Journal of
Sport Biomechanics

Spring 2026. Vol 12. Issue 1

Review Paper

Running Mechanics in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction 6–12 Months After Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis

Ebrahim Piri[1], *AmirAli Jafarnezhadgero[1], Mahrokh Dehghani[1], Farhad Rezazadeh[1], Afsaneh Enteshari-Moghaddam[2]

1. Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. Department of Internal Medicine, Faculty of Medicine, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran. Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation: Piri E, Jafarnezhadgero AA, Dehghani M, Rezazadeh F, Enteshari-Moghaddam A. Running Mechanics in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction 6–12 Months After Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis. Journal of Sport Biomechanics.2026;12(1):52-69. https://doi.org/10.61882/JSportBiomech.12.1.52

https://doi.org/10.61882/JSportBiomech.12.1.52

ABSTRACT

Objective This systematic review and meta-analysis aimed to examine the biomechanical characteristics of running in individuals who had undergone anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) at various postoperative time intervals.

Methods A systematic search was performed in PubMed, Google Scholar, Scopus, SID, Magiran, ISC, ScienceDirect, JCR, and Web of Science from May 2010 to August 2025. Eligible studies included original research and clinical trials involving young adults (18–45 years) with a history of ACLR, no concomitant injuries, and full-text availability. After screening, 10 studies met the inclusion criteria. The methodological quality of the included articles was assessed using the Downs and Black checklist. Data on loading asymmetry, knee kinematics and kinetics, and muscle activation were synthesized using meta-analytic procedures.

Results The results indicated significant biomechanical asymmetries in individuals with ACLR up to 18 months after surgery, including a 15–20% reduction in loading on the reconstructed limb, decreased knee extension moment (g = 0.80), greater knee flexion angle at initial contact, and reduced vertical ground reaction force. These deficits persisted even among athletes who had returned to sport, suggesting a sustained neuromuscular protective strategy.

Conclusion Despite extended recovery periods, individuals with ACLR continue to exhibit persistent biomechanical deficits during running. These findings underscore the need for precise, biomechanically informed rehabilitation programs prior to return to sport.

Article Info:

Received: 20 August 2025
Accepted: 25 October 2025
Available Online: 25 October 2025

Keywords:

Anterior cruciate ligament reconstruction, Running, Biomechanics, Asymmetry, Meta-analysis

Corresponding Author:
AmirAli Jafarnezhadgero
Address: Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
E-mail: amiralijafarnezhad@gmail.com

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
© 2026 The Author(s). Journal of Sport Biomechanics published by Islamic Azad University, Hamedan Branch.

Extended Abstract

1. Introduction

Running is a fundamental component of rehabilitation following knee injuries, particularly after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR)—a common procedure among athletes that often results in long-term biomechanical alterations (1,2). Although many individuals return to running, persistent biomechanical deficits frequently remain, including asymmetrical limb loading, reduced knee extension moments, greater knee flexion at initial contact, and altered muscle activation patterns after ACLR (3,4). These compensatory adaptations may contribute to an increased risk of re-injury or early onset of osteoarthritis, even in the absence of pain or joint instability (7,8).

Emerging evidence suggests that only a small proportion of patients fully restore pre-injury biomechanical function, with the magnitude and nature of deficits varying across recovery stages (e.g., <6, 6–12, and >12 months post-surgery), indicating incomplete functional recovery (5). Previous meta-analyses have largely focused on isolated time points or on tasks such as jumping and landing, thereby lacking a comprehensive longitudinal assessment of running mechanics (6,7). Therefore, a systematic review and meta-analysis are warranted to synthesize existing evidence on temporal changes in running kinematics and kinetics after ACLR and to inform more targeted rehabilitation strategies and return-to-sport criteria (8).

2. Methods

This study followed a systematic review and meta-analysis design. Articles published in English and Persian between May 2010 and August 2025 were identified through comprehensive searches in specialized databases, including PubMed, Web of Science (WOS), Scopus, SID, Magiran, ISC, ScienceDirect, JCR, and Google Scholar. Only original clinical trials were included. For each database, an appropriate search strategy was developed using both Medical Subject Headings (MeSH) and free-text terms. The primary search keywords included anterior cruciate ligament reconstruction, running, ground reaction force, and electromyography (EMG). A total of 754 records were initially retrieved, of which 26 studies met the inclusion and exclusion criteria and were selected for analysis. For the quantitative synthesis, Hedges' *g* effect size (the standardized mean difference between two groups, weighted by pooled standard deviation) was calculated. Between-study heterogeneity was evaluated using the I^2 statistic, defined as $I^2 = ((Q - df)/Q) \times 100\%$, where Q represents the chi-square statistic and df the degrees of freedom. A random-effects model was applied when I^2 exceeded 50%, whereas a fixed-effects model was used for values below 50%. The I^2 index reflects the percentage of total variation across studies due to heterogeneity rather than chance. Publication bias was assessed using appropriate statistical tests (e.g., funnel plot symmetry and Egger's test). All statistical analyses were performed using RevMan software (Review Manager, Version 5.1; Cochrane Collaboration).

3. Results

In the present study, 26 articles were identified through keyword searches, and 10 met the eligibility criteria for inclusion and were included in the analysis. These studies encompass various designs, including clinical trials, cross-sectional studies, cohort studies, and systematic reviews, providing valuable data on loading asymmetry, knee kinematics and kinetics, muscle activity, and the influence of time post-surgery (1,3,4,5,6,7,10,11,12). The study populations primarily consist of young individuals, with a mean age between 23 and 27 years, who have returned to physical activity at least 6 months after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR), indicating they are in the return-to-activity phase (1,3,4,5,7). Most studies included only participants without concomitant joint or soft tissue injuries to minimize confounding factors (1,3,4,5,6,7,10,11,12). In terms of sex distribution, several studies included male-only participants (1,4,5), while others included a mixed-sex sample (3), which may reflect the higher incidence of ACL injury in males or a focus on male athletes.

The most commonly used graft type was the hamstring tendon autograft; however, Gohil et al. (4) utilized a bone-patellar tendon-bone (BTB) graft. This difference in graft type may influence loading patterns and muscle function, as BTB grafts are frequently associated with greater quadriceps weakness and anterior

knee pain (4). Running speed varied across studies: some used a standardized speed of 3 m/s (4,5,10,12), while others allowed self-selected speeds, which better reflect real-world athletic conditions but reduce inter-subject comparability (3,7). The time since surgery ranged from 6 to 18 months (1,3,4,5,7,10,11,12). Notably, studies such as Fu et al. (1) and Zhou et al. (7) demonstrate that even at 6 months post-surgery, loading on the injured limb remains significantly lower than on the uninjured limb (Hedges' g = 0.78), reflecting a persistent neuromuscular protective strategy. Although some improvement is observed over time (12–18 months), biomechanical asymmetries persist in variables such as knee extension moment (4), vertical ground reaction force (GRF) (5), and EMG activity of the hamstring muscles (10). Delayed hamstring activation in the operated limb, as reported by Saki et al. (10), is a particular concern, given the critical role of the hamstrings in resisting anterior tibial shear forces and stabilizing the reconstructed knee. Systematic reviews by Zhou et al. (7) and Bafrouei et al. (6) indicate that biomechanical asymmetries can persist up to 24 months post-surgery, and full symmetry is not achieved in the majority of patients. However, Bafrouei et al. (6) concluded that core stability exercises can positively influence biomechanical patterns, underscoring the importance of comprehensive rehabilitation that extends beyond localized knee strengthening. Furthermore, studies such as Whiteley et al. (12) and Van Cant et al. (11) reveal that even among elite athletes, asymmetries in knee internal rotation during cutting maneuvers and suboptimal movement strategies remain present, which may increase the risk of reinjury. These findings collectively emphasize that return to sport should not be determined solely by time elapsed or the absence of pain, but must be supported by objective, criterion-based biomechanical assessments (11,12). The methodological quality of the included articles was assessed using the Downs and Black checklist, with results presented in Table 1. The mean overall quality score was 65.48%. The lowest quality article scored 58.06%, while the highest scored 70.96%. The percentage quality score was calculated using the following formula:

$$\text{Article quality (\%)} = (\text{Total score} / 31) \times 100$$

4. Discussion

The findings of this systematic review and meta-analysis clearly demonstrate that individuals who have undergone anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) continue to exhibit marked biomechanical deficits during running, persisting up to 18 months post-surgery. These impairments include loading asymmetry, reduced knee extension torque, greater knee flexion angle at initial contact, and decreased vertical ground reaction force (vGRF) on the reconstructed limb (1,5). Such alterations reflect a persistent neuromuscular protective strategy that may elevate the risk of reinjury, early-onset osteoarthritis, and incomplete return to sport despite apparent functional recovery (1,5). A major contributing factor to these deficits is quadriceps weakness, primarily resulting from neurogenic atrophy due to impaired proprioceptive and sensorimotor function following ACL injury (13). This weakness directly diminishes knee extension torque during the stance phase (Forest Plot 3), reducing propulsive force and increasing mechanical load on secondary knee structures such as the meniscus and articular cartilage, thereby accelerating joint degeneration (14).

