Journal of Gorgan University of Medical Sciences

e-ISSN: 2008-4080 p-ISSN: 1562-4765

2024 / Vol 26 / No 4

OPEN ACCESS

Original Paper

Effect of Sand-Based Training on Ground Reaction Force Frequency Spectrum in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Pronated Feet during Gait: A Randomized Controlled Trial

Hamed Sheikhalizade [1], **Fariborz Imani** [2], **Amir Ali Jafarnezhadgero (Ph.D)*** [3], **Majid Mafi** [4]

1 Ph.D Candidate in Sport Biomechanics, Department of Sport Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2 M.Sc in Sport Biomechanics, Department of Sport Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3 Assistant Professor, Department of Sports Biomechanics, Sport Sciences Research Institute, Tehran, Iran. 4 Medical Engineering, Biomedical Engineering Research Center, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Abstract

Background and Objective: Gait is a fundamental movement pattern influenced by various structures. This study aimed to determine the effect of sand-based training on ground reaction force frequency spectrum in individuals with anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction and pronated feet during gait.

Methods: This clinical trial was conducted on 28 male students with pronated feet and ACL injuries aged 22-25 years at Mohaghegh Ardabili University. Participants were randomly assigned to two groups of 14: A control group and a sand-based training group. The ground reaction force variables were measured using a force plate in the pre-test and post-test.

Results: The number of necessary harmonics in the free moment component decreased by 15.95% in the post-test (16.48±4.14) compared to the pre-test (19.11±2.15) of the control group (P<0.05). The number of necessary harmonics in the mediolateral direction of the ground reaction force decreased by 23.34% in the post-test (15.59±3.92) compared to the pre-test (19.23±2.66) of the training group (P<0.05). Additionally, the number of necessary harmonics in the anteroposterior direction of the ground reaction force increased by 33.04% in the post-test (21.61±2.55) compared to the pre-test (14.47±4.11) of the training group (P<0.05).

Conclusion: Sand-based training was able to improve the gait mechanics of individuals with ACL reconstruction and pronated feet.

Keywords: Anterior Cruciate Ligament, Foot, Pronation, Walking, Sand

***Corresponding Author:** Amir Ali Jafarnezhadgero (Ph.D), **E-mail:** amiralijafarnezhad@gmail.com

Received 8 Jan 2024
Final Revised 2 Jun 2024
Accepted 5 Jun 2024
Published Online 23 Dec 2024

Cite this article as: Sheikhalizade H, Imani F, Jafarnezhadgero AA, Mafi M. [Effect of Sand-Based Training on Ground Reaction Force Frequency Spectrum in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Pronated Feet during Gait: A Randomized Controlled Trial]. J Gorgan Univ Med Sci. 2024; 26(4): 21-28. [Article in Persian]

10.21859/JGorganUnivMedSci.26.4.21

© The author(s)
Owned: Golestan University of Medical Sciences **Publisher:** Deputy of Research and Technology

Journal of Gorgan University of Medical Sciences

Extended Abstract

2024 / Vol 26 / No 4

Introduction

Anterior cruciate ligament (ACL) rupture is a significant and debilitating knee injury that can culminate in long-term consequences, such as altered knee kinematics, meniscal and cartilage damage, and eventually, knee osteoarthritis. Approximately 75% of ACL ruptures occur with minimal or no contact at the time of injury.

Risk factors for ACL injury can be categorized as intrinsic and extrinsic. Extrinsic risk factors for non-contact ACL injuries include dry weather conditions and the use of artificial turf instead of natural grass. Intrinsic risk factors encompass knee joint laxity, a narrow intercondylar notch, reduced relative hamstring strength and functional capacity, muscle fatigue stemming from altered neuromuscular control, decreased proprioception and pelvic girdle strength, excessive ankle dorsiflexion during sports activities, hip internal rotation, and tibial external rotation with or without foot pronation.

Foot pronation is a natural foot movement essential for normal gait, as it helps absorb ground reaction forces. However, excessive foot pronation is a risk factor for ACL injury. Excessive foot pronation contributes to increased tibial internal rotation, leading to ACL ruptures. Sand-based gait training presents a promising therapeutic intervention for excessive foot pronation due to its accessibility and low cost. From a health perspective, the unstable nature of sand may strengthen the muscles of the foot and ankle, improve foot function, and reduce excessive foot pronation. Sand-based training can improve gait patterns and, as a natural, accessible, and cost-free resource, can be incorporated into corrective exercises for individuals with excessive foot pronation. This study aimed to determine the effect of sand-based training on the ground reaction force frequency spectrum in individuals with ACL reconstruction and pronated feet during gait.

Methods

This clinical trial was conducted on 28 male university students aged 22-25 years with pronated feet and ACL injuries at Mohaghegh Ardabili University, Iran. The participants were randomly assigned to two groups of 14: A control group and a sand-based training group.

Participants were purposefully selected following a call for volunteers. According to the participants' medical records, all individuals in the ACL group had a complete ACL rupture that had been surgically repaired using arthroscopy. These individuals had also pronated feet.

Inclusion criteria included male gender, completion of an informed consent form, a complete ACL rupture in one leg, pronated feet, full range of motion in the knee joint, six months post-surgery with a hamstring graft, and the ability to walk independently.

After selection, participants were randomly assigned to either the control or the intervention (sand-based training) group.

Participants' dominant foot was determined through a soccer ball kicking test, and all participants were right-footed. Subjects were instructed to wear athletic attire and perform a warm-up prior to testing to prevent injury. Subsequently, participants walked along a 15-meter pathway equipped with a force plate positioned at the midpoint. Kinetic data were collected at a sampling rate of 1000 Hz using a Bertec force plate (USA). Each participant completed five gait trials as a pre-test, during which ground reaction forces were recorded in the vertical (Fz), anteroposterior (Fy), and mediolateral (Fx) directions. Following this, the intervention group underwent an 8-week training protocol, while the control group did not engage in any training. Ground reaction force data during gait were collected again after the 8-week period. Kinetic data were smoothed using a fourth-order Butterworth filter with a cutoff frequency of 20 Hz.

The training protocol for the training group consisted of a barefoot walking program on sand, including jogging, striding, bounding, galloping, and short sprints. This program was conducted for eight weeks (three sessions per week).

After the intervention, the training group was reassessed using the same evaluation methods as the initial assessment. The reassessment was scheduled six days after the final intervention session to avoid interference with acute physiological responses to training. The control group participated in no training and was reassessed after 8 weeks.

