Archives of
Rehabilitation

Spring 2026. Vol 27. Num 1

Review Paper

A Multidimensional Model for Return to Sport Decision-making After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

Leila Saburi[1], Ebrahim Piri[2,3], *AmirAli Jafarnezhadgero[2], Makwan JabarAli[4]

1. Department of Sports Biomechanics, Faculty of Sports Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2. Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3. Department of Molecular Medicine and Surgery, Karolinska Institutet, Solna, Sweden.
4. Department of Physical Education, College of Physical Education and Sport Sciences, University of Halabja, Halabja, Kurdistan Region, Iraq.

Use your device to scan and read the article online

Citation Saburi L, Piri E, Jafarnezhadgero AA, JabarAli M. A Multidimensional Model for Return to Sport Decision-making After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Archives of Rehabilitation. 2026; 27(1):58-71. https://doi.org/10.32598/RJ.27.1.4128.6

https://doi.org/10.32598/RJ.27.1.4128.6

ABSTRACT

Objective Return to sport (RTS) after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) is commonly guided by time-based milestones and isolated functional pass/fail criteria. However, many athletes return with persistent biomechanical deficits that can increase the risk of reinjury and contribute to long-term joint degeneration. This study aims to synthesize time-specific changes in gait and running biomechanics at 6, 12, and 18 months after ACLR, and to propose an integrated, multidimensional RTS decision-making model that links rehabilitation fidelity with serial biomechanical assessment. We critically discuss whether the injury-to-surgery time (early vs delayed) may influence locomotor recovery trajectories.

Materials & Methods This is an editorial review. Evidence from the ACLR rehabilitation and biomechanics literature is reviewed narratively to summarize task-dependent recovery patterns in gait and running and to highlight the limitations of conventional RTS batteries. Based on this synthesis, two practical tools are presented: (i) a milestone-based table of gait and running biomechanical deficits at 6, 12, and 18 months post-surgery, and (ii) a multidimensional RTS decision-making framework integrating three domains of clinical, functional/neuromuscular, and biomechanical readiness.

Results Biomechanical recovery after ACLR appears nonlinear and task-specific. Gait parameters may be normal up to 12 months, whereas running mechanics, frontal-plane control, limb-loading symmetry, and neuromuscular coordination can remain impaired beyond this time. Athletes may therefore pass hop or strength symmetry thresholds while still demonstrating compensatory landing strategies, reduced knee extensor contribution, trunk/pelvic compensations, or persistent underloading of the surgical limb features associated with increased reinjury risk. Serial gait and running analyses at 6, 12, and 18 months post-surgery can help identify early protective strategies, detect deceptive recovery at mid-term follow-up, and reveal residual high-demand deficits at later stages (e.g. under speed, fatigue, and cutting). The literature on early versus delayed ACLR remains mixed, underscoring the need for more granular, time-specific evaluation of who benefits from differences in post-surgical time.

Conclusion Successful RTS after ACLR should be viewed as a continuum rather than a single clearance event. Time since surgery is necessary but insufficient. For RTS decision-making, it should integrate clinical status, psychological readiness, strength and sensorimotor recovery, movement quality, and sport-specific performance, with gait and running biomechanics serving as a clinically meaningful bridge between progression in anterior cruciate ligament rehabilitation and safer RTS decision-making.

Keywords Anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR), Return to sport (RTS), Biomechanics, Gait, Running

Received: 03 Dec 2025
Accepted: 02 Feb 2026
Available Online: 01 Apr 2026

Corresponding Author:
AmirAli Jafarnezhadgero, Professor.
Address: Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
Tel: +98 (910) 5146214
E-Mail: amiralijafarnezhad@gmail.com

Copyright © 2026 The Author(s);
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-By-NC: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