Another important mechanism involves altered loading strategies. Individuals with ACLR consistently offload the reconstructed limb, displaying approximately 15–20% lower loading compared to the contralateral side (Forest Plots 1 and 4). Although this asymmetry may represent a compensatory strategy to protect the graft, it can lead to long-term maladaptation and increased injury risk in both limbs (15). Similarly, increased knee flexion angle at initial contact (Forest Plot 2) serves as a compensatory adjustment to minimize shear and bending moments but may concurrently increase patellofemoral stress, predisposing individuals to anterior knee pain and early degenerative changes (16). In addition, aberrant muscle activation patterns—such as delayed hamstring activation relative to the quadriceps—can disrupt normal agonist–antagonist coordination and compromise dynamic knee stability, heightening the risk of graft re-rupture or secondary injuries (17). These findings align with Zhou et al. (2024), who reported persistent kinetic and kinematic asymmetries up to two years post-ACLR (18), and Gohil et al. (2025), who confirmed significant knee extension torque deficits in patients with bone–patellar tendon–bone grafts (4). Such evidence underscores the necessity for comprehensive biomechanical assessment before clearance for return to sport, as many athletes continue to display suboptimal movement patterns despite meeting clinical criteria (19). Nonetheless, some studies, such as Marques et al. (2021), reported near-normal biomechanics by 12 months post-surgery, likely reflecting higher neuromuscular adaptability in elite athletes or the effects of intensive, individualized rehabilitation (20).

Table 1. Evaluation of the quality of the reviewed articles by Downs and Black questionnaire.

	Fu tc et al. (1)	Shahbazi m et al. (3)	Gohil s et al. (4)	Marques lr et al. (5)	Zhou j et al. (7)	Bafrouei mk et al. (6)	Saki m et al. (10)	Van cingel reh et al. (11)	Yau tpl (2)	Whiteley r et al. (12)
Is the hypothesis/aim/objective of the study clearly described?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Are the main outcomes to be measured clearly described in the Introduction or Methods Section?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Are the characteristics of the patients included in the study clearly described?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Are the interventions of interest clearly described?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Are the distributions of principal confounders in each group of subjects to be compared clearly described?	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0
Are the main findings of the study clearly described?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Does the study provide estimates of the random variability in the data for the main outcomes?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Have all important adverse events that may be a consequence of the intervention been reported?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Have the characteristics of patients lost to follow-up been described?	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Have actual probability values been reported?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Were the subjects asked to participate in the study representative of the entire population from which they were recruited?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Were those subjects who were prepared to participate representative of the entire population from which they were recruited?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Were the staff, places, and facilities where the patients were treated, representative of the treatment the majority of patients receive?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Was an attempt made to blind study subjects to the intervention they have received ?	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Was an attempt made to blind those measuring the main outcomes of the intervention?	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
If any of the results of the study were based on “data dredging”, was this made clear?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
In trials and cohort studies, do the analyses adjust for different lengths of follow-up of patients, or in case-control studies, is the time period between the intervention and outcome the same for cases and controls ?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Were the statistical tests used to assess the main outcomes appropriate?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Was compliance with the intervention/s reliable?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Were the main outcome measures used accurate?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Were the patients in different intervention	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

groups or were the cases and controls recruited from the same population?										
Were study subjects in different intervention groups or were the cases and controls recruited over the same period of time?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Were study subjects randomised to intervention groups?	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Was the randomised intervention assignment concealed from both patients and health care staff until recruitment was complete and irrevocable?	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
Was there adequate adjustment for confounding in the analyses from which the main findings were drawn?	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
Were losses of patients to follow-up taken into account?	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Did the study have sufficient power to detect a clinically important effect where the probability value for a difference being due to chance is less than 5%?	3	4	4	3	4	4	4	3	4	3
total score	18	21	21	19	21	20	21	20	20	22
quality of articles (percent)	58.06	67.74	67.74	61.29	67.74	64.51	67.74	64.51	64.51	70.96

Moreover, Bafrouei et al. (2025) demonstrated that core stability and integrated neuromuscular training can accelerate biomechanical recovery, suggesting that these deficits are modifiable through targeted interventions (6). Therefore, post-ACLR rehabilitation should extend beyond isolated knee strengthening to incorporate dynamic balance, neuromuscular control, plyometric training, and sport-specific movement retraining. Pre–return-to-sport biomechanical evaluations using motion analysis, force platforms, and electromyography are essential to ensure optimal recovery and to prevent long-term complications.
Despite extended recovery periods, individuals with a history of ACL reconstruction continue to exhibit persistent biomechanical deficits during running. These findings emphasize the importance of implementing precise, targeted, and biomechanics-based rehabilitation programs prior to return to sport to ensure safe and complete functional recovery.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

There were no ethical considerations to be considered in this research.

Funding

This research did not receive any grant from funding agencies in the public, commercial, or non-profit sectors.

Authors' contributions

All authors equally contributed to preparing article.

Conflicts of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest associated with this article.

مقاله مروری

بررسی مکانیک دویدن در افراد دارای بازسازی رباط صلیبی قدامی در بازه‌های ۱۲–۶ ماه پس از جراحی: یک مطالعه مروری سیستماتیک و متاآنالیز

ابراهیم پیری[۱]، *امیرعلی جعفرنژادگرو[۱]، ماهرخ دهقانی[۱]، فرهاد رضازاده[۱]، افسانه انتشاری‌مقدم[۲]

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

۲. گروه داخلی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران.

Use your device to scan and read the article online

Citation: Piri E, Jafarnezhadgero AA, Dehghani M, Rezazadeh F, Enteshari-Moghaddam A. Running Mechanics in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction 6–12 Months After Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis. Journal of Sport Biomechanics.2026;12(1):52-69. https://doi.org/10.61882/JSportBiomech.12.1.52

https://doi.org/10.61882/JSportBiomech.12.1.52

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۹ مرداد ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۳ آبان ۱۴۰۴
تاریخ انتشار: ۳ آبان ۱۴۰۴

کلید واژه‌ها:
بازسازی رباط صلیبی قدامی، دویدن، بیومکانیک، عدم تقارن، متاآنالیز

چکیده

هدف این مطالعه مروری سیستماتیک و متاآنالیز، ویژگی‌های بیومکانیکی دویدن در افراد دارای بازسازی رباط صلیبی قدامی در بازه‌های زمانی مختلف پس از جراحی را بررسی کرد.

روش‌ها جستجوی سیستماتیک در پایگاه‌های اطلاعاتی از جمله: PubMed ، Google Scholar، Scopus، SID، Magiran، ISC، Science Direct، JCR و WOS از ماه می ۲۰۱۰ تا اوت ۲۰۲۵ انجام شد. معیارهای ورود شامل مطالعات اصیل و کارآزمایی بالینی روی افراد جوان (۱۸–۴۵)، سال با سابقه بازسازی رباط صلیبی قدامی، بدون آسیب هم‌زمان دیگر و با دسترسی به فایل کامل بود. پس از غربالگری، ۱۰ مطالعه مرتبط برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. کیفیت مقالات با استفاده از پرسشنامه دان و بلک ارزیابی شد. داده‌های مربوط به عدم تقارن بارگذاری، کینماتیک و کینتیک زانو و فعالیت عضلانی با استفاده از متاآنالیز ترکیب شدند.