Results

The number of necessary harmonics in the free moment component decreased by 15.95% in the post-test compared to the pre-test in the control group ($P<0.045$). The number of necessary harmonics in the mediolateral direction of the ground reaction force decreased by 23.34% in the post-test compared to the pre-test in the intervention group ($P<0.008$). The number of necessary harmonics in the anteroposterior direction of the ground reaction force increased by 33.04% in the post-test compared to the pre-test in the intervention group ($P<0.001$). There was a significant difference in the number of necessary harmonics in the anteroposterior direction between the pre-test and post-test in the study groups ($P<0.021$).

Conclusion

Sand-based training enhances the necessary harmonics and, in fact, this training period, by increasing postural control during gait, improves performance in individuals with pronated feet and ACL ruptures.

Ethical Statement

This study was approved by the Research Ethics Committee of Baqiyatollah University of Medical Sciences, Tehran (IR.BMSU.BAQ.REC.1399.050) and registered in the Iranian Registry of Clinical Trials (IRCT20200912048696N1).

Funding

This article is the result of an approved research project (No. 98000391) of Baqiyatollah University of Medical Sciences.

Conflicts of Interest

No conflict of interest.

Acknowledgement

We would like to thank all participants in this study.

Sand-based training can enhance the gait mechanics of individuals with ACL reconstruction and pronated feet.

مجله دانشگاه علوم پزشکی گرگان

زمستان ۱۴۰۳ / دوره ۲۶ / شماره ۴ (پی در پی ۹۲)

دارای رتبه علمی -پژوهشی از کمیسیون نشریات علوم پزشکی کشور

e-ISSN: ۲۰۰۸-۴۰۸۰ p-ISSN: ۱۵۶۲-۴۷۶۵

با دسترسی آزاد

تحقیقی

اثر تمرینات روی شن بر طیف فرکانس نیروی عکس‌العمل زمین در افراد دارای ترمیم رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت هنگام راه‌رفتن: یک مطالعه کارآزمایی بالینی

حامد شیخعلی‌زاده [۱]، فریبرز ایمانی [۲]، دکتر امیرعلی جعفرنژادگرو*[۳]، مجید مافی [۴]

۱ دانشجوی دکتری بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ۲ کارشناس ارشد بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ۳ دانشیار، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ۴ مهندسی پزشکی، مرکز تحقیقات مهندسی زیست پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله، تهران، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: *راه رفتن یک الگوی حرکتی بنیادین است که تحت تاثیر ساختارهای مختلفی قرار دارد. این مطالعه به منظور تعیین اثر تمرینات روی شن بر طیف فرکانس نیروی عکس‌العمل زمین در افراد دارای ترمیم رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت هنگام راه‌رفتن انجام شد.*

روش بررسی: *این کارآزمایی بالینی روی ۲۸ دانشجوی پسر دارای پای پرونیت و آسیب ACL با دامنه سنی ۲۵-۲۲ سال در دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. آزمودنی‌ها به صورت تصادفی در دو گروه ۱۴ نفری کنترل و تمرینات روی شن قرار گرفتند. متغیرهای نیروی عکس‌العمل زمین در پیش‌آزمون و پس‌آزمون با استفاده از دستگاه صفحه نیرو اندازه‌گیری شد.*

یافته‌ها: *تعداد هارمونی ضروری در مؤلفه گشتاور آزاد در پس‌آزمون گروه کنترل (۱۶/۴۸±۱۴/۴) در مقایسه با پیش‌آزمون (۱۹/۱۱±۲/۱۵) ۱۵/۹۵ درصد کاهش یافت (P<۰/۰۵). تعداد هارمونی ضروری در راستای داخلی-خارجی نیروی عکس‌العمل زمین در پس‌آزمون گروه تمرین (۱۵/۵۹±۳/۹۲) در مقایسه با پیش‌آزمون (۱۹/۲۳±۲/۶۶) ۲۳/۳۴ درصد کاهش یافت (P<۰/۰۵). همچنین تعداد هارمونی ضروری در راستای قدامی-خلفی نیروی عکس‌العمل زمین در پس‌آزمون گروه تمرین (۲۱/۶۱±۲/۵۵) در مقایسه با پیش‌آزمون (۱۴/۴۷±۴/۱۱) ۳۳/۰۴ درصد افزایش یافت (P<۰/۰۵).*

نتیجه‌گیری: *تمرین بر روی شن توانست مکانیک راه‌رفتن افراد دارای ترمیم رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت را بهبود دهد.*

واژه‌های کلیدی: *رباط صلیبی قدامی ، پرونیت ، پا ، راه‌رفتن ، شن و ماسه*

* نویسنده مسؤول: دکتر امیرعلی جعفرنژادگرو ، پست الکترونیکی: amiralijafarnezhad@gmail.com

نشانی: اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، تلفن و نمابر ۰۴۵-۳۱۵۰۵۶۴۹

وصول ۱۴۰۲/۱۰/۱۸ اصلاح نهایی ۱۴۰۳/۳/۱۳ پذیرش ۱۴۰۳/۳/۱۶ انتشار ۱۴۰۳/۱۰/۳

مقدمه

راه‌رفتن یک الگوی حرکتی بنیادین است که تحت تاثیر تغییرات بدنی ناشی از سن، اختلالات اسکلتی-عضلانی، بیماری‌ها و شرایط محیطی به‌ویژه سطحی که حرکت روی آن انجام می‌شود؛ قرار می‌گیرد.[۱] آسیب‌های اندام تحتانی ۶۶ درصد از آسیب‌های ورزشی را تشکیل می‌دهند و زانو شایع‌ترین مفصل آسیب دیده در این ناحیه است. یک نوع آسیب ویژه مهم و مخرب زانو، پارگی رباط صلیبی قدامی (ACL) است.[۲] آسیب ACL می‌تواند پیامدهای طولانی‌مدت بر روی زانوی آسیب‌دیده داشته باشد. از جمله این پیامدها تغییر کینماتیک زانو، آسیب مینیسک و غضروف مرتبط و در نهایت آرتروز زانو خواهد بود.[۳و۴] میزان بروز چنین صدماتی تنها در ایالات متحده بیش از ۲۰۰ هزار مورد در سال گزارش شده است.[۳و۵] تقریباً ۷۵ درصد پارگی‌های ACL با حداقل تماس یا بدون تماس در زمان آسیب اتفاق می‌افتد.[۳و۶]

