

Research Paper



The Effect of Thermoplastic Insoles on Center of Pressure Parameters in Individuals with Flatfoot Deformity

*Mohammad Yousefi¹, Rasul Borhani¹, Masumeh Aleghabi¹, Sadeqh Mohammadnia Ahmadi²

1. Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Department of Sport Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran.

2. Department of Neurology, Faculty of Medicine, Birjand University of Medical Sciences, Birjand, Iran.

Use your device to scan and
read the article online



Citation: Yousefi M, Borhani R, Aleghabi M, Mohammadnia Ahmadi S. The Effect of Thermoplastic Insoles on Center of Pressure Parameters in Individuals with Flatfoot Deformity. Journal of Sport Biomechanics. 2026;12(3):626-640. <https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.3.626>

<https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.3.626>



Article Info:

Received: 14 May 2026

Accepted: 11 August 2026

Available Online: 17 August 2026

Keywords:

Flatfoot, Thermoplastic insoles, Center of pressure, Postural stability

ABSTRACT

Objective Flatfoot deformity is one of the most common musculoskeletal disorders that can impair postural stability and balance by altering center of pressure (COP) characteristics. Given the importance of non-invasive approaches, the present study aimed to investigate the effect of thermoplastic insoles on COP parameters in individuals with flatfoot deformity.

Methods In this quasi-experimental study, 14 eligible participants were randomly assigned to either the intervention group (thermoplastic insole, n=7) or the control group (n=7). Static and dynamic COP data were recorded using a foot-scan system. Following a 45-day intervention period, data collection was repeated. Statistical analyses were performed using paired t-tests and univariate analysis of covariance (ANCOVA) at a significance level of 0.05.

Results The findings demonstrated that the use of thermoplastic insoles significantly improved COP parameters in both the mediolateral (ML) and anteroposterior (AP) directions and significantly reduced the Confidence Ellipse Area (CEA) in the intervention group ($P < 0.05$). In contrast, no significant changes were observed in the control group ($P > 0.05$).

Conclusion Due to their elastic properties and effective mechanical support, thermoplastic insoles may represent an effective biomechanical intervention for enhancing postural stability and reducing center of pressure (COP) oscillations in individuals with flatfoot deformity.

* Corresponding Author:

Mohammad Yousefi

Address: Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Department of Sport Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran.

E-mail: m.yousefi@Birjand.ac.ir

This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, adaptation, and reproduction in any medium or format, provided the original author(s) and the source are credited.

© 2026 The Author(s). Journal of Sport Biomechanics published by Islamic Azad University, Hamedan Branch.

Extended Abstract

1. Introduction

The human foot plays a critical role in shock absorption and load distribution during gait, and proper structural alignment is essential for efficient locomotion and musculoskeletal function. Flatfoot deformity (pes planus) is a common structural alteration characterized by a reduction or collapse of the medial longitudinal arch. When persistent beyond normal development, this deformity may result in compensatory biomechanical adaptations, including rearfoot valgus and forefoot abduction, which can increase mechanical stress on the plantar fascia and Achilles tendon and contribute to pain and impaired postural stability. One of the important biomechanical consequences of flatfoot deformity is the alteration of the center of pressure (COP) trajectory. During the stance phase of gait, the COP represents the point of application of the ground reaction force vector and provides valuable information regarding postural control and loading strategies. Individuals with flatfoot may demonstrate altered COP displacement patterns, which can affect dynamic balance and plantar loading distribution. Although various orthotic interventions have been developed to improve foot mechanics, previous studies have reported inconsistent findings regarding their effects on ground reaction forces and COP-related parameters. Thermoplastic insoles, due to their heat-moldable properties, allow individualized shaping according to foot morphology and may provide targeted mechanical support for correcting abnormal foot alignment. Therefore, the purpose of the present study was to investigate the effects of custom thermoplastic insoles on COP parameters and Confidence Ellipse Area (CEA) in individuals with flatfoot deformity.

2. Methods

The present study employed an applied quasi-experimental pretest-posttest control group design. The study population consisted of individuals with flexible flatfoot deformity aged between 10 and 17 years. Fourteen participants (male and female) who met the eligibility criteria were recruited and randomly allocated into either the intervention group (thermoplastic insole, $n=7$) or the control group ($n=7$). Participants were included if they had a definitive clinical diagnosis of flexible flatfoot deformity confirmed by a specialist physician. Flexible flatfoot was defined as a structural condition characterized by collapse or flattening of the medial longitudinal arch during weight-bearing activities, with restoration of the arch during non-weight-bearing conditions or tip-toe standing. Participants were excluded if they developed soft tissue injuries or severe plantar arch hypersensitivity during insole use, experienced persistent or severe pain after one week of thermoplastic insole application, or if they or their guardians were unwilling to continue participation at any stage of the study.

Following a comprehensive explanation of the study procedures, written informed consent was obtained from the parents or legal guardians of all participants. Anthropometric characteristics, including height and body mass, were recorded. Participants then underwent pedobarographic assessment using a foot-scan system. Prior to data collection, participants received instructions regarding the gait protocol and were familiarized with walking across the sensor platform. They were instructed to step on the platform with the left foot during the forward trial and with the right foot during the return trial. To minimize the effects of unfamiliarity and ensure a natural walking pattern, participants performed 3–5 familiarization trials. The most representative trial reflecting their habitual walking pattern was selected for subsequent analysis.

After the baseline assessment, participants were randomly assigned to their respective groups. The intervention group was instructed to wear custom thermoplastic insoles continuously inside their footwear for 45 days, whereas the control group received no orthotic or exercise intervention during this period. Following completion of the intervention period, all participants returned to the laboratory, and post-test measurements were obtained under conditions identical to the baseline assessment. Foot pressure data were collected using the Foot Medisense Plus scanner (Danesh Salar Iranian Co.). The system has dimensions of 520×640 mm, a maximum load capacity of 150 kg, sensors with a spatial resolution of 0.7 cm, and a sensor plate area of 40×40 cm. The system is capable of calculating the center of pressure (COP) trajectory during dynamic activities.

The extracted COP variables were recorded during walking. COP coordinates were calculated and reported in millimeters, whereas the Confidence Ellipse Area (CEA) was expressed in square millimeters. The analyzed COP parameters included COP-LFX, COP-RFX, COP-LFY, and COP-RFY, representing the

mean position of the COP trajectory along the mediolateral (X) and anteroposterior (Y) axes during walking. These parameters provide information regarding plantar loading distribution and dynamic postural control. In addition, CEA-LF and CEA-RF represented the 95% confidence ellipse area, indicating the spatial dispersion of COP trajectory fluctuations during gait. The thermoplastic insoles used in this study were provided by the "Pouya Gam Azma Tajhiz" technology firm. Due to the thermo-moldable characteristics of the polymer material, these insoles allowed individualized shaping according to each participant's foot morphology. During fabrication, the raw insole was heated in a dedicated thermo-heater unit at 110°C until it became sufficiently flexible for molding. The heated insole was then placed on a specialized polyurethane (PU) molding pad, and participants were instructed to stand on the insole while maintaining their natural body weight. The geometric structure of the high-density PU pad enabled accurate adaptation of the insole to the individual foot arch. The insoles were cooled for approximately 2–3 minutes until reaching their final supportive form. The main advantages of these insoles include reduced fabrication time, lightweight structure, mechanical durability, improved pressure distribution, and individualized adaptation to foot anatomy (Fig. 1).