Anterior cruciate ligament (ACL) rupture is one of the most prevalent and debilitating orthopedic injuries worldwide, with global incidence estimated at approximately 1 per 3,500, equating to nearly 95,000 new ACL reconstruction (ACLR) cases annually in the United States alone [1]. Alarmingly, incidence rates among high-risk populations, particularly adolescents and young adults aged 16–39 years, are even higher, reaching 85 per 100,000, with Australia reporting the highest global incidence of 91 per 100,000 people under the age of 25 [2]. Given that these figures are derived predominantly from surgical databases, the true incidence of ACL injury is likely substantially greater, reflecting a global epidemic that continues to expand across athletic populations [2]. In the United States, approximately 60,000–75,000 ACLRs are performed annually, with reported long-term success rates ranging from 75 to 95% [1]. However, the ability to successfully return to sport (RTS) following ACLR remains highly variable and, for many patients, it is elusive. Evidence demonstrates that while approximately 80% of patients return to some form of sports activity, only 65% return to their pre-injury level of performance, and 55% successfully return to competitive-level sport [3]. Among soccer players, up to 40% do not believe they will return to their sport following ACL injury, reflecting the profound psychological and physical barriers to successful RTS [4]. Among those who have successful RTS, reinjury rates remain alarmingly high, with 23.5% experiencing reinjury and 24.5% requiring reoperation. These sobering statistics underscore a fundamental question: what distinguishes a high-quality, sustained RTS from a dangerous, injury-prone one?

A growing body of literature has identified several key determinants of successful RTS. The Delaware-Oslo ACL cohort study established international consensus on six measures defining successful outcome after ACL injury and reconstruction: absence of knee joint giving way, RTS, quadriceps and hamstrings' strength >90% of the uninvolved limb, having no more than mild knee joint effusion, and patient-reported outcomes [5]. Moreover, prospective evidence has demonstrated that premature RTS, specifically before 9 months postoperatively, may increase the risk of a second ACL injury by up to 7-fold, whereas delaying clearance by each additional month up to 9 months can reduce reinjury risk by approximately 50%.

The consequences of incomplete or inadequate rehabilitation are profound and enduring. Inadequate rehabilitation, combined with an unprepared RTS, not only limits athletic performance but also significantly increases the reinjury risk [6]. Persistent gait abnormalities are frequently observed even at 6–12 months postoperatively and may last up to 2 years or longer [7]. Such biomechanical impairments, including reduced peak knee flexion angles, diminished knee flexion moments, and altered gait symmetry, are associated not only with heightened ACL reinjury risk but also with early-onset post-traumatic osteoarthritis (PTOA) [7]. Alarmingly, over 80% of patients undergoing ACLR with hamstring tendon autografts exhibit radiographic evidence of PTOA during a 15.6-year follow-up [8].

This editorial introduces a novel conceptual framework that bridges the critical gap between structured rehabilitation programming and systematic biomechanical assessment. Specifically, we propose the integration of comprehensive kinematic and kinetic analyses during walking and running at three distinct postoperative milestones, 6, 12, and 18 months, to differentiate the biomechanical trajectory of patients who adhere to rigorous, criteria-based rehabilitation protocols from those who do not. While numerous studies have characterized gait abnormalities following ACLR [9], no study has systematically mapped the temporal evolution of locomotor mechanics in relation to adherence to structured rehabilitation, nor prospectively compared these biomechanical outcomes with the timing of surgical intervention. This editorial further contributes a unique examination of the temporal relationship between injury and surgery, specifically, whether immediate ACLR (<6 weeks after injury) confers biomechanical advantages over delayed reconstruction (>6 months), or whether prolonged presurgical periods with inadequate rehabilitation engender persistent, unfavorable gait and running mechanics that undermine long-term joint health.

Emerging evidence suggests that early ACLR may be more beneficial in improving knee extension movement and knee extension moment during walking at 12 months postoperatively compared to delayed surgery [10]. Conversely, other studies have reported that >80% of early and delayed ACLR patients ultimately develop PTOA at long-term follow-up, with no significant differences between groups [8]. These conflicting findings highlight the urgent need for a granular, timespecific analysis of when and for whom surgical timing truly matters. Accordingly, the primary goal of this editorial is twofold: (a) to establish a bridge between comprehensive rehabilitation adherence and serial biomechanical