شناسایی عوامل خطر بیومکانیکی مرتبط با آسیب ACL می‌تواند پیشگیری از آسیب را تسهیل کند. بیشتر آسیب‌های ACL شامل ضربه مستقیم به زانو نشده؛ بلکه ماهیت آن بدون تماس یا تماس غیرمستقیم است که شامل پارامترهای بیومکانیکی کنترل نشده اندام تحتانی است.[۲و۷] بنابراین، پیشگیری از آسیب ACL ممکن است با اجرای برنامه‌های آموزشی که کنترل عصبی عضلانی و بیومکانیک اندام تحتانی را بهبود بخشد؛ به‌دست آید.[۲] عوامل خطر آسیب ACL به دو نوع داخلی و خارجی تقسیم‌بندی شده است. عوامل خطر خارجی آسیب غیرتماسی رباط صلیبی قدامی شامل آب‌وهوای خشک و استفاده از زمین‌های مصنوعی به جای چمن طبیعی است.[۳و۷]

عوامل خطر داخلی شامل شلی مفصل زانو، کوچک و باریک بودن پهنای شکاف بین کندیلی، کاهش قدرت نسبی همسترینگ و توانایی به کارگیری آن، خستگی عضلانی ناشی از تغییرات کنترل اسکلتی عضلانی، کاهش حس عمقی و قدرت ناحیه کمربند لگنی، دورسی فلکشن بیش از اندازه مچ پا حین انجام فعالیت‌های ورزشی، چرخش داخلی هیپ و چرخش خارجی تیبیا با یا بدون پرونیشن پا است.[۳و۷و۸]

پرونیشن پا یک حرکت طبیعی است که برای پیشروی طبیعی راه‌رفتن ضروری است. زیرا به جذب نیروهای واکنش زمین کمک می‌کند؛[۹] اما با این‌حال یکی از عوامل خطر آسیب ACL پرونیشن بیش از حد پا است.[۳و۷و۹] پرونیشن بیش از حد پا با افزایش چرخش داخلی تیبیا به بروز پارگی ACL کمک می‌کند.[۷] نقش بیومکانیک غیرطبیعی پا در ایجاد آسیب‌شناسی زانو از نظر بالینی در پیشگیری و درمان آسیب مهم است. در طول تحمل وزن، پا و زانو به عنوان بخش‌های تعاملی عمل نموده و پرونیشن پا و چرخش داخلی استخوان درشت‌نی به‌طور همزمان انجام می‌شود. یکی از عملکردهای مکانیکی ACL در زانو، محدود کردن چرخش داخلی استخوان درشت‌نی است. مکانیسم کمک‌کننده به آسیب ACL، چرخش بیش از حد استخوان درشت‌نی به دلیل پرونیشن بیش از حد مفصل ساب تالار است که منجر به فشار روی مفصل شده که در نتیجه خطر پارگی ACL را افزایش می‌دهد.[۱۰] میزان شیوع پرونیشن بیش از حد پا در بزرگسالان ۲۱ درصد است.[۹] کف پای صاف ممکن است با پرونیشن بیش از حد مفصل ساب تالار همراه باشد و این پرونیشن جبرانی غیرطبیعی ممکن است باعث بی‌ثباتی و بیش‌فعالی مفاصل پا شود.[۱۱] اطلاعات کمی در مورد اثر برنامه‌های ورزشی بر فعالیت‌ها و شرایط بیومکانیکی در افراد پرونیشن بیش از حد پا وجود دارد.[۱۲و۱۳] راه‌رفتن روی شن می‌تواند یک مداخله ورزشی امیدوارکننده برای درمان پرونیشن بیش از حد پا باشد. زیرا دسترسی به آن نسبتاً آسان بوده و هزینه کمتری دارد. از دیدگاه مرتبط با سلامت، عنصر ناپایدار شن ممکن است سبب تقویت عضلات پا و مچ پا، بهبود عملکرد و کاهش بیش از حد پا پرونیشن گردد.[۱۳] تمرین بر روی شن باعث بهبود الگوی راه‌رفتن شده و به‌عنوان منبع طبیعی، در دسترس و بدون هزینه‌ای است که می‌توان تمرینات اصلاحی بر روی شن را برای افراد پرونیشن بیش از حد پا تدوین نمود.[۱۲و۱۴و۱۵] به‌دلیل اهمیت موضوع، یافتن شیوه‌های درمانی مناسب برای پیشگیری از وقوع آسیب طی راه‌رفتن در افراد با آسیب ACL و پرونیت بیش از حد پا و بهبود این عارضه در این افراد بسیار ضرورت دارد.[۱۲و۱۶] نیروهای عکس‌العمل زمین تولید شده در حرکات انتقالی همچون راه‌رفتن و دویدن شامل نیروهای عمودی، قدامی–خلفی و داخلی–خارجی هستند.[۱۷] در مطالعه قبلی سرعت راه‌رفتن کمتری هنگام راه‌رفتن روی شن در مقایسه با زمین ثابت در افراد دارای پرونیشن بیش از حد پا مشاهده شد. علاوه بر این، گشتاورهای آزاد مثبت اوج کمتری در طول فاز پوش‌آف و نرخ‌های بارگذاری پایین‌تر در طول فاز بارگذاری یافتند.[۱۸] مقایسه بین راه‌رفتن و دویدن با سرعت‌های قابل مقایسه، تعدادی تفاوت خاص را در مورد نیروهای واکنش زمین (GRFs)، به‌عنوان مثال حداکثر دامنه GRFs در سه بعد را نشان داده است.[۱۹-۲۱] این مطالعه به منظور تعیین اثر تمرینات روی شن بر طیف فرکانس نیروی عکس‌العمل زمین در افراد دارای ترمیم رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت هنگام راه‌رفتن انجام شد.

روش بررسی

این کارآزمایی بالینی روی ۲۸ دانشجوی پسر دارای پای پرونیت و آسیب ACL با دامنه سنی ۲۵-۲۲ سال در دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. آزمودنی‌ها به صورت تصادفی در دو گروه ۱۴ نفری کنترل و تمرینات روی شن قرار گرفتند.

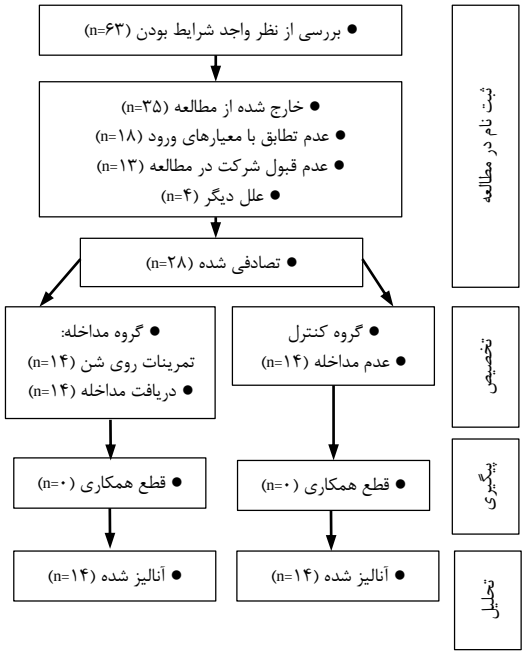
مطالعه مورد تایید کمیته اخلاق در پژوهش مرکز آموزشی درمانی بقیه‌الله الاعظم (عج) تهران (IR.BMSU.BAQ.REC.1399.050) و مرکز ثبت کارآزمایی بالینی ایران (IRCT20200912048696N1) قرار گرفت. آزمودنی‌ها فرم رضایت‌نامه کتبی شرکت آگاهانه در مطالعه را امضا نمودند.