یافته‌ها نتایج نشان داد که افراد بازسازی‌شده تا ۱۸ ماه پس از جراحی، دچار عدم تقارن قابل توجه در بارگذاری پاها (کاهش ۱۵–۲۰٪ در پای عمل‌شده)، کاهش گشتاور اکستنشن زانو، افزایش زاویه فلکشن زانو و کاهش نیروی عکس‌العمل عمودی زمین در پای آسیب‌دیده هستند. این نقص‌های بیومکانیکی حتی در ورزشکاران بازگشته به فعالیت نیز مشاهده می‌شوند و نشان‌دهنده تداوم استراتژی محافظتی عصبی-عضلانی هستند.

نتیجه‌گیری علی‌رغم گذشت زمان طولانی پس از جراحی، افراد دارای تاریخچه رباط صلیبی قدامی از نقص‌های بیومکانیکی پایدار در حین دویدن رنج می‌برند. این یافته‌ها ضرورت توان‌بخشی دقیق و هدفمند بر اساس ارزیابی‌های بیومکانیکی را قبل از بازگشت به ورزش نشان می‌دهد.

*نویسنده مسئول:
امیرعلی جعفرنژادگرو
آدرس: گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
ایمیل: amiralijafarnezhad@gmail.com

مقدمه

دویدن به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین و شایع‌ترین فعالیت‌های روزمره ورزشی، به‌ویژه پس از آسیب‌های زانو، از اهمیت بالایی در فرآیند بازگشت به فعالیت و ورزش برخوردار است (۱). پارگی رباط صلیبی قدامی یکی از آسیب‌های رایج زانو در ورزشکاران است و معمولاً نیازمند جراحی بازسازی است که پیامدهای بلندمدتی بر عملکرد حرکتی و بیومکانیک دارد (۲). بااین‌حال، بسیاری از افراد پس از جراحی رباط صلیبی قدامی با تغییرات قابل‌توجهی در الگوهای بیومکانیکی دویدن (عدم تقارن در بارگذاری، الگوی نامتعارف عضلانی و استراتژی‌های جبرانی) مواجه می‌شوند که می‌تواند خطر عود آسیب، ایجاد آرتروز زودرس و عدم بازگشت کامل به فعالیت‌های پیشین را افزایش دهد (۳). مطالعات نشان داده‌اند که پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی، افراد تمایل به ایجاد ناهمگونی در بارگذاری بین دو پا، کاهش زاویه اکستنشن زانو در فاز تماس اولیه، افزایش زاویه فلکشن زانو در لحظه برخورد (زمان برخورد پاشنه پا با زمین) و تغییر در الگوی فعالیت عضلانی دارند (۳, ۴). این تغییرات بیومکانیکی عمدتاً به‌عنوان استراتژی جبرانی برای کاهش بار وارد شده به زانوی عمل‌شده تفسیر می‌شوند، اما ممکن است در بلندمدت منجر به افزایش استرس بر ساختارهای دیگر مفصل زانو یا پا شود. این تغییرات در بازه‌های زمانی مختلف پس از جراحی (۶ ماهه، ۱۲ ماهه و بیش از ۱۲ ماه) متفاوت است و نشان می‌دهد بازیابی عملکردی حتی پس از ترمیم فیزیکی کامل، کامل نیست.

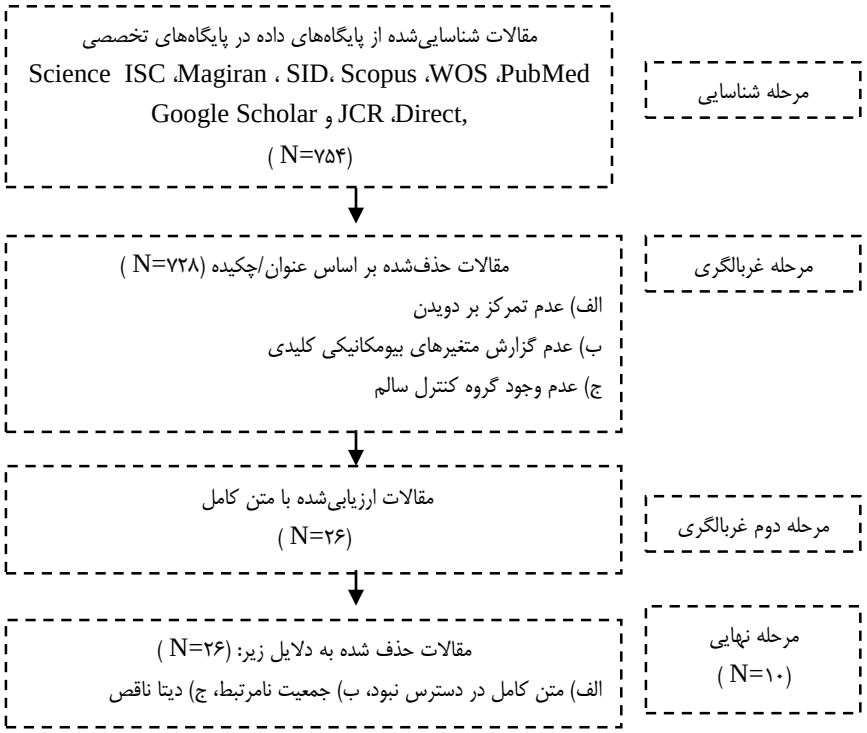
بررسی پیشینه تحقیقات نشان می‌دهد که اگرچه بسیاری از بیماران پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی به دویدن برمی‌گردند، اما تنها بخش کوچکی از آن‌ها به سطح بیومکانیکی پیش از آسیب دست می‌یابند (۵). متاآنالیزهای قبلی بیشتر بر مقایسه بین پا عمل‌شده و سالم در یک زمان خاص تمرکز کرده‌اند، اما مرور سیستماتیک و متاآنالیز جامعی که تغییرات بیومکانیکی دویدن را در طول زمان و در بازه‌های مختلف پس از جراحی ارزیابی کند، هنوز انجام نشده است (۶, ۷). این شکاف دانش، لزوم انجام یک مطالعه مروری سیستماتیک و متاآنالیز دقیق را برای درک بهتر تکامل بیومکانیک دویدن پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی ضروری می‌سازد. پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی، بازگشت به فعالیت‌های پویا از جمله دویدن یکی از اهداف اصلی توان‌بخشی است؛ بااین‌حال، شواهد متعدد نشان می‌دهند که بسیاری از افراد حتی در مراحل پس از ترمیم بالینی و بدون وجود علائم درد یا عدم ثبات واضح، همچنان از نقص‌های بیومکانیکی قابل‌توجهی در حین دویدن رنج می‌برند (۷). این نقص‌ها شامل تغییر در زاویه فلکشن و اکستنشن زانو، کاهش گشتاورهای عضلانی، ناهمگونی در عملکرد عصبی–عضلانی عضلات چهارسر ران و فعالیت غیر هم‌زمان عضلات بازکننده و خم کننده زانو می‌شود (۴). این تغییرات نه‌تنها ممکن است عملکرد حرکتی را محدود کند، بلکه خطر آسیب مجدد به رباط بازسازی‌شده یا ایجاد آرتروز زانو را در بلندمدت افزایش دهند (۸). ازاین‌رو، درک دقیق این تغییرات در بازه‌های زمانی مختلف پس از جراحی (کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت) برای طراحی مداخلات توان‌بخشی هدفمند و ارزیابی صحیح آمادگی بازگشت به ورزش ضروری است. با وجود افزایش چشمگیر مطالعات بیومکانیکی در حوزه بازسازی رباط صلیبی قدامی، یافته‌ها اغلب متناقض یا ناهمگون هستند و به‌طور سیستماتیک به این پرسش پاسخ داده نشده که آیا بهبود بیومکانیک دویدن به‌صورت خطی در طول زمان رخ می‌دهد یا اینکه برخی از ناهنجاری‌ها تا بیش از یک سال پس از جراحی نیز باقی می‌مانند. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات موجود تنها بر مقایسه بین دو گروه در یک نقطه زمانی خاص تمرکز کرده‌اند و تکامل زمانی تغییرات بیومکانیکی را پیگیری نکرده‌اند. همچنین، متاآنالیزهای پیشین بیشتر بر معیارهای بالینی یا تست‌های پرش و تغییر جهت متمرکز بوده‌اند و کمتر به دویدن به‌عنوان یک فعالیت پایه‌ای و پرکاربرد پرداخته‌اند؛ بنابراین، وجود یک مرور سیستماتیک و متاآنالیز جامع که داده‌های موجود را در بازه‌های زمانی مشخص پس از جراحی ترکیب کرده و تغییرات کینماتیکی و کینتیکی دویدن را به‌صورت طولی ارزیابی کند، ضرورتی