Descriptive statistics were presented as mean and standard deviation (SD). The normality of data distribution was assessed using the Shapiro–Wilk test, and homogeneity of variances was evaluated using Levene's test. Paired t-tests were used to examine within-group changes between pre-test and post-test measurements. Furthermore, a univariate analysis of covariance (ANCOVA) was performed to compare post-test outcomes between groups while controlling for baseline values. All statistical analyses were conducted using SPSS software (version 27.0.1; IBM Corp., Armonk, NY, USA), and statistical significance was set at $P < 0.05$.

3. Results

The demographic characteristics of the 14 participants were normally distributed and comparable between groups at baseline. Within-group comparisons using paired t-tests demonstrated significant improvements in all mediolateral and anteroposterior COP parameters, along with a significant reduction in CEA, in the thermoplastic insole group. In contrast, no significant changes were observed in the control group. Furthermore, ANCOVA revealed a significant effect of the intervention on post-test COP parameters in both lower extremities after controlling for baseline values. Similarly, significant between-group differences were observed in post-test CEA values for both limbs, indicating the potential effectiveness of custom thermoplastic insoles in modifying COP-related measures.

4. Discussion

The present study aimed to investigate the effects of thermoplastic insoles on center of pressure (COP) parameters and Confidence Ellipse Area (CEA) in individuals with flexible flatfoot deformity. The findings demonstrated that the use of thermoplastic insoles resulted in significant improvements in COP parameters and a significant reduction in CEA. These findings suggest that thermoplastic insoles may enhance dynamic postural control by providing support for the medial and transverse foot arches, improving plantar pressure distribution, and guiding COP displacement toward a more stable biomechanical pattern. Consequently, excessive COP fluctuations may be reduced, contributing to improved postural stability.



Fig. 1. Thermoplastic insole and tools used for thermoplastic insole fabrication.

The findings of the present study are consistent with previous studies indicating that alterations in the medial and transverse foot arches can influence postural stability and balance control (32 - 34). In individuals with flatfoot deformity, structural changes and abnormal plantar pressure distribution may affect the efficiency of the postural control system. Thermoplastic insoles may provide a more favorable mechanical condition by increasing the support surface and optimizing plantar load distribution. Therefore, the observed improvements in postural control, reflected by COP and CEA parameters, are in agreement with previous studies emphasizing the beneficial effects of supportive orthotic interventions on balance and postural stability (33, 35).

Regarding the mediolateral axis, the results of the present study showed that thermoplastic insoles shifted the mean COP position toward a more lateral direction. Although direct kinematic measurements were not obtained in this study, this alteration may be associated with the reduction of excessive foot pronation and improved alignment of the foot during weight-bearing activities (16, 33). In addition to improvements in the mediolateral direction, the current findings demonstrated enhanced control of COP fluctuations along the anteroposterior axis. The foot arch not only provides essential support for weight-bearing but also plays an important role in shock absorption, body weight transfer, and forward progression during gait (28). The present findings suggest that thermoplastic insoles may improve anteroposterior stability through enhanced support of the medial longitudinal arch. These results are consistent with previous studies reporting that medial arch support increases midfoot joint stiffness and optimizes weight transfer and forward propulsion in individuals with flatfoot deformity (36). In addition to the biomechanical mechanisms described above, the structural durability of the insole material is an important factor influencing the effectiveness of orthotic interventions during longer-term use (37). The results of the present study indicated that thermoplastic insoles maintained their structural characteristics throughout the intervention period. Therefore, this type of insole may represent a suitable option for longer-term management in individuals with flatfoot deformity. However, further studies with larger sample sizes and longer follow-up periods are required to confirm these effects.

Several limitations should be considered when interpreting the findings of the present study. The small sample size, short intervention period that limits evaluation of long-term musculoskeletal adaptations, lack of assessment of kinematic, kinetic, and muscle activity parameters, and absence of a sham insole condition should be acknowledged. Furthermore, participants were aware of the intervention, and expectations regarding treatment effects could not be fully controlled. Therefore, the results of the present study should be interpreted considering these methodological limitations.

5. Conclusion

In conclusion, the findings of the present study indicate that the use of thermoplastic insoles may positively influence center of pressure (COP) parameters and reduce Confidence Ellipse Area (CEA) in individuals with flatfoot deformity. These findings suggest that customized thermoplastic insoles may contribute to improved dynamic postural control by providing individualized mechanical support and optimizing plantar load distribution. Considering their customizable characteristics and structural stability, thermoplastic insoles may represent a promising orthotic approach for managing biomechanical alterations associated with flatfoot deformity. However, further studies with larger sample sizes, longer follow-up periods, and additional assessments, including kinematic, kinetic, and electromyographic analyses, are required to clarify the underlying mechanisms and long-term effects of these interventions.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This study was conducted in accordance with the ethical principles of the relevant research committees and the Declaration of Helsinki. All participants voluntarily participated in the study, and written informed consent was obtained prior to enrollment.

Funding

This article was derived from a research project approved by the University of Birjand.

Authors' contributions

All authors contributed to the conceptualization, data collection, data analysis, and preparation of the manuscript. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

مقاله پژوهشی

اثر کفی ترموپلاستیک بر مرکز فشار پا در افراد مبتلا به ناهنجاری کف پای صاف

*محمد یوسفی^۱، رسول برهانی^۱، معصومه العقابی^۱، صادق محمدنیا احمدی^۲

۱. دانشکده علوم ورزشی، گروه علوم ورزشی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲. گروه مغز و اعصاب، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی بیرجند، بیرجند، ایران.

Use your device to scan and read the article online



Citation: Yousefi M, Borhani R, Aleghabi M, Mohammadnia Ahmadi S. The Effect of Thermoplastic Insoles on Center of Pressure Parameters in Individuals with Flatfoot Deformity. Journal of Sport Biomechanics. 2026;12(3):626-640. <https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.3.626>

doi <https://doi.org/10.66224/JSportBiomech.12.3.626>

چکیده

هدف: ناهنجاری کف پای صاف یکی از اختلالات شایع اسکلتی-عضلانی است که با تأثیر بر مرکز فشار (COP)، پایداری قامتی و تعادل فرد را مختل می‌کند. با توجه به اهمیت مداخلات غیرتهاجمی، هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر کفی‌های ترموپلاستیک بر پارامترهای مرکز فشار در افراد مبتلا به کف پای صاف بود.