assessment at 6, 12, and 18 months postsurgery; and (b) to critically evaluate the influence of the injurytosurgery time on walking and running mechanics. By linking process (rehabilitation fidelity) to outcome (biomechanical recovery), this editorial seeks to provide clinicians, surgeons, and sports scientists with actionable, evidence-based guidelines for determining not only the time of RTS, but also how the patient should return with quality, resilience, and sustained joint health as the ultimate endpoints. Six months after ACLR, patients commonly demonstrate protective walking and running patterns characterized by unloading of the surgical limb, reduced knee extensor moment, marked neuromuscular inhibition, and substantial interlimb asymmetry. After 12 months, many spatiotemporal gait parameters return to normal values; however, running mechanics often remain impaired, particularly in loading symmetry and knee control, indicating that apparently normal gait may mask persistent deficits during higher-demand tasks. By 18 months, gait biomechanics are typically near normal in most individuals, and many gait variables improve substantially, although subtle asymmetries, especially in frontal-plane knee mechanics and hip control, may persist in some patients, potentially contributing to reinjury risk and long-term joint degeneration [9].

Table 1 synthesize evidence-based, time-specific biomechanical findings after ACLR, at 6, 12, and 18 months post-surgery, with emphasis on limb-to-limb asymmetry, locomotor loading strategies, and neuromuscular control during walking and running factors central to RTS quality and reinjury risk.

Integrating biomechanical recovery with RTS testing

Although the time since surgery is frequently used as a practical benchmark in ACLR rehabilitation, it is not a sufficient criterion. Biomechanical recovery after ACLR is task-specific and nonlinear. Gait mechanics may be normal up to 12 months, whereas running mechanics, frontal-plane control, limb-loading symmetry, and neuromuscular coordination may remain impaired beyond this time. Accordingly, RTS decision-making should not be based solely on chronological recovery but rather on a multidimensional framework that integrates graft status, knee function, psychological readiness, strength recovery, movement quality, and sport-specific performance.

A major limitation of conventional RTS decision-making is the overreliance on isolated pass/fail criteria, particularly when these criteria are assessed without consideration of underlying movement strategies. For example, an athlete may demonstrate acceptable hop test or quadriceps limb symmetry while still exhibiting altered landing mechanics, reduced knee extensor contribution, compensatory trunk motion, or persistent underloading of the surgical limb. In other words, the athlete may be able to resume sports exposure while still maintaining a movement pattern that can increase reinjury risk or accelerate long-term joint degeneration [11]. To address this gap, we propose that RTS testing after ACLR should be interpreted within three interrelated domains: clinical readiness, functional/neuromuscular readiness, and biomechanical readiness.

Clinical readiness includes physician approval; evidence of adequate graft healing or, when available, graft maturity; restoration of knee range of motion (ROM); minimal or absent effusion; a stable ligament examination; and acceptable anterior knee laxity measured with devices such as the KT-1000 or KT-2000 arthrometer [12]. These indicators provide a necessary foundation for progression, but they do not confirm readiness for high-demand athletic activity.

Functional/neuromuscular readiness includes patient-reported outcome measures, muscle performance testing, proprioceptive assessment, and progressively demanding functional tasks [13]. Relevant self-reported measures include the ACL-return to sport after injury (ACL-RSI) scale, the International Knee Documentation Committee (IKDC) score, the knee injury and osteoarthritis outcome score (KOOS), the Tegner activity scale, the Lysholm score, kinesiophobia scales such as the Tampa Scale, activities of daily living measures, and sport-specific questionnaires where appropriate [14]. These tools are particularly important because fear of reinjury, low confidence, and perceived instability frequently persist even when objective impairments appear mild. Psychological readiness is therefore not an adjunct consideration, but a central determinant of successful and sustainable RTS. Muscle performance testing should encompass both open kinetic chain (OKC) and closed kinetic chain (CKC) assessments. OKC testing (manual muscle testing, hand-held dynamometry, progressive resistive exercise testing, and especially isokinetic dynamometry) allows more isolated examination of quadriceps and hamstring function [15]. This is particularly relevant after ACLR because isolated weakness may remain hidden during compound tasks through compensatory changes at the hip, ankle, or contralateral limb. Isokinetic testing remains especially valuable despite criticism of its functional relevance, as it provides quantifiable information on peak torque, angle-specific torque, strength asymmetry, and, in some cases, rate of