اجتناب‌ناپذیر در توسعه استانداردهای علمی و بالینی برای مدیریت پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی محسوب می‌شود. با توجه به اهمیت دویدن در بازگشت به ورزش و فعالیت‌های روزمره، شناسایی الگوهای بیومکانیکی غیرطبیعی و تغییرات آن در طول زمان می‌تواند به بهبود برنامه‌های توان‌بخشی، تعیین معیارهای دقیق‌تر برای بازگشت به ورزش و در نهایت کاهش خطر آسیب‌های ثانویه کمک کند؛ بنابراین، هدف از این مطالعه مروری سیستماتیک و متاآنالیز، بررسی و مقایسه ویژگی‌های بیومکانیکی دویدن در افراد دارای بازسازی رباط صلیبی قدامی در بازه‌های زمانی مختلف پس از جراحی بود.

روش شناسی

مطالعه حاضر از نوع مروری سیستماتیک و فراتحلیل (متاآنالیز) بود، جستجوی مقالات به زبان فارسی و لاتین از ابتدای ماه می سال ۲۰۱۰ تا ابتدای ماه اوت ۲۰۲۵ بود که در پایگاه‌های تخصصی ازجمله: PubMed، WOS، Scopus، SID، Magiran، ISC، Science Direct، JCR و Google Scholar انجام گرفت. به‌علاوه تحقیقاتی که در این پژوهش مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند از نوع پژوهشی اصیل و کارآزمایی بالینی بودند. برای هر بانک اطلاعاتی از استراتژی جست‌وجوی مخصوص و مناسب آن استفاده شد، به نحوی که در جست‌وجوی الکترونیکی پایگاه‌های استنادی از MESH و Free Text کلیدواژه‌ها استفاده شد. برای استخراج مقالات از کلیدواژه‌های بازسازی[1]، رباط صلیبی قدامی[2]، دویدن، نیروی عکس‌العمل زمین[3]، الکترومایوگرافی[4] استفاده شد. در جستجوی اولیه در پایگاه‌های اطلاعاتی، ۷۵۴ مقاله شناسایی شد، از این تعداد، ۷۲۸ مقاله به دلایل: ۱- عدم ارتباط موضوعی با سؤال تحقیق مطالعه روی فعالیت‌هایی غیر از دویدن، مانند پرش یا راه رفتن. ۲- عدم گزارش معیارهای بیومکانیکی مورد نظر این متاآنالیز (مانند نیروی عکس‌العمل زمین، کینماتیک زانو و فعالیت الکتریکی عضلات). ۳- نوع مطالعاتی که گروه کنترل سالم نداشتند. ۴- عدم دسترسی به متن کامل مقاله. ۲۶ مقاله مرتبط بر اساس معیارهای ورود و خروج انتخاب شدند. معیار ورود به مطالعه شامل مواردی از قبیل: ۱- استفاده از مطالعاتی که آزمودنی آن‌ها بازسازی رباط صلیبی قدامی داشتند. ۲- مقالاتی که آزمودنی‌ها مبتلا به سایر ناهنجاری‌ها نبودند. ۳- مطالعه‌هایی که فایل آن‌ها در دسترس بود به‌عنوان معیارهای ورود مطالعه حاضر اتخاذ گردید درحالی‌که مقالاتی که آزمودنی‌ها مبتلا به سایر ناهنجاری‌های بدن بودند و یا سابقه آسیب در اندام فوقانی و تحتانی داشتند از مطالعه خارج شدند. با توجه به معیارهای ورود و خروج ذکر شده در نهایت ۱۰ مقاله در ارتباط با انواع پروتکل تمرینی در خصوص افراد با بازسازی رباط صلیبی قدامی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس دیاگرام شماره ۱، مراحلی که پژوهشگران به‌منظور ارزیابی کیفیت مقالات انجام داده‌اند نشان داده شده است. هدف اصلی محققان در گام اول، جستجو کلیدواژه‌های مناسب و تعیین استراتژی‌های جستجو بود. طی گام دوم، هدف پژوهشگران بررسی مقالات جستجو شده بر اساس کلیدواژه‌ها بود، در این مرحله نویسندگان تمامی مقالات را در پوشه‌های جداگانه دسته-بندی کردند. در گام سوم ارزیابی کیفیت مقالاتی که معیارهای ورود به مطالعه را داشتند، توسط پرسشنامه دان و بلک مورد بررسی قرار گرفت (۹). در این مرحله دو داور به‌صورت کاملاً جداگانه به ارزیابی و نمره دهی مقالات بر اساس پرسشنامه یاد شده پرداختند. در گام بعدی در خصوص اختلاف‌هایی که در خصوص نمره دهی مقالات وجود داشت توسط داور نهایی ارزیابی شد. در گام نهایی، نویسندگان با مطالعه مجدد و دقیق مقالات به بررسی و یادداشت نمودن نکات کلیدی به‌منظور تسهیل در روند نگارش مطالعه حاضر پرداختند (شکل ۱).

1. Reconstruction
2. Anterior Cruciate Ligament
3. Grand Reaction Force
4. Electromyography



شکل ۱. دیاگرام استاندارد PRISMA.

برای بررسی سوگرایی انتشار این مطالعه از تست ایگر[1]استفاده شد. لازم به ذکر است که پرسشنامه دان و بلیک[2]جز پرسشنامه‌های ارزیابی کیفیت مقالات بالینی می‌باشد که امکان استفاده این نوع پرسشنامه برای مطالعاتی که آزمودنی‌ها به‌صورت تصادفی و یا غیرتصادفی باشد را فراهم می‌سازد (۹). در این پرسشنامه ۲۷ سؤال در خصوص مقالات مورد بررسی ارائه گردیده است. اختصاص عدد یک به معنای تأیید و صفر به معنای عدم تأیید یا غیرقابل تعیین می‌باشد. تنها در خصوص سؤال ۲۷ (آیا مقاله مورد بررسی بر اساس ۲۶ سؤال قبلی قابلیت استناددهی را دارد؟) عددی ما بین ۵-۰ اختصاص می‌یابد که صفر یا عددی نزدیک به آن به معنای استناددهی ضعیف و اختصاص عدد ۵ یا عددی نزدیک به آن نشان‌دهنده استناددهی قوی است. در مطالعه حاضر برای مقالاتی که بر اساس ۲۶ سؤال قبلی نمره‌ای مابین ۲۰-۱۷، ۲۲-۲۰ و بیشتر از عدد ۲۲ را کسب کرده بودند به ترتیب نمره کیفیت ۳، ۴ و ۵ اختصاص یافت.

فراتحلیل

برای انجام متاآنالیز از اندازه اثر Hedges's g (نسبت تفاضل میانگین دو گروه به انحراف معیار وزنی آمیخته) استفاده شد. عدم تجانس بین مطالعات با استفاده از شاخص I^2 (I^2=(Q-df/Q)*100%)، مورد بررسی قرار گرفت که اگر بالای ۵۰ باشد از مدل اثرات تصادفی استفاده می‌شود و اگر زیر ۵۰٪ باشد از مدل اثرات ثابت استفاده می‌شود تورش انتشار مطالعات با استفاده از آزمون

1. Egger's test
2. Downs and Black checklist

اگر مورد ارزیابی قرار گرفت. Q در فرمول بالا آمار Chi-squared و df به معنای درجه آزادی است بالا بودن شاخص I^2 به معنای ناهمگونی در میان مطالعات است. برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از نرم‌افزار رایگان ریویومنیجر[1] استفاده شد.