روش‌ها: در این مطالعه نیمه تجربی، ۱۴ شرکت‌کننده واجد شرایط به صورت تصادفی در دو گروه مداخله (کفی ترموپلاستیک، ۷ نفر) و کنترل (۷ نفر) قرار گرفتند. داده‌های مربوط به مرکز فشار در حالت ایستا و پویا با استفاده از دستگاه اسکتر کف پا ثبت گردید. پس از ۴۵ روز مداخله، مجدداً داده‌ها جمع‌آوری شد. تحلیل داده‌ها با استفاده از تی زوجی و آزمون کوواریانس تک‌متغیره در سطح معناداری ۰/۰۵ انجام گرفت.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان داد که استفاده از کفی ترموپلاستیک منجر به بهبود معنی‌داری در پارامترهای COP در هر دو محور داخلی-خارجی و قدامی-خلفی و همچنین کاهش مساحت نوسان قامتی (CEA) گردید (۰/۰۵ < p).

نتیجه‌گیری: کفی‌های ترموپلاستیک به دلیل خاصیت ارتجاعی و حمایت مکانیکی مؤثر، به عنوان یک مداخله کارآمد برای افزایش پایداری و کنترل نوسانات COP در افراد مبتلا به کف پای صاف عمل می‌کنند.

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۲۰ مرداد ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۲۶ مرداد ۱۴۰۵

کلید واژه‌ها:

کف پای صاف، کفی

ترموپلاستیک، مرکز فشار،

پایداری قامتی

*نویسنده مسئول:

محمد یوسفی

آدرس: دانشکده علوم ورزشی، گروه علوم ورزشی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

ایمیل: m.yousefi@Birjand.ac.ir

مقدمه

پا یکی از اجزای مهم پایین تنه می باشد که نقش مهمی در جذب ضربه و توزیع بار هنگام راه رفتن ایفا می کند و علاوه بر این، یکپارچگی ساختار پا برای عملکرد بهتر راه رفتن و سلامت کلی اسکلتی-عضلانی ضروری می باشد (۱). شکل و ساختار پا با توجه به رشد ساختاری و بیومکانیکی، در کودکان در حال تغییرات و رشد است (۲). یکی از ناهنجاری ها که در پا بیشتر در سنین پایه رخ می دهد، کف پای صاف می باشد (۳). این ناهنجاری می تواند پس از اتمام سن رشد در افراد از بین برود و یا این که به صورت مداوم تا آخر عمر همراه باشد (۴).

کف پای صاف به وضعیتی گفته می شود که قوس طولی و عرضی پا از بین می رود و زمانی که فرد در حال ایستاده است؛ قوس طولی و عرضی صاف به نظر می رسد (۵، ۶). این ناهنجاری ممکن است به دلایل مختلفی مانند عوامل محیطی، میزان سطح فعالیت، عادات کفش پوشیدن و ژنتیکی باشد (۷). کف پای صاف می تواند یک پا و یا هر دو پا را تحت تأثیر خود قرار دهد؛ هنگامی که این حالت به وجود می آید بر اثر فشاری که به کف پا وارد می شود منجر به انحراف عقب پا و در ادامه باعث دور شدن جلو پا می شود (۸). ناهنجاری کف پای صاف اگر بعد از اتمام دوران کودکی ادامه دار باشد منجر به مشکلاتی مانند درد و همچنین اختلال در عملکرد پا می شود (۹). علاوه بر این در مطالعه ای گزارش شده است؛ زمانی که افراد دچار کف پای صاف می شوند باعث وارد شدن فشار اضافی بر ناحیه فاشیا می شود که در نتیجه باعث به وجود آمدن درد در این ناحیه خواهد شد (۱۰). همچنین کف پای صاف ممکن است فشار بر تاندون آشیل را افزایش دهد و منجر به التهاب در این ناحیه شود (۱۱). این ناهنجاری به علت کشیدگی بیش از حد رباط ها پا منجر به بی ثباتی و عدم تعادل می شود (۱۲) و در ادامه بی ثباتی ایجاد شده منجر به توزیع نابرابر وزن می شود که در نهایت باعث درد، در ساق پا، کمر و باسن می شود (۱۳، ۱۴). یکی دیگر از مشکلاتی هنگام کف پا صاف به وجود می آید؛ تغییرات در مرکز فشار می باشد (۱۵، ۱۶). زمانی که مرکز فشار نیز به داخل پا تغییر مکان می دهد؛ باعث ایجاد آرتروز در مفاصل متاتارسوفالانژیال اول و هالگوس والگوس می شود (۱۷، ۱۸) که سرانجام منجر به درد در جلوی پا می شود (۱۹). مرکز فشار را می توان به عنوان نقطه ای که نیروی واکنش زمین به طور سریع به آن وارد می شود تعریف کرد که جهت ارزیابی ویژگی های الگوی بارگذاری در طول مراحل ایستا و راه رفتن در افراد دارای کف پای صاف مورد استفاده قرار می گیرد (۲۰). مرکز فشار تقریباً از تماس اولیه تا تماس کامل پا به صورت جانبی حرکت می کند و سپس به صورت داخلی به سمت قبل از پرواز حرکت می کند و بدین ترتیب یک قوس را تشکیل می دهد (۲۱). با این که به طور کامل مشخص نیست چه عاملی بر تغییر مسیر داخلی مرکز فشار در افراد مبتلا به کف پای صاف تأثیر می گذارد، اما در برخی مطالعات بر رابطه بین وضعیت های استاتیک پا و مسیر مرکز فشار در حین راه رفتن تمرکز کرده اند (۲۰، ۲۲). در یک مطالعه ای گزارش شده است که موقعیت مرکز فشار در کف پای صاف، از تماس اولیه به سمت داخل جابجا شده و ارتباط نزدیکی با حرکت عقب پا در صفحات فرونتال در طول مرحله ایستادن دارد و برای اصلاح تغییر مسیر داخلی مسیر مرکز فشار در کف پای صاف، کنترل انحراف و جلوگیری از نزدیک شدن بیش از حد انتهای پا در طول مرحله ایستادن مهم است (۲۰). بر این اساس به نظر می رسد تشخیص کف پا صاف جهت جلوگیری از علائم به وجود آمده در مرحله اول و سپس بهبود آن جهت جلوگیری از ادامه دار شدن بعد از اتمام سن رشد بسیار حائز اهمیت می باشد.