Table 1. Summary of key gait and running biomechanics after ACLR at 6, 12, and 18 months post-surgery

Task	Key Biomechanical Feature	Months		
		6	12	18
Gait	Spatiotemporal symmetry	Reduced gait speed, shorter step length, and decreased single-limb support on the surgical limb	Largely restored, with minor residual asymmetry in some patients	Generally normalized
Gait	Knee sagittal-plane mechanics	Reduced knee flexion and extension excursion; quadriceps-avoidance	Improvement, although mild deficits may persist	Near-normal in most patients
Gait	Limb loading	Protective unloading of the surgical limb; lower vertical ground reaction force and loading rate	Loading symmetry improves	Usually normalized
Gait	Frontal-plane/pelvic control	Mild pelvic drop and altered knee adduction loading	Mostly improved, though subtle deficits may remain	Largely normalized, with isolated abnormalities in some patients
Gait	Neuromuscular function	Quadriceps inhibition, increased hamstring co-activation, and delayed gluteal activation	Improved muscle activation, but incomplete recovery may persist	Mostly normalized
Running	Spatiotemporal symmetry	Shorter stride length, longer ground contact time, and reduced flight time	Partial recovery, though asymmetry may persist	Near-normal in most cases
Running	Knee sagittal-plane mechanics	Reduced knee flexion at contact and stance; stiff landing strategy	Improved but still often abnormal compared to gait	Largely restored, with minor residual deficits in some cases
Running	Limb loading	Reduced loading on the surgical limb and compensatory contralateral overloading	More symmetrical, though subtle, loading imbalance may persist	Mostly normalized
Running	Frontal plane control	Increased knee abduction moment/angle and compensatory trunk lean	Persistent deficits may remain in some cases	Usually improved, but subtle abnormalities may persist under high demand
Running	Neuromuscular function	Reduced quadricep contribution, increased hamstring co-activation, and delayed gluteal recruitment	Neuromuscular recovery progresses, but may be poorer compared to gait	Largely normalized in most patients
Total	Interlimb asymmetry and RTS relevance	Marked asymmetry and protective movement strategies	Gait may appear normal, but running deficits often persist	Most biomechanical variables improve, although subtle asymmetries may still influence reinjury risk and long-term joint health

Archives of Rehabilitation

force development. These variables are highly relevant to restoring dynamic knee stability and enabling controlled deceleration. In contrast, CKC assessments are more reflective of coordinated lower-extremity function because they challenge multiple joints and muscle groups simultaneously [16]. However, their interpretive limitation is equally important. When a deficit is detected in a CKC task, the exact source of impairment may be unclear. For this reason, isolated and integrated testing should be viewed as complementary rather than competing approaches. A patient who performs well during a squat-based or hopping task may still possess deficits in isolated quadriceps' force production, whereas another may demonstrate good isolated strength but poor movement quality under dynamic conditions. Functional testing should therefore progress from basic movement competency toward high-demand athletic tasks. This progression may include balance and proprioceptive testing, kinesthesia or joint position sense assessment, quality-of-movement evaluations, jump and hop tests, lower-extremity functional test, and sport-specific tests under realistic conditions.

Table 2. Proposed multidimensional testing framework for RTS post-surgery

Domain	Assessments	Clinical purpose
Clinical readiness	Physician approval, graft maturity on MRI, ROM, effusion, KT-1000/2000, Lachman test, Pivot shift test	Establishing foundational joint status and safety for progression
Patient-reported/psychological readiness	ACL-RSI, IKDC, KOOS, Lysholm score, Tegner scale, Tampa scale of Kinesiophobia	Assessing confidence, symptoms, function, and fear of reinjury
Strength and neuromuscular readiness	MMT, HHD, PRE, isotonic strength testing, isokinetic dynamometry, RFD	Quantifying force production, asymmetry, and isolated muscle deficits
Sensorimotor readiness	Balance test, proprioception test, kinesthesia, joint-position sense	Assessing dynamic joint awareness and control
Functional readiness	Jump tests, hop tests, LEFT, wall slide, Vail sport cord test	Evaluating integrated lower-extremity performance
Biomechanical readiness	Gait analysis, running analysis, kinematics, and kinetics	Identifying compensatory mechanics and hidden movement deficits
Sport-specific readiness	Agility, cutting, reactive drills, and prevention programs	Determining readiness for sport-specific demands