طی فراخوان صورت گرفته آزمودنی‌ها به صورت هدفمند انتخاب شدند. طبق پرونده پزشکی آزمودنی‌ها، تمامی افرادی که در گروه ACL قرار گرفته بودند؛ پارگی کامل ACL داشتند که به روش جراحی آرتروسکوپی عمل شده بودند. همچنین این افراد دارای پای پرونیت شده نیز بودند. حجم نمونه با توجه به توان آماری ۰/۸ در سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ با اندازه اثر ۰/۶۶ در نرم‌افزار G*power ۲۸ نفر برآورد شد.[۲۲]

معیارهای ورود به مطالعه شامل جنسیت مرد، تکمیل فرم رضایت فردی، آسیب پارگی کامل ACL در یک پا، داشتن پای پرونیت شده، داشتن دامنه حرکتی کامل در مفصل زانو، گذشت شش ماه از جراحی با گرافت همسترینگ و توانایی راه‌رفتن مستقل بودند. معیارهای عدم ورود به مطالعه شامل اختلاف در اندام‌های تحتانی، سابقه ابتلا به آسیب‌های اسکلتی–عضلانی خصوصاً در ناحیه اندام تحتانی و استفاده از هرگونه بریس یا زانوبند بودند.

آزمودنی‌ها پس از انتخاب به‌صورت تصادفی به دو گروه کنترل و مداخله (تمرینات روی شن) دسته‌بندی شدند. برای تصادفی‌سازی اسامی آزمودنی‌ها در یک برگه نوشته شده و به‌صورت شانسی در دو گروه کنترل و مداخله قرار گرفتند (شکل یک).

پای برتر آزمودنی‌ها توسط آزمون شوت توپ فوتبال مشخص گردید و تمام آنان راست پا بودند. پس از توجیه آزمودنی‌ها و ذکر



شکل ۱: نمودار کارآزمایی بالینی

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 پوشیده و برای جلوگیری از آسیب، قبل از اجرای تست، گرم کردن اولیه را انجام دهد. سپس آزمودنی‌ها در مسیر ۱۵ متری که در میانه راه صفحه نیرو قرارگرفته بود؛ عمل راه‌رفتن را انجام دادند. داده‌های کینتیکی با استفاده از صفحه نیروی برتک (ساخت کشور آمریکا) با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰۰ هرتز ثبت شد. هر آزمودنی ۵ مرتبه عمل راه‌رفتن را به عنوان پیش‌آزمون انجام داد و در این حین نیروهای عکس‌العمل زمین در جهت‌های عمودی (Fz)، قدامی–خلفی (Fy) و داخلی–خارجی (Fx) ثبت شد. سپس گروه مداخله به مدت ۸ هفته پروتکل تمرینی را انجام داد که در این مدت گروه کنترل تمریناتی انجام نداد. مجدداً پس از اتمام ۸ هفته تمرین، داده‌های نیروی عکس‌العمل زمین در حین عمل راه‌رفتن ثبت شد. داده‌های کینتیکی با استفاده از فیلتر باترورث مرتبه چهار با برش فرکانسی ۲۰ هرتز هموار گردید.

پروتکل تمرینی گروه تمرین شامل برنامه تمرینی پیاده‌روی با پای برهنه روی شن شامل آهسته دویدن (Jogging)، قدم زدن (Striding)، جهیدن (Bounding)، گالوپینگ (Galloping)، دوی سرعت کوتاه (Short sprints) بود که به‌مدت هشت هفته (سه جلسه در هفته) انجام گردید. هر جلسه با یک جلسه گرم کردن و کشش به مدت پنج دقیقه شروع شد و با یک جلسه سرد کردن به مدت پنج دقیقه پایان یافت. مدت تمرین ۵۰ دقیقه در هر جلسه بود. شدت تمرین و تعداد تکرار بر اساس مطالعه Durai و Shaju[۲۳] تنظیم شد (جدول یک). هر جلسه تحت نظارت یک فیزیوتراپیست اجرا گردید. پس از مداخله، گروه تمرین با همان روش‌های ارزیابی اول مجدداً ارزیابی گردید. ارزیابی مجدد شش روز پس از جلسه مداخله نهایی برنامه‌ریزی شد تا پاسخ‌های فیزیولوژیکی حاد به تمرین با اندازه‌گیری‌ها تداخل نداشته باشند.[۲۴] گروه کنترل هیچ تمرینی انجام نداد و پس از ۸ هفته مجدداً ارزیابی شد.

جدول ۱: پروتکل تمرین بر روی شن و ماسه

نوع تمرین	مدت تمرین	تکرار تمرین	مسابقه اجرای تمرین	ریکاوری
راه‌رفتن و دویدن آرام	۲۰ دقیقه	–	۵۰ متر	–
گام بلند	۳ دقیقه	۲-۳ تکرار	۵۰ متر	۱ دقیقه
پریدن	۳ دقیقه	۲-۳ تکرار	۳۰ متر	۱ دقیقه
لی لی کردن	۳ دقیقه	۲-۳ تکرار	۳۰ متر	۱ دقیقه
دویدن سریع	۶ دقیقه	۳-۵ تکرار	۲۵ متر	۲ دقیقه

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS-26 تجزیه و تحلیل شدند. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون شاپیروویلک و برای تحلیل داده‌های آماری از آزمون تحلیل واریانس دوسویه در سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ استفاده گردید.

یافته‌ها

سن گروه کنترل و مداخله به ترتیب ۱/۰۵±۲۴/۲۱ و ۱/۰۶±۲۴/۲۸ سال، قد ۵/۹۲±۱۷۸/۱۴ و ۴/۵۶±۱۷۵/۷۱ سانتی‌متر، وزن ۶/۶۴±۷۲/۵۷ و ۴/۳۶±۷۱/۵۷ کیلوگرم و نمایه توده بدنی ۱/۴۹±۲۲/۸۴ و ۱/۵۶±۲۳/۲۰ کیلوگرم بر مترمربع بود و اختلاف معنی‌داری بین هیچیک از متغیرها مشاهده نشد.

تعداد هارمونی ضروری در مؤلفه گشتاور آزاد در پس‌آزمون گروه کنترل در مقایسه با پیش‌آزمون ۱۵/۹۵ درصد کاهش یافت (P<۰/۰۴۵). تعداد هارمونی ضروری در راستای داخلی–خارجی نیروی عکس‌العمل زمین در پس‌آزمون گروه مداخله در مقایسه با پیش‌آزمون ۲۳/۳۴ درصد کاهش یافت (P<۰/۰۰۸). تعداد هارمونی ضروری در راستای قدامی–خلفی نیروی عکس‌العمل زمین در پس‌آزمون گروه مداخله در مقایسه با پیش‌آزمون ۳۳/۰۴ درصد افزایش یافت (P<۰/۰۰۱) (جدول ۲). اختلاف هارمونی ضروری در راستای قدامی–خلفی پیش‌آزمون و پس‌آزمون گروه‌های مورد مطالعه اختلاف آماری معنی‌داری داشتند (P<۰/۰۲۱) (جدول ۲).

بحث

با توجه به نتایج این مطالعه، تعداد هارمونی ضروری در مؤلفه گشتاور آزاد در پس‌آزمون گروه کنترل در مقایسه با پیش‌آزمون ۱۵/۹۵ درصد کاهش یافت. همچنین تعداد هارمونی ضروری در راستای قدامی–خلفی نیروی عکس‌العمل زمین در پس‌آزمون گروه مداخله در مقایسه با پیش‌آزمون ۳۳/۰۴ درصد افزایش یافت. این موضوع می‌تواند به افزایش سرعت راه‌رفتن و دویدن در افراد دارای پای پرونیت و آسیب ACL بیانجامد.[۲۵] از این رو بررسی سیگنال‌های

جدول ۲ : مقادیر نیروهای عکس العمل زمین در دو گروه کنترل و تمرین در مقایسه درون گروهی و بین گروهی

راستا	متغیرها	کنترل				تمرین			
		پیش آزمون	پس آزمون	p-value درون گروهی	p-value بین گروهی	پیش آزمون	پس آزمون	p-value درون گروهی	p-value بین‌گروهی
نیروی عمودی عکس العمل زمین	فرکانس با توان ۹۹/۵ درصد	۱۲/۹۲±۳/۴۸	۱۱/۵۲±۳/۳۰	۰/۲۸۴	۰/۷۵۲	۱۲/۸۵±۳/۰۴	۱۱/۸۸±۳/۱۶	۰/۴۱۴	۰/۳۴۶
	هارمونی ضروری	۱۶/۹۲±۴/۱۵	۱۶/۰۷±۳/۸۰	۰/۵۷۴	۰/۰۶۹	۲۰/۰۴±۳/۸۰	۱۷/۹۷±۴/۰۸	۰/۱۷۷	۰/۶۲۸
	میانه فرکانس	۲/۰۴±۰/۱۲	۲/۰۰±۰/۰۰	۰/۱۵۳	۰/۵۵۹	۲/۰۴±۰/۱۲	۲/۰۲±۰/۰۸	۰/۵۵۸	۰/۵۵۸
	پهنای باند فرکانس	۱/۰۴±۰/۱۲	۱/۰۰±۰/۰۰	۰/۱۵۳	۰/۵۵۸	۱/۰۴±۰/۱۲	۱/۰۲±۰/۰۸	۰/۵۵۸	۰/۵۵۸
داخلی-خارجی	فرکانس با توان ۹۹/۵ درصد	۱۲/۲۸±۲/۵۷	۱۱/۹۰±۲/۳۲	۰/۶۸۴	۰/۵۳۶	۱۴/۷۱±۳/۳۳	۱۱/۸۳±۴/۶۲	۰/۰۷۰	۰/۱۵۹
	هارمونی ضروری	۱۶/۷۶±۴/۰۸	۱۶/۲۶±۳/۲۴	۰/۷۲۲	۰/۲۲۹	۱۹/۲۳±۲/۶۶	۱۵/۵۹±۳/۹۲	۰/۰۰۸ *	۰/۰۲۱ *
	میانه فرکانس	۲/۰۴±۰/۱۲	۲/۰۴±۰/۱۲	۱/۰۰۰	۰/۶۹۸	۲/۰۲±۰/۰۸	۲/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۰۰	۰/۵۵۸
	پهنای باند فرکانس	۱/۰۴±۰/۱۲	۱/۰۴±۰/۱۲	۱/۰۰۰	۰/۵۵۸	۱/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۰۰	۰/۵۵۹
قدامی-خلفی	فرکانس با توان ۹۹/۵ درصد	۱۲/۲۶±۳/۳۵	۱۲/۸۸±۳/۰۷	۰/۶۱۵	۰/۲۸۳	۱۳/۰۴±۳/۲۶	۱۱/۱۹±۳/۰۸	۰/۱۳۴	۰/۷۷۴
	هارمونی ضروری	۱۷/۸۰±۲/۸۹	۱۸/۰۴±۴/۰۲	۰/۱۰۳	۰/۲۷۲	۱۴/۴۷±۴/۱۱	۲۱/۶۱±۲/۵۵	۰/۰۰۱ *	۰/۲۱۳
	میانه فرکانس	۲/۰۲±۰/۰۸	۲/۰۴±۰/۱۲	۰/۵۵۸	۱/۰۰۰	۲/۰۲±۰/۰۸	۲/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۰۰	۰/۳۳۶
	پهنای باند فرکانس	۱/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۴±۰/۱۲	۰/۵۵۸	۱/۰۰۰	۱/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۰۰	۰/۳۲۷
گشتاور آزاد	فرکانس با توان ۹۹/۵ درصد	۱۱/۶۶±۲/۹۵	۱۲/۰۴±۲/۹۴	۰/۷۳۵	۰/۰۵۶	۱۰/۶۶±۱/۷۱	۱۱/۶۴±۴/۶۰	۰/۴۶۳	۰/۷۸۴
	هارمونی ضروری	۱۹/۱۱±۲/۱۵	۱۶/۴۸±۴/۱۴	۰/۰۴۵ *	۰/۱۲۸	۱۷/۶۹±۴/۲۱	۱۷/۲۱±۳/۶۳	۰/۷۵۱	۰/۶۲۶
	میانه فرکانس	۲/۰۲±۰/۰۸	۲/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۰۰	۰/۵۵۸	۲/۰۴±۰/۱۲	۲/۰۴±۰/۱۲	۱/۰۰۰	۰/۵۵۸
	پهنای باند فرکانس	۱/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۲±۰/۰۸	۱/۰۰۰	۰/۵۵۹	۱/۰۴±۰/۱۲	۱/۰۴±۰/۱۲	۱/۰۰۰	۰/۵۵۹

P<۰/۰۵ *

نیروی عکس‌العمل زمین در طیف فرکانس ممکن است در درک بهتر تفاوت‌ها در شرایط بارگیری در فعالیت‌های روزمره مانند راه‌رفتن و دویدن کمک کند.[۲۶] با توجه به این که سرعت در پیش‌آزمون و پس‌آزمون کنترل شده بود تا تفاوتی بین دو گروه وجود نداشته باشد؛ لذا این مورد می‌تواند به دلیل جذب شوک مناسب بعد از تمرین روی شن باشد. احتمالاً این افزایش ایجاد شده در مقدار هارمونی ضروری در راستای قدامی-خلفی می‌تواند از آسیب‌های اندام تحتانی به‌ویژه در صفحه فرونتال جلوگیری کند. تجزیه و تحلیل هارمونیک نیروی عکس‌العمل زمین طی راه‌رفتن از تبدیل منحنی‌های سری زمانی به پارامترهای گسسته (ضرایب فوریه) تشکیل شده است. این پارامترها حاوی اطلاعاتی در مورد کل شکل موج با دقت ۹۹/۵ درصد است و برای تحلیل داده‌های نیروی عکس‌العمل زمین بدون محدود کردن تحلیل به نقاط اوج منحنی نیرو-زمان به‌کار می‌رود.[۲۷و۲۸]

پارگی رباط صلیبی قدامی حرکت خطی رو به جلوی درشت‌نی زیر ران را امکان‌پذیر می‌کند و باعث ایجاد ناپایداری در مفصل زانو می‌شود.[۲۲و۲۹] افزایش ناپایداری در مفصل زانو، بیماران را وادار می‌سازد که الگوی راه‌رفتن را تغییر دهند و از یک الگوی جبرانی برای راه‌رفتن استفاده کنند که آن نیز باعث بهبود در جذب شوک بیمار حین راه‌رفتن می‌شود.[۳۰و۳۱] در واقع این دوره تمرینی از طریق افزایش کنترل پاسچر طی راه‌رفتن، باعث بهبود عملکرد در افراد دارای پای پرونیت و پارگی ACL شده است. در مطالعه Hammami و همکاران افزایش سرعت متعاقب تمرین روی سطح شن مشاهده شده است[۳۲] که با مطالعه حاضر همسو است. همچنین نتایج تحقیقات گذشته حاکی از آن است که نیروهای وارده بر مؤلفه قدامی-خلفی در افراد دارای عارضه پای پرونیت نسبت به افراد دارای پای طبیعی در هنگام راه‌رفتن بالا است[۳۳] که با مطالعه حاضر همسو است.

نیروهای شدید که در هنگام تماس پاشنه با زمین در حین راه‌رفتن به سمت جلو در افراد دارای کف پای صاف اتفاق می‌افتد؛ معمولاً به دلیل زمان اندک جذب نشده و با گذشت زمان موجب آسیب می‌گردد.[۳۴] در مطالعه Khodadadeh و Welton نیروی عکس‌العمل زمین در افراد دارای عارضه پای پرونیت با افراد نرمال هنگام فرود از ارتفاع مشخص، ارزیابی شد و افراد دارای کف پای صاف دارای نیروی عکس‌العمل بیشتری نسبت به افراد نرمال بودند که این امر می‌تواند در درازمدت در این افراد سبب آسیب شود.[۳۴]

تعداد هارمونی ضروری در راستای داخلی-خارجی نیروی عکس‌العمل زمین در پس‌آزمون گروه مداخله در مقایسه با پیش‌آزمون ۲۳/۳۴ درصد کاهش یافت که این نتیجه به نوعی با مطالعه طهماسبی و همکاران[۳۵] همسو است. در مطالعه طهماسبی و همکاران[۳۵] میزان جابجایی مرکز فشار در راستای قدامی- خلفی و داخلی-خارجی در کودکان فلج مغزی در مقایسه با همسالان سالم بیشتر بود. دلیل همسو بودن نتایج را می‌توان به مشکلات عضلانی اسکلتی مرتبط دانست که می‌تواند تعادل این افراد را طی حرکت‌های مختلف دچار اختلال کند. در هنگام راه‌رفتن در ۵۰ میلی‌ثانیه بعد از تماس آغازین، توسط تبادل انرژی و اندازه حرکت از پایی که با زمین برخورد می‌کند؛ موج شوک به بدن منتقل می‌شود.[۳۶] در ارتباط با جذب و کاهش طیف فرکانس نیروهای عکس‌العمل زمین، حرکت اندام قبل از تماس پا با زمین بر نیروهای عکس‌العمل زمین دستخوش تغییر می‌شود. در بعضی از افراد قبل از برخورد پا با زمین، سرعت پا را کاهش می‌دهند و یا آن

را متوقف می‌کنند و بعضی از آنان اجازه می‌دهند تا زمین پای آنها را متوقف کند. هر دو مکانیسم بالا به یک سیستم عضلانی سالم برای کنترل نیاز دارند.[۳۷] معمولاً افراد سالم برخلاف افراد دارای پای پرونیت دارای کاهش نوسانات پا[۳۸] و کاهش تغییرپذیری راه‌رفتن[۳۹] هستند. در تحقیقاتی بیان شده فرکانس با توان ۹۹/۵ یا ۹۹ درصد طیف فرکانس نیروهای عکس‌العمل زمین در افراد آسیب دیده مورد بررسی پایین‌تر از گروه کنترل است[۴۰و۴۱] که با مطالعه حاضر همسو نیست. فرکانس با توان ۹۹/۵ درصد نیروی عکس‌العمل زمین نشان‌دهنده تعادل، لرزش و ثبات فرد است.[۴۲] بنابراین پایین بودن مقدار فرکانس با توان ۹۹/۵ درصد در افراد دارای پای پرونیت و پارگی ACL می‌تواند نشان‌دهنده کاهش نوسانات و بی‌ثباتی در الگوی حرکتی این گروه از افراد باشد که با مطالعه علوی‌مهر و همکاران[۴۳] که به ارزیابی اثر کفی بر افراد دارای پای پرونیت پرداختند؛ کاهش نوسان می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که فرد در انجام حرکت توانسته کنترل پاسچر بهتری داشته باشد که کاهش در هارمونی ضروری نیز می‌تواند یکی از پیامدهای تعادل بهتر باشد.[۴۴]

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که تمرین بر روی شن می‌تواند سبب بهبود مکانیک راه‌رفتن افراد دارای ترمیم رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت گردد.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی مصوب (شماره ۹۸۰۰۰۳۹۱) دانشگاه علوم پزشکی بقیه‌الله (عج) بود. بدین‌وسیله از همه شرکت‌کنندگان در مطالعه صمیمانه تشکر می‌نماییم. بین نویسندگان تضاد منافع وجود ندارد.

References

1. Keshavarz Moghadam N, Sadeghi H. [Biomechanical Variables of Gait Initiation and Gait Termination with Emphasis on Instruments, Floors, and Musculoskeletal Disorders: A Systematic Review]. The Scientific Journal of Rehabilitation Medicine. 2019;8(3):260-71. doi: 10.22037/jrm.2019.111060.1730. [Article in Persian]

2. Padua DA, DiStefano LJ, Hewett TE, Garrett WE, Marshall SW, Golden GM, et al. National Athletic Trainers' Association Position Statement: Prevention of Anterior Cruciate Ligament Injury. J Athl Train. 2018 Jan;53(1):5-19. doi: 10.4085/1062-6050-99-16.

3. Wetters N, Weber AE, Wuerz TH, Schub DL, Mandelbaum BR. Mechanism of Injury and Risk Factors for Anterior Cruciate Ligament Injury. Operative Techniques in Sports Medicine. 2016 Mar;24(1): 2-6. doi: 10.1053/j.otsm.2015.09.001.

4. Lohmander LS, Ostenberg A, Englund M, Roos H. High prevalence of knee osteoarthritis, pain, and functional limitations in female soccer players twelve years after anterior cruciate ligament injury. Arthritis Rheum. 2004 Oct;50(10):3145-52. doi: 10.1002/art.20589.

5. Gottlob CA, Baker CL Jr. Anterior cruciate ligament reconstruction: socioeconomic issues and cost effectiveness. Am J Orthop (Belle Mead NJ). 2000 Jun;29(6):472-76.

6. Boden BP, Dean GS, Feagin JA Jr, Garrett WE Jr. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. Orthopedics. 2000 Jun;23(6):573-78. doi: 10.3928/0147-7447-20000601-15.

7. Alentorn-Geli E, Myer GD, Silvers HJ, Samitier G, Romero D, Lázaro-Haro C, et al. Prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries in soccer players. Part 1: Mechanisms of injury and underlying risk factors. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2009 Jul;17(7):705-29. doi: 10.1007/s00167-009-0813-1.

8. Goharpey S, Shirin A, Mehravar M, Zahednejad S, Fatehi A, Kahlaii A. [Studying the Correlation Between Knee Isokinetic Dynamometery and Lower Extremity Functional Test for Return to Sport in Professional Athletes After ACL Reconstruction]. Jundishapur Scientific Medical Journal. 2022; 20(Special Issue): 698-709. doi: 10.32598/JSMJ.20.2562. [Article in Persian]

9. Sánchez-Rodríguez R, Valle-Estévez S, Fraile-García PA, Martínez-Nova A, Gómez-Martín B, Escamilla-Martínez E. Modification of Pronated Foot Posture after a Program of Therapeutic Exercises. Int J Environ Res Public Health. 2020 Nov;17(22):8406. doi: 10.3390/ijerph17228406.

10. Allen MK, Glasoe WM. Metrecom measurement of navicular drop in subjects with anterior cruciate ligament injury. J Athl Train. 2000 Oct;35(4):403-406.

11. Golchini A, Rahnama N. [Effect of 12-week corrective exercises on postural sways in male students with pronation distortion syndrome]. RSMT. 2020;18(19):127-45. doi: 10.29252/jsmt.18.19.127. [Article in Persian]

12. Fatollahi A, Jafarnezhadgero AA. [Effect of Long-Term Training on Sand on Co-Contraction of Ankle Joint in Individuals with Pronated Feet]. JSSU. 2021;29(4):3669-80. doi: 10.18502/ssu.v29i4.6499. [Article in Persian]

13. Jafarnezhadgero A, Amirzadeh N, Fatollahi A, Siahkouhian M, Oliveira AS, Granacher U. Effects of Running on Sand vs. Stable Ground on Kinetics and Muscle Activities in Individuals With Over-Pronated Feet. Front Physiol. 2022 Jan;12:822024. doi: 10.3389/fphys.2021.822024.

14. Jafarnezhadgero AA, Fatollahi A, Granacher U. Eight Weeks of Exercising on Sand Has Positive Effects on Biomechanics of Walking and Muscle Activities in Individuals with Pronated Feet: A Randomized Double-Blinded Controlled Trial. Sports (Basel). 2022 May;10(5):70. doi: 10.3390/sports10050070.

15. van den Berg MEL, Barr CJ, McLoughlin JV, Crotty M. Effect of walking on sand on gait kinematics in individuals with multiple sclerosis. Mult Scler Relat Disord. 2017 Aug;16:15-21. doi: 10.1016/j.msard.2017.05.008.

16. Sedaghti P, Chamachaei MA, Zarei H. Effects of Exercise Training Programs on Postural Control and Dynamic Balance in Individuals with Flat Feet and Cavus Feet: A Systematic Review and Meta-analysis. Journal of Rehabilitation Sciences & Research. 2023;10(1):1-8. doi: 10.30476/jrsr.2022.93997.1256.

17. Jafarnezhadgero AA, Sheikhalizade H, Dehghani M. [The frequency domain of ground reaction forces during running in patients with low back pain: comparing with healthy control group]. Med J Tabriz Uni Med Sciences Health Services. 2020 June- July; 42(2):143-51. doi: 10.34172/mj.2020.030. [Article in Persian]

18. Jafarnezhadgero A, Fatollahi A, Amirzadeh N, Siahkouhian M, Granacher U. Ground reaction forces and muscle activity while walking on sand versus stable ground in individuals with pronated feet compared with healthy controls. PLoS One. 2019 Sep;14(9):e0223219. doi: 10.1371/journal.pone.0223219.

19. Grillner S, Halbertsma J, Nilsson J, Thorstensson A. The adaptation to speed in human locomotion. Brain Res. 1979 Apr;165(1):177-82. doi: 10.1016/0006-8993(79)90059-3.

20. Thorstensson A, Carlson H, Zomlefer MR, Nilsson J. Lumbar back muscle activity in relation to trunk movements during locomotion in man. Acta Physiol Scand. 1982 Sep;116(1):13-20. doi: 10.1111/j.1748-1716.1982.tb10593.x.

21. Lichtwark GA, Wilson AM. Optimal muscle fascicle length and tendon stiffness for maximising gastrocnemius efficiency during human walking and running. J Theor Biol. 2008 Jun;252(4):662-73. doi: 10.1016/j.jtbi.2008.01.018.

22. Mafi M, Sheikhalizade H, Jafarnezhadgero A, Asheghan M. Investigating the effect of sand training on running mechanics in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction and pronated feet. Gait Posture. 2023 Jul;104:129-34. doi: 10.1016/j.gaitpost.2023.06.009.

23. Durai DBJ, Shaju MKF. Effect of sand running training on speed among school boys. International Journal of Physical Education, Sports and Health. 2019;6(3):117-22.

24. Clarkson PM, Hubal MJ. Exercise-induced muscle damage in humans. Am J Phys Med Rehabil. 2002 Nov;81(11 Suppl):S52-69. doi: 10.1097/00002060-200211001-00007.

25. Mohammadkhani-Pordanjani E, Arnould C, Raji P, Nakhostin Ansari N, Hasson S. Validity and reliability of the Persian ABILHAND-Kids in a sample of Iranian children with cerebral palsy. Disabil Rehabil. 2020 Jun;42(12):1744-52. doi: 10.1080/09638288.2018.1530307.

26. Dehghan L, Abdolvahab M, Bagheri H, Dalvand H, Faghihzade S. [Inter rater reliability of Persian version of Gross Motor Function Classification System Expanded and Revised in patients with cerebral palsy]. Daneshvar Medicine. 2020;18(6):37-44. [Article in Persian]

27. White R, Agouris I, Selbie RD, Kirkpatrick M. The variability of force platform data in normal and cerebral palsy gait. Clin Biomech (Bristol, Avon). 1999 Mar;14(3):185-92. doi: 10.1016/s0268-0033(99)80003-5.

28. White R, Schuren J, Wardlaw D, Diamandopoulos Z, Anderson R. Biomechanical assessment of gait in below-knee walking casts. Prosthet Orthot Int. 1999 Aug;23(2):142-51. doi: 10.3109/03093649909071626.

29. Nilsson J, Thorstensson A. Ground reaction forces at different speeds of human walking and running. Acta Physiol Scand. 1989 Jun;136(2):217-27. doi: 10.1111/j.1748-1716.1989.tb08655.x.

30. Hooper DM, Morrissey MC, Crookenden R, Ireland J, Beacon JP. Gait adaptations in patients with chronic posterior instability of the knee. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2002 Mar;17(3):227-33. doi: 10.1016/s0268-0033(02)00002-5.

31. Brandsson S, Karlsson J, Eriksson BI, Kärrholm J. Kinematics after tear in the anterior cruciate ligament: dynamic bilateral radiostereometric studies in 11 patients. Acta Orthop Scand. 2001 Aug;72(4):372-78. doi: 10.1080/000164701753542032.

32. Hammami M, Bragazzi NL, Hermassi S, Gaamouri N, Aouadi R, Shephard RJ, et al. The effect of a sand surface on physical performance responses of junior male handball players to plyometric training. BMC Sports Sci Med Rehabil. 2020 Apr;12:26. doi: 10.1186/s13102-020-00176-x.

33. Zifchock R, Parker R, Wan W, Neary M, Song J, Hillstrom H. The relationship between foot arch flexibility and medial-lateral ground reaction force distribution. Gait Posture. 2019 Mar;69:46-49. doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.01.012.

34. Khodadadeh S, Welton EA. Gait studies of patients with flat feet. The Foot. 1993 Dec;3(4):189-93. doi: 10.1016/0958-2592(93)90007-P.

35. Tahmasebi A, Raji P, Karimi MT. [Effect of Visual Feedback on Static Standing Balance in Children with Spastic Diplegic Cerebral Palsy Compared to Normal Children]. The Scientific Journal of Rehabilitation Medicine, 2017;6(2):59-72. doi: 10.22037/jrm.2017.1100469. [Article in Persian]

36. Brenneman EC, Maly MR. Identifying changes in gait waveforms following a strengthening intervention for women with knee osteoarthritis using principal components analysis. Gait Posture. 2018 Jan;59:286-91. doi: 10.1016/j.gaitpost.2017.07.006.

37. Collins M, Xenophontos SL, Cariolou MA, Mokone GG, Hudson DE, Anastasiades L, et al. The ACE gene and endurance performance during the South African Ironman Triathlons. Med Sci Sports Exerc. 2004 Aug;36(8):1314-20. doi: 10.1249/01.mss.0000135779.41475.42.

38. Qu X. Impacts of different types of insoles on postural stability in older adults. Appl Ergon. 2015 Jan;46 Pt A:38-43. doi: 10.1016/j.apergo.2014.06.005.

39. Hatton AL, Dixon J, Rome K, Newton JL, Martin DJ. Altering gait by way of stimulation of the plantar surface of the foot: the immediate effect of wearing textured insoles in older fallers. J Foot Ankle Res. 2012 Apr;5:11. doi: 10.1186/1757-1146-5-11.

40. Stergiou N, Giakas G, Byrne JB, Pomeroy V. Frequency domain characteristics of ground reaction forces during walking of young and elderly females. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2002 Oct;17(8):615-17. doi: 10.1016/s0268-0033(02)00072-4.

41. Wurdeman SR, Huisinga JM, Filipi M, Stergiou N. Multiple sclerosis affects the frequency content in the vertical ground reaction forces during walking. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2011 Feb;26(2):207-12. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2010.09.021.

42. Alavi-Mehr SM, Jafarnezhadgero A, Salari-Esker F, Zago M. Acute effect of foot orthoses on frequency domain of ground reaction forces in male children with flexible flatfeet during walking. Foot (Edinb). 2018 Dec;37:77-84. doi: 10.1016/j.foot.2018.05.003.

43. Jafarnezhadgero A, Madadi-Shad M, Alavi-Mehr SM, Granacher U. The long-term use of foot orthoses affects walking kinematics and kinetics of children with flexible flat feet: A randomized controlled trial. PLoS One. 2018 Oct;13(10):e0205187. doi: 10.1371/journal.pone.0205187.

44. Anoushirvani S, Heshmati S, Yousefi O, Abdollahpour Darvishani M, Akbarifard L. [Comparison of Frequency Spectrum of Ground Reaction Forces and Electromyography Activities in Cerebral Palsy with Healthy Children During Walking]. Journal of Paramedical Sciences & Rehabilitation, 2021;10(2):83-96. doi: 10.22038/jpsr.2021.47269.2093. [Article in Persian]