یکی از راه حل های درمانی که امروزه جهت بهبود و درمان این ناهنجاری انجام می گیرد؛ استفاده از کفی ها ارتوپدی می باشد (۶، ۱۶). در یک مطالعه مروری که به بررسی اثر کفی بر کف پای صاف پرداخت؛ پس از بررسی مطالعات انتخاب شده در مطالعه مروری حال حاضر نتایج متناقضی راجع به تأثیر کفی بر کف پای صاف گزارش شده است (۶). همچنین در یک مطالعه مروری دیگری

گزارش شده است که استفاده از کفی همراه با تمرین ورزشی یا بدون تمرین ورزشی در کاهش درد و همچنین و اصلاح در راستای والگوس در افراد مبتلا به کف پای صاف اثرات مثبتی دارد (۲۳). به‌طور کلی بر اساس یافته‌های مطالعه‌ای استفاده از کفی باعث کاهش درد، کاهش خستگی و همچنین تغییرات مثبتی بر مرکز فشار در حین راه رفتن و ایستادن دارد (۲۴)؛ بنابراین استفاده از کفی می‌تواند یک روش مناسب جهت تغییرات مثبت بر مرکز فشار در افراد مبتلا به کف پا صاف باشد.

کفی‌های مورد استفاده برای اصلاح ناهنجاری‌های کف پا در انواع مختلف و با جنس‌های گوناگون تولید می‌شوند. این کفی‌ها بسته به نوع ناهنجاری و نیاز بیومکانیکی، از مواد مختلفی همچون پلاستیک، فوم، سیلیکون و چرم ساخته می‌شوند تا حمایت و راحتی لازم را فراهم کنند (۲۵، ۲۶). در برخی مطالعات گزارش شده است که کفی‌های ساخته شده با استفاده از فناوری چاپگر سه‌بعدی ممکن است تأثیرات مثبتی بر راحتی و عملکرد پا در شرایط مختلف داشته باشند باین‌حال، نتایج این مطالعه نشان داد که این کفی‌ها در تغییر متغیرهای نیروی واکنشی زمین در حین فعالیت‌های پویایی مانند راه رفتن و دویدن تأثیر معناداری نداشته‌اند. به‌عبارت دیگر، اگرچه این کفی‌ها ممکن است در راحتی پا بهبودهایی ایجاد کنند، اما بر نیروی واکنشی زمین که با مرکز فشار ارتباط دارد؛ اثرات مثبتی در حین راه رفتن مشاهده نشده است (۲۷)، اما کفی‌های ترموپلاستیک که تحت تأثیر گرما قابلیت تغییر شکل دارد؛ امکان طراحی شخصی‌سازی شده برای هر فرد را فراهم می‌آورند. رویکردی که مطالعات پیشین نشان دادند؛ می‌تواند ناهنجاری کف پای صاف را بهتر مدیریت کند (۲۵، ۲۸). بررسی اثر کفی ترموپلاستیک بر پارامترهای مرکز فشار COP و مساحت بیضی اطمینان CEA در افراد مبتلا به کف پای صاف بود.

روش شناسی

آزمودنی‌ها

مطالعه حال حاضر از نوع کاربردی و نیمه تجربی و به‌صورت پیش‌آزمون و پس‌آزمون برگزار شد؛ همچنین جامعه آماری در شهرستان مشهد و افراد دارای ناهنجاری کف پای صاف با دامنه سنی ۱۷-۱۰ انتخاب شدند. در مجموعه ۱۴ نفر پسر (۶ نفر) و دختر (۸ نفر) به‌صورت تصادفی و هدفمند وارد مطالعه شدند که تعیین حجم نمونه بر اساس مطالعه مشابه نیز تعیین گردید (۲۹، ۳۰). افرادی که پس از تشخیص تست‌های کلینیکال توسط پزشک مربوطه، کف پای صاف منعطف تشخیص داده شد وارد مطالعه شدند. کف پای صاف منعطف به افراد گفته می‌شود که هنگام ایستادن روی پنجه، قوس کف پا نیز شکل بگیرد (۳۱). بروز هرگونه آسیب در بافت قوس کف پا هنگام استفاده از کفی ترموپلاستیک، احساس هرگونه درد پس از یک هفته استفاده از کفی ترموپلاستیک و درنهایت عدم تمایل به همکاری شرکت‌کنندگان از معیارها خروج این مطالعه در نظر گرفته شد. پس از تکمیل فرم رضایت‌نامه آگاهانه و ثبت ویژگی‌های آنترپومتری (قد و وزن)، آزمودنی‌ها آماده ارزیابی با دستگاه فوت‌اسکن شدند. روند گام‌برداری روی دستگاه به شرکت‌کنندگان آموزش داده شد تا در مسیر رفت با پای چپ و در برگشت با پای راست از روی سنسور عبور کنند. جهت دستیابی به سرعت طبیعی، الگوی حرکتی نرمال و حذف سوگیری گام‌برداری هدفمند، از شرکت‌کنندگان خواسته شد ابتدا ۳ تا ۵ مرتبه آزمون را تکرار کنند و در نهایت، یکی از تست‌ها اندازه‌گیری شده که به الگوی راه رفتن طبیعی فرد نزدیک‌تر بود، ثبت گردید. سپس آزمودنی‌ها به‌طور تصادفی به دو گروه کنترل و مداخله (۴۵ روز استفاده از کفی ترموپلاستیک) تقسیم شدند؛ از گروه کنترل خواسته شد در این مدت هیچ‌گونه مداخله‌ای دریافت نکنند. پس از اتمام این دوره، تمامی افراد مجدداً در مرکز حضور یافته و ارزیابی‌های پس‌آزمون در شرایطی کاملاً مشابه تکرار و ثبت شد.

اندازه‌گیری قوس کف پا

اندازه‌گیری وضعیت کف پا توسط دستگاه فوت مدیسن پلاس شرکت دانش‌ساز ایران انجام گرفت. مشخصات فنی این دستگاه در ادامه بیان می‌گردد. ابعاد دستگاه ۵۲۰ در ۶۴۰ میلی‌متر، دارای قابلیت اندازه‌گیری ۱۵۰ کیلوگرم، سنسورها دارای رزولوشن ۰/۷ سانتی‌متر مربع، صفحه سنسورها ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر مربع و در نهایت قابلیت نشان دادن مرکز فشار بدن و ترسیم خط مرکز فشار از مشخصات این دستگاه می‌باشد. همان‌طور که بیان گردید، متغیرهای به‌دست‌آمده به‌صورت دینامیک ثبت شدند و بر همین اساس، پارامترهای استخراج‌شده از دستگاه فوت‌اسکندر در ادامه توضیح داده می‌شوند. تمامی متغیرهای مربوط به مختصات COP برحسب میلی‌متر و متغیر CEA برحسب میلی‌متر مربع محاسبه و گزارش شده‌اند. پارامترهای COP شامل COP-LFX^۱، COP-RFY^۲، COP-LFY^۳ و RFX^۴ بودند. این متغیرها نشان‌دهنده میانگین موقعیت (مختصات) خط سیر مرکز فشار در دو محور داخلی-خارجی (X) و قدامی-خلفی (Y) در هنگام راه رفتن می‌باشد و نحوه توزیع بارگذاری و پایداری دینامیک پا را منعکس می‌کنند. علاوه بر این، شاخص‌های CEA-LF و CEA-RF بیانگر مساحت بیضی اطمینان ۹۵ درصد هستند که کل فضای دربرگیرنده نوسانات خط سیر COP را در حین گام‌برداری اندازه‌گیری می‌کنند.

کفی ترموپلاستیک

کفی ترموپلاستیک مورد استفاده از شرکت دانش‌بنیان پویا گام آزما تجهیز تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. این کفی‌ها که از مواد ترموپلاستیک ساخته شده‌اند، قابلیت تغییر شکل با گرما را دارند و به‌صورت کاملاً شخصی‌سازی‌شده برای هر فرد قابل طراحی هستند. فرآیند ساخت به این صورت انجام می‌گیرد که ابتدا کفی در دستگاه هیتر تا دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌بیند تا نرم و آماده قالب‌گیری شود؛ سپس کفی روی بالشتک مخصوصی به نام PU قرار داده می‌شود و از فرد خواسته می‌شود تا روی آن بایستد. طراحی هندسی منحصربه‌فرد PU باعث می‌شود که کفی به شکل دقیق پا قالب‌گیری شده و به مدت زمان دو الی سه دقیقه سرد و محکم شود. از جمله مزایای کفی ترموپلاستیک کاهش زمان ساخت، وزن سبک، استحکام بالا، جلوگیری از پیشرفت ناهنجاری‌های پا، توزیع یکنواخت فشار و طراحی اختصاصی متناسب با ساختار پای هر فرد می‌باشد. در ادامه کفی‌ها و ابزار مورد استفاده از این کفی‌ها در شکل ۱، نمایش داده می‌شود.



شکل ۱. کفی ترموپلاستیک و ابزار مورد استفاده برای ساخت کفی ترموپلاستیک

1. Center of Pressure Mediolateral - Left Foot
2. Center of Pressure Mediolateral - Right Foot
3. Center of Pressure Anteroposterior - Left Foot
4. Center of Pressure Anteroposterior - Right Foot

تجزیه و تحلیل آماری

جهت توصیف داده‌های پژوهش، از روش‌های آمار توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار استفاده شد. به منظور بررسی نحوه توزیع داده‌ها از آزمون شاپیرو-ویلک و برای سنجش پیش‌فرض برابری واریانس جامعه‌ها از آزمون لون استفاده شد. به منظور مقایسه درون‌گروهی و ارزیابی تغییرات نمرات از مرحله پیش‌آزمون تا پس‌آزمون در هر گروه، آزمون تی زوجی به کار گرفته شد با توجه به ماهیت طرح تحقیق (پیش‌آزمون-پس‌آزمون) و به منظور کنترل آماری اثر نمرات پیش‌آزمون، از آزمون تحلیل کوواریانس جهت مقایسه میانگین گروه‌ها در مرحله پس‌آزمون استفاده شد. نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ جهت آنالیز داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت و سطح معنی‌داری $P \leq 0.05$ در نظر خواهد گرفته شد.

نتایج

میانگین و انحراف معیار مشخصات دموگرافیک آزمودنی‌ها و متغیرهای وابسته در جدول ۱ و ۲ در حالت قبل و بعد از اجرای مداخله گزارش شده است. نتایج بدست‌آمده از آزمون تی زوجی شامل COP در دو محور داخلی-خارجی و در محور قدامی-خلفی و CEA (جدول ۲ و ۳) در ادامه گزارش شده است. به منظور مقایسه نتایج درون‌گروهی، از آزمون تی زوجی استفاده شد. بررسی نتایج درون‌گروهی آزمون تی زوجی نشان داد که در گروه مداخله (کفی ترموپلاستیک)، تمامی متغیرهای مربوط به نوسانات COP در راستای داخلی-خارجی و قدامی-خلفی و همچنین CEA در هر دو اندام تحتانی، در مرحله پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون تغییرات و بهبود معنی‌داری پیدا کرده‌اند ($p=0.001$). این در حالی است که در گروه کنترل، در هیچ‌یک از متغیرهای فوق، تفاوت آماری معنی‌داری بین مراحل پیش‌آزمون و پس‌آزمون مشاهده نگردید ($p>0.05$).

جدول ۱. میانگین و انحراف معیار مشخصات دموگرافیک شرکت‌کنندگان

متغیر	مداخله	کنترل
سن (سال)	۱۴/۴۳±۲/۰۷	۱۳/۲۹±۱/۱۱
وزن (کیلوگرم)	۵۰/۸۵±۱۷/۴۲	۳۴/۸۵±۶/۹۶
قد (سانتی‌متر)	۱/۶۲±۰/۰۹	۱/۵۷±۰/۰۳
شاخص توده بدنی (کیلوگرم بر متر مربع)	۱۹/۳۸±۶/۳۶	۱۴/۱۴±۲/۶۸

جدول ۲. میانگین و انحراف معیار COP دو گروه در مراحل پیش‌آزمون و پس‌آزمون و نتایج آزمون تی زوجی به منظور مقایسه بین درون‌گروهی

متغیر	گروه	پیش‌آزمون	پس‌آزمون	فاصله اطمینان	T	P
COP-LFX (mm)	مداخله	۲۱۴/۶۴ ± ۳۸/۹۰	۲۲۲/۴۳ ± ۳۹/۱۵	(۶/۵۹، ۸/۹۷)	۱۶/۰۱۳	*۰/۰۰۱
	کنترل	۲۱۹/۸۰ ± ۳۲/۸۹	۲۱۹/۹۲ ± ۳۱/۰۰	(-۳/۲۸، ۳/۵۳)	۰/۰۸۹	۰/۹۳۲
COP-RFX (mm)	مداخله	۲۱۹/۷۵ ± ۴۲/۱۲	۲۲۸/۰۲ ± ۴۱/۶۲	(۷/۱۸، ۹/۳۵)	۱۸/۶۷۲	*۰/۰۰۱
	کنترل	۲۱۳/۴۵ ± ۳۳/۹۶	۲۱۳/۵۹ ± ۳۵/۸۸	(-۳/۳۵، ۳/۶۴)	۰/۰۹۹	۰/۹۲۴
COP-LFY (mm)	مداخله	۱۳۴/۰۴ ± ۴۱/۲۳	۱۴۲/۲۸ ± ۴۱/۱۴	(۷/۵۳، ۸/۹۴)	۲۸/۶۸	*۰/۰۰۱
	کنترل	۱۳۳/۹۴ ± ۲۰/۱۶	۱۳۴/۱۶ ± ۲۰/۹۱	(-۳/۳۳، ۲/۸۸)	۰/۱۷۹	۰/۸۶۴
COP-RFY (mm)	مداخله	۱۳۹/۴۹ ± ۵۱/۸۴	۱۴۷/۵۹ ± ۵۲/۲۵	(۷/۳۴، ۸/۸۶)	۲۵/۹۹	*۰/۰۰۱
	کنترل	۱۱۲/۲۱ ± ۱۲/۲۴	۱۱۲/۵۹ ± ۱۳/۳۵	(-۳/۱۱، ۳/۸۸)	۰/۲۶۸	۰/۷۹۸

COP-LFX = Center of Pressure Mediolateral - Left Foot (X-axis); COP-RFX = Center of Pressure Mediolateral - Right Foot (X-axis); COP-LFY = Center of Pressure Anteroposterior - Left Foot (Y-axis); COP-RFY = Center of Pressure Anteroposterior - Right Foot (Y-axis).

نتایج بدست آمده از آزمون تحلیل کوواریانس شامل COP در دو محور داخلی-خارجی و در محور قدامی-خلفی (جدول ۴) و CEA (جدول ۵) در ادامه گزارش شده است. یافته‌های آماری نشان می‌دهد که در تمامی پارامترهای COP و CEA، بین گروه مداخله (کفی ترموپلاستیک) و گروه کنترل تفاوت معنی‌داری وجود دارد.

یافته‌های حاصل از آزمون تحلیل کوواریانس (جدول ۴) نشان می‌دهد که پس از تعدیل و کنترل اثر نمرات پیش‌آزمون، اثر عامل گروه بر COP معنی‌دار است ($p=0/001$). بر این اساس، در راستای محور داخلی-خارجی (X)، در پای چپ ($F=26/053$ ، $p=0/001$)، $\eta^2=0/703$ و پای راست ($F=27/141$ ، $p=0/001$ ، $\eta^2=0/712$) و در راستای قدامی-خلفی (Y) در پای چپ ($F=33/377$ ، $p=0/001$ ، $\eta^2=0/752$) و پای راست ($F=21/004$ ، $p=0/001$ ، $\eta^2=0/656$) تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. یافته‌های حاصل از آزمون تحلیل کوواریانس (جدول ۵) نشان داد که پس از تعدیل و کنترل اثر نمرات پیش‌آزمون، مداخله کفی ترموپلاستیک اثر معنی‌داری بر CEA در هر دو اندام تحتانی داشته است. بر این اساس، تفاوت آماری معنی‌داری بین دو گروه مداخله و کنترل در CEA پای چپ ($F=20/857$ ، $p=0/001$ ، $\eta^2=0/466$) و در پای راست ($F=28/450$ ، $p=0/001$ ، $\eta^2=0/721$) مشاهده شد.

بحث

مطالعه حال حاضر با هدف بررسی کفی ترموپلاستیک بر COP و CEA افراد مبتلا به ناهنجاری کف پا صاف انجام شد. یافته‌ها این مطالعه نشان داد که استفاده از این نوع کفی می‌تواند بهبود معنی‌داری بر پارامتر CEA ایجاد کند؛ بر این اساس می‌توان بیان کرد ممکن است که کفی ترموپلاستیک با حمایت از قوس طولی-عرضی پا، منجر به تغییر در توزیع نیروها شده و با هدایت COP به موقعیت بیومکانیکی بهینه‌تر، از نوسانات بیش‌ازحد جلوگیری کرده و پایداری را افزایش دهد.

جدول ۳. میانگین و انحراف معیار CEA دو گروه در مراحل پیش‌آزمون و پس‌آزمون و نتایج آزمون تی زوجی به منظور مقایسه بین درون‌گروهی

متغیر	گروه	پیش‌آزمون	پس‌آزمون	فاصله اطمینان	T	P
CEA-LF (mm ²)	مداخله	264/18±3/78	219/79±3/26	(42/72، 46/06)	65/06	*0/001
	کنترل	257/16±10/00	259/72±7/13	(-24/51، 19/39)	0/285	0/785
CEA-RF (mm ²)	مداخله	257/01±11/14	212/34±13/77	(38/28، 51/05)	17/126	*0/001
	کنترل	248/55±9/50	253/07±14/00	(-23/24، 14/20)	0/591	0/576

CEA-LF = Confidence Ellipse Area - Left Foot; CEA-RF = Confidence Ellipse Area - Right Foot

جدول ۴. نتایج آزمون تحلیل کوواریانس بر پارامتر COP (mm)

متغیر	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	آماره p	ضریب اتا
COP-LFX (mm)	198/112	198/112	26/053	*0/001	0/703
COP-RFX (mm)	224/920	224/920	27/141	*0/001	0/712
COP-LFY (mm)	213/906	213/906	33/377	*0/001	0/752
COP-RFY (mm)	168/762	168/762	21/004	*0/001	0/656

جدول ۵. نتایج آزمون تحلیل کوواریانس بر پارامتر CEA (mm²)

متغیر	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	آماره p	ضریب اتا
CEA-LF (mm ²)	4894/157	4894/157	20/857	*0/001	0/465
CEA-RF (mm ²)	1810/320	1810/320	28/450	*0/001	0/721

یافته‌های مطالعه حاضر همسو با نتایج برخی مطالعات نشان می‌دهد که افت قوس طولی-عرضی، می‌تواند یکی از عوامل اثرگذار بر تعادل افراد باشد (۳۲-۳۴). در افراد مبتلا به این ناهنجاری، با تغییر شکل ساختاری و توزیع غیرطبیعی فشار در کف پا، این احتمال وجود دارد که سیستم کنترل قامتی انسان دچار اختلال گردد. کفی‌های ترموپلاستیک از طریق افزایش سطح اتکا و توزیع بهینه فشار، می‌تواند شرایط مطلوب‌تری برای ثبات بهتر ایجاد کنند؛ بر این اساس این بهبود در عملکرد سیستم کنترل قامتی که با شاخص‌های COP و CEA ارزیابی شد، با یافته‌های پژوهشی که بر اثربخشی کفی‌های حمایت‌کننده در بهبود تعادلی تأکید دارند، هم‌راستا است (۳۳، ۳۵). در بررسی محور داخلی-خارجی، نتایج ما نشان داد که کفی ترموپلاستیک باعث جابجایی موقعیت میانگین مرکز فشار به سمت خارج شده است؛ هرچند داده‌های کینماتیکی مستقیم در این مطالعه ثبت نشده است، اما می‌توان این‌گونه بیان کرد که این تغییر ممکن است به علت مهار پرونیشن بیش‌ازحد پا باشد که منجر به قرارگیری COP در ناحیه اتکای مناسب‌تر شده است (۱۶، ۳۳). هم‌زمان با بهبود در محور X و در صفحه فرونتال، اما یافته‌ها حال حاضر بهبود کنترل نوسانات در مورد محور قدامی-خلفی (Y) را نشان داد. ساختار قوس پا نه تنها یک تکیه‌گاه ضروری برای تحمل وزن است، بلکه در جذب ضربه، انتقال وزن بدن و حرکت روبه‌جلو نقش کلیدی دارد (۲۸). در مطالعه حال حاضر نشان داده شد که کفی ترموپلاستیک ممکن است از طریق حمایت قوس طولی منجر به بهبود پایداری در محور Y شده باشد. این یافته‌ها همسو با مطالعات پیشین است که گزارش کرده‌اند که حمایت از قوس طولی داخلی با افزایش صلبیت مفصل میانی، فرآیند انتقال وزن و حرکت روبه‌جلو را در افراد مبتلا به کف پای صاف بهینه‌سازی می‌کند (۳۶). علاوه بر مکانیسم‌های بیومکانیکی ذکر شده؛ پایداری متریال کفی‌ها مورد استفاده یکی از عوامل می‌باشد که در مداخلات بلند مدت نقش تعیین‌کننده‌ای دارد (۳۷)؛ یافته‌ها مطالعه حال حاضر نشان داد که کفی ترموپلاستیک در طول دوره مداخله، دچار افت ارتفاع در ناحیه قوس نمی‌شود؛ بنابراین این نوع کفی می‌تواند یک روش مناسب و بلند مدت جهت مداخله برای افراد مبتلا به کف پای صاف مورد استفاده قرار گیرد.

در مطالعه حاضر حجم نمونه پایین؛ ارزیابی‌های کوتاه‌مدت که بررسی اثرات سازگاری بلندمدت سیستم حرکتی را دشوار می‌سازد، عدم ارزیابی پارامترهای کینماتیکی، کینتیکی و فعالیت عضلانی، عدم کنترل انتظارات درمانی آزمودنی‌ها به دلیل عدم استفاده از کفی ساختگی و آگاهی آزمودنی‌ها از روند درمان از جمله محدودیت محسوب می‌شود؛ بنابراین نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه باید با توجه به محدودیت‌ها که بیان گردید؛ تفسیر شود.

نتیجه‌گیری نهایی

در مجموع، یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از کفی‌های ترموپلاستیک به‌واسطه‌ی ویژگی‌های بیومکانیکی، از جمله ایجاد حمایت سه‌نقطه‌ای پایدار و اصلاح راستای مفاصل میانی پا، می‌تواند یک روش مؤثر برای مدیریت COP و بهبود پایداری در افراد مبتلا به کف پای صاف مورد استفاده قرار گیرد. نتایج ما نشان داد که این مداخله نه تنها می‌تواند اثرات مثبتی بر پارامترهای COP داشته باشد، بلکه ممکن است با کاهش CEA، بر ثبات قامت نیز اثرات قابل توجه‌ای داشته باشد. با توجه به دوام ساختاری متریال ترموپلاستیک، استفاده از این نوع کفی می‌تواند به‌عنوان یک مداخله‌ی بالینی کارآمد توصیه گردد؛ با این حال، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده با استفاده از ابزارهای مکمل نظیر الکترومایوگرافی و تحلیل‌های کینماتیکی دقیق، اثرات مثبت این نوع کفی را مشخص کنند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این پژوهش مطابق با اصول اخلاقی کمیته‌های پژوهشی ذی‌صلاح و مفاد بیانیه هلسینکی انجام شد. تمامی شرکت‌کنندگان به‌صورت داوطلبانه در پژوهش شرکت کردند و پیش از ورود به مطالعه، رضایت‌نامه آگاهانه کتبی از آنان اخذ شد.

حامی مالی

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی مصوب دانشگاه بیرجند می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در مفهوم‌پردازی، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله مشارکت داشته‌اند. همچنین، تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

تعارض

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافی در ارتباط با این پژوهش ندارند.

Reference

1. Sarkodie-Gyan T, Yu H. The human locomotor system: physiological and technological foundations. In: The Human Locomotor System: Physiological and Technological Foundations. Springer; 2023. p. 1-76. [DOI:10.1007/978-3-031-32781-0_1]
2. Asghar A, Naaz S. The transverse arch in the human feet: a narrative review of its evolution, anatomy, biomechanics and clinical implications. Morphologie. 2022;106(355):225-234. [DOI:10.1016/j.morpho.2021.07.005]
3. Green A. The pediatric foot and ankle. Pediatric Clinics of North America. 2020;67(1):169-183. [DOI:10.1016/j.pcl.2019.09.007]
4. Kardm SM, Alanazi ZA, Aldugman TAS, Reddy RS, Gautam AP. Prevalence and functional impact of flexible flatfoot in school-aged children: a cross-sectional clinical and postural assessment. Journal of Orthopaedic Surgery and Research. 2025;20(1):783. [DOI:10.1186/s13018-025-06207-y]
5. Flores DV, Mejía Gómez C, Fernández Hernando M, Davis MA, Pathria MN. Adult acquired flatfoot deformity: anatomy, biomechanics, staging, and imaging findings. Radiographics. 2019;39(5):1437-1460. [DOI:10.1148/rg.2019190046]
6. Chen H, Sun D, Fang Y, Gao S, Zhang Q, Bíró I, et al. Effect of orthopedic insoles on lower limb motion kinematics and kinetics in adults with flat foot: a systematic review. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2024;12:1435554. [DOI:10.3389/fbioe.2024.1435554]
7. Jiang H, Mei Q, Wang Y, He J, Shao E, Fernandez J, et al. Understanding foot conditions, morphologies and functions in children: a current review. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2023;11:1192524. [DOI:10.3389/fbioe.2023.1192524]

8. Kodithuwakku Arachchige SNK, Chander H, Knight A. Flatfeet: biomechanical implications, assessment and management. *The Foot*. 2019;38:81-85. [DOI:10.1016/j.foot.2019.02.004]
9. Toullec E. Adult flatfoot. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. 2015;101(Suppl 1):S11-S17. [DOI:10.1016/j.otsr.2014.07.030]
10. Morikawa M, Maeda N, Komiya M, Hirota A, Mizuta R, Kobayashi T, et al. Contribution of plantar fascia and intrinsic foot muscles in a single-leg drop landing and repetitive rebound jumps: an ultrasound-based study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(9):4633. [DOI:10.3390/ijerph18094511]
11. Vijayakumar K, Kumar S. Prevalence of flexible flatfoot and rigid flatfoot in relation with tightness of Achilles tendon and weakness of tibialis posterior tendon among individuals of 40-60 years of age. *Indian Journal of Physiotherapy and Occupational Therapy*. 2017;11:210. [DOI:10.5958/0973-5674.2017.00106.X]
12. Bertani A, Cappello A, Benedetti MG, Simoncini L, Catani F. Flat foot functional evaluation using pattern recognition of ground reaction data. *Clinical Biomechanics*. 1999;14(7):484-493. [DOI:10.1016/S0268-0033(98)90099-7]
13. Messier SP, Pittala KA. Etiologic factors associated with selected running injuries. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1988;20(5):501-505. [DOI:10.1249/00005768-198810000-00012]
14. Herchenröder M, Wilfling D, Steinhäuser J. Evidence for foot orthoses for adults with flatfoot: a systematic review. *Journal of Foot and Ankle Research*. 2021;14(1):57. [DOI:10.1186/s13047-021-00499-z]
15. Hillstrom HJ, Song J, Kraszewski AP, Hafer JF, Mootanah R, Dufour AB, et al. Foot type biomechanics part 1: structure and function of the asymptomatic foot. *Gait & Posture*. 2013;37(3):445-451. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2012.09.007]
16. Soltani N, Jalalvand A, Jahani MR. Comparison of plantar force, pressure and impulse during walking in men and women with flat feet. *Journal of Sport Biomechanics*. 2021;7(2):94-105. [DOI:10.32598/biomechanics.7.2.2]
17. Zammit GV, Menz HB, Munteanu SE, Landorf KB. Plantar pressure distribution in older people with osteoarthritis of the first metatarsophalangeal joint (hallux limitus/rigidus). *Journal of Orthopaedic Research*. 2008;26(12):1665-1669. [DOI:10.1002/jor.20700]
18. Van Gheluwe B, Dananberg HJ, Hagman F, Vanstaen K. Effects of hallux limitus on plantar foot pressure and foot kinematics during walking. *Journal of the American Podiatric Medical Association*. 2006;96(5):428-436. [DOI:10.7547/0960428]
19. Keijsers NL, Stolwijk NM, Louwerens JW, Duysens J. Classification of forefoot pain based on plantar pressure measurements. *Clinical Biomechanics*. 2013;28(3):350-356. [DOI:10.1016/j.clinbiomech.2013.01.012]
20. Dodelin D, Tourny C, L'Hermette M. The biomechanical effects of pronated foot function on gait: an experimental study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2020;30(11):2167-2177. [DOI:10.1111/sms.13785]
21. Kawakami W, Iwamoto Y, Takeuchi Y, Takeuchi R, Sekiya J, Ishii Y, et al. Relationship between foot kinematics and center of pressure trajectory during gait in individuals with flatfoot. *Journal of the American Podiatric Medical Association*. 2025;115(4). [DOI:10.7547/23-050]
22. Wong L, Hunt A, Burns J, Crosbie J. Effect of foot morphology on center-of-pressure excursion during barefoot walking. *Journal of the American Podiatric Medical Association*. 2008;98(2):112-117. [DOI:10.7547/0980112]

23. Shim SR, Kim JY, Shin J, Lee YJ, Park JB, Hong MJ. Optimizing flatfoot management with foot orthoses: a systematic review and meta-analysis. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. 2025. [DOI:10.1097/PHM.0000000000002833]
24. Jiang Y, Yang J, Tian H, Jiang C, Wang H. Comparative study of the effects of custom-made insole and ordinary insole in adults with flexible flatfoot on different slopes. *Technology and Health Care*. 2024;32(6):4063-4075. [DOI:10.3233/THC-231785]
25. Nouri A, Wang L, Li Y, Wen C. Materials and manufacturing for ankle-foot orthoses: a review. *Advanced Engineering Materials*. 2023;25(20):2300238. [DOI:10.1002/adem.202300238]
26. Mohammad Reza B, Hooman M, Foad S. The effect of foot orthosis on electromyographic activity of ankle muscles in athletes with flat foot during single leg jump landing. *Journal of Sport Sciences and Health Research*. 2017;9(19):139-152.
27. Daryabor A, Kobayashi T, Saeedi H, Lyons SM, Maeda N, Naimi SS. Effect of 3D printed insoles for people with flatfeet: a systematic review. *Assistive Technology*. 2023;35(2):169-179. [DOI:10.1080/10400435.2022.2105438]
28. Saeedi H, Aboutorabi A, Arazpour M. An evaluation of a bespoke modified UCBL foot orthosis on subjects with flat foot using kinetic measurements and user comfort scores: a randomized controlled trial. *Foot*. 2024;60:102127. [DOI:10.1016/j.foot.2024.102127]
29. Aminian DG, Farhoodi M, Safaeepour Z, Pezeshk AF. The assessment of the effect of longitudinal arch support insole on plantar pressure distribution in subjects with flexible flatfoot. *Iranian Journal of War and Public Health*. 2012;4(16):43-48.
30. Sadeghi H, Aghaie Atabadi P, Hovanlo F. Immediate effect of pre-made foot orthotics on variability and joint coupling patterns of rear foot and tibia during gait in male athletes with pes planus. *Journal of Sport Biomechanics*. 2015;1(2):41-51.
31. Mosca VS. Flexible flatfoot and skewfoot. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 1995;77(12):1937-1945. [DOI:10.2106/00004623-199512000-00021]
32. Ghorbani M, Yaali R, Sadeghi H, Luczak T. The effect of foot posture on static balance, ankle and knee proprioception in 18-to-25-year-old female students: a cross-sectional study. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2023;24(1):547. [DOI:10.1186/s12891-023-06678-2]
33. Fattahi A, Koreili Z, Ameli M. Instantaneous effect of insole on the balance of adolescents with flat foot and pes cavus. *Journal of Sport Biomechanics*. 2020;6(1):44-54. [DOI:10.32598/biomechanics.6.1.6]
34. Roshandel Hesari A, Langeroudi MS, Nazari R. The impact of an exhaustive exercise on static balance of freestyle wrestlers with flat foot. *Journal of Sport Biomechanics*. 2022;7(4):250-261. [DOI:10.32598/biomechanics.7.4.252.4]
35. Kulcu DG, Yavuzer G, Sarmer S, Ergin S. Immediate effects of silicone insoles on gait pattern in patients with flexible flatfoot. *Foot & Ankle International*. 2007;28(10):1053-1056. [DOI:10.3113/FAI.2007.1053]
36. Chen H, Sun D, Zhang Q, Yuan Y, Song Y, Li F, et al. Biomechanical effects of varying arch support hardness in foot orthosis for adults with flexible flatfoot: a comprehensive Bayesian statistical analysis. *Gait & Posture*. 2026;125:110085. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2025.110085]
37. Soltani N, Majlesi M, Fatahi A. Long-term use of anti-pronation insoles enhances inter-joint coordination in individuals with flat feet. *Journal of Foot and Ankle Research*. 2026;19(1):e70124. [DOI:10.1002/jfa2.70124]