p < 0.001$; $\eta^2 = 0.549$). The main effect of time on the time to reach the peak vertical ground reaction force in the heel strike phase was also significant ($p < 0.001$). The main effect of the group on the peak vertical ground reaction force in the heel-strike phase was significant ($p = 0.027$). The interaction effect of time $\times$ group on the peak pressure on the second metatarsal bone was significant ($p = 0.032$).

Conclusion: Combined exercises improve biomechanical performance, improve results by correcting plantar pressure and reducing abnormal stresses, and play a preventive role against future injuries.

Keywords: Plantar pressure, Combined exercises, Vertical ground reaction force, anterior cruciate ligament injury, pronated foot

Cite this paper: Jafarnezhadgero A, Imani Brouj S, Sheikhalizadeh H. Effect Of Combined Exercises on Plantar Pressures During Walking in Men with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Pronated Foot. *Journal of Ilam University of Medical Sciences*. 2026;34(2):14-26.

Introduction

Anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction is one of the most common surgeries for knee injuries, but many patients do not return to their pre-injury level of athletic performance and complications such as cartilage and meniscal damage are reported later on (1). On the other hand, foot pronation can increase the stress on the knee joint and ligaments and can increase the risk of ACL injury (2) due to decreased medial longitudinal arch and tibia internal rotation. Patients develop compensatory gait patterns in walking and running after ACL reconstruction which are

associated with changes in ground reaction forces and plantar pressure distribution (3). However, there is no agreement on the position of maximal plantar pressure in these patients (4). (5) The effect of advanced training programs on plantar pressure distribution in patients with ACL reconstruction and pronated feet has not been investigated. The aim of this study was to investigate the effect of combined exercises on plantar pressures in individuals with ACL reconstruction and pronation during gait.

Methods

This study was designed as a clinical trial. Based



© The Author(s)

Publisher: Ilam University of Medical Sciences

on data from previous studies the required sample size was estimated at 15 participants per group. Accordingly, 15 individuals with a history of ACL reconstruction and pronated feet were assigned to the exercise group, and 15 individuals with similar characteristics were selected as the control group (non-exercise group). All participants had undergone unilateral ACL reconstruction surgery 4 to 8 months prior to the study. Individuals with meniscal injuries, osteoarthritis, or knee pain were excluded. All participants were physically active and engaged in walking or running for at least 45 minutes per session, three times per week. The statistical population consisted of males aged between 19 and 26 years, and all participants were right-leg dominant. After being informed about the study procedures and ethical considerations, and after receiving instructions that would not interfere with the data collection process, participants were asked to wear sportswear and perform a standardised warm-up to prevent injury before testing. Subsequently, participants walked five times along an 18-metre walkway at a constant speed of 1.2 m/s. During these trials, plantar pressure data were recorded using a Footscan system (Belgium) with a sampling frequency of 300 Hz. Following the pre-test assessment, participants in the intervention group took part in an 8-week training programme consisting of 24 sessions (three sessions per week, 45 minutes per session). The training intervention consisted of a combination of advanced corrective exercises designed and implemented according to the principles of corrective and advanced training programmes. The type, sequence, and content of the exercises performed in each session are presented in Tables 2 and 3. After completion of the training period, the post-test assessment was conducted. To examine the effects of time (pre-test vs. post-test) and group (control vs. intervention) on the outcomes, a mixed within-between repeated measures ANOVA was applied. Bonferroni post hoc tests were used for follow-up analyses. Effect size was estimated using partial eta squared (η^2p) in SPSS V.26 in p less than 0.05.

Results

The results indicated that the main effect of time on the vertical ground reaction force (vGRF) in the heel strike phase was statistically significant ($d = 0.549$; $P < 0.001$). The pairwise comparisons indicated that vGRF values during heel strike were lower in the pre test than in the post test. The main effect of time on the vertical ground reaction force during the loading response phase was statistically significant ($d = 0.560$; $p < 0.001$). The pre test vGRF values during the loading response phase were lower

than the post test in pairwise comparisons. Main effect of time (time to peak vertical ground reaction force during heel strike) was also statistically significant ($d = 0.495$; $P < 0.001$). The pairwise analysis showed that the time to peak vGRF during heel strike was shorter in the pre test than in the post test. Results indicated that the main effect of group on the vertical ground reaction force in the heel strike phase was statistically significant ($d = 0.153$; $P = 0.027$). Pairwise comparisons revealed that the training group had greater vGRF values at heel strike than the control group. The time $\times$ group interaction effect for peak pressure in the 2nd metatarsal region was statistically significant ($d=0.144$; $P=0.032$). Post hoc analysis revealed significantly higher peak pressure in second metatarsal (12.31%) in the pre test compared to the post test in the training group but not in the control group.

Conclusion

In conclusion, combined training improves gait-related biomechanical indices and balance control and muscle efficiency, leading to more stable function and improved movement quality in these patients. Future studies with a larger sample size, longer follow up periods and more biomechanical variables are recommended to establish stronger evidence and to assess the long-term sustainability of these outcomes.

Authors' Contribution

Conceptualization, Methodology, Formal Analysis, Investigation, Resources, Writing Original Draft Preparation, Writing-Review & Editing, Supervision, Software, Data Curation, Visualization, Project Administration: HSH, AJ,

Methodology, Supervision, Project Administration: HSH, SI.

Ethical Statement

This study was approved by Ethics Committee of University of Mohaghegh Ardabili (Iran) (IR.UMA.REC.1402.064). The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Funding

This research received no financial support.

Acknowledgment

The present article was extracted from the Ph.D. thesis written by Hamed sheikhalizade. The authors thank the all of participants and persons who help in this project.

بررسی تأثیر تمرینات ترکیبی بر فشارهای کفپایی طی راه رفتن در مردان دارای بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی همراه با پای پرونیت

امیرعلی جعفرنژادگرو^{۱*}، سارا ایمانی بروج^۱، حامد شیخ‌علیزاده^۱

^۱ بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

نویسنده مسئول:

امیرعلی جعفرنژادگرو

بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مقدمه: بازسازی رباط صلیبی قدامی جراحی رایجی برای آسیب‌های این رباط است که عملکرد زانو را در ۹۰ درصد بیماران بهبود می‌بخشد؛ اما تنها ۶۵ درصد به سطح ورزشی پیشین بازمی‌گردند. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر تمرینات ترکیبی بر فشارهای کفپایی در افراد دارای بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی همراه با پای پرونیت طی راه رفتن است.