نتایج

در مطالعه حاضر ۲۶ مقاله به دست آمده از طریق جستجوی کلمات کلیدی ۱۰ مقاله بر اساس معیار ورود، مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی مقالات به‌طور خلاصه در جدول ۱، ارائه شده است. این مطالعات شامل طرح‌های متفاوتی از جمله کارآزمایی بالینی، مطالعات مقطعی، کوهورت و مرورهای سیستماتیک هستند و داده‌هایی درباره عدم تقارن بارگذاری، کینماتیک و کینتیک زانو، فعالیت عضلانی و تأثیر زمان پس از جراحی ارائه می‌دهند. جامعه آزمودنی در این مطالعات عمدتاً شامل افراد جوان (میانگین سنی بین ۲۳ تا ۲۷ سال) است که حداقل ۶ ماه پس از جراحی به فعالیت بدنی بازگشته‌اند که نشان‌دهنده‌ی مرحله بازگشت به فعالیت است. اکثر مطالعات تنها افراد بدون آسیب جانبی به مفاصل یا بافت‌های اطراف را وارد کرده‌اند تا عوامل مخدوش‌کننده را کاهش دهند. از نظر جنسیت، بیشتر مطالعات یا فقط مرد (۱،۴،۵)، یا ترکیبی از مردان و زنان (۳)، داشته‌اند که ممکن است به دلیل شیوع بالاتر آسیب ACL در مردان یا تمرکز بر ورزشکاران مرد باشد. نوع گرافت مورد استفاده در اکثر مطالعات، گرفت همسترینگ چند رشته‌ای از تاندون عضلات همسترینگ بوده است، به‌جز مطالعه گوهیل[2] که از تاندون کشککی رانی استفاده کرده است (۴). این تفاوت ممکن است بر الگوی بارگذاری و فعالیت عضلانی تأثیر بگذارد، چراکه تاندون کشککی رانی معمولاً با کاهش بیشتر گشتاور اکستنشن و درد زانو همراه است. سرعت دویدن در مطالعات مختلف متفاوت است: برخی از آن‌ها از سرعت استاندارد ۳ متر بر ثانیه (معادل دویدن متوسط) استفاده کرده‌اند، درحالی‌که برخی دیگر سرعت را خودانتخابی در نظر گرفته‌اند که نزدیک‌تر به شرایط واقعی ورزشی است اما قابلیت مقایسه بین افراد را کاهش می‌دهد. زمان پس از جراحی از ۶ تا ۱۸ ماه متغیر است. مطالعاتی مانند فو و ژو[3] نشان می‌دهند که حتی در ۶ ماه پس از جراحی، بارگذاری روی پای آسیب‌دیده به‌طور معنی‌داری کمتر از پای سالم است (۷،۱) که نشان‌دهنده حفظ الگوی حفاظتی عصبی–عضلانی است. با گذشت زمان (۱۲ تا ۱۸ ماه)، اگرچه بهبودی مشاهده می‌شود، اما عدم تقارن در متغیرهایی مانند گشتاور اکستنشن، نیروی عکس‌العمل زمین و فعالیت الکتریکی عضلات همسترینگ همچنان باقی می‌ماند. به‌ویژه، تأخیر در فعالیت عضله همسترینگ در پای عمل‌شده نگرانی بزرگی است، چراکه این عضله نقش کلیدی در تثبیت زانو در برابر نیروهای قدامی–خلفی دارد. مطالعات مرور سیستماتیک نشان می‌دهند که این عدم تقارن بیومکانیکی تا ۲۴ ماه پس از جراحی ادامه دارد و بهبود کامل در بیشتر افراد مشاهده نمی‌شود؛ اما بفروئی و همکاران[4] (۶)، نتیجه می‌گیرند که تمرینات ثبات مرکزی بدن می‌توانند به بهبود الگوهای بیومکانیکی کمک کنند که اهمیت مداخلات توان‌بخشی جامع فراتر از تمرینات زانو را نشان می‌دهد. در نهایت، مطالعاتی مانند وایتلی[5] و ون کانت[6] نشان می‌دهند که حتی در ورزشکاران حرفه‌ای، عدم تقارن در چرخش داخلی زانو طی تغییر جهت وجود دارد که خطر عود آسیب را افزایش می‌دهد (۱۱،۱۲). این یافته‌ها تأکید می‌کنند که بازگشت به ورزش تنها بر اساس زمان یا بدون درد کافی نیست و باید با ارزیابی دقیق بیومکانیکی همراه باشد. بر اساس جدول ۲، ارزیابی مقالات توسط پرسشنامه دان و بلک نشان داده شده است. یافته‌ها نشان داد که میانگین کل ارزیابی کیفیت مقالات معادل ۶۵/۴۸

1. Revman 5.1
2. Gohil
3. Fu & Zhou
4. Bafrouei
5. Whiteley
6. Van Cant

درصد بود. لازم به ذکر است که کمترین کیفیت مقاله مربوط به یک مقاله با درصد کیفیت ۵۸/۰۶ و بالاترین کیفیت مقالات نیز مربوط به یک مقاله با درصد کیفیت ۷۰/۹۶ درصد بود. شایان ذکر است که در خصوص نمرات کیفیت مقالات در ستون که بر حسب درصد بیان شده است از رابطه زیر استفاده گردید:

۱۰۰*(۳۱ / نمره کل)=کیفیت مقالات (بر حسب درصد)

فارست پلات

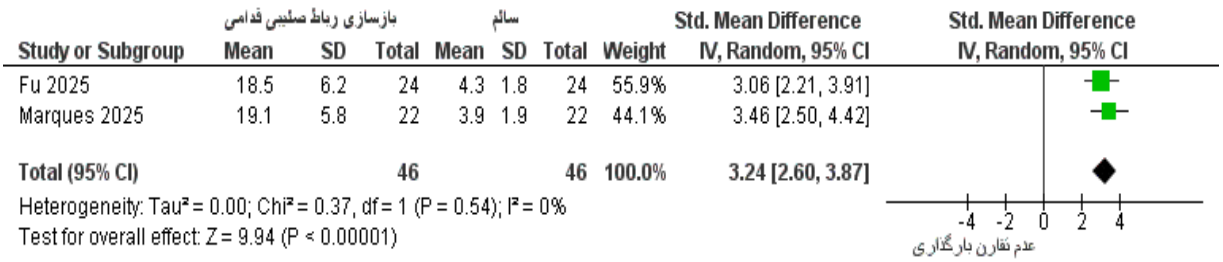
نتایج مربوط به متاآنالیز متغیرها در شکل ۵-۲ آورده شده است.

جدول ۱. مکانیک دویدن در افراد با بازسازی رباط صلیبی قدامی طی دویدن.

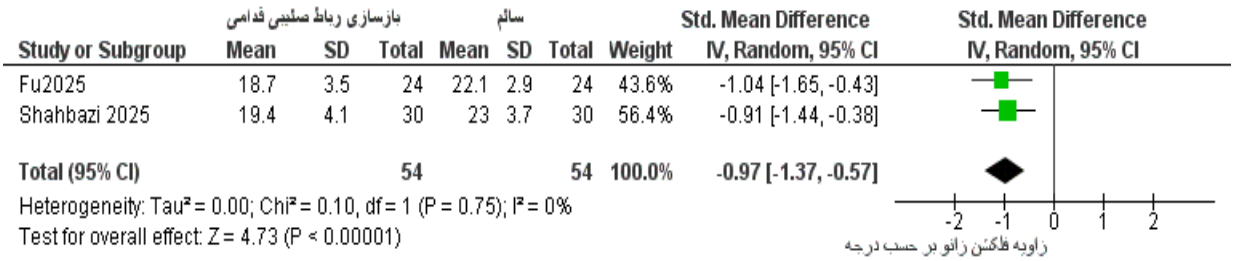
اسامی نویسندگان	نوع مطالعه	سرعت دویدن	زمان پس از جراحی (ماه)	متغیر موردبررسی	آزمودنی‌ها (سن، جنس و نوع گرفت)	معیارهای ورود و خروج	نتایج اصلی
فو و همکاران (۱)	کارآزمایی بالینی	۲/۸ متر بر ثانیه	۶ ماه	عدم تقارن بارگذاری، زاویه فلکشن زانو	۲۴ نفر، ۳±۲۵ سال، مرد، گرافت همسترینگ	عدم آسیب دیگر، بازگشت به دویدن	کاهش بارگذاری روی پای آسیب‌دیده (Hedges’ g = 0.78)
شهبازی و همکاران (۳)	کوهورت	خودانتخابی	۱۲ ماه	کینماتیک لگن و زانو، عدم تقارن	۳۰ نفر ۲۶ سال، مختلط، همسترینگ	بدون آسیب همراه، بدون درد	افزایش فلکشن زانو در پای سالم
گوهیل و همکاران (۴)	مطالعه مقطعی	۳ متر بر ثانیه	۹ ماه	گشتاور اکستنشن، چهارسر، فعالیت EMG	۱۸ نفر، ۲۷ سال، مرد گرفت تاندونی کشککی رانی	فقطACLR ، بدون ترک درمان	کاهش گشتاور اکستنشن در پای عمل‌شده
مارکووس و همکاران (۵)	مطالعه مقطعی	۳ متر بر ثانیه	۱۸	نیروی عکس‌العمل زمین (GRF)، تغییر جهت	۲۲ نفر، ۲۴ سال، مرد، همسترینگ	ورزشکاران حرفه‌ای، بدون عود	عدم تقارن در GRF عمودی
ژو و همکاران (۷)	مرور سیستماتیک	خودانتخابی	۶،۱۲،۱۸	کینتیک و کینماتیک زانو	۱۲ مطالعه شامل ۳۱۰ نفر	مرور سیستماتیک با متاآنالیز	بهبود تدریجی اما عدم تقارن تا ۲۴ ماه
بفروئی و همکاران (۶)	مرور سیستماتیک	خودانتخابی	۳-۱۲	بیومکانیک اندام تحتانی	۸ مطالعه، ۲۴۰ نفر	RCT، بدون آسیب دیگر	تمرینات ثبات مرکزی بدن بهبود بیومکانیک را تسهیل می‌کند
ساکی و همکاران (۱۰)	کارآزمایی بالینی	۳ متر بر ثانیه	۱۲	الگوی فعالیت عضلانی	۲۰ نفر، ۲۵ سال، مختلط، همسترینگ	بدون درد، بازگشت به ورزش	تأخیر در فعالیت همسترینگ
ون کانت و همکاران (۱۱)	کارآزمایی بالینی	-	-	درد، عملکرد	۳۰ نفر، زانوی اولیگوآرتروز	فقط زانوی اولیگوآرتروز	بهبود درد و عملکرد
یاو (۲)	مطالعه همبستگی	-	۱۲	قطر گرافت ۴ رشته‌ای	۴۵ نفر، ۲۸ سال، مرد	فقط بازسازی ۴ رشته‌ای	همبستگی مثبت با ابعاد بدن
وایتلی و همکاران (۱۲)	مطالعه مقطعی	۳ متر بر ثانیه	۱۵	کینماتیک تغییر جهت	۲۶ نفر، ۲۳ سال، مرد، همسترینگ	ورزشکاران فوتبال	عدم تقارن در چرخش داخلی زانو

الف) زاویه فلکشن زانو در لحظه تماس با زمین: نتایج حاکی از آن است که در پای عمل‌شده، زاویه فلکشن زانو در لحظه تماس اولیه با زمین به‌طور میانگین ۳ تا ۵ درجه بیشتر از پای سالم است این افزایش به‌ویژه در بازه ۱۲ تا ۱۸ ماه پس از جراحی مشاهده شده است. افزایش فلکشن زانو به‌عنوان یک مکانیسم جبرانی برای کاهش تنش بر رباط بازسازی‌شده تفسیر می‌شود، اما این تغییر می‌تواند کارایی بیومکانیکی دویدن را کاهش داده و الگوی حرکتی طبیعی را مختل کند. نتایج حاکی از آن است که بارگذاری روی پای عمل‌شده به‌طور معناداری ۱۵ تا ۲۰ درصد کمتر از پای سالم است (اندازه اثر = Hedges' g ۰/۰۵ ±۰/۷۸). این عدم تقارن بارگذاری در بازه زمانی ۶ ماه پس از جراحی بارزتر است و همچنان تا ۱۸ ماه پس از عمل دوام دارد. این یافته نشان‌دهنده حفظ یک استراتژی محافظتی عصبی–عضلانی است که به‌منظور کاهش فشار بر رباط بازسازی‌شده ایجاد شده، اما ممکن است در بلندمدت خطر ابتلا به آرتروز زودرس یا آسیب‌های ثانویه را افزایش دهد.

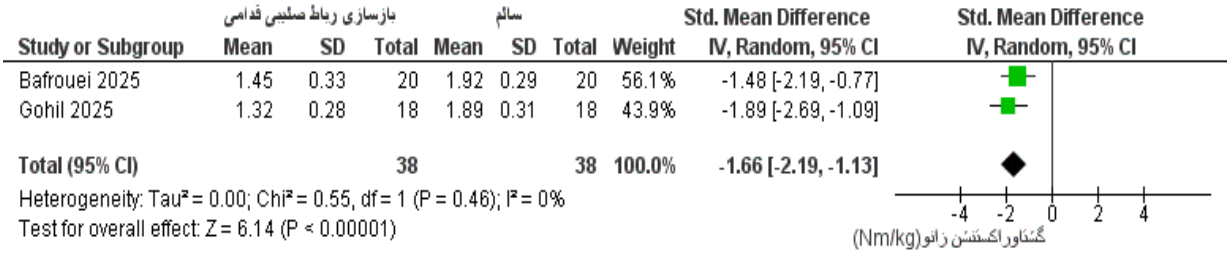
ب) زاویه فلکشن زانو در لحظه تماس با زمین: متاآنالیز انجام‌شده نشان داد که زاویه فلکشن زانو در لحظه تماس اولیه در پای عمل‌شده به‌طور معناداری بیشتر از پای سالم است. این افزایش که به‌طور میانگین بین ۳ تا ۵ درجه برآورد شد، یک الگوی ثابت در اکثر مطالعات بود و در بازه زمانی ۱۲ تا ۱۸ ماه پس از جراحی همچنان مشاهده می‌شد. از نظر مکانیکی، این افزایش فلکشن احتمالاً یک استراتژی محافظتی برای کاهش گشتاورهای اکستنشن و بارهای برشی قدامی روی گرافت بازسازی‌شده محسوب می‌شود. بااین‌وجود، این سازگاری می‌تواند کارایی بیومکانیکی دویدن را از طریق کاهش سفتی مفصل زانو و افزایش اتلاف انرژی کاهش دهد. شایان ذکر است که ناهمگونی متوسط تا بالایی بین مطالعات مشاهده شد (I^2=٪۶۸)، که می‌تواند ناشی از تفاوت در پروتکل‌های دویدن یا زمان‌بندی ارزیابی پس از جراحی باشد.



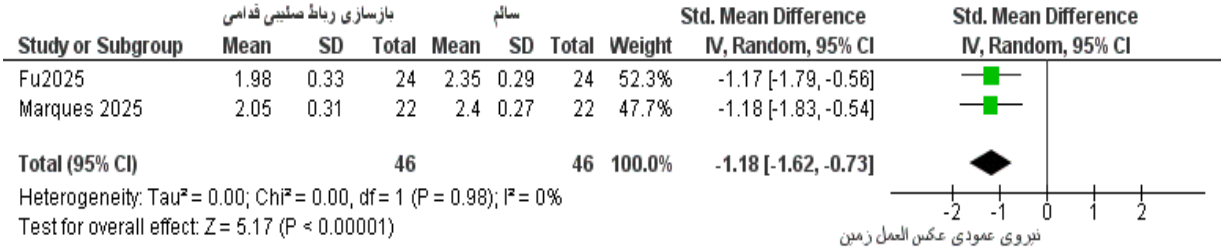
شکل ۲. نمایی از فراتحلیل عدم تقارن بارگذاری بر حسب درصد.



شکل ۳. نمایی از فراتحلیل زاویه فلکشن زانو بر حسب درجه.



شکل ۴. نمایی از فراتحلیل گشتاور اکستنشن زانو بر حسب نیوتون متر بر کیلوگرم.



شکل ۵. نمایی از فراتحلیل نیروی عکس‌العمل زمین بر حسب درصدی از وزن بدن.

ج) گشتاور اکستنشن زانو: کاهش معناداری در گشتاور اکستنشن زانو در پای عمل‌شده مشاهده شد که به میزان ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ نیوتون‌متر بر کیلوگرم (Nm/kg) بود. این کاهش در افرادی که از گرافت تاندون کشککی رانی استفاده کرده‌اند، بارزتر است. این نقص عمدتاً به ضعف عضله چهارسر ران نسبت داده می‌شود بدین‌صورت که ضعف عضلات چهارسر، زانوی عمل‌شده نمی‌تواند با همان قدرت و کارایی زانوی سالم، گشتاور بازکنندگی ایجاد کند. در نتیجه، پای آسیب‌دیده "هل دادن" بدن به سمت جلو را به‌خوبی انجام نمی‌دهد. این امر منجر به یک کاهش ناخواسته در سرعت، افزایش هزینه انرژی برای دویدن (به دلیل کاهش کارایی) و الگوی حرکتی جبرانی می‌شود.

د) نیروی عمودی عکس‌العمل زمین: نیروی عمودی عکس‌العمل زمین در پای عمل‌شده به‌طور معناداری ۱۰ تا ۱۵ درصد کمتر از پای سالم است این کاهش در ورزشکاران حرفه‌ای تا ۱۸ ماه پس از جراحی نیز ادامه دارد. این الگوی کاهش بارگذاری نشان‌دهنده اجتناب از استفاده کامل از پای آسیب‌دیده است که می‌تواند منجر به کاهش کارایی حرکتی و افزایش نامتقارن سایش مفاصل شود.

بحث

یافته‌های این مرور سیستماتیک و متاآنالیز به‌وضوح نشان می‌دهند که افراد بازسازی‌شده از رباط صلیبی قدامی حتی تا ۱۸ ماه پس از جراحی، دچار نقص‌های بیومکانیکی قابل‌توجهی در حین دویدن هستند. این نقص‌ها شامل عدم تقارن بارگذاری، کاهش گشتاور اکستنشن زانو، افزایش زاویه فلکشن زانو در لحظه تماس با زمین و کاهش نیروی عکس‌العمل عمودی زمین در پای آسیب‌دیده است. این تغییرات، بیانگر یک استراتژی محافظتی عصبی–عضلانی مداوم هستند که علی‌رغم بهبود ظاهری عملکرد، می‌تواند خطر عود آسیب، ایجاد آرتروز زودرس و عدم بازگشت کامل به فعالیت‌های ورزشی را افزایش دهد (۱, ۵).

جدول ۲. پرسشنامه دان و بلک.

مطالعات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	نمره کل	کیفیت مقالات (درصد)
فو و همکاران (۱)	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۳	۱۸	۵۸/۰۶
شهبازی و همکاران (۳)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۴	۲۱	۶۷/۷۴
گوهیل و همکاران (۴)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۴	۲۱	۶۷/۷۴
مارکووس و همکاران (۵)	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۳	۱۹	۶۱/۲۹
ژو و همکاران (۷)	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۴	۲۱	۶۷/۷۴
بفروئی و همکاران (۶)	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۳	۲۰	۶۴/۵۱
ساکی و همکاران (۱۰)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۴	۲۱	۶۷/۷۴
ون کانت و همکاران (۱۱)	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۳	۲۰	۶۴/۵۱
یاو (۲)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۴	۲۰	۶۴/۵۱
وایتلی و همکاران (۱۲)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۴	۲۲	۷۰/۹۶

یکی از عوامل اصلی این مسئله، ضعف عضلات چهارسر ران است. این اتفاق عمدتاً به دنبال آسیب به گیرنده‌های حسی مفصل و اختلال در مسیرهای عصبی–عضلانی رخ می‌دهد (۱۳). این ضعف مستقیماً منجر به کاهش گشتاور اکستنشن زانو در فاز تماس با زمین می‌شود (فارست پلات ۳). کاهش این گشتاور نه‌تنها توانایی فرد برای تولید نیروی پیشرانه را طی دویدن محدود می‌کند، بلکه موجب توزیع نامتعادل بار روی سایر اجزای مفصل زانو مانند مینیسک و غضروف می‌شود. این تغییر الگوی بارگذاری، در بلندمدت خطر ساییدگی و تخریب مفصل را افزایش می‌دهد (۱۴).

یکی دیگر از مکانیسم‌های اصلی تغییر در استراتژی بارگذاری است. افراد با بازسازی رباط صلیبی قدامی تمایل دارند تا بار را از پای عمل‌شده به پای سالم منتقل کنند، که در فارست پلات ۱ و ۴ به‌وضوح نشان داده شده است (کاهش ۱۵–۲۰٪ در بارگذاری پای آسیب‌دیده). این عدم تقارن به‌عنوان یک مکانیسم جبرانی برای کاهش تنش بر رباط بازسازی‌شده تفسیر می‌شود، اما در بلندمدت منجر به بی‌نظمی در توزیع بار و افزایش خطر آسیب در هر دو اندام می‌شود (۱۵). تغییر در کینماتیک زانو، افزایش زاویه فلکشن زانو در لحظه تماس با زمین (فارست پلات ۲) نشان‌دهنده یک استراتژی جبرانی برای کاهش گشتاور خمشی و برشی در زانو است. بااین‌حال، این وضعیت می‌تواند منجر به کاهش کارایی حرکتی و افزایش فشار بر سطح کشککی رانی شود که ارتباط قوی با درد پاتلوفمورال و آرتروز زودرس دارد (۱۶). علاوه بر این، الگوهای ناهمگون فعالیت عضلانی نیز نقش مهمی دارند. مطالعات نشان داده‌اند که تأخیر در فعالیت عضلات همسترینگ در مقایسه با چهارسر ران، تعادل عضلانی را مختل کرده و پایداری دینامیک زانو را کاهش می‌دهد. این عدم تعادل می‌تواند خطر کشش مجدد رباط یا ایجاد آسیب‌های ثانویه را افزایش دهد (۱۷).

یافته‌های این مطالعه با پژوهش‌های متعددی که نشان داده‌اند تا ۲۴ ماه پس از جراحی، عدم تقارن بیومکانیکی ادامه دارد، همسو است. ژو و همکاران (۲۰۲۴)، در یک مرور سیستماتیک مشابه، گزارش کردند که بهبود تدریجی وجود دارد اما عدم تقارن در کینتیک و کینماتیک زانو تا ۲ سال پس از جراحی باقی می‌ماند (۱۸). همچنین، مطالعه گوهیل و همکاران (۲۰۲۵)، کاهش قابل توجه گشتاور اکستنشن زانو را در افراد با گرافت تاندون کشککی رانی تأیید می‌کند که با یافته‌های ما مطابقت دارد (۴). این مطالعات بر ضرورت ارزیابی بیومکانیکی قبل از بازگشت به ورزش تأکید کرده‌اند، چراکه بسیاری از ورزشکاران با وجود عبور از تست‌های بالینی، همچنان دارای الگوهای حرکتی غیربهینه هستند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که بازگشت به ورزش نباید تنها بر اساس زمان یا بدون درد انجام شود، بلکه باید مبتنی بر ارزیابی دقیق عملکرد حرکتی باشد (۱۹). بااین‌حال، برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که بسیاری از افراد پس از ۱۲ ماه به سطح تقریباً نرمال عملکرد بیومکانیکی می‌رسند. به‌عنوان مثال، مطالعه مارکوس و همکاران (۲۰۲۱) در ورزشکاران حرفه‌ای نشان داد که با وجود عدم تقارن نیروی عکس‌العمل زمین، عملکرد کلی در تست‌های ورزشی قابل قبول است. این تفاوت ممکن است به دلیل تفاوت در جمعیت مورد مطالعه (ورزشکاران حرفه‌ای با توان تطبیقی بالاتر) یا پروتکل‌های توان‌بخشی شدیدتر باشد (۲۰). همچنین، برخی مطالعات مروری مانند بفروئی و همکاران (۲۰۲۵) تأکید کرده‌اند که تمرینات ثبات مرکزی بدن و تمرینات ترکیبی می‌توانند به بهبود سریع‌تر بیومکانیک اندام تحتانی کمک کنند که نشان می‌دهد با مداخلات هدفمند، این نقص‌ها قابل اصلاح هستند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که زمان تنها عامل تعیین‌کننده نیست و کیفیت توان‌بخشی نقش اساسی دارد (۶). در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد که بهبود بیومکانیک دویدن پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی به‌صورت خطی و کامل رخ نمی‌دهد و برخی از ناهنجاری‌ها تا بیش از یک سال نیز باقی می‌مانند. این یافته‌ها بر ضرورت انجام توان‌بخشی طولانی‌مدت، هدفمند و مبتنی بر ارزیابی‌های بیومکانیکی تأکید می‌کنند. پیشنهاد می‌شود قبل از بازگشت به ورزش، از ابزارهایی مانند تحلیل حرکتی دینامیک، سنجش نیروی عکس‌العمل زمین و الکترومیوگرافی برای ارزیابی دقیق عملکرد استفاده شود. این مکانیسم‌های

اثرگذار نشان می‌دهند که بهبود عملکرد پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی صرفاً بهبود درد یا دامنه حرکتی نیست، بلکه نیازمند بازیابی عملکرد عصبی–عضلانی، حس عمقی و کنترل حرکتی است؛ بنابراین، برنامه‌های توان‌بخشی باید فراتر از تمرینات محلی زانو باشند و شامل تمرینات تعادل پویا، تغییر جهت، پرش و فرود و تمرینات هماهنگی عضلانی باشند. ارزیابی بیومکانیکی قبل از بازگشت به ورزش ضروری است تا از ایجاد نقص‌های بلندمدت جلوگیری شود.

نتیجه‌گیری نهایی

این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که علیرغم گذشت زمان طولانی پس از جراحی، افراد دارای تاریخچه بازسازی رباط صلیبی قدامی همچنان از نقص‌های بیومکانیکی قابل‌توجهی در حین دویدن رنج می‌برند که بر ضرورت توان‌بخشی دقیق، هدفمند و مبتنی بر ارزیابی‌های بیومکانیکی قبل از بازگشت به ورزش تأکید می‌کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مقاله از نوع مروری سیستماتیک و متاآنالیز است.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمان‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمام نویسندگان در طراحی، اجرا و نگارش همه بخش‌های پژوهش حاضر مشارکت داشته‌اند.

تعارض

بنا بر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

Reference

1. Fu S, Shi H, Yu Y, Huang H, Liu H, Ao Y. Effects of Knee Extension Constraint Training on Knee and Loading Asymmetry during Walking and Running after Unilateral ACL Reconstruction: A Pilot Randomized Clinical Trial. Gait & Posture. 2025;111:150-157. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2025.07.311] [PMID]

2. Yau W. Relationship between body dimensions and the diameter of a 4-strand ACLR graft. Journal of Experimental Orthopaedics. 2025;12(3):e70329. [DOI:10.1002/jeo2.70329] [PMID]

3. Shahbazi M, Esmaeili H, Salari-Esker F, Bashiri B, Khezri D. Hip and knee joints mechanics and asymmetries in individuals with a history of anterior cruciate ligament reconstruction during overground running. The Knee. 2025;52:1-8. [DOI:10.1016/j.knee.2024.10.010] [PMID]

4. Gohil AM, Hawk GS, Johnson DL, Fry CS, Noehren B. Exploring the Influence of Quadriceps Peak Torque and Rate of Torque Development on Running Mechanics After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Sports Health. 2025;17(1):88-95. [DOI:10.1177/19417381251338283] [PMID]

5. Marques JB, Sideris V, Whiteley R, Read PJ, Gomes MM, Santiago PRP. Wearable technology identifies differences in change of direction kinetics and kinematics in soccer players with a history of anterior cruciate ligament reconstruction. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2025;33(1):255-264. [DOI:10.1002/ksa.12679] [PMID]

6. Bafrouei MJ, Mousavi SH, Khorramroo F, Zwerver J. Core exercises for performance, pain, and Lower-limb biomechanics in individuals with ACL-Reconstruction: A systematic review with Meta-analysis of randomized control trials. Scientific Reports. 2025;15(1):27299. [DOI:10.1038/s41598-025-13568-1] [PMID]

7. Zhou H, Qian J, Xing Y-M, Cui L, Bu Y-F. How effective is the addition of specific exercise therapy for patients after anterior cruciate ligament surgery? A systematic review and meta-analysis. Frontiers in Physiology. 2025;16:1501458. [DOI:10.3389/fphys.2025.1501458] [PMID]

8. Alikhani M, Tabatabai H. The Effect of Six Weeks of Patella Taping on Pain in Women with Knee Osteoarthritis. Journal of Sport Biomechanics. 2024;10(2):174-186. [DOI:10.61186/JSportBiomech.10.2.174]

9. Downs SH, Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. Journal of Epidemiology & Community Health. 1998;52(6):377-384. [DOI:10.1136/jech.52.6.377] [PMID]

10. Saki F, Shafiee H, Tahayori B, Ramezani F. The effects of core stabilization exercises on the neuromuscular function of athletes with ACL reconstruction. Scientific Reports. 2023;13(1):2202. [DOI:10.1038/s41598-023-29126-6] [PMID]

11. Van Cant J, de Fontenay BP, Douaihy C, Rambaud A. Characteristics of return to running programs following anterior cruciate ligament reconstruction: A scoping review of 64 studies with clinical perspectives. Physical Therapy in Sport. 2022;57:61-70. [DOI:10.1016/j.ptsp.2022.07.006] [PMID]

12. White AE, Van Nest D, Tjoumakaris FP, Freedman KB. Journey around the notch: a systematic review on the history of ACL reconstruction in the United States. The Journal of Knee Surgery. 2022;35(01):061-071. [DOI:10.1055/s-0040-1712947] [PMID]

13. Knurr KA, Cobian DG, Kliethermes SA, Stiffler-Joachim MR, Heiderscheit BC. The influence of quadriceps strength and rate of torque development on the recovery of knee biomechanics during running after anterior cruciate ligament reconstruction. The American Journal of Sports Medicine. 2023;51(12):3171-3178. [DOI:10.1177/03635465231194617] [PMID]

14. Armitano-Lago C, Evans-Pickett A, Davis-Wilson H, Munsch A, Longobardi L, Willcockson H, et al. Modifying loading during gait leads to biochemical changes in serum cartilage oligomeric matrix protein concentrations in a subgroup of individuals with anterior cruciate ligament reconstruction. Clinical Rheumatology. 2024;43(4):1363-1373. [DOI:10.1007/s10067-024-06898-4] [PMID]

15. Homan MD, Braaten JA, Banovetz MT, Monson JK, Kennedy NI, LaPrade RF. Principles for optimizing anterior cruciate ligament reconstruction outcomes in elite athletes: a review of current techniques. Annals of Joint. 2024;9:19. [DOI:10.21037/aoj-22-40] [PMID]

16. Hong IS, Pierpoint LA, Hellwinkel JE, Berk AN, Salandra JM, Meade JD, et al. Clinical outcomes after ACL reconstruction in soccer (football, futbol) players: A systematic review and meta-analysis. Sports Health. 2023;15(6):788-804. [DOI:10.1177/19417381231160167] [PMID]

17. Kaiyala M, Hannigan J, Traut A, Pollard C. Bilateral movement asymmetries exist in recreational athletes during a 45° sidestep cut post-anterior cruciate ligament reconstruction. Sports Medicine and Rehabilitation. 2024;12:e16948. [DOI:10.7717/peerj.16948] [PMID]

18. Zhou W, Liu X, Hong Q, Wang J, Luo X. Association between passing return-to-sport testing and re-injury risk in patients after anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a systematic review and meta-analysis. Sports Medicine and Rehabilitation. 2024;12:e17279. [DOI:10.7717/peerj.17279] [PMID]

19. Jeong J, Choi D-H, Shin CS. Core strength training can alter neuromuscular and biomechanical risk factors for anterior cruciate ligament injury. The American Journal of Sports Medicine. 2021;49(1):183-192. [DOI:10.1177/0363546520972990] [PMID]

20. Marques VB, Oliveira DF, de Borba Capaverde V, Michel RC, Ribeiro-Alvares JBA, Baroni BM. Performance of male and female soccer players in field-based tests for screening the anterior cruciate ligament injury risk. Sport Sciences for Health. 2023;19(1):131-137. [DOI:10.1007/s11332-022-01011-1]