Archives of
Rehabilitation

Abbreviation: ROM: Range of motion; KT-1000/KT-2000: Knee arthrometers for anterior tibial translation (instrumented laxity); ACL-RSI: Anterior cruciate ligament–return to sport after injury scale; IKDC: International Knee Documentation Committee; KOOS: Knee injury and osteoarthritis outcome score; MMT: Manual muscle testing; HHD: Hand-held dynamometry; PRE: Progressive resistive exercise; RFD: Rate of force development; LEFT: Lower extremity functional test

Importantly, performance outcomes alone are not sufficient. The qualitative execution of each task should also be assessed, with particular attention to frontal-plane knee control, pelvic stability, trunk alignment, landing strategy, and interlimb loading symmetry. This is where three-dimensional kinematic analysis, kinetic analysis, gait assessment, and running analysis offer substantial clinical value. These methods can detect residual deficits that conventional clinical tests may overlook, particularly in individuals who have learned to compensate successfully enough to pass standard RTS batteries. From a rehabilitation perspective, integrating serial gait and running analyses at 6, 12, and 18 months after ACLR offers a practical and conceptually powerful framework. At approximately 6 months, many individuals remain in a protective biomechanical state characterized by underloading of the surgical limb, reduced knee extensor moments, elevated co-contraction, and cautious locomotor strategies [17].

At this stage, rehabilitation should continue to prioritize graft protection, restoration of quadriceps function, progressive resistive exercise, proprioceptive retraining, and foundational movement quality. Advancement to higher-level functional tasks should be contingent on acceptable clinical stability, adequate ROM, and demonstrable improvement in asymmetry. By 12 months, many athletes appear clinically improved and may subjectively feel ready to return; however, this stage may represent a particularly deceptive phase of recovery. Gait parameters often normalize earlier than running mechanics, and standard strength or hop tests may suggest acceptable progress even while deficits remain in frontal-plane control, knee loading strategy, and neuromuscular timing during more demanding tasks [18].

Accordingly, athletes at this phase should undergo more challenging testing, including running analysis, jump-landing test, unilateral functional tasks, and, if feasible, isokinetic evaluation of residual deficits in quadriceps and hamstring performance. A patient who demonstrates acceptable basic function but persistent compensatory mechanics should not be considered fully ready for unrestricted RTS. After 18 months, most gross biomechanical deficits are expected to improve substantially, particularly in individuals who have completed structured, criteria-based rehabilitation. Nevertheless, subtle impairments may remain in a subset of patients, especially under conditions of speed, fatigue, cutting, or sport-specific unpredictability [18]. These residual deficits may be low but clinically meaningful, particularly with respect to the risk of a second ACL injury and the cumulative joint-loading patterns associated with PTOA. Therefore, RTS testing at later stages should extend beyond laboratory symmetry thresholds and include sport-specific power, repeated-effort performance, reactive control, and movement quality under high-demand conditions.

Based on the mentioned framework detailed in Table 2, we propose that RTS after ACLR should be considered as a continuum rather than a single clearance event. Return to full sport participation should ideally reflect convergence across several dimensions: physician approval, graft and knee stability, adequate ROM, satisfactory patient-reported outcomes, low psychological avoidance, acceptable strength symmetry, restored proprioceptive and balance performance, high-quality movement mechanics, and appropriate sport-specific capacity. In this model, biomechanical analysis of gait and running is not an optional research tool, but a clinically meaningful bridge between the rehabilitation process and the RTS decision-making. A patient may be able to return to sport before they are truly ready to return safely. If walking is normalized but running remains asymmetrical, if hop distance is restored but landing control is poor, or if strength symmetry is acceptable but frontal-plane knee mechanics remain altered, the athlete may return not to sports, but to injury risk. For this reason, clinicians should move beyond time-based milestones and isolated test thresholds toward a more integrated, longitudinal, and biomechanically informed RTS model after ACLR.

Conclusion

We suggest that successful RTS after ACLR is not defined merely by elapsed postoperative time or isolated functional performance, but by the restoration of high-quality, symmetrical, and task-appropriate movement across clinical, neuromuscular, and biomechanical domains.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All ethical principles were considered in this study. This is a systematic review study. No experiments were conducted on human or animal samples. Accordingly, there was no need for an ethical code.

Funding

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

Authors' contributions

Conceptualization, Methodology, and Sources for writing the draft: Leila Sabouri, and Ebrahim Piri; Validation: Ebrahim Piri; Analysis, and Research and review: Leila Sabouri; Editing and finalizing the text: All authors; Visualization: Ebrahim Piri and Makwan JabarAli; Supervision, and Project management: AmirAli Jafarnejadgro.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest.

This Page Intentionally Left Blank

مقاله مروری

یک مدل چند بعدی برای تصمیم‌گیری در مورد بازگشت به ورزش پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی

لیلا صبوری[۱]، ابراهیم پیری[۲،۳]، *امیرعلی جعفرنژادگرو[۲]، مکوان جابر علی[۴]

۱. گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
۲. گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳. گروه پزشکی مولکولی و جراحی، موسسه کارولینسکا، سولنا، سوئد.
۴. گروه تربیت بدنی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه حلبجه، حلبجه، اقلیم کردستان، عراق.

Use your device to scan and read the article online

Citation Saburi L, Piri E, Jafarnezhadgero AA, JabarAli M. A Multidimensional Model for Return to Sport Decision-making After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction.. Archives of Rehabilitation. 2026; 27(1):58-71. https://doi.org/10.32598/RJ.27.1.4128.6

https://doi.org/10.32598/RJ.27.1.4128.6

چکیده

هدف بازگشت به ورزش (RTS)، پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی (ACLR)، معمولاً براساس نقاط عطف زمانی و معیارهای عملکردی جداگانه به‌صورت موفقیت/شکست هدایت می‌شود. بااین‌حال، بسیاری از ورزشکاران در حالی به ورزش بازمی‌گردند که هنوز دچار نقص‌های بیومکانیکی پایدار هستند؛ نقص‌هایی که می‌توانند خطر آسیب مجدد را افزایش داده و در درازمدت به تخریب مفصل منجر شوند.

هدف: این مطالعه دو هدف مدنظر دارد: تلفیق و جمع‌بندی تغییرات وابسته به زمان در بیومکانیک راه‌رفتن و دویدن در ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه پس از ACLR؛ و ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه و چندبعدی برای بازگشت به ورزش؛ که پایبندی به برنامه توانبخشی را با ارزیابی‌های سریالی بیومکانیکی پیوند می‌دهد. هدف ثانویه نیز بررسی انتقادی این موضوع است که آیا فاصله زمانی بین آسیب تا جراحی (ACLR زودهنگام در مقابل تأخیری) می‌تواند بر مسیرهای بازیابی الگوهای حرکتی تأثیر بگذارد یا خیر.

روش بررسی این یک مطالعه مروری سرمقاله‌ای است. شواهد موجود در ادبیات توانبخشی و بیومکانیک ACLR به‌صورت روایتی بررسی شد تا الگوهای بهبود وابسته به نوع تکلیف در راه‌رفتن و دویدن خلاصه شده و محدودیت‌های آزمون‌های متداول بازگشت به ورزش برجسته شود. براساس این جمع‌بندی، دو ابزار کاربردی ارائه می‌شود: جدولی مبتنی بر نقاط عطف که نقص‌های بیومکانیکی راه‌رفتن و دویدن را در ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه پس از جراحی نشان می‌دهد؛ و یک چارچوب چندحوزه‌ای برای ارزیابی آمادگی بازگشت به ورزش که حوزه‌های آمادگی بالینی، آمادