



Research Article

**Assessment of Plantar Pressure in Static Standing Position Before and After Fatigue in Individuals with a History of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Pronated Foot at Different Time Intervals Post-Surgery**

**Ebrahim Piri<sup>1</sup>**, **AmirAli Jafarnezhadgero<sup>2\*</sup>**, **Mahrokh Dehghani<sup>3</sup>**, **Afsaneh Enteshari-Moghaddam<sup>4</sup>**

1. PhD in Sports Biomechanics, Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. Associate Professor of Sports Biomechanics, Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3. Professor of Sports Biomechanics, Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Iran.
4. Associate Professor of Rheumatology, Department of Internal Medicine, Faculty of Medicine, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran. Iran.

**Received: 09/09/2025, Accepted: 12/01/2026, Online Published: 19/01/2026**

\*Corresponding Author: AmirAli Jafarnezhadgero, E-mail: [a.jafarnezhad@uma.ac.ir](mailto:a.jafarnezhad@uma.ac.ir)

**How to Cite:** Piri, E; Jafarnezhadgero, AA. Dehghani M, Entesharimoghaddam A(2025). Assessment of Static Plantar Pressures in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Pronated Feet at Different Time Intervals After Surgery. *Sport Medicine Studies, Sport Medicine Studies*, 2026; 17(46), 79-100. Doi: [10.22089/smj.2026.18487.1827](https://doi.org/10.22089/smj.2026.18487.1827).

**Extended Abstract**

**Background and Purpose**

Anterior cruciate ligament (ACL) rupture is among the most prevalent and functionally disruptive injuries in the lower extremities, particularly in active populations. Surgical reconstruction (ACLR) is often required to restore knee stability, yet biomechanical deficits frequently persist long after the procedure, especially when compounded by pre-existing or concomitant biomechanical abnormalities such as pronated feet. Pronated foot posture, characterized by excessive eversion of the calcaneus and collapse of the medial longitudinal arch, alters the kinetic chain from the foot up to the hip and spine, potentially exacerbating instability and maladaptive loading patterns in ACL-reconstructed knees. Epidemiological data indicate that 20–23% of adult's exhibit pronated feet, while annual ACL injury incidence ranges from 30 to 70 per 100,000 individuals, with over 200,000 ACL reconstructions



**Copyright:** © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

performed annually in the United States alone. Despite advances in surgical techniques and rehabilitation protocols, re-injury rates remain alarmingly high (5–25%), particularly within the first 1–2 years' post-surgery, often attributed to premature return to sport, inadequate neuromuscular control, and unresolved biomechanical asymmetries. Muscular fatigue, a physiological state marked by reduced force-generating capacity and impaired neuromuscular coordination, further compounds these deficits. Fatigue diminishes proprioceptive acuity, delays muscle activation, and disrupts agonist-antagonist co-activation patterns, thereby increasing vulnerability to joint instability and abnormal loading. In individuals with ACLR, fatigue may unmask latent biomechanical deficiencies that are not apparent under non-fatigued conditions. Moreover, the synergistic effect of ACLR and pronated foot posture on plantar pressure distribution particularly under fatigued conditions remains underexplored, despite its critical implications for rehabilitation strategy and injury prevention.

Plantar pressure analysis serves as a sensitive biomechanical indicator of postural control, load distribution, and neuromuscular compensation strategies. Abnormal pressure patterns, especially elevated medial heel and midfoot pressures, are associated with increased pronation and may reflect compensatory strategies to stabilize the knee in the presence of residual ACL deficiency. Therefore, the purpose of this study was to investigate static plantar pressure parameters in male individuals with ACL reconstruction and pronated feet across different post-surgical time intervals (less than 6 months, 6–12 months, and more than 12 months), both before and after induced muscular fatigue, to identify critical windows of vulnerability and inform targeted rehabilitation interventions.

## Methods

This quasi-experimental study employed a pretest-posttest design with repeated measures and was conducted in the Sports Biomechanics Laboratory at the University of Mohagheh Ardabili, Iran. Sample size calculation using G\*Power 3.1 ( $P = 0.05$ , effect size = 0.7, power = 0.8) determined a minimum of 10 participants per group. Forty male volunteers aged 18–45 years were recruited and divided into four groups: Group A (ACLR + pronated foot, <6 months' post-operative,  $n=10$ ), Group B (ACLR + pronated foot, 6–12 months' post-operative,  $n=10$ ), Group C (ACLR + pronated foot, >12 months' post-operative,  $n=10$ ), and Group D (healthy controls,  $n=10$ ). Inclusion criteria comprised unilateral ACLR using hamstring autograft, absence of lower limb pain or injury, ability to run without restriction, BMI between 18.5–25 kg/m<sup>2</sup>, navicular drop >10 mm, and rearfoot angle >4°. Exclusion criteria included history of lower limb fracture, leg length discrepancy >5 mm, or unwillingness to participate. Ethical approval was obtained (IR.UMA.REC.1404.019, IRCT20220129053865N2), and written informed consent was secured from all participants. Plantar pressure data were collected using the Footscan pressure plate system (RSscan International, Belgium; 4363 sensors, 300 Hz sampling rate). The system automatically segmented the foot into 10 anatomical regions: medial heel, lateral heel, midfoot, metatarsals 1–5 (M1–M5), hallux (T1), and toes 2–5 (T2–T5). Measurements were taken in static standing posture, both pre- and post-fatigue. Fatigue was induced via a progressive treadmill

protocol (Horizon Fitness, Omega GT, USA) starting at 6 km/h, increasing by 1 km/h every 2 minutes until participants reached a Borg Rating of Perceived Exertion (RPE) of 13 or higher. Participants then maintained a steady pace of 12 km/h until RPE  $\geq 17$  or heart rate  $\geq 80\%$  of maximum for 2 minutes.

Statistical analysis was performed using SPSS v23. Data normality was confirmed via Shapiro-Wilk test. A two-way repeated-measures ANOVA was used to examine the main effects of “time” (pre- vs. post-fatigue) and “group” (A, B, C, D), as well as their interaction. Post-hoc pairwise comparisons with Bonferroni correction were conducted where significant effects were found. Effect sizes (Cohen’s *d*) were calculated for all significant outcomes. Statistical significance was set at  $p < 0.05$ .

### Results

Results revealed a significant main effect of time (fatigue) on nearly all plantar pressure variables ( $p < 0.001$ ), indicating that fatigue universally increased plantar pressures across all groups. The “group” factor also showed significant differences ( $p < 0.05$ ), with Group A (<6 months’ post-op) exhibiting the highest-pressure values in the medial heel, midfoot, and metatarsal regions suggesting that early-stage rehabilitation is marked by the most pronounced biomechanical compromise.

Critically, a significant time  $\times$  group interaction was observed for mean plantar pressure (right foot:  $p = 0.006$ ,  $d = 0.877$ ; left foot:  $p = 0.007$ ,  $d = 0.281$ ), medial heel pressure (right:  $p = 0.001$ ,  $d = 0.384$ ; left:  $p = 0.041$ ,  $d = 0.280$ ), first metatarsal pressure (M1), and pressure under toes 2–5 (T2–T5) (right:  $p = 0.009$ ,  $d = 0.364$ ; left:  $p = 0.004$ ,  $d = 0.378$ ). Post-hoc analyses confirmed that the greatest pressure increases post-fatigue occurred in Groups A and B (<12 months’ post-op), particularly in medial heel and forefoot regions.

### Conclusion

Individuals with ACL reconstruction and concomitant pronated foot posture demonstrate significantly elevated and abnormally distributed plantar pressures during static standing, particularly under fatigued conditions and within the first 12 months’ post-surgery. The most critical period appears to be the first six months, where medial heel and forefoot loading increases dramatically with fatigue, signaling profound neuromuscular instability and compensatory strategies.

**Keywords:** Anterior cruciate ligament reconstruction, Pronated feet, Plantar pressure, Static posture, Muscular fatigue.

### Article Message

It appears that individuals with anterior cruciate ligament reconstruction and pronated feet, particularly during the early stages of rehabilitation (less than 12 months’ post-surgery), experience a significant increase in plantar pressure under fatigued conditions, indicating greater postural instability and improper load distribution across the foot highlighting the critical need for fatigue-resilient, foot-targeted rehabilitation strategies.

### **Ethical Considerations**

Ethical approval was obtained (IR.UMA.REC.1404.019), and written informed consent was secured from all participants.

### **Authors' Contributions**

Conceptualization: AmirAli Jafarnezhadgero

Data Collection: Ebrahim Piri

Data Analysis: Ebrahim Piri

Manuscript Writing: Ebrahim Piri

Review and Editing: AmirAli Jafarnezhadgero and Ebrahim Piri

Responsible for funding: AmirAli Jafarnezhadgero

Literature Review: Mahrokh Dehghani and Afsaneh Enteshari-Moghaddam

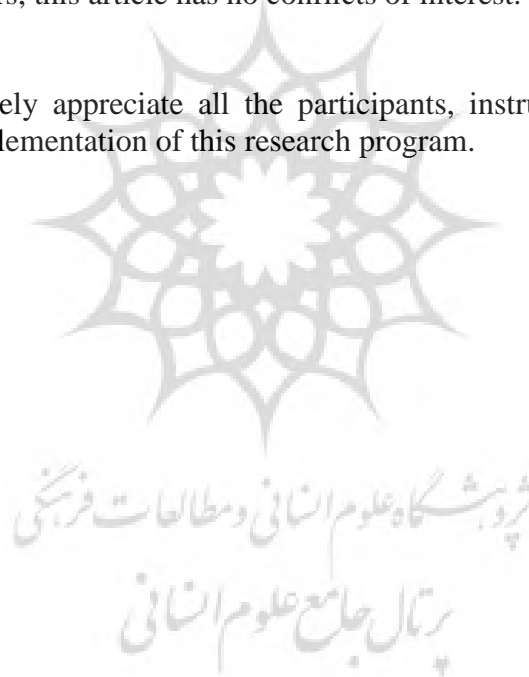
Project Manager: AmirAli Jafarnezhadgero

### **Conflict of Interest**

According to the authors, this article has no conflicts of interest.