مواد و روش‌ها: روش این تحقیق از نوع کارآزمایی بالینی بود. با استفاده از نرم‌افزار G*Power، حجم نمونه برای هر گروه ۱۵ نفر تعیین شد. آزمودنی‌های تحقیق بازسازی رباط صلیبی قدامی را انجام داده و مبتلا به پای پرونیت بودند. آزمودنی‌ها به صورت تصادفی، به دو گروه کنترل و تمرین تقسیم‌بندی گردیدند. گروه مداخله به مدت ۸ هفته، تحت دستورالعمل تمرینی ترکیبی قرار گرفتند. پس از پایان دوره مداخله، ارزیابی‌های پس‌آزمون در هر دو گروه به صورت مشابه پیش‌آزمون تکرار گردید. همه تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS vol.26 انجام گرفت.

یافته‌های پژوهش: نتایج تحلیل واریانس با اندازه‌گیری مکرر نشان داد که اثر اصلی زمان بر اوج نیروی عمودی عکس‌العمل زمین در فاز برخورد پاشنه ($P<0.001$ ؛ $\eta^2=0.549$) و نیز اثر اصلی زمان بر زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی عکس‌العمل زمین در فاز برخورد پاشنه ($P<0.001$ ؛ $\eta^2=0.495$) معنادار بود؛ همچنین اثر اصلی گروه بر اوج نیروی عمودی عکس‌العمل زمین در فاز برخورد پاشنه ($P<0.001$ ؛ $\eta^2=0.153$) و اثر تعاملی زمان×گروه بر اوج فشار وارد بر استخوان متاتارس دوم ($P<0.001$ ؛ $\eta^2=0.032$) معنادار بود.

بحث و نتیجه‌گیری: تمرینات ترکیبی نه تنها در بهبود عملکرد بیومکانیکی مؤثرند، بلکه با اصلاح توزیع فشار کفپایی و کاهش فشارهای غیرطبیعی، نقشی پیشگیرانه در برابر آسیب‌های آتی ایفا می‌کنند.

Email: amiralijafarnezhad@gmail.com

واژه‌های کلیدی: فشار کفپایی، تمرینات ترکیبی، نیروی عمودی عکس‌العمل زمین، آسیب رباط صلیبی قدامی، پای پرونیت

استناد: جعفرنژادگرو امیرعلی، ایمانی بروج سارا، شیخ‌علیزاده حامد. بررسی تأثیر تمرینات ترکیبی بر فشارهای کفپایی طی راه رفتن در مردان دارای بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی همراه با پای پرونیت. مجله دانشگاه علوم پزشکی ایلام، خرداد ۱۴۰۵؛ ۳۴(۲): ۲۶-۱۴.

مقدمه

بازسازی رباط صلیبی قدامی به عنوان یکی از رایج ترین مداخلات جراحی در مدیریت آسیب های حاد و مزمن این رباط شناخته می شود (۱). با وجود ترمیم نسبتاً مطلوب عملکرد زانو در حدود ۹۰ درصد از بیماران (۲)، تنها ۶۵ درصد از افراد پس از عمل قادرند به سطح عملکرد ورزشی پیش از آسیب بازگردند (۳). شواهد نشان داده اند که در بازه ۵ تا ۱۵ سال پس از بازسازی، بروز آسیب غضروف های مفصلی و به ویژه ضایعات مینیسک داخلی و سپس مینیسک جانبی از پیامدهای شایع به شمار می رود (۲). با این حال، نرخ بازسازی مجدد رباط صلیبی قدامی بسیار پایین گزارش شده و بین ۲ تا ۶ درصد متغیر است (۴، ۳).

یکی از عوارض شایع اندام تحتانی در مفصل مچ پا، پای پرونیت (افتادگی بیشتر از ۱۰ میلی متر در قوس طولی پا و چرخش پاشنه با خارج) است (۴). مطالعات بیان کرده اند که پرونیشن مفصل سابلار موجب افزایش چرخش داخلی استخوان تیبیا در طول فعالیت های دینامیک می شود که نتیجه آن، افزایش فشار بر مفصل زانو و رباط های پیرامونی آن است (۵). این تغییرات پرونیشن پا را به یکی از عوامل مهم بروز درد قدامی زانو تبدیل کرده است، به طوری که در پژوهشی، میزان شیوع این درد در مردان و زنان مبتلا به پای پرونیت به ترتیب ۱۶/۲۳ و ۱۱/۳۱ درصد گزارش شد (۶). پژوهش ها نشان داده اند که چرخش بیش از حد درشت نی ناشی از پرونیشن سابلار می تواند به عنوان سازوکاری در بروز آسیب رباط صلیبی قدامی عمل کند و فشار مضاعفی بر این رباط وارد نماید که در نهایت، خطر پارگی آن را افزایش می دهد (۷). بیماران پس از بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی معمولاً از راهبردهای جبرانی در اندام تحتانی بهره می گیرند تا بارهای خارجی و نیروهای عکس العمل زمین کاهش یابد (۸). این راهبردها ممکن است با تغییر در گشتاورهای عضلانی در صفحه ساجیتال همراه باشند (۹). شواهد نشان داده اند که بازسازی رباط صلیبی قدامی قادر است بر الگوهای حرکتی در حین راه رفتن و دویدن تأثیر بگذارد (۱۰).

شواهد متعددی تغییرات مکانیک راه رفتن را در

بیماران مختلف نشان داده اند. دگرگونی در نیروهای عکس العمل زمین مستلزم تغییر در شتاب مرکز جرم است (۱۱). اگرچه نقش دقیق رباط صلیبی قدامی در پیشگیری از بی ثباتی و محدود شدن عملکرد زانو هنوز به طور کامل روشن نشده است (۱۲)، بررسی های مکانیکی دقیق نشان داده اند که ساختار و عملکرد زانو پیچیدگی قابل توجهی دارد. با این حال، بخشی از تغییرات دینامیکی یا پیامدهای آسیب رباط صلیبی قدامی را می توان از طریق تحلیل فشارهای کف پای شناسایی کرد؛ اما در افراد دارای بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت، درباره اینکه کدام بخش بیشترین میزان فشار را متحمل می شود، شواهد یکسان نیست. برخی پژوهش ها بیان داشته اند که بیشینه فشار در ناحیه میانی جلوی پا متمرکز است (۱۶، ۱۷)، در حالی که برخی دیگر بخش انگشتان پا را به عنوان ناحیه آناتومیکی با بالاترین فشار معرفی کرده اند (۱۳). به منظور پر کردن این شکاف، از برنامه های تمرینی پیشرفته و اصلاحی با فعالیت هایی شبیه به شرایط واقعی ورزش استفاده شده است تا گذار از پایان توان بخشی استاندارد به ورود کامل به رقابت های ورزشی تسهیل شود (۱۴-۱۶). این برنامه ها معمولاً بازه ۶ تا ۱۲ ماه پس از عمل را هدف می گیرند و عموماً شامل تقویت اندام های تحتانی و تمرینات عصبی-عضلانی (چابکی، تمرینات اغتشاشی و پلئومتریک) با شدتی بالاتر از توان بخشی استاندارد هستند (۲۲، ۲۱). پژوهش ها نشان داده اند که مزایای بالقوه تمرینات پیشرفته شامل بهبود عملکرد (۱۶)، افزایش میزان موفقیت در گذر از معیارهای بازگشت به ورزش که متشکل از سنجهای اختلالات جسمانی و شاخص های روان شناختی است (۱۷) و احتمالاً پیشگیری از آسیب ثانویه می شود (۱۶). حتی در غیاب مداخله روان شناختی صریح، مطالعات پیشین گزارش کرده اند، بیمارانی که تمرینات پیشرفته را به پایان می رسانند، از آمادگی روان شناختی کلی بیشتری برای مشارکت ورزشی برخوردارند (۱۸) و خودکارآمدی بهتری در فعالیت های مرتبط با زانو نشان می دهند (۱۹). با توجه به مطالعات انجام شده، هیچ مطالعه ای تأثیر تمرینات ترکیبی را بر فشارهای کف پای در بیماران دارای بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای

پرونیته را طی راه رفتن بررسی نکرده است؛ بنابراین، در این پژوهش به آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

روش این تحقیق از نوع کارآزمایی بالینی بود. با استفاده از اطلاعات مربوط به مطالعات پیشین و با استفاده از نرم‌افزار (G*power vol.3.1.9.7 Franz Faul, Universität Kiel, آلمان)، حجم نمونه آماری پژوهش حاضر ۱۵ نفر در هر گروه برآورد شد تا توان آماری ۰/۸ در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ به دست آید. بر اساس همین، ۱۵ نفر با سابقه بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی و مبتلا به پای پرونیته (گروه تمرین) (که از سوی پزشک بررسی و وارد تحقیق شدند) و

۱۵ نفر با سابقه بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی و مبتلا به پای پرونیته، به عنوان گروه کنترل (گروه بدون تمرین) انتخاب گردیدند. افراد دارای آسیب رباط صلیبی قدامی ۴ تا ۸ ماه قبل از مطالعه، عمل جراحی رباط صلیبی قدامی (اتوگرفت همسترینگ) را به صورت یک طرفه انجام داده بودند. افرادی که آسیب‌های مینیسک و آرتروز و درد زانو داشتند، از مطالعه کنار گذاشته شدند. همه شرکت‌کنندگان از نظر جسمی فعال بودند و حداقل سه جلسه در هفته، به مدت ۴۵ دقیقه پیاده‌روی و یا دویدن داشتند. جامعه آماری این پژوهش مردانی با محدوده سنی ۱۹ تا ۲۶ سال بودند (جدول شماره ۱).

جدول شماره ۱. آزمودنی‌های شرکت‌کننده در تحقیق

متغیر	گروه سالم	گروه بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی با پای پرونیته	سطح معناداری
سن (سال)	۲۳/۱±۸۶/۲۴	۲۴/۱±۲۰/۳۷	۰/۴۹۲
قد (سانتی‌متر)	۱۷۷/۳±۲۶/۸۲	۱۷۸/۳±۱۳/۸۵	۰/۵۴۱
وزن (کیلوگرم)	۷۶/۳±۸۶/۶۲	۷۷/۳±۶۶/۶۹	۰/۵۵۴
(کیلوگرم در مترمربع) BMI	۲۴/۱±۶۱/۴۸	۲۴/۱±۴۸/۰۴	۰/۷۷۷
زمان آسیب تا عمل جراحی (ماه)	-	۶/۰±۱۳/۹۹	-
زمان عمل جراحی تا شرکت در تحقیق (ماه)	-	۵/۱±۸۶/۳۰	-

هریک از آزمودنی‌های تحقیق بر اساس معیارهای ورود شامل جنسیت مرد، بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی در پای راست، داشتن افتادگی ناوی در همان پا (برای سنجش پرونیته پا)، داشتن دامنه حرکتی کامل در مفصل زانو، گذشت حداقل چهار ماه از جراحی، توانایی راه رفتن و دویدن مستقل و استفاده نکردن از هرگونه بریس یا زانوبند، از شرایط ورود به تحقیق بیماران آسیب رباط صلیبی قدامی انتخاب شدند. دستورالعمل تحقیق از سوی کمیته اخلاق (IR.UMA.REC.1403.063) دانشگاه محقق اردبیلی تصویب و با کد IRCT20170806035517N6 در مرکز ثبت کارآزمایی بالینی ایران به ثبت رسید. همه موارد اجرای پژوهش مطابق با اعلامیه هلسینکی انجام شد (۲۰). پای برتر آزمودنی‌ها توسط آزمون شوت توپ مشخص گردید (۲۱).

همه آزمودنی‌ها راست پا بودند. پس از توجیه آزمودنی‌ها و ذکر ملاحظات اخلاقی تحقیق و همچنین ذکر نکات و آموزش‌هایی که در روند انجام تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها تداخلی ایجاد نمی‌کرد، از فرد خواسته شد که لباس ورزشی بپوشد و برای جلوگیری از آسیب، پیش از اجرای آزمون، گرم کردن اولیه را انجام دهد؛ سپس آزمودنی‌ها در مسیر ۱۸ متری، ۵ مرتبه عمل راه رفتن را با سرعت ثابت ۱/۲ متر بر ثانیه اجرا کردند. در این حین، فشارهای کف‌پایی با استفاده از دستگاه فوت اسکن (RSScan international, Belgium,) (0.5×0.5×0.02m, 4363 sensors) ساخت کشور بلژیک با نرخ نمونه‌برداری ۳۰۰ هرتز ثبت شد.

کوشش راه رفتن صحیح شامل برخورد کامل پا روی بخش میانی دستگاه فوت اسکن بود. آزمودنی به‌طور

کف پای اول، استخوان کف پای دوم، استخوان کف پای سوم، استخوان کف پای چهارم، استخوان کف پای پنجم، بخش میانه پا، بخش داخلی پاشنه و بخش خارجی پاشنه است. آزمودنی‌ها پس از انجام پیش‌آزمون، در یک دوره تمرینی ۸ هفته‌ای شامل ۲۴ جلسه تمرین (۳ جلسه در هفته، هر جلسه ۴۵ دقیقه) شرکت کردند. مداخله تمرینی شامل تمرینات اصلاحی پیشرفته به صورت ترکیبی بود که بر اساس اصول تمرینات اصلاحی و پیشرفته طراحی و اجرا شد. نوع، توالی و محتوای تمرینات در هر جلسه مطابق جدول‌های شماره ۲ و ۳ ارائه گردیده است (۲۴، ۲۳). در پایان جلسات تمرینی، آزمون دوباره تکرار شد.

آزمایشی، سه مرتبه کوشش راه رفتن را انجام می‌داد تا با نحوه آزمایش آشنا شود. اگر فوت‌اسکن از سوی آزمودنی برای تنظیم گام مورد هدف قرار می‌گرفت یا تعادل آزمودنی دچار اختلال می‌گردید، کوشش راه رفتن تکرار می‌شد (۲۲). تعداد کوشش‌های صحیح راه رفتن برابر ۳ کوشش در هر شرایط بود. مدت زمان استراحت میان هر کوشش راه رفتن برابر یک دقیقه بود. داده‌های فشار کف پای طی فاز اتکای راه رفتن استخراج گردید. فاز اتکای راه رفتن به عنوان تماس پاشنه پا با زمین تا بلند شدن پنجه پا تعیین شد که می‌تواند اوج نیروی عمودی عکس‌العمل زمین، زمان رسیدن به این اوج، اوج متغیرهای فشار کف پای در نواحی ده‌گانه پا باشد. این نواحی به ترتیب شامل انگشت شست، انگشت دوم تا پنجم، استخوان

جدول شماره ۲. تمرینات پیشرفته

دسته بندی	نوع	مثال
پلایومتریک	جانبی قدامی جمع کردن پا قیچی لانچ چرخشی	پرش جانبی تک پا پرش سه گانه پرش جفت وزنه یک طرفه پرش قیچی پرش ۹۰ درجه روی فوم
قدرت	تنه عضلات چهارسر ران همسترینگ	پلانک جانبی لانچ با اسکات Single leg bridge on BOSU
چابکی	سرعت پا پرش عکس‌العمل	دریل‌های نردبانی حرکات بین مخروطی آزمون عکس‌العمل با توپ توپ واکنش

جدول شماره ۳. تمرینات اصلاحی

مراحل	حرکت	دور	مدت/تکرار	شدت	توضیحات
مه‌ار (رهاسازی مایوفاشیال)	دوقلو/نعلی	۱	۳۰ ثانیه	آهسته	بخش خارجی
	دوسرانی	۱	۳۰ ثانیه	آهسته	بخش خارجی
	نوارا یلیو تیبال	۱	۳۰ ثانیه	آهسته	بخش خارجی
افزایش طول (کشش ایستا)	کشش دوقلو	۱	۳۰ ثانیه	آهسته	چرخش داخلی پشت پا
	کشش نعلی	۱	۳۰ ثانیه	آهسته	چرخش داخلی پشت پا
		۱	۳۰ ثانیه	آهسته	چرخش داخلی پشت پا

چرخش داخلی پشت پا	آهسته	۳۰ ثانیه	۱	کشش دوسرانی در حالت طاق باز کشش کشنده پهن نیام در حالت ایستاده	
ساقی قدامی دوقلو داخلی همسترینگ داخلی ساقی خلفی	۴/۲/۲ ۴/۲/۲ ۴/۲/۲ ۴/۲/۲	۱۵-۱۰ ۱۵-۱۰ ۱۵-۱۰ ۱۵-۱۰	۲-۱ ۲-۱ ۲-۱ ۲-۱	دورسی فلکشن مچ در مقابل مقاومت بلند کردن ساق یک پا خم کردن زانو در مقابل مقاومت همراه با چرخش داخلی ران پلاتار فلکشن و اینورژن در مقابل مقاومت	فعال سازی (تمرین تقویتی ایزومتریک)
حفظ قوس مناسب پا، زانو مستقیم در مقابل انگشتان دوم و سوم	آهسته	۱۵-۱۰	۲-۱	دستیابی به تعادل بر روی یک پا در چند سطح	انسجام بخشی

نظر آماری معنادار بود ($P < 0.001$; $d = 0.549$). مقایسه جفتی نشان داد، مقادیر نیروی عمودی عکس العمل زمین در فاز برخورد پاشنه پا با زمین در پیش آزمون، نسبت به پس آزمون، کمتر بود. اثر عامل زمان در مؤلفه نیروی عمودی عکس العمل زمین در فاز پیشروی از نظر آماری معنادار بود ($d = 0.560$; $P < 0.001$). مقایسه جفتی نشان داد، مقادیر نیروی عکس العمل زمین در فاز پیشروی در پیش آزمون، نسبت به پس آزمون، کمتر بود. اثر عامل زمان مؤلفه زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی عکس العمل زمین در فاز برخورد پاشنه پا با زمین از نظر آماری معنادار بود ($d = 0.495$; $P < 0.001$). مقایسه جفتی نشان داد، مقادیر زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی عکس العمل زمین در فاز برخورد پاشنه پا با زمین در پیش آزمون، در مقایسه با پس-آزمون، کمتر بود. اثر عامل زمان مؤلفه زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی عکس العمل زمین در فاز پیشروی از نظر آماری معنادار بود ($d = 0.399$; $P < 0.001$). مقایسه جفتی نشان داد، مقادیر زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی عکس العمل زمین در فاز پیشروی در پیش آزمون، در مقایسه با پس آزمون، کمتر بود. اثر عامل زمان در مؤلفه اوج فشار در استخوان کف پای سوم از نظر آماری

برای هموار کردن داده‌ها، از فیلتر باترورث مرتبه چهارم با برش فرکانسی ۲۰ هرتز استفاده گردید (۲۵). برای نرمال کردن مقادیر نیروی عکس العمل زمین، این مقادیر بر وزن بدن تقسیم و در عدد ۱۰۰ ضرب شدند (۲۵). در نهایت، برای بررسی طبیعی بودن توزیع داده‌ها، از آزمون شاپیرو-ویلک استفاده گردید. برای بررسی تأثیرات زمان (پیش آزمون در برابر پس آزمون) و گروه (گروه کنترل در برابر گروه مداخله) بر نتایج، از تحلیل واریانس با اندازه گیری‌های مکرر ترکیبی (within-between repeated measures ANOVA) استفاده شد. در تحلیل‌های آزمون تعقیبی (post-hoc)، از آزمون بونفرونی بهره گرفته شد. برای برآورد اندازه اثر، مقدار اتای جزئی ($\eta^2 p$) گزارش گردید. مقادیر کمتر از ۰/۵۰ نشان‌دهنده اثر کوچک، مقادیر بین ۰/۵۰ تا ۰/۸۰ نشان‌دهنده اثر متوسط و مقادیر بیشتر از ۰/۸۰ نشان‌دهنده اثر بزرگ بودند. همه تحلیل‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS vol.26 انجام گرفت.

یافته‌های پژوهش

با توجه به نتایج اثر عامل زمان در مؤلفه نیروی عمودی عکس العمل زمین در فاز برخورد پاشنه پا با زمین از

شماره ۴).

با توجه به نتایج، اثر عامل گروه در مؤلفه نیروی عمودی عکس‌العمل زمین در فاز برخورد پاشنه پا با زمین از نظر آمار معنادار بود ($P=0.027$; $d=0.153$). مقایسه جفتی نشان داد، مقادیر نیروی عمودی عکس‌العمل زمین در فاز برخورد پاشنه پا با زمین در گروه تمرین، نسبت به گروه کنترل، بیشتر بود.

اثر تعاملی زمان×گروه در مؤلفه اوج فشار در استخوان کف پای دوم از نظر آماری معنادار بود ($d=0.144$; $P=0.032$). آزمون تعقیبی نشان داد، مقادیر اوج فشار در استخوان کف پای دوم در گروه تمرین پیش‌آزمون، نسبت به پس‌آزمون، ۱۲/۳۱ درصد بیشتر بود که در گروه کنترل این اختلاف معنادار مشاهده نشد (جدول شماره ۴).

معنادار بود ($P=0.002$; $d=0.268$). مقایسه جفتی نشان داد، مقادیر اوج فشار در استخوان کف پای سوم در پیش‌آزمون، نسبت به پس‌آزمون، بیشتر بود. اثر عامل زمان در مؤلفه اوج فشار در استخوان کف پای چهارم از نظر آماری معنادار بود ($P=0.004$; $d=0.250$). مقایسه جفتی نشان داد، مقادیر اوج فشار در استخوان کف پای چهارم در پیش‌آزمون، در مقایسه با پس‌آزمون، بیشتر بود. اثر عامل زمان در مؤلفه اوج فشار در استخوان کف پای پنجم از نظر آماری معنادار بود ($d=0.186$; $P=0.014$). مقایسه جفتی نشان داد، مقادیر اوج فشار در استخوان کف پای پنجم در پیش‌آزمون، نسبت به پس‌آزمون، بیشتر بود. اثر عامل زمان در مؤلفه اوج فشار در قسمت میانی کف پا از نظر آماری معنادار بود ($d=0.342$; $P<0.001$). مقایسه جفتی نشان داد، مقادیر اوج فشار در قسمت میانی کف پا در پیش‌آزمون، در مقایسه با پس‌آزمون، بیشتر بود (جدول

جدول شماره ۴. مقایسه مؤلفه‌های فشار کف پای دو گروه تمرین و کنترل در افراد دارای بازسازی رباط صلیبی قدامی با پای پروتیت (نیوتن بر سانتی‌متر مربع)

مؤلفه‌ها	گروه کنترل		گروه تمرین		سطح معناداری	
	پیش‌آزمون	پس‌آزمون	پیش‌آزمون	پس‌آزمون	اثر عامل زمان	اثر عامل گروه
Fz _{HC}	۱۲۸/۲۷±۴۶/۱۸	۱۷۱/۳۲±۶۰/۴۱	۱۴۳/۲۴±۲۰/۴۹	۱۹۴/۴۰±۴۶/۶۸	$P<0.001^*$ (۰/۵۴۹)	۰/۰۲۷ * (۰/۱۵۳)
Fz _{PO}	۱۴۱/۲۵±۴۰/۵۶	۱۷۷/۳۱±۵۴/۰۱	۱۴۵/۲۴±۳۷/۸۱	۱۹۵/۴۱±۶۰/۰۸	$P<0.001^*$ (۰/۵۶۰)	۰/۲۰۹ (۰/۰۵۲)
TTPF _{Zhc}	۱۷۴/۵۴±۵۱/۱۹	۶۴/۷۳ ±۲۷۵/۹۷	۲۰۵/۱۱۱±۴۶/۵۵	۲۶۵/۶۳±۸۸/۵۶	$P<0.001^*$ (۰/۴۹۵)	۰/۶۴۹ (۰/۰۰۷)
TTPF _{Zpo}	۵۰۳/۶۵±۶۳/۵۹	۶۰۷/۵۲±۵۳/۰۸	۵۳۹/۶۶±۳۹/۰۵	۶۰۳/۱۰۵±۴۷/۵۰	$P<0.001^*$ (۰/۳۹۹)	۰/۴۰۳ (۰/۰۲۳)
انگشت شست	۱۲/۳±۸۷/۷۶	۱۴/۴±۱۲/۰۳	۱۴/۵±۱۶/۳۱	۱۴/۴±۲۳/۰۶	۰/۵۶۵ (۰/۰۱۱)	۰/۵۰۶ (۰/۰۱۵)
انگشتان دوم تا پنجم	۶/۱±۱۷/۸۱	۵/۱±۵۹/۷۲	۵/۲±۶۰/۱۴	۵/۱±۲۸/۷۵	۰/۳۴۴ (۰/۰۳۰)	۰/۳۵۴ (۰/۰۲۹)
کف پای اول	۱۲/۴±۶۲/۷۶	۱۲/۳±۸۹/۱۹	۱۴/۵±۷۴/۳۰	۱۱/۳±۸۱/۵۲	۰/۱۷۵ (۰/۰۶۰)	۰/۶۶۲ (۰/۰۰۶)

کف پای دوم	۲۳/۳±۵۷/۶۵	۲۴/۴±۲۳/۱۷	۲۵/۳±۱۷/۸۴	۲۲/۵±۰۷/۲۰	۰/۱۵۸ (۰/۰۶۵)	۰/۸۲۵ (۰/۰۰۲)	۰/۰۳۲ (۰/۱۴۴)*
کف پای سوم	۲۵/۴±۲۰/۹۲	۲۳/۵±۸۲/۴۰	۲۶/۴±۵۹/۷۲	۲۲/۵±۴۷/۳۳	*۰/۰۰۲ (۰/۲۶۸)	۰/۹۹۱ (۰/۰۰۰)	۰/۱۱۰ (۰/۰۸۳)
کف پای چهارم	۲۴/۸±۰۵/۴۸	۱۹/۷±۰۵/۱۰	۲۱/۶±۱۱/۲۹	۱۷/۴±۳۴/۷۶	*۰/۰۰۴ (۰/۲۵۰)	۰/۲۴۵ (۰/۰۴۵)	۰/۶۶۴ (۰/۰۰۶)
کف پای پنجم	۱۶/۸±۷۰/۰۴	۱۲/۶±۰۱/۵۳	۱۳/۷±۶۷/۹۵	۱۰/۲±۲۷/۷۷	*۰/۰۱۴ (۰/۱۸۶)	۰/۱۹۲ (۰/۰۵۶)	۰/۶۸۲ (۰/۰۰۶)
میانی کف پا	۱۱/۲±۶۹/۸۴	۹/۲±۲۷/۲۳	۱۱/۲±۱۲/۳۸	۹/۲±۳۹/۱۲	P<0.001* (۰/۳۴۲)	۰/۷۴۲ (۰/۰۰۴)	۰/۵۱۹ (۰/۰۱۴)
داخلی پاشنه	۱۵/۲±۶۰/۴۸	۱۷/۴±۹۱/۳۰	۱۷/۴±۸۶/۶۳	۱۸/۳±۸۷/۹۱	۰/۱۳۷ (۰/۰۷۲)	۰/۰۷۱ (۰/۱۰۵)	۰/۵۵۴ (۰/۰۱۲)
خارجی پاشنه	۱۵/۲±۶۳/۰۹	۱۶/۳±۵۷/۶۳	۱۵/۳±۹۰/۰۶	۱۶/۳±۸۶/۷۳	۰/۲۷۶ (۰/۰۳۹)	۰/۷۰۵ (۰/۰۰۵)	۰/۹۹۲ (۰/۰۰۰)

FzHC. اوج نیروی عمودی عکس العمل زمین در لحظه تماس پاشنه پا با زمین؛ FzPO. اوج نیروی عمودی عکس العمل زمین در لحظه پیشروی؛ TTPFzHC. زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی عکس العمل زمین در لحظه تماس پاشنه پا با زمین؛ TTPFzPO. زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی عکس العمل زمین در لحظه پیشروی؛ *سطح معناداری $P<0.05$

بحث و نتیجه گیری

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر تمرینات ترکیبی بر فشارهای کف پای در افراد دارای بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی همراه با پای پرونیت طی راه رفتن بود. یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر مثبت تمرینات ترکیبی بر توزیع فشارهای کف پای و نیروهای عکس العمل زمین در افراد با بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی همراه با پای پرونیت طی راه رفتن است. این تغییرات می‌تواند به بهبود پایداری و کاهش خطر آسیب‌های ثانویه کمک کند که با شواهد موجود درباره بیومکانیک پس از بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی همخوانی دارد. در مقایسه با مطالعات پیشین، افزایش نیروی عمودی عکس العمل زمین در فاز برخورد پاشنه با زمین پس از تمرینات ترکیبی، با یافته‌های کاری و همکاران شباهت دارد که گزارش کردند، افراد با بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی اغلب الگوهای راه رفتن تغییر یافته‌ای نشان می‌دهند، از جمله افزایش بار عمودی برای جبران ناپایداری زانو (۲۶). این شباهت ممکن است به علت بهبود کنترل عصبی عضلانی باشد که در مطالعه نگلی نیز نشان داده شد، تمرینات

عصبی عضلانی به بهبود کینتیک و کنماتیک زانو منجر می‌شود که می‌تواند توزیع بار را بهینه کند (۲۷). با این حال، تفاوت با مطالعه شهبازی و همکاران مشاهده می‌گردد که گزارش کردند، بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی به کاهش کلی نیروی عکس العمل زمین منجر می‌شود. علت این تفاوت می‌تواند به تمرکز مطالعه ما بر تمرینات ترکیبی (شامل تقویت و تعادل) باشد که برخلاف رویکردهای صرفاً توان بخشی در مطالعه سیتین، به افزایش نیروی عمودی برای حمایت بهتر از زانو کمک می‌کند (۲۸)؛ همچنین کوپین و همکاران نشان دادند که گشتاور پایدار زانو پس از بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی بهبود می‌یابد که می‌تواند توضیح‌دهنده افزایش نیروی عکس العمل زمین در مطالعه ما باشد؛ زیرا پایداری عضلانی بهتر به توزیع بار مؤثرتر منجر می‌شود (۲۹). افزایش نیروی عمودی عکس العمل زمین در فاز پیشروی پس از تمرینات، با نتایج وانگ همخوانی دارد که گزارش کرد، تمرینات ایزوکتیک به بهبود قدرت عضلانی و حس عمقی منجر می‌گردد که می‌تواند بار عمودی را در فازهای پیشروی راه رفتن افزایش دهد (۳۰). این شباهت احتمالاً به سبب تقویت زنجیره عضلانی (مانند چهارسرانی و همسترینگ)

کردند که می‌تواند پرونیشن را کاهش دهد (۳۵). این شباهت احتمالاً به علت بهبود تعادل عضلانی است که در مطالعه کریمی و همکاران نیز بیان شده است (۳۶). در مقابل، ناهمبوسی با مطالعه ویلیامز و همکاران وجود داشت که افزایش فشار جانبی را گزارش کردند و ممکن است به علت دستورالعمل تمرینی ما باشد که بر کاهش بار جانبی تمرکز داشت تا خطر پیچ‌خوردگی را کم کند (۳۷). درنهایت، افزایش نیروی عکس‌العمل زمین در گروه تمرینی نسبت به کنترل با مطالعه جانگ و همکاران شباهت دارد که تمرینات جدید کیتیک زانو را بهبود می‌بخشد (۳۸). کاهش فشار در استخوان کف پای دوم در گروه تمرینی با مطالعه نگلی و همکاران همخوانی دارد که تمرینات عضبی عضلانی توزیع بار را بهینه می‌کند (۲۷). این تغییرات نشان‌دهنده پتانسیل تمرینات ترکیبی برای کاهش خطر آسیب‌های ثانویه است؛ اما مطالعات آینده باید بر جمعیت‌های بزرگ‌تر و پیگیری طولانی مدت تمرکز کنند.

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که تمرینات ترکیبی می‌توانند به‌طور معناداری بر بهبود شاخص‌های بیومکانیکی مرتبط با فشار کف پای و نیروی عکس‌العمل زمین در افراد دارای بازسازی رباط صلیبی قدامی همراه با پای پرونیته اثرگذار باشند. کاهش فشار در استخوان‌های کف پای به‌ویژه متاتارس دوم، سوم، چهارم و پنجم و نیز کاهش فشار در ناحیه میانی کف پا پس از اجرای دستورالعمل تمرینی، بیان‌کننده بهبود در الگوی توزیع فشار و اصلاح عملکرد حرکتی است؛ همچنین تغییرات مشاهده‌شده در زمان رسیدن به اوج نیرو و مقادیر نیروی عمودی عکس‌العمل زمین حاکی از بهبود هماهنگی عضبی-عضلانی و افزایش پایداری مفصل در فازهای مختلف گام‌برداری است. این نتایج نشان می‌دهد که تمرینات ترکیبی با تأثیر بر سازوکارهای کنترل تعادل و بازتوزیع بار می‌توانند به بازگرداندن الگوی طبیعی راه رفتن پس از بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی کمک کنند و احتمال بروز آسیب‌های ثانویه از جمله شکستگی‌های استرسی یا پیچ‌خوردگی میچ پا را کاهش دهند. از این دیدگاه، تمرینات استفاده‌شده در مطالعه حاضر می‌توانند به‌عنوان

است که در مطالعه رستمی نیز تأکید شده خستگی عضبی عضلانی به تغییرات نیروی عکس‌العمل زمین منجر می‌شود؛ اما تمرینات می‌تواند این آثار را معکوس کند (۳۱). این نتایج با مطالعه میلیت مایر همسو نبود، به‌صورتی که او کاهش فشار در ناحیه پاشنه را گزارش کرد. علت تفاوت می‌تواند به عمل تفاوت در زمان پس از جراحی باشد. مطالعه ما بر افراد با حداقل ۴ ماه پس از بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی تمرکز داشت، درحالی که میلیت مایر بر مراحل اولیه تأکید داشت (۳۲).

تأخیر در زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی عکس‌العمل زمین در فاز برخورد پاشنه، با یافته‌های دشتی و رستمی شباهت دارد که نشان دادند، خستگی به تغییرات فعالیت الکتریکی عضلات زانو منجر می‌شود؛ اما تمرینات عضبی عضلانی می‌تواند زمان‌بندی را بهبود بخشد (۳۳). علت این شباهت احتمالاً بهبود قدرت عضبی عضلانی است که در مطالعه نگلی و همکاران نیز گزارش شده است. بااین‌حال، تفاوت با مطالعه کار (که زمان‌بندی سریع‌تر را در راه رفتن پس از بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی نشان داد) می‌تواند به سبب ترکیب پرونیته یا در جمعیت مطالعه ما باشد که بار را تغییر می‌دهد و نیاز به زمان بیشتر برای جذب شوک دارد (۲۷). تأخیر در زمان رسیدن به اوج نیروی عمودی عکس‌العمل زمین در فاز پیشروی، با نتایج میر باجتون و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد که بیان کردند، تمرینات پیشرفته به بهبود آمادگی برای بازگشت به ورزش منجر می‌گردد (۲۳). این شباهت ممکن است به سبب تقویت حس عمقی باشد که در مطالعه ما و همکاران نیز بیان شده که تمرینات حس عمقی توزیع بار را بهینه می‌کند (۳۲). اختلاف با مطالعه الکسی و همکاران که خستگی همسترینگ را بررسی کردند، می‌تواند به تمرکز ما بر تمرینات ترکیبی باشد که برخلاف آنان، زمان‌بندی را برای کاهش استرس بر زانو کنترل کرده است (۳۴).

کاهش اوج فشار در استخوان کف پای سوم، چهارم و پنجم پس از تمرینات، با یافته‌های آردین و همکاران شباهت دارد که انتقال بار از جانبی به داخلی را بررسی و گزارش

بخشی از دستورالعمل‌های توان‌بخشی و بازتوانی بیماران مبتلا به بازسازی آسیب رباط صلیبی قدامی، به‌ویژه در افرادی با ساختار پای پروتیت توصیه شوند. پژوهش‌های آینده می‌توانند با استفاده از نمونه‌های بزرگ‌تر، پیگیری طولانی‌مدت و بررسی سایر متغیرهای کینتیکی و کینماتیکی، اثربخشی و پایداری نتایج این نوع مداخلات را با دقت بیشتری ارزیابی کنند.

سپاس‌گزاری

از همه شرکت‌کنندگان حاضر در پژوهش و همچنین از حمایت مالی معاونت تحصیلات تکمیلی دانشگاه محقق اردبیلی در اجرای پژوهش حاضر کمال تشکر و قدردانی را داریم.

تعارض منافع

بنا به اظهار نویسندگان، این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی نداشته است. پژوهش حاضر از هیچ‌سازمانی کمک مالی دریافت نکرد.

کد اخلاق

این مقاله با نظارت و تاییدیه کمیته اخلاق دانشگاه محقق اردبیلی با کد اخلاق IR.UMA.REC.1402.064 انجام شده است.

حمایت مالی

پژوهش حاضر از هیچ‌گونه حمایت مالی برخوردار نبوده است.

مشارکت نویسندگان

مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، تجزیه و تحلیل رسمی، تحقیق، منابع، نوشتن آماده‌سازی پیش‌نویس اصلی، نوشتن - بررسی و ویرایش، نظارت، نرم‌افزار، مدیریت داده، تجسم، مدیریت پروژه: جعفر نژاد - شیخ علی زاده. روش‌شناسی، نظارت، مدیریت پروژه: شیخ علی زاده، سارا ایمانی.