### **Acknowledgments**

The researchers sincerely appreciate all the participants, instructors, and managers who collaborated in the implementation of this research program.





## بررسی فشارهای کف پایي وضعیت ایستا قبل و بعد خستگی در افراد با سابقه بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت در بازه‌های زمانی متفاوت پس از جراحی

ابراهیم پیری<sup>۱</sup> ID، امیر علی جعفر نژاد گرو<sup>۲\*</sup> ID، ماهرخ دهقانی<sup>۳</sup> ID، افسانه انتشاری مقدم<sup>۴</sup> ID

۱. دکتری بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲. دانشیار بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳. استاد تمام بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۴. دانشیار روماتولوژی، گروه داخلی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲، تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹

\*Corresponding Author: AmirAli Jafarnezhadgero, E-mail: [a.jafarnezhad@uma.ac.ir](mailto:a.jafarnezhad@uma.ac.ir)

**How to Cite:** Piri, E; Jafarnezhadgero, AA. Dehghani M, Entesharimoghaddam A(2025). Assessment of Static Plantar Pressures in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Pronated Feet at Different Time Intervals After Surgery. *Sport Medicine Studies, Sport Medicine Studies*, 2026; 17(46), 79-100. Doi: [10.22089/smj.2026.18487.1827](https://doi.org/10.22089/smj.2026.18487.1827).

### چکیده

هدف این مطالعه، بررسی فشارهای کف پایي وضعیت ایستا در افراد دارای بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت در بازه‌های زمانی متفاوت پس از جراحی بود. تعداد ۳۰ مرد دارای پای پرونیت با سابقه بازسازی رباط صلیبی قدامی داوطلب شرکت در این مطالعه شدند. برای اندازه‌گیری فشارهای کف پایي از دستگاه فوت اسکن ساخت کشور بلژیک استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل آماری آنالیز واریانس دوسویه با اندازه‌گیری‌های تکراری به کار رفت. نتایج نشان داد که عامل زمان (قبل و بعد از خستگی) تأثیر معناداری بر افزایش فشارهای کف پایي در تمامی گروه‌ها داشت ( $P < 0.001$ ) همچنین عامل گروه تفاوت معناداری بین گروه‌ها نشان داد؛ به طوری که گروه کمتر از شش ماه پس از بازسازی بیشترین مقادیر فشار را در نواحی پاشنه داخلی، میان‌پا، و متاتارسال‌ها داشت. اثر تعاملی زمان  $\times$  گروه برای متغیرهای میانگین فشار کف پا، فشار در پاشنه داخلی، فشار در متاتارسال اول، و فشار در انگشتان ۲ تا ۵ معنادار بود ( $P < 0.05$ ). نتایج آزمون‌های تعقیبی نشان داد که بیشترین افزایش فشار پس از خستگی در گروه کمتر از ۶ و ۱۲ ماه پس از بازسازی رخ داد. به نظر می‌رسد، افراد دارای بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت، به‌ویژه در مراحل اولیه توانبخشی (کمتر از ۱۲ ماه پس از جراحی)، در شرایط خستگی دچار افزایش درخورد توجهی در فشارهای کف پایي می‌شوند که نشان‌دهنده ناپایداری بیشتر و توزیع نامناسب بار بر کف پا است.

**واژگان کلیدی:** بازسازی رباط صلیبی قدامی، پای پرونیت، فشار کف پا، وضعیت ایستا، خستگی عضلانی.



## مقدمه

یکی از شایع‌ترین عوارض بازسازی رباط صلیبی قدامی سفتی مفاصل است که به نوبه خود می‌تواند منجر به شکست گرفت یا آرتروز زودرس شود (۱). وجود بیماران با بازسازی رباط صلیبی قدامی به همراه پای پرونیت، مسئله جدیدی است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که رباط صلیبی-قدامی نقش کلیدی در ثبات زانو دارد؛ به‌ویژه در برابر جابه‌جایی قدامی تی‌بیا نسبت به فمور و کنترل چرخش داخلی زانو. پس از بازسازی این رباط، ممکن است فرد دچار ناپایداری زانو، کاهش کنترل عضلانی (قدرت عضلات چهارسرران) و تغییر در زاویه‌های مفصلی زانو شود که متعاقب آن منجر به افزایش خطر سفتی مفاصل یا آسیب‌های ثانویه به غضروف‌ها و منیسک‌ها می‌شود (۲، ۳). براساس مطالعات پیشین، شیوع عارضه پرونیشن پا در جمعیت بزرگسال در محدوده ۲۰ تا ۲۳ درصد گزارش شده است. پای پرونیت با ایجاد چرخش داخلی بیش‌ازحد ساق پا، فشار غیرطبیعی بر رباط صلیبی قدامی وارد می‌کند و خطر پارگی اولیه و مجدد آن را افزایش می‌دهد (۴). از سوی دیگر، پارگی رباط صلیبی قدامی از جمله آسیب‌های شایع زانو به شمار می‌رود که براساس داده‌های اپیدمیولوژیک، میزان بروز سالانه آن بین ۳۰ تا ۷۰ مورد در هر صد هزار نفر در جمعیت عمومی گزارش شده است (۵). پرونیشن پا که از شایع‌ترین ناهنجاری‌های اندام تحتانی محسوب می‌شود، با کاهش ارتفاع قوس طولی داخلی کف پا و تغییر راستای بیومکانیکی مچ پا مشخص می‌شود (۶). بازسازی رباط صلیبی قدامی با استفاده از گرافت‌های مختلفی مانند همسترینگ، پاتلار و یا چهارسر ران انجام می‌پذیرد و عواملی مانند سطح فعالیت بیمار و سازگاری بیولوژیک گرافت در انتخاب روش جراحی نقش کلیدی دارند (۷)، اما خطر پارگی مجدد رباط صلیبی قدامی بازسازی‌شده امری شناخته‌شده است. مطالعات نشان می‌دهند، میزان این عود بسته به فاکتورهای مختلفی از قبیل توان بخشی ناکافی، بازگشت زودهنگام به ورزش و ضعف عضلانی، بین ۵ تا ۲۵ درصد است که عمدتاً در یک تا دو سال اول پس از عمل اتفاق می‌افتد (۸، ۹).

بروز خستگی یکی از فاکتورهای مهم فیزیولوژیک است (۱۰). به لحاظ فیزیولوژیک، خستگی عبارت است از ناتوانی عضله در تولید نیروی کافی برای استمرار یک فعالیت (۱۱). همچنین براساس نتایج مطالعات پیشین، خستگی سبب کاهش قدرت ارادی و ظرفیت عملکردی عضلات، اختلال در فعال‌سازی هم‌زمان عضلات آگونیست و آنتاگونیست و درنهایت، کاهش عملکرد و کارایی سیستم عضلانی می‌شود (۱۱-۱۳). نتایج مطالعات گذشته حاکی از آن است که بروز خستگی در افراد می‌تواند با کاهش عملکرد عصبی-عضلانی نقش مهمی در رفتار مکانیکی و فعالیت عصبی-عضلانی داشته باشد (۱۴). خستگی می‌تواند منجر به تغییرات در سینتیک اندام تحتانی شود که با افزایش خطر آسیب مرتبط است (۱۵). به نظر می‌رسد، یافتن بهترین راه برای جلوگیری از آسیب‌های ثانویه، آشنایی و کشف اطلاعاتی در خصوص فشارهای کف‌پایی قبل و بعد خستگی است. ارزیابی فشارهای کف‌پایی به عنوان یک شاخص بیومکانیکی کلیدی، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد الگوی توزیع وزن، مرکز فشار (COP) و بیومکانیک ایستادن در این بیماران ارائه دهد. اختلال در توزیع فشار کف‌پا، به‌ویژه در شرایط خستگی می‌تواند منجر به تغییر الگوی گام‌برداری<sup>۱</sup> و افزایش بارهای غیرعادی روی مفصل زانو شود که این امر به نوبه خود خطر آسیب‌های ثانویه به ساختارهای تازه بازسازی‌شده زانو و همچنین مفاصل بالاتر (مانند ران و ستون فقرات) را به شدت افزایش می‌دهد (۱۶). از آنجاکه پرونیشن پا به طور مستقیم بر الگوی فشار کف پا تأثیر می‌گذارد، کمی‌سازی این فشارها در بیماران با بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت، نه تنها برای درک پاتومکانیک آسیب، بلکه برای طراحی پروتکل‌های توان بخشی

## 1. Gait Pattern

هدفمند (مانند استفاده از کفی یا تمرینات اصلاحی) به منظور جلوگیری از شکست درمان و پارگی مجدد رباط نیز حیاتی است (۱۷)؛ بنابراین هدف این مطالعه، بررسی متغیرهای فشارهای کف پای وضعیت ایستا قبل و بعد از خستگی در افراد با سابقه بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت در بازه‌های زمانی متفاوت پس از جراحی بود.

### روش پژوهش

این پژوهش از نوع مقطعی بود که به صورت پیش‌آزمون و پس‌آزمون (قبل و بعد از خستگی) در آزمایشگاه بیومکانیک ورزشی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. برای تعیین حداقل حجم نمونه از نرم‌افزار  $G*Power3.1$  استفاده شد. این نرم‌افزار نشان داد، در سطح معناداری ۰/۰۵، اندازه اثر ۰/۷ و توان آماری برابر با ۰/۸، حداقل تعداد نمونه برابر ۱۰ نفر در هر گروه است (۱۸). جامعه آماری پژوهش حاضر شامل تمامی بیماران با بازسازی رباط صلیبی قدامی دارای پای پرونیت بود. نمونه آماری، ۴۰ بیمار (مرد) در استان اردبیل با دامنه سنی ۴۵-۱۸ سال بودند که به طور دسترس در این پژوهش شرکت کردند. آزمودنی‌ها چهار گروه بودند: (A) افراد دارای آسیب رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت که کمتر از شش ماه از بازسازی رباط آن‌ها گذشته بود؛ (B) افراد دارای آسیب رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت که در بازه زمانی ۶ تا ۱۲ ماه پس از بازسازی قرار داشتند؛ (C) افراد دارای آسیب رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت که در بازه زمانی بیش از ۱۲ ماه پس از بازسازی قرار داشتند؛ (D) گروه سالم. شاخص‌های دموگرافیک آزمودنی‌ها در جدول (۱) نمایش داده شده است. همچنین پای راست طی آزمون شوت فوتبال به‌عنوان پای برتر تمامی آزمودنی‌ها مشخص شد (۱۹). شرایط ورود به پژوهش عبارت بود از: افراد دارای آسیب رباط صلیبی قدامی که در بازه زمانی ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه پس از بازسازی قرار داشتند؛ نداشتن احساس درد در دامنه‌های حرکتی؛ توانایی دویدن بدون احساس هیچ‌گونه محدودیت؛ علاقه‌مند به شرکت در پژوهش؛ نداشتن سابقه شکستگی‌های اندام تحتانی؛ دامنه سنی بین ۱۸-۴۵ سال؛ مبتلا نبودن به سایر ناهنجاری‌های اندام تحتانی همچون پای پرنیزی، پای ضربدری و...؛ نداشتن سابقه طولانی مدت مصرف داروهای مؤثر بر سیستم عضلانی اسکلتی؛ داشتن شاخص توده بدنی ۲۵ تا ۱۸/۵ (کیلوگرم بر مجذور متر)؛ داشتن پیوند همسترینگ؛ زاویه انحراف قسمت عقبی پا بیش از ۴ درجه؛ شاخص پاسچر پا ۱۰ میلی‌متر بیشتر؛ افتادگی ناوی بیش از ۱ سانتی‌متر. شرایط خروج آزمودنی‌ها از پژوهش شامل سابقه جراحی، سابقه آسیب در اندام تحتانی بدن، تقارن نداشتن طول اندام تحتانی بیشتر از ۵ میلی‌متر و تمایل نداشتن به همکاری بود. در همه مراحل پژوهش، اخلاق پژوهشی رعایت شد و از آزمودنی‌ها رضایت‌نامه حضور در پژوهش دریافت شد. تمام بخش‌های اجرایی پژوهش حاضر طبق بیانیه هلسینکی انجام شد (۲۰). همچنین این مطالعه دارای کد اخلاق به شماره IR.UMA.REC.1404.019 و کد کارآزمایی بالینی (IRCT20220129053865N2) بود.

جدول ۱- شاخص‌های دموگرافیک و آنتروپومتری آزمودنی‌ها

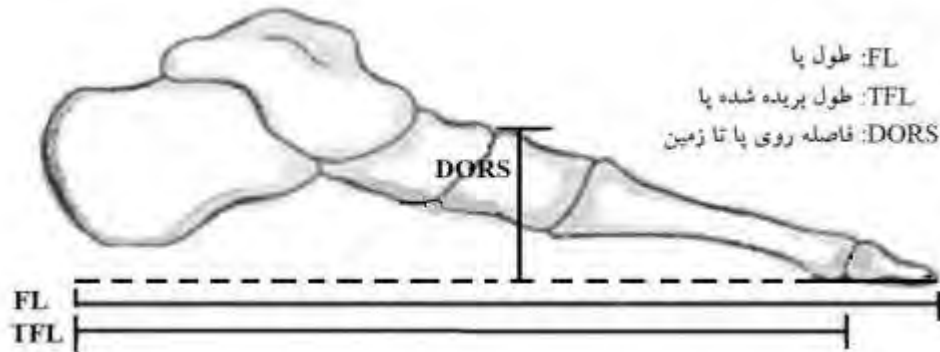
Table 1- Demographic and anthropometric indicators of the participants

سطح معناداری P-Value	گروه D Group D	گروه C Group C	گروه B Group B	گروه A Group A	مشخصات Characteristics
0.082	25.3 ± 0.4	27.1 ± 0.1	26.1 ± 0.4	24.6 ± 0.8	سن (سال) Age (year)
0.912	178.1 ± 6.1	181.1 ± 2.1	179.2 ± 5.7	180.4 ± 3.2	قد (سانتی‌متر) Height (cm)
0.360	79.2 ± 6.5	80.6 ± 4.3	81.5 ± 5.2	80.4 ± 7.4	وزن (کیلوگرم) Weight (kg)
0.547	23.10 ± 3.8	23.79 ± 0.82	24.01 ± 0.13	23.77 ± 0.64	شاخص توده بدنی (کیلوگرم/مجدور متر) Body mass index (kg/m <sup>2</sup> )
<0.001	7.2 ± 1.8	12.9 ± 1.3	13.8 ± 1.1	12.7 ± 1.9	افت ناوی (میلی‌متر) Navicular drop (mm)
<0.001	3.2 ± 0.5	6.7 ± 1.7	8.3 ± 0.5	7.2 ± 0.2	شاخص وضعیت پا Foot posture index
-	سالم Healthy	همسترینگ Hamstring	همسترینگ Hamstring	همسترینگ Hamstring	نوع گرفت (اتوگرفت) Grip type (autogrip)
1.000	25.37 ± 0.23	25.76 ± 0.22	26.03 ± 0.22	26.43 ± 0.22	طول پای راست (سانتی‌متر) Right foot length (cm)
1.000	25.27 ± 0.23	25.66 ± 0.22	25.93 ± 0.22	26.33 ± 0.22	طول پای چپ (سانتی‌متر) Left foot length (cm)
1.000	9.42 ± 0.19	9.73 ± 0.18	9.98 ± 0.18	10.23 ± 0.14	عرض پای راست (سانتی‌متر) Right foot width (cm)
1.000	9.32 ± 0.19	9.63 ± 0.18	9.88 ± 0.18	10.13 ± 0.14	عرض پای چپ (سانتی‌متر) Left foot width (cm)
1.000	0.22 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.28 ± 0.01	شاخص کف پای راست Right plantar index
1.000	0.21 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.25 ± 0.01	0.27 ± 0.01	شاخص کف پای چپ Left plantar index

A: ACLR + پای پرونیت (کمتر از ۶ ماه)، B: ACLR + پای پرونیت (۶-۱۲ ماه)، C: ACLR + پای پرونیت (بیش از ۱۲ ماه)، D: گروه سالم.  
A: ACLR + pronated foot (< 6 months), B: ACLR + pronated foot (6-12 months), C: ACLR + pronated foot (> 12 months), D: healthy control group.

در مدت جمع‌آوری داده‌ها از همه آزمودنی‌ها خواسته شد تا قبل از شرکت در آزمون فرم رضایت‌نامه حضور در آزمون را پر کنند و ۴۸ ساعت قبل از حضور در آزمون فعالیت شدید ورزشی نداشته باشند تا صرفاً تنها اثر خستگی آنی ایجاد شده در آزمایشگاه (شرایط تمرینی یکسان) بررسی شود (۲۱). به منظور بررسی شاخص ارتفاع قوس آزمودنی‌ها و تقسیم‌بندی افراد در گروه‌های کف پای طبیعی و افراد با بازسازی رباط صلیبی قدامی به همراه پای پرونیت، شرکت کنندگان از ناحیه پا معاینه شدند. برای این منظور، افراد برای غربالگری از طریق شاخص قوس طولی داخلی پا به آزمایشگاه دعوت شدند. شاخص ارتفاع

قوس براساس مطالعه ویلیامز و مک کلی به صورت نسبت ارتفاع روی پا (Dorsum)، از سطح زمین در وسط طول پا (از پشت پاشنه تا نوک انگشت شست)، تقسیم بر طول بریده شده پا (از پاشنه تا سر اولین مفصل کفپایی انگشتی) محاسبه شد (۲۲).



شکل ۱- نحوه به دست آوردن شاخص ارتفاع قوس (۲۳)

Figure 1- Method of obtaining the arch height index (23)

### روش جمع آوری داده‌ها

برای ثبت داده‌های فشارهای کفپایی از دستگاه فوت اسکن ساخت کشور بلژیک (RSScan international, Belgium, ) با 4363 sensors (0.5×0.5×0.02m)، با نرخ نمونه‌برداری ۳۰۰ هرتز استفاده شد. شرکت‌کنندگان به مدت ۵ ثانیه به صورت ثابت روی صفحه دستگاه ایستادند و داده‌های این بازه زمانی ثبت و میانگین‌گیری شد. نرم‌افزار دستگاه به صورت خودکار کف پا را در ده ناحیه آناتومیک شامل پاشنه داخلی (Heel Medial)، پاشنه خارجی (Heel Lateral)، بخش میانی کف پا (Mid Foot)، متاتارسال‌های ۱ تا ۵ (M1-M5)، انگشت شست (T1) و انگشتان دوم تا پنجم (T2-T5) می‌شد (۲۳). پژوهش حاضر در دو مرحله قبل و بعد از خستگی انجام شد. در طول پژوهش آزمودنی‌ها پشت دستگاه فوت اسکن که در کف زمین تعبیه شده بود قرار گرفتند (۲۴). پروتکل خستگی با استفاده از تردمیل پیشرفته مدل (Horizon Fitness, Omega GT, USA) بدون شیب انجام شد. در هنگام شروع آزمودنی‌ها در حالی که با سرعت ۶ کیلومتر در ساعت راه می‌رفتند پروتکل را شروع کردند و سرعت تردمیل هر ۲ دقیقه یک کیلومتر در ساعت افزایش یافت. از مقیاسی ادراکی بورگ (۶-۲۰) جهت تعیین لحظه نهایی خستگی شرکت‌کنندگان استفاده شد (۲۵). به محض اینکه شرکت‌کنندگان ادراک ۱۳ یا بالاتر را در مقیاس بورگ گزارش کردند، سرعت تردمیل با سرعت ۱۲ کیلومتر در ساعت ثابت شد تا اجازه دویدن در حالت ثابت را بدهد. در طول مرحله دویدن در حالت پایدار، امتیاز تلاش درک شده هر ۳۰ ثانیه ارزیابی می‌شد و پروتکل خستگی پس از دو دقیقه دویدن در حالت پایدار بیش از ۱۷ در مقیاس ۶ تا ۲۰ بورگ یا ۸۰٪ حداکثر ضربان قلب به پایان می‌رسید (۲۶).

### تجزیه و تحلیل آماری

نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک تأیید شد. از آزمون آنالیز واریانس دوسویه با اندازه‌گیری‌های تکراری استفاده شد. تمام تحلیل‌ها در سطح معناداری  $P < 0.05$  با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ انجام پذیرفت. برای بررسی همگنی از آزمون لون در سطح معناداری  $P \leq 0.05$  استفاده شد. در صورت مشاهده اثر متقابل یا اصلی معنادار، آزمون‌های تعقیبی با تصحیح بونفرونی برای مقایسه‌های زوجی به کار رفت. تمام تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزارهای اکسل

و SPSS نسخه ۲۳ انجام شد. همچنین اندازه اثر با رابطه زیر محاسبه شد (۲۷):

$$d = \frac{\text{اختلاف میانگین دو شرایط}}{\text{میانگین انحراف استاندارد دو شرایط}}$$

## نتایج

براساس جدول (۲)، اثر عامل زمان به لحاظ آماری برای متغیرهای میانگین فشار پای راست ( $F(1,36)=48/73$ ;  $d=0/375$ ); پای چپ ( $F(1,36)=52/14$ ;  $d=0/615$ ;  $P=0/001$ ); اوج فشار پای راست ( $F(1,36)=67/89$ ;  $d=0/887$ ;  $P=0/001$ ); پای چپ ( $F(1,36)=30/45$ ;  $d=0/279$ ;  $P=0/001$ ); سطح تماس پای راست ( $F(1,36)=44/28$ ;  $d=0/648$ ;  $P=0/001$ ); پای چپ ( $F(1,36)=41/92$ ;  $d=0/612$ ;  $P=0/001$ ); نیروی کل پای راست ( $F(1,36)=46/33$ ;  $d=0/642$ ;  $P=0/001$ ); پای چپ ( $F(1,36)=28/15$ ;  $d=0/183$ ;  $P=0/001$ ); سرعت مرکز فشار پای راست ( $F(1,36)=5/89$ ;  $d=0/025$ ;  $P=0/001$ ); پای چپ ( $F(1,36)=6/45$ ;  $d=0/033$ ;  $P=0/001$ ); فشار در منطقه پاشنه پای راست ( $F(1,36)=38/27$ ;  $d=0/473$ ;  $P=0/001$ ); پای چپ ( $F(1,36)=25/41$ ;  $d=0/211$ ;  $P=0/001$ ); فشار در منطقه پاشنه خارجی پای راست ( $F(1,36)=4/95$ ;  $d=0/003$ ;  $P=0/001$ ); پای چپ ( $F(1,36)=22/14$ ;  $d=0/150$ ;  $P=0/001$ ); فشار در کف پای راست ( $F(1,36)=18/33$ ;  $d=0/100$ ;  $P=0/001$ ); پای چپ ( $F(1,36)=24/67$ ;  $d=0/142$ ;  $P=0/001$ ) افزایش معناداری را نشان داد.

همچنین اثر عامل گروه افزایش معناداری را برای میانگین فشار، اوج فشار، سطح تماس، فشار در منطقه پاشنه پا، نیروی کل و فشار در کف پای راست و چپ در گروه بازسازی کمتر از ۶ ماه نشان داد ( $F(3,36)=12/45$ ;  $P<0/05$ ). به علاوه اثر عامل گروه افزایش معناداری را برای سرعت مرکز فشار پای راست و چپ در گروه بازسازی کمتر از ۱۲ ماه نشان داد ( $F(3,36)=9/87$ ;  $P<0/05$ ). یافته‌ها نشان داد، اثر تعاملی زمان\*گروه برای میانگین فشار کف پای راست ( $F(3,36)=8/94$ );  $F(3,36)=11/23$ ); و چپ ( $F(3,36)=7/82$ ;  $d=0/281$ ;  $P=0/007$ ) و فشار در منطقه پاشنه پای راست ( $F(3,36)=5/67$ ;  $d=0/280$ ;  $P=0/041$ ) به لحاظ آماری معنادار بود. نتایج آزمون تعقیبی نشان داد که بیشترین نرخ افزایش مربوط به گروه بازسازی کمتر از ۶ ماه در مقایسه با سایر گروه‌ها بود.

یافته‌های حاضر نشان داد که ناپایداری ناشی از جراحی بازسازی ACL، به ویژه هنگامی که با الگوی پرونیشن کف پا همراه است، منجر به تغییرات بیومکانیکی مشخصی در توزیع فشار کف پا و کنترل پاسچر می‌شود. افزایش معنادار سرعت مرکز فشار در گروه‌های با سابقه جراحی (کمتر از ۱۲ ماه)، به ویژه گروه با سابقه کمتر از ۶ ماه را می‌توان به ضعف در کنترل عصبی-عضلانی، ناپایداری مفصل و اختلال در مکانیسم‌های حس عمقی نسبت داد. این ناپایداری، بدن را وادار می‌سازد تا با انجام اصلاحات پاسچرال مکرر و سریع‌تر، تعادل خود را حفظ کند که در قالب افزایش سرعت مرکز فشار آشکار می‌شود. هم‌زمان، الگوی افزایش فشار در نواحی میانی-داخلی کف پا (از جمله پاشنه و قوس کف پا) تأییدکننده الگوی پرونیشن و بارگذاری غیرطبیعی در این نواحی است. افزون بر این، نتایج به‌وضوح نشان داد که اعمال خستگی به‌عنوان یک عامل استرس‌زا، این ناپایداری و الگوی بارگذاری غیرنرمال را تشدید می‌کند و بیماران را در معرض خطر بیشتری برای حوادث مجدد یا آسیب‌های ثانویه قرار می‌دهد.

جدول ۲- میانگین و انحراف استاندارد متغیرهای فشار ایستا شامل میانگین فشار، حداکثر فشار، سطح تماس، نیروی نرمال شده، مسیر مرکز فشار و سرعت مرکز فشار برای هر پا

Table 2 - Mean and standard deviation of static pressure variables, including mean pressure, maximum pressure, contact area, normalized force, center of pressure path, and center of pressure velocity for each foot

سطح معناداری (اندازه اثر) P-Value (Effect Size)			گروه D Group D		گروه C Group C		گروه B Group B		گروه A Group A		متغیرها Variables
اثر تعاملی زمان × گروه Time × Group interaction effect	اثر عامل گروه Effect of group factor	اثر عامل زمان Effect of time factor	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	
0.006* (0.877)	<0.001* (0.897)	<0.001* (0.375)	172.00 ± 2.46	171.72 ± 2.33	187.17 ± 2.09	176.75 ± 2.08	191.44 ± 1.95	181.00 ± 1.96	199.22 ± 2.47	181.77 ± 2.49	میانگین فشار پای راست (KPa)
0.007* (0.281)	<0.001* (0.895)	<0.001* (0.615)	170.20 ± 2.46	166.92 ± 2.33	180.37 ± 2.09	171.95 ± 2.08	180.64 ± 1.95	176.20 ± 1.96	194.37 ± 2.55	183.94 ± 2.45	میانگین فشار پای چپ (KPa)
0.181 (0.125)	<0.001* (0.924)	<0.001* (0.887)	322.37 ± 2.84	302.15 ± 2.70	327.19 ± 2.06	306.81 ± 2.05	331.59 ± 1.83	311.24 ± 1.84	344.47 ± 3.08	314.23 ± 3.02	اوج فشار پای راست (KPa)
0.147 (0.137)	<0.001* (0.923)	<0.001* (0.279)	300.57 ± 2.84	297.35 ± 2.70	322.39 ± 2.06	302.01 ± 2.05	326.79 ± 1.83	306.44 ± 1.84	339.66 ± 3.09	310.19 ± 3.08	اوج فشار پای چپ (KPa)
0.543 (0.057)	<0.001* (0.891)	<0.001* (0.648)	96.24 ± 1.64	86.08 ± 1.33	100.41 ± 1.24	90.37 ± 1.28	103.21 ± 1.59	92.99 ± 1.45	107.83 ± 1.87	90.66 ± 1.90	سطح تماس پای راست (cm <sup>2</sup> )
0.538 (0.058)	<0.001* (0.891)	<0.001* (0.612)	95.54 ± 1.64	85.48 ± 1.33	99.71 ± 1.24	89.77 ± 1.28	103.51 ± 1.59	92.39 ± 1.45	107.15 ± 1.86	92.07 ± 1.89	سطح تماس پای چپ (cm <sup>2</sup> )
0.117 (0.149)	<0.001* (0.874)	<0.001* (0.642)	411.12 ± 2.59	407.18 ± 2.59	420.71 ± 2.30	411.75 ± 2.28	435.55 ± 2.08	415.60 ± 2.08	444.44 ± 2.96	424.23 ± 3.11	نیروی کل پای راست (نیوتن)
0.089 (0.163)	<0.001* (0.875)	<0.001* (0.183)	422.42 ± 2.59	402.48 ± 2.59	427.01 ± 2.30	407.05 ± 2.28	430.85 ± 2.08	410.90 ± 2.08	439.75 ± 2.94	409.53 ± 3.11	نیروی کل پای چپ (نیوتن)
0.111 (0.213)	0.512 (0.843)	0.426 (0.200)	45.99 ± 0.60	42.99 ± 0.60	46.99 ± 0.47	43.49 ± 0.47	47.91 ± 0.52	44.41 ± 0.52	49.34 ± 0.62	45.84 ± 0.62	طول مسیر مرکز فشار پای راست (mm)
0.214 (0.059)	0.478 (0.321)	0.352 (0.157)	45.39 ± 0.60	42.09 ± 0.60	46.39 ± 0.47	43.09 ± 0.47	47.31 ± 0.52	44.01 ± 0.52	48.74 ± 0.62	45.44 ± 0.62	طول مسیر مرکز فشار پای چپ (mm)
0.489 (0.069)	<0.001* (0.839)	<0.001* (0.025)	14.54 ± 0.30	11.20 ± 0.22	14.95 ± 0.19	11.65 ± 0.19	15.25 ± 0.19	11.95 ± 0.19	15.96 ± 0.29	12.46 ± 0.30	سرعت مرکز فشار پای راست (mm/s)
0.352 (0.124)	<0.001* (0.800)	<0.001* (0.033)	14.24 ± 0.30	11.00 ± 0.22	14.65 ± 0.19	11.45 ± 0.19	15.95 ± 0.19	11.75 ± 0.19	15.66 ± 0.29	12.44 ± 0.30	سرعت مرکز فشار پای چپ (mm/s)

جدول ۲- میانگین و انحراف استاندارد متغیرهای فشار ایستا شامل میانگین فشار، حداکثر فشار، سطح تماس، نیروی نرمال شده، مسیر مرکز فشار و سرعت مرکز فشار برای هر پا

Table 2 - Mean and standard deviation of static pressure variables, including mean pressure, maximum pressure, contact area, normalized force, center of pressure path, and center of pressure velocity for each foot

سطح معناداری (اندازه اثر)			گروه D		گروه C		گروه B		گروه A		متغیرها Variables
P-Value (Effect Size)			Group D		Group C		Group B		Group A		
اثر تعاملی زمان × گروه Time × Group interaction effect	اثر عامل گروه Effect of group factor	اثر عامل زمان Effect of time factor	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	
<0.001* (0.384)	<0.001* (0.887)	<0.001* (0.473)	200.12 ± 2.54	196.85 ± 2.33	211.30 ± 2.20	201.96 ± 2.23	220.49 ± 1.93	206.14 ± 1.94	229.06 ± 2.87	214.13 ± 3.12	فشار در منطقه پاشنه پای راست (Heel) Medial, (kPa)
0.041* (0.280)	0.021* (0.885)	<0.001* (0.211)	206.32 ± 2.54	192.05 ± 2.33	211.50 ± 2.20	197.16 ± 2.23	215.69 ± 1.93	201.34 ± 1.94	224.10 ± 2.90	209.29 ± 3.17	فشار در منطقه پاشنه پای چپ (Heel) Medial, (kPa)
0.961 (0.008)	0.321 (0.884)	<0.001* (0.003)	192.26 ± 2.54	182.00 ± 2.46	195.66 ± 2.10	187.46 ± 2.10	199.81 ± 1.84	191.61 ± 1.84	200.42 ± 2.95	199.19 ± 3.02	فشار در منطقه پاشنه خارجی پای راست (Heel) Lateral, (kPa)
0.889 (0.629)	0.149 (0.387)	<0.001* (0.150)	183.46 ± 2.54	177.20 ± 2.46	190.86 ± 2.10	182.66 ± 2.10	199.01 ± 1.84	186.81 ± 1.84	200.62 ± 2.95	194.35 ± 3.07	فشار در منطقه پاشنه خارجی پای چپ (Heel) Lateral, (kPa)
0.404 (0.077)	0.005* (0.448)	<0.001* (0.100)	99.24 ± 1.64	96.24 ± 1.64	107.41 ± 1.24	100.41 ± 1.24	109.21 ± 1.59	103.21 ± 1.59	117.83 ± 1.87	107.81 ± 1.89	فشار در کف پای راست (Midfoot) (kPa)
0.135 (0.141)	0.047* (0.320)	<0.001* (0.142)	97.54 ± 1.64	93.54 ± 1.64	100.71 ± 1.24	97.71 ± 1.24	104.51 ± 1.59	100.51 ± 1.59	115.13 ± 1.87	105.10 ± 1.90	فشار در کف پای چپ (Midfoot) (kPa)

\*سطح معناداری: P<0.05؛ A: ACLR + پای پرونیته (کمتر از ۶ ماه)، B: ACLR + پای پرونیته (۶-۱۲ ماه)، C: ACLR + پای پرونیته (بیش از ۱۲ ماه)، D: گروه سالم.

P-Value: P<0.05; A: ACLR + pronated foot (< 6 months), B: ACLR + pronated foot (6-12 months), C: ACLR + pronated foot (> 12 months), D: healthy control group.

در جدول (۳)، مقادیر توزیع فشارهای کف پای نشان داده شده است. یافته‌ها حاکی از آن است که اثر عامل زمان به لحاظ آماری برای متغیرهای فشار در انگشت شست (M1)، پای راست ( $F(1,36)=62/45$ ;  $d=0/086$ ;  $P=0/001$ )، پای چپ ( $F(1,36)=5/89$ ;  $d=0/004$ ;  $P=0/004$ )، فشار در متاتارسال ۳ پای راست ( $F(1,36)=8/76$ ;  $d=0/200$ ;  $P=0/003$ )، فشار در متاتارسال ۴ پای راست ( $F(1,36)=12/34$ ;  $d=0/313$ ;  $P=0/001$ )، پای چپ ( $F(1,36)=10/89$ ;  $d=0/285$ ;  $P=0/001$ )، فشار در متاتارسال ۵ پای راست ( $F(1,36)=6/12$ ;  $d=0/100$ ;  $P=0/015$ )، پای چپ ( $F(1,36)=5/78$ ;  $d=0/21$ ;  $P=0/018$ )، فشار در انگشت شست (T1)، پای راست ( $F(1,36)=40/23$ ;  $d=0/562$ ;  $P=0/001$ )، پای چپ ( $d=0/750$ ;  $P=0/021$ )، فشار در انگشتان ۲ تا ۵ (T2-T5)، پای راست ( $d=0/751$ ;  $P=0/001$ )، پای چپ ( $F(1,36)=6/89$ ;  $d=0/314$ ;  $P=0/014$ )، افزایش معناداری را نشان داد. همچنین اثر عامل گروه افزایش معناداری را برای فشار در انگشت شست پای راست و چپ (M1)، ( $F(3,36)=9/45$ ;  $P<0/001$ ) و فشار در متاتارسال ۴ پای چپ در گروه بازسازی کمتر از ۶ ماه نشان داد ( $F(3,36)=7/23$ )، به‌علاوه اثر عامل گروه افزایش معناداری را برای فشار در انگشت شست پای چپ (T1)، ( $F(3,36)=6/78$ ;  $P<0/001$ ) و فشار در انگشتان ۲ تا ۵ (T2-T5)، پای راست و چپ در گروه بازسازی کمتر از ۱۲ ماه نشان داد ( $F(3,36)=8/12$ ;  $P<0/05$ ). یافته‌ها نشان داد، اثر تعاملی زمان\*گروه برای فشار در انگشت شست (M1)، کف پای راست ( $F(3,36)=7/45$ ;  $d=0/213$ ;  $P=0/007$ ) و چپ ( $F(3,36)=6/89$ ;  $d=0/124$ ;  $P=0/005$ ) و فشار در انگشتان ۲ تا ۵ (T2-T5)، پای راست ( $F(3,36)=8/34$ ;  $d=0/364$ ;  $P=0/009$ )، پای چپ ( $F(3,36)=9/12$ ;  $d=0/378$ ;  $P=0/004$ )، به لحاظ آماری افزایش معناداری داشت. نتایج آزمون تعقیبی نشان داد، بیشترین نرخ افزایش متغیر فشار در انگشت شست (M1)، مربوط به گروه بازسازی کمتر از ۶ ماه و بیشترین نرخ افزایش متغیر فشار در انگشتان ۲ تا ۵ (T2-T5)، مربوط به گروه بازسازی کمتر از ۱۲ ماه در مقایسه با سایر گروه‌ها بود. نتایج نشان داد که پس از جراحی ACL، الگوی توزیع فشار در کف پا به طور معناداری تغییر می‌کند. این تغییرات به صورت افزایش فشار در نواحی داخلی و میانی کف پا (مانند متاتارسال ۴ و انگشت شست) و همچنین افزایش فشار در انگشتان پا مشاهده شد. این الگو می‌تواند نشان‌دهنده استراتژی جبرانی برای افزایش پایداری بدن در پاسخ به ناپایداری مفصل پس از جراحی باشد.

جدول ۳- میانگین و انحراف استاندارد توزیع فشارهای کف پای در نواحی ده‌گانه پا

Mean and standard deviation of plantar pressure distribution in the ten-foot regions-Table 3

سطح معناداری (اندازه اثر)			گروه D		گروه C		گروه B		گروه A		متغیرها Variables
P-Value (Effect Size)			Group D		Group C		Group B		Group A		
اثر تعاملی زمان × گروه Time × Group interaction effect	اثر عامل گروه Effect of group factor	اثر عامل زمان Effect of time factor	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre- test	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre- test	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre- test	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre- test	
0.007*	<0.001*	<0.001*	130.20	125.20 ±	140.80	128.80 ±	145.60	132.60 ±	153.50	138.50 ±	فشار در انگشت شست پای راست (Metatarsal ) (1, kPa)
(0.213)	(0.860)	(0.254)	± 1.93	1.93	± 1.54	1.54	± 2.22	2.22	± 2.54	2.54	

جدول ۳- میانگین و انحراف استاندارد توزیع فشارهای کف پای در نواحی ده گانه پا

Mean and standard deviation of plantar pressure distribution in the ten-foot regions-Table 3

سطح معناداری (اندازه اثر)			گروه D		گروه C		گروه B		گروه A		متغیرها Variables
P-Value (Effect Size)			Group D		Group C		Group B		Group A		
اثر تعاملی Time × Group interaction effect	اثر عامل گروه Effect of group factor	اثر عامل زمان Effect of time factor	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre-test	
0.005* (0.124)	<0.001* (0.210)	0.004* (0.004)	130.20 ± 1.93	122.20 ± 1.93	135.80 ± 1.54	125.80 ± 1.54	140.60 ± 2.22	129.60 ± 2.22	150.50 ± 2.54	135.50 ± 2.54	فشار در انگشت شست پای چپ Metatarsal 1 (kPa) فشار در متاتارسال ۲ پای راست (kPa) فشار در متاتارسال ۲ پای چپ (kPa) فشار در متاتارسال ۳ پای راست (kPa) فشار در متاتارسال ۳ پای چپ (kPa) فشار در متاتارسال ۴ پای راست (kPa) فشار در متاتارسال ۴ پای چپ (kPa) فشار در متاتارسال ۵ پای راست (kPa)
0.341 (0.124)	0.630 (0.831)	0.245 (0.341)	120.20 ± 1.17	115.20 ± 1.01	133.42 ± 1.00	118.21 ± 1.01	137.60 ± 2.12	122.20 ± 2.14	143.50 ± 2.00	128.50 ± 2.16	
0.124 (0.004)	0.287 (0.102)	0.175 (0.436)	127.20 ± 1.17	112.20 ± 1.08	130.72 ± 1.32	115.19 ± 1.42	134.85 ± 2.76	119.76 ± 2.13	140.15 ± 2.75	125.52 ± 2.00	
0.111 (0.213)	0.930 (0.164)	0.003* (0.200)	112.02 ± 1.71	107.16 ± 1.18	125.14 ± 1.00	110.26 ± 1.23	129.18 ± 2.74	114.13 ± 2.00	135.54 ± 2.85	120.61 ± 2.10	
0.462 (0.394)	0.051 (0.103)	0.143 (0.159)	122.38 ± 1.67	107.20 ± 1.32	125.08 ± 1.91	110.08 ± 1.09	129.06 ± 2.44	114.64 ± 2.14	135.50 ± 2.45	120.50 ± 2.19	
0.123 (0.100)	0.200 (0.412)	<0.001* (0.313)	120.08 ± 1.00	105.56 ± 1.02	123.10 ± 1.18	108.37 ± 1.96	127.08 ± 2.12	112.22 ± 2.23	135.62 ± 2.08	118.35 ± 1.22	
0.256 (0.021)	<0.001* (0.486)	<0.001* (0.285)	107.46 ± 1.10	102.01 ± 1.10	115.62 ± 1.13	105.21 ± 1.10	114.52 ± 2.16	109.19 ± 2.12	130.28 ± 2.91	115.15 ± 1.00	
0.212 (0.001)	0.284 (0.461)	0.015* (0.100)	105.03 ± 1.00	100.72 ± 1.03	118.07 ± 1.42	103.02 ± 1.85	122.00 ± 2.01	107.72 ± 2.22	128.75 ± 2.00	113.63 ± 1.53	

جدول ۳- میانگین و انحراف استاندارد توزیع فشارهای کف پای در نواحی ده گانه پا

Mean and standard deviation of plantar pressure distribution in the ten-foot regions-Table 3

سطح معناداری (اندازه اثر) P-Value (Effect Size)			گروه D Group D		گروه C Group C		گروه B Group B		گروه A Group A		متغیرها Variables
اثر تعاملی Time × Group interaction effect	اثر عامل Effect of group factor	اثر عامل Effect of time factor	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre-test	پس آزمون Post- test	پیش آزمون Pre-test	
0.442 (0.136)	0.400 (0.231)	0.180* (0.021)	100.11 ± 1.28	97.00 ± 1.00	115.00 ± 1.00	100.42 ± 1.00	119.00 ± 2.77	104.12 ± 2.75	125.65 ± 2.00	110.13 ± 1.00	فشار در متاتارسال ۵ پای چپ (kPa)
0.100 (0.451)	0.421 (0.562)	0.002* (0.251)	150.25 ± 1.00	135.36 ± 1.36	153.16 ± 1.23	138.36 ± 1.64	157.70 ± 2.01	142.85 ± 2.13	163.50 ± 2.00	148.25 ± 2.63	فشار در انگشت شست پای راست ( Toe (1, kPa
0.319 (0.289)	0.021* (0.750)	<0.001* (0.631)	147.01 ± 1.59	132.37 ± 1.00	150.52 ± 1.00	135.53 ± 1.34	160.37 ± 2.47	139.64 ± 2.39	155.00 ± 1.13	145.54 ± 2.00	فشار در انگشت شست پای چپ ( Toe 1, ) (kPa
0.009* (0.364)	<0.001* (0.100)	<0.001* (0.751)	140.28 ± 1.37	130.54 ± 1.37	148.20 ± 1.37	133.03 ± 1.33	158.05 ± 2.39	137.03 ± 2.13	158.31 ± 1.00	143.08 ± 2.18	فشار در انگشتان ۲ تا ۵ پای راست ( Toe 2-5, ) (kPa
0.004* (0.378)	0.012* (0.461)	0.014* (0.314)	130.62 ± 1.42	122.27 ± 1.30	140.00 ± 1.21	130.15 ± 1.78	147.10 ± 2.01	134.00 ± 2.00	155.34 ± 1.75	140.11 ± 2.00	فشار در انگشتان ۲ تا ۵ پای چپ ( Toe 2-5, ) (kPa

\*سطح معناداری: A: P<0.05 + ACLR + پای پرونیته (کمتر از ۶ ماه)، B: ACLR + پای پرونیته (۶-۱۲ ماه)، C: ACLR + پای پرونیته (بیش از ۱۲ ماه). D: گروه سالم.

P-Value: P<0.05; A: ACLR + pronated foot (< 6 months), B: ACLR + pronated foot (6-12 months), C: ACLR + pronated foot (> 12 months), D: healthy control group.

## بحث و نتیجه گیری

هدف این مطالعه، بررسی فشارهای کف پای وضعیت ایستا قبل و بعد خستگی در افراد با سابقه بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت در بازه‌های زمانی متفاوت پس از جراحی بود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بیماران با سابقه بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت، به‌ویژه در شش ماه اول پس از جراحی، بیشترین مقادیر فشار را در نواحی پاشنه داخلی، میان‌پا و متاتارسال‌ها تجربه می‌کنند. این الگوی فشاری را می‌توان از طریق مکانیسم جبرانی عصبی-عضلانی تبیین کرد؛ به طوری که ناپایداری زانو موجب می‌شود سیستم عصبی مرکزی با افزایش سفتی در مچ پا و اتخاذ الگوی انقباضی محافظتی، پایه ثابتی برای مفصل زانو ایجاد کند. این استراتژی خود را به صورت افزایش فشار پاشنه داخلی و میانی و افزایش فشار متاتارسال نشان می‌دهد. وقوع خستگی عضلانی این چرخه معیوب را تشدید می‌کند؛ چراکه توانایی سیستم برای حفظ این الگوهای جبرانی ناکارآمد کاهش یافته و در نتیجه فشارهای مذکور به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این یافته بر لزوم تمرینات توان‌بخشی هدفمند که بر کنترل عصبی-عضلانی پایدارکننده‌های مچ پا و بازآموزی الگوی توزیع فشار تمرکز دارند، به‌ویژه در یک سال اول پس از جراحی، تأکید می‌کند.

مکانیسم اصلی این تغییرات، اختلال در زنجیره بیومکانیکی کینتیک است. پس از ACLR، با وجود بازسازی آناتومیک رباط، سیستم عصبی-عضلانی زانو به طور کامل به حالت قبل از آسیب باز نمی‌گردد. این موضوع شامل کاهش قدرت عضلات چهارسر ران، تأخیر در فعال‌سازی عضلات، و تغییر در کنترل حس عمقی می‌شود (۱). این تغییرات در زانو، به‌عنوان ناپایداری بالا، باعث ایجاد استراتژی‌های جبرانی در سایر بخش‌های اندام تحتانی می‌شود. سیستم عصبی ممکن است با تغییر در زاویه مفصلی زانو و مچ پا، تلاش کند تا تعادل و پایداری را حفظ کند. این تغییرات از طریق انتقال نیرو به سمت پایین، بر عملکرد مچ پا و کف پا تأثیر می‌گذارند (۲۸). الگوی مشاهده‌شده افزایش فشار در نواحی پاشنه داخلی، میان‌پا و متاتارسال‌ها را می‌توان با یک زنجیره بیومکانیکی معیوب تبیین کرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب ناپایداری عملکردی زانو پس از بازسازی ACL، یک زنجیره بیومکانیکی معیوبی را ایجاد می‌کند که در الگوی فشار کف پا ظاهر می‌شود (۲۹). مکانیسم این پدیده از نقص پروگزیمال در کنترل عصبی-عضلانی زانو آغاز شده و با اتخاذ استراتژی جبرانی حفاظتی شامل افزایش سفتی مفصل مچ پا و قفل شدن مفصل سابتالار در وضعیت پرونیت همراه می‌شود. این سازوکار منجر به افت قوس طولی داخلی و افزایش بار غیرفیزیولوژیک بر پاشنه داخلی و میانی می‌شود. هم‌زمان، سیستم عصبی مرکزی با فعال کردن الگوی جبرانی ثانویه (عمل چنگ زدن انگشتان) سعی در افزایش پایداری می‌کند که افزایش فشار متاتارسال‌ها را به دنبال دارد. وقوع خستگی عضلانی به‌عنوان استرس فیزیولوژیک، این چرخه معیوب را تشدید می‌کند و با کاهش کارایی مکانیسم‌های جبرانی، منجر به تشدید الگوی فشار غیرعادی می‌شود (۳۰). این یافته‌ها بر اهمیت تمرینات توان‌بخشی یکپارچه که بر بازآموزی کنترل عصبی-عضلانی در کل زنجیره جنبشی و تصحیح الگوهای توزیع فشار متمرکز هستند، تأکید می‌کنند.

خستگی عضلانی به‌عنوان فاکتوری تشدیدکننده، این چرخه را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۱). خستگی باعث کاهش ظرفیت عضلات برای تولید نیرو، تأخیر در واکنش‌های عصبی-عضلانی و اختلال در فعال‌سازی هماهنگ عضلات آگونیست و آنتاگونیست می‌شود (۱۱). در شرایط خستگی، سیستم عصبی-عضلانی کمترین ظرفیت را برای جبران نقص‌های موجود دارد (۱۱). یافته‌های مطالعه حاضر که نشان می‌دهد بیشترین افزایش فشار پس از خستگی در گروه‌های A و B رخ داده است، دقیقاً این مفهوم را تأیید می‌کند. در این مراحل اولیه توان‌بخشی، سیستم عصبی-عضلانی هنوز به طور کامل بازآموزی نمی‌شود و در برابر تحریکات تحمیلی مانند خستگی، بسیار آسیب‌پذیر است. افزایش فشار در متاتارسال‌ها (به‌ویژه M1 و

(T2-T5) پس از خستگی، نشان دهنده جابه‌جایی مرکز فشار به سمت جلو و افزایش بار بر قسمت قدامی کف پا است که احتمالاً برای جبران ناتوانی عضلات پشتی ساق در کنترل پرونیشن اضافی انجام می‌شود. یافته‌های این مطالعه با پژوهش‌های متعددی که بر تغییرات بیومکانیکی پس از ACLR تمرکز داشته‌اند، همسوست. همچنین مطالعه جعفرنژادگرو و همکاران نشان داد که ترکیب ACLR و پای پرونیته منجر به ایجاد تغییرات معناداری در فشار کف پا و فعالیت عضلانی طی دویدن می‌شود که این امر از اهمیت هم‌زمانی ناهنجاری‌های اندام تحتانی با آسیب رباطی حکایت دارد (۲). در مطالعه حاضر با تمرکز بر افراد دارای پای پرونیته و ارزیابی در شرایط خستگی، جنبه‌هایی از عملکرد بررسی شد که در بسیاری از مطالعات قبلی نادیده گرفته شد؛ بنابراین ممکن است افرادی که در شرایط ایستا و بدون خستگی عملکرد قابل قبولی دارند، در شرایط دینامیک یا خستگی دچار نقص عملکردی شوند؛ با این حال، افزایش فشار کف پا در شرایط ایستا در افراد دارای ACLR و پای پرونیته، به‌ویژه در شرایط خستگی، می‌تواند ناشی از چندین دلیل احتمالی باشد: ۱- کاهش کنترل عصبی-عضلانی زانو: پس از ACLR، به‌رغم بهبود قدرت، کنترل عصبی-عضلانی زانو ممکن است به طور کامل بازیابی نشود (۱۳)؛ ۲- تغییر در الگوی فعال‌سازی عضلات: مطالعات نشان داده‌اند که پس از ACLR، الگوی فعال‌سازی عضلات چهارسرران و همسترینگ تغییر می‌کند که این امر می‌تواند بر تعادل و توزیع بار تأثیر بگذارد (۱۲)؛ ۳- ناتوانی در جبران خستگی: در شرایط خستگی، سیستم عصبی-عضلانی باید بیشترین تلاش را برای حفظ تعادل و کنترل حرکت انجام دهد. افراد با سابقه آسیب رباطی، به‌ویژه در مراحل اولیه توان‌بخشی، ممکن است ظرفیت کمتری برای جبران این تغییرات داشته باشند (۲۶)؛ ۴- تأثیر ترکیبی پرونیته پا: پرونیته پا به طور مستقیم بر توزیع فشار کف پا تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش فشار بر نواحی داخلی کف پا می‌شود. این تأثیر در حضور ناپایداری زانو تشدید می‌شود. با توجه به ذکر دلایل احتمالی افزایش فشارهای کف پای در بازه زمانی کمتر از ۱۲ ماه پس از جراحی، توجه به برنامه توان‌بخشی جامع و ابزارهای حمایتی همچون کفی‌های آنتی‌پرونیته، یکی از مهم‌ترین یافته‌های مطالعه حاضر است.

مهم‌ترین محدودیت طراحی این مطالعه، نبود گروه‌های جداگانه برای افراد ACLR و پای پرونیته است. این امر مانع از تعیین سهم مستقل و دقیق هر یک از این عوامل در الگوی فشار کف پا می‌شود. یافته‌های حاضر عمدتاً اثر ترکیبی و تعاملی این دو ناهنجاری را نشان می‌دهند. به‌علاوه نوع و میزان توان‌بخشی ممکن است به‌عنوان یک متغیر گمراه‌کننده بر نتایج تأثیرگذار باشد. در طراحی مطالعه حاضر، با توجه به چالش‌های عملی در دسترسی به نمونه‌های همگن که دقیقاً تحت یک پروتکل توان‌بخشی ثابت و مستند قرار گرفته باشند، کنترل این متغیر میسر نبود. این موضوع به‌عنوان یک محدودیت در مطالعه حاضر پذیرفته می‌شود. به نظر می‌رسد، افراد دارای بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای پرونیته، به‌ویژه در ۱۲ ماه اول پس از جراحی، در شرایط خستگی دچار افزایش درخور توجهی در فشارهای کف پای و ناپایداری پاسچر می‌شوند. این نتایج بر لزوم غربالگری ناهنجاری‌های بیومکانیکی کف پا در بیماران کاندیدای جراحی ACL و همچنین ادغام تمرینات مقاومتی در برابر خستگی و راهبردهای اصلاحی (مانند استفاده از کفی‌های طبی) در پروتکل‌های توان‌بخشی استاندارد، به‌ویژه در مراحل اولیه پس از عمل، تأکید می‌کند. اجرای این راهکارها می‌تواند به توزیع مناسب‌تر بار، بهبود پایداری و پیشگیری از آسیب‌های مجدد در این جمعیت بیماری منجر شود.

### پیشنهاد‌های کاربردی

با استناد به یافته‌های مطالعه حاضر و مرور پژوهش‌های پیشین که افزایش فشار کف پا (به‌ویژه در ناحیه پاشنه داخلی و میان‌پا) و تأثیر تشدیدکننده پرونیشن پا و خستگی را در بازه زمانی کمتر از ۱۲ ماه پس از جراحی ACL نشان می‌دهند،

پیشنهاد می‌شود پروتکل‌های توان‌بخشی علاوه بر تقویت عضلات چهارسر و همسترینگ، شامل تمرینات تخصصی برای بهبود کنترل عصبی-عضلانی مچ‌پا، شبیه‌سازی شرایط خستگی و استفاده از کفی‌های اصلاحی آنتی‌پرونیت باشند تا از توزیع نامناسب بار، ناپایداری و آسیب‌های ثانویه جلوگیری شود. همچنین به پژوهشگران آینده پیشنهاد می‌شود برای تعیین سهم مستقل و تعاملی هریک از عوامل آسیب ACL و پرونیشن پا، مطالعاتی با طراحی چهار گروه (گروه سالم، تنها ACLR، تنها پای پرونیت، و ترکیب ACLR + پای پرونیت) انجام دهند

### چشم‌اندازهای پژوهشی

با توجه به خلأ پژوهشی موجود در بررسی تأثیر هم‌زمان پرونیشن پا و خستگی بر توزیع فشار کف‌پا در بازه‌های زمانی مختلف پس از جراحی ACL و همچنین با در نظر گرفتن یافته‌های نوآورانه این مطالعه، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی به بررسی آثار مداخلات توان‌بخشی در بلندمدت، تحلیل تفاوت‌های جنسیتی، مقایسه تکنیک‌های جراحی و برنامه‌های توان‌بخشی مختلف و نیز مطالعه سایر شاخص‌های بیومکانیکی و عصبی-عضلانی (مانند فعالیت الکترومایوگرافی عضلات در شرایط خستگی) با حجم نمونه بیشتر بپردازند.

### پیام مقاله

این مطالعه نشان می‌دهد که افراد با سابقه بازسازی رباط صلیبی قدامی و پای پرونیت، به‌ویژه در ۱۲ ماه نخست پس از جراحی (و به طور ویژه در ۶ ماه اول)، در شرایط خستگی عضلانی، افزایش معناداری را در فشار کف‌پا تجربه می‌کنند. این افزایش فشار به‌ویژه در نواحی پاشنه داخلی، میانی‌پا و متاتارسال‌ها (به طور خاص متاتارسال اول و انگشتان دوم تا پنجم) مشهود است و نشان‌دهنده ناپایداری وضعیتی و توزیع نامناسب بار در کف‌پا است. یافته‌ها حاکی از آن است که خستگی، نقایص عصبی-عضلانی و الگوهای جبرانی ناکارآمد را تشدید می‌کند و دوره بحرانی آسیب‌پذیری را در ماه‌های اولیه پس از جراحی مشخص می‌کند؛ در نتیجه، طراحی پروتکل‌های توان‌بخشی هدفمند که بر بهبود کنترل عصبی-عضلانی، افزایش مقاومت در برابر خستگی و اصلاح الگوی توزیع فشار کف‌پا تمرکز دارند، به‌ویژه در مراحل اولیه بهبودی، ضروری به نظر می‌رسد.

### ملاحظات اخلاقی

این مطالعه دارای کد اخلاق به شماره IR.UMA.REC.1404.019 و کد کارآزمایی بالینی (IRCT20220129053865N2) بود.

### مشارکت نویسندگان

مفهوم‌سازی: امیرعلی جعفرنژادگرو

گردآوری داده‌ها: ابراهیم پیری

تجزیه و تحلیل داده‌ها: ابراهیم پیری

دست‌نوشته: ابراهیم پیری

نقد و بررسی: امیرعلی جعفرنژادگرو و ابراهیم پیری

مسئول تأمین مالی: امیرعلی جعفرنژادگرو

نقد و بررسی ادبیات: ماهرخ دهقانی و افسانه انتشاری مقدم

مدیر پروژه: امیرعلی جعفرنژادگرو

### تعارض منافع

در مطالعه حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی بین نویسندگان گزارش نشده است.

### تشکر و قدردانی

از تمامی آزمودنی‌ها در این مطالعه تشکر و قدردانی فراوان می‌کنیم.

### منابع

1. Kember LS, Riehm CD, Schille A, Slaton JA, Oliver JL, Myer GD, et al. Kinetics during the tuck jump assessment and biomechanical deficits in female athletes 12 Months after ACLR surgery. *The American Journal of Sports Medicine*. 2025;53(2):333-42. <https://doi.org/10.1177/03635465241308579>
2. Jafarnezhadgero AA, Alizadeh R, Mirzanag EF, Dionisio VC. Could the anterior cruciate ligament reconstruction and pronated feet affect the plantar pressure variables and muscular activity during running? A comparative study. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 2024;40:986-91. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2024.07.020>
3. Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *British Journal of Sports Medicine*. 2016;50(13):804-8. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096031>
4. 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;14(9):e0223219. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223219>
5. Dolk DC, Hedevid H, Stigson H, Wretenberg P, Kvist J, Stålman A. Nationwide incidence of anterior cruciate ligament reconstruction in higher-level athletes in Sweden: a cohort study from the Swedish National Knee Ligament Registry linked to six sports organisations. *British Journal of Sports Medicine*. 2025;59(7):470-9. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108343>
6. koreili z, Fatahi A, Azarbayjani MA, Sharifnezhad A. Comparison of Static Balance performance and plantar selected parameters in dominant and non-dominant leg Active Female Adolescents with ankle pronation. *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2021; 12(2):306-19. <https://doi.org/10.32598/SJRM.12.2.7>
7. Piri E, Jafarnezhadgero A, Stålman A. Advantages and Disadvantages of Different Surgical Grafts in Anterior Cruciate Ligament Injuries: A Letter to the Editor. *Journal of Sport Biomechanics*. 2024;10(3):254-60. <https://doi.org/10.61186/JSportBiomech.10.3.254>
8. Cristiani R, Forssblad M, Edman G, Eriksson K, Stålman A. Age, time from injury to surgery and hop performance after primary ACLR affect the risk of contralateral ACLR. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2022;30(5):1828-35. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06759-6>
9. Pfeiffer TR, Burnham JM, Hughes JD, Kanakamedala AC, Herbst E, Popchak A, et al. An increased lateral femoral condyle ratio is a risk factor for anterior cruciate ligament injury. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2018;100(10):857-64. <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.01011>
10. Naderi A, Baloochi R, Rostami KD, Fourchet F, Degens H. Obesity and foot muscle strength are associated with high dynamic plantar pressure during running. *The Foot*. 2020;44:101683. <https://doi.org/10.1016/j.foot.2020.101683>
11. Behrens M, Gube M, Chaabene H, Prieske O, Zenon A, Broscheid K-C, et al. Fatigue and human performance: an updated framework. *Sports Medicine*. 2023;53(1):7-31. DOI: 10.1007/s40279-022-01748-2

12. Cifrek M, Medved V, Tonković S, Ostojić S. Surface EMG based muscle fatigue evaluation in biomechanics. *Clinical Biomechanics*. 2009;24(4):327-40. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2009.01.010>
13. Liu Z, Yang C, Yu J, Zhao X, Wu J, Zhang Y, et al. The effect of muscles fatigue on the knee's kinetics and kinematics characteristics. *Sustainability*. 2023;15(4):3029. <https://doi.org/10.3390/su15043029>
14. Jones D. Muscle fatigue due to changes beyond the neuromuscular junction. *Human Muscle Fatigue: Physiological Mechanisms*. 1981;1981:178-96. <https://doi.org/10.1002/9780470715420.ch11>
15. Gerlach KE, White SC, Burton HW, Dorn JM, Leddy JJ, Horvath PJ. Kinetic changes with fatigue and relationship to injury in female runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2005;37(4):657-63. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000158994.29358.71>
16. Schilling J, Gragston B, Dunlavy B, Ko J. The effect of a short foot eccentric endurance exercise on foot center of pressure: a pilot study. *Exercise Science*. 2021;30(3):303-8. <https://doi.org/10.15857/ksep.2021.30.3.303>
17. Barton CJ, Bonanno D, Carr J, Neal B, Malliaras P, Franklyn-Miller A, et al. Running retraining to treat lower limb injuries: a mixed-methods study of current evidence synthesised with expert opinion. *British Journal of Sports Medicine*. 2016;50(9):513-26. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095278>
18. Yip CHT, Chiu TTW, Poon ATK. The relationship between head posture and severity and disability of patients with neck pain. *Manual Therapy*. 2008;13(2):148-54. <https://doi.org/10.1016/j.math.2006.11.002>
19. Teixeira LA, de Oliveira DL, Romano RG, Correa SC. Leg preference and interlateral asymmetry of balance stability in soccer players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 2011;82(1):21-7. <https://doi.org/10.1080/02701367.2011.10599718>
20. Association WM. World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *Bulletin of the World Health Organization*. 2001;79(4):373.
21. McWalter EJ, Cibere J, MacIntyre NJ, Nicolaou S, Schulzer M, Wilson DR. Relationship between varus-valgus alignment and patellar kinematics in individuals with knee osteoarthritis. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2007;89(12):2723-31. <https://doi.org/10.2106/JBJS.F.01016>
22. Williams DS, McClay IS. Measurements used to characterize the foot and the medial longitudinal arch: reliability and validity. *Physical Therapy*. 2000;80(9):864-71.
23. Farzaneh Herabad N, Anbarian M, Rahbar S. The Effects of Foot Structures on Plantar Pressure Characteristics in Overweight Girls Aged 10-13 Years During Walking. *Journal of Paramedical Sciences & Rehabilitation*. 2024;12(4):14-25. <https://doi.org/10.22038/JPSR.2024.69912.2458>
24. Piri E, Barghamadi M, Farzizade R. Comparison of the Effects of Immediate and Long-Term Water and Thera band Exercises on Loading Rate, Impulse, and Free Moment in People with Pronate Foot during Walking: A Clinical Trial. *Journal of Gorgan University of Medical Sciences*. 2022;24(4):10-9.
25. Borg G. Borg's perceived exertion and pain scales. Champaign: Human Kinetics; 1998.
26. Koblbauer IF, van Schooten KS, Verhagen EA, van Dieën JH. Kinematic changes during running-induced fatigue and relations with core endurance in novice runners. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2014;17(4):419-24. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.05.013>
27. Cohen J. editor. Quantitative methods in psychology: a power primer. *Psychological Bulletin*; 1992: Citeseer.
28. Ardern CL, Webster KE, Taylor NF, Feller JA. Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a systematic review and meta-analysis of the state of play. *British Journal of Sports Medicine*. 2011;45(7):596-606. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2010.076364>
29. Powers CM. The influence of abnormal hip mechanics on knee injury: a biomechanical perspective. *Journal of orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 2010;40(2):42-51. <https://doi.org/10.2519/jospt.2010.3337>
30. Gribble PA, Hertel J, Denegar CR, Buckley WE. The effects of fatigue and chronic ankle instability on dynamic postural control. *Journal of Athletic Training*. 2004;39(4):321.