References

- Shorter KA, Polk JD, Rosengren KS, Hsiao-Weckler ET. A new approach to detecting asymmetries in gait. *Clin Biomech.* 2008;23:459-67. doi:10.1016/j.clinbiomech.2007.12.002.
- Arden CL, Webster KE, Taylor NF, Feller JA. Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2011;45:596-606. doi:10.1136/bjsm.2010.076364.
- Arden CL, Taylor NF, Feller JA, Webster KE. Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: updated systematic review. *Br J Sports Med.* 2014;48:1543-52. doi:10.1136/bjsports-2013-093398.
- Nepple JJ, Dunn WR, Wright RW. Meniscal repair outcomes at >5 years. *J Bone Joint Surg Am.* 2012;94:2222-27. doi:10.2106/JBJS.K.01584.
- Feagin JA, Wills RP, Lambert KL, Mott HW, Cunningham RR. Anterior cruciate ligament reconstruction: BPTB versus semitendinosus. *Clin Orthop Relat Res.* 1997;341:69-72. doi:10.1097/00003086-199704000-00010.
- Loudon JK, Jenkins W, Loudon KL. The relationship between static posture and ACL injury in female athletes. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1996;24:91-7. doi:10.2519/jospt.1996.24.2.91.
- Baumgart C, Schubert M, Hoppe MW, Gokeler A, Freiwald J. Do ground reaction forces during unilateral and bilateral movements exhibit compensation strategies following ACL reconstruction? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2017;25:1385-94. doi:10.1007/s00167-015-3623-7.
- Menz HB. Two feet, or one person? Problems associated with statistical analysis of paired data in foot and ankle medicine. *Foot.* 2004;14:2-5. doi:10.1016/S0958-2592(03)00047-6.
- Robertson DGE, Caldwell GE, Hamill J, Kamen G, Whittlesey S. *Research Methods in Biomechanics.* Champaign, IL: Human Kinetics; 2013.
- Redmond AC, Crosbie J, Ouvrier RA. Development and validation of a novel rating system for scoring standing foot posture: the Foot Posture Index. *Clin Biomech (Bristol).* 2006;21:89-98. doi:10.1016/j.clinbiomech.2005.08.002.
- Burnfield JM. Gait analysis: normal and pathological function. *J Sports Sci Med.* 2010;9:353.
- Schneider E, Chao EYS. Fourier analysis of ground reaction forces. *J Biomech.* 1983;16:591-601. doi:10.1016/0021-9290(83)90109-4.
- Chiou SS, Turner N, Zwiener J, Weaver DL, Haskell WE. Effect of boot weight and sole flexibility on gait and physiological responses of firefighters in stepping over obstacles. *Hum Factors.* 2012;54:373-86. doi:10.1177/0018720811433464.
- de Mille P, Osmak J. Performance: Bridging the Gap After ACL Surgery. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2017;10:297-306. doi:10.1007/s12178-017-9419-2.
- Myer GD, Chu DA, Brent JL, Hewett TE. Trunk and hip control neuromuscular training for the prevention of knee joint injury. *Clin Sports Med.* 2008;27:425-48. doi:10.1016/j.csm.2008.02.006.
- Nyland J, Greene J, Carter S, Brey J, Krupp R, Caborn D. Return to sports bridge program. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2020;28:3676-85. doi:10.1007/s00167-020-06162-7.
- Meierbachtol A, Yungtum W, Paur E, Bottoms J, Chmielewski TL. Psychological and Functional Readiness for Sport Following Advanced Group Training in Patients With Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2018;48:864-72. doi:10.2519/jospt.2018.8041.
- Meierbachtol A, Obermeier M, Yungtum W, Bottoms J, Paur E, Nelson BJ, et al. Injury-Related Fears During the Return-to-Sport Phase of ACL Reconstruction Rehabilitation. *Orthop J Sports Med.* 2020;8:2325967120909385. doi:10.1177/2325967120909385.
- Chmielewski TL, George SZ, Tillman SM, Moser MW, Lentz TA, Indelicato PA, et al. Low- Versus High-Intensity Plyometric Exercise During Rehabilitation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med.* 2016;44:609-17. doi:10.1177/0363546515620583.
- World Medical Association. Declaration of Helsinki. 2004.
- Jafarnezhadgero AA, Majlesi M, Azadian E. Gait ground reaction force characteristics in deaf and hearing children. *Gait Posture.* 2017;53:236-40. doi:10.1016/j.gaitpost.2017.02.006.
- Jafarnezhadgero AA, Oliveira AS, Mousavi SH, Madadi-Shad M. Combining valgus knee brace and lateral foot wedges reduces external forces and moments in osteoarthritis patients. *Gait Posture.* 2018;59:104-10. doi:10.1016/j.gaitpost.2017.09.040.
- Meierbachtol A, Obermeier M, Yungtum W, Bottoms J, Paur E, Nelson BJ, et al. Advanced training enhances readiness to return to sport after anterior cruciate ligament

- reconstruction. *J Orthop Res.* 2022;40:191-9. doi: 10.1002/jor.25072.
24. Clark M, Lucett S. *NASM Essentials of Corrective Exercise Training.* Lippincott Williams & Wilkins; 2010.
 25. Farahpour N, Jafarnezhad A, Damavandi M, Bakhtiari A, Allard P. Gait ground reaction force characteristics of low back pain patients with pronated foot and able-bodied individuals with and without foot pronation. *J Biomech.* 2016;49:1705-10. doi: 10.1016/j.jbiomech.2016.03.056.
 26. Kaur M, Ribeiro DC, Theis JC, Webster KE, Sole G. Movement Patterns of the Knee During Gait Following ACL Reconstruction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* 2016;46:1869-95. doi: 10.1007/s40279-016-0510-4.
 27. Nagelli CV, Wordeman SC, Di Stasi S, Hoffman J, Marulli T, Hewett TE. Neuromuscular Training Improves Biomechanical Deficits at the Knee in Anterior Cruciate Ligament-Reconstructed Athletes. *Clin J Sport Med.* 2021;31:113-19. doi: 10.1097/JSM.0000000000000723.
 28. Shahbazi M, Esmaeili H, Salari-Esker F, Bashiri B, Khezri D. Hip and knee joints mechanics and asymmetries in individuals with a history of anterior cruciate ligament reconstruction during overground running. *Knee.* 2025;52:1-8. doi: 10.1016/j.knee.2024.10.010.
 29. Cobian DG, Oppenheim ZR, Roehl TJ, Joachim MR, Heiderscheit BC. Knee Extensor Torque Steadiness and Quadriceps Activation Variability in Collegiate Athletes 4, 6, and 12 Months After ACL Reconstruction. *Orthop J Sports Med.* 2024;12:23259671241253843. doi: 10.1177/23259671241253843.
 30. Wang K, Cheng L, Wang B, He B. Effect of isokinetic muscle strength training on knee muscle strength, proprioception, and balance ability in athletes with anterior cruciate ligament reconstruction: a randomised control trial. *Front Physiol.* 2023;14:1237497. doi: 10.3389/fphys.2023.1237497.
 31. Rostami KD, Thomas A, Naderi A. Effect of fatigue on neuromuscular and biomechanical variables after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. *J Sports Med Phys Fitness.* 2025;65:554-61. doi: 10.23736/S0022-4707.24.16210-X.
 32. Ma J et al. Proprioceptive training effects after ACLR. *Clin Rehabil.* 2021;35:506-21. doi:10.1177/0269215520960287.
 33. Dashti Rostami K et al. EMG fatigue patterns after ACL injury. *J Funct Morphol Kinesiol.* 2018;3:22. doi:10.3390/jfmk3020022.
 34. Oleksy Ł, Mika A, Sopa M, Stolarczyk A, Adamska O, Szczudło M, et al. Evaluation of Lateral and Medial Parts of the Hamstring Muscle Fatigue Symmetry in Professional Footballers Cleared to Play After ACL Reconstruction. *J Clin Med.* 2024;13:6521. doi: 10.3390/jcm13216521.
 35. Nagel A, et al. Plantar pressures after long-distance running. *Gait Posture.* 2008;27:152-5. doi:10.1016/j.gaitpost.2007.03.012.
 36. Karimijashni M, et al. Contralateral neuromuscular training after ACLR. *J Sport Rehabil.* 2023;32:524-39. doi:10.1123/jsr.2021-0443
 37. Lavoie F, Laplante M, Parent G, Duval N, Doré S, de Guise JA. Gesture standardization increases the reproducibility of 3D kinematic measurements of the knee joint. *Clin Biomech (Bristol).* 2006;21:502-7. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2005.12.007.
 38. Wang C, et al. ACL strain during OKC vs CKC exercises. *Musculoskelet Sci Pract.* 2023;63:102715. doi:10.1016/j.msksp.2023.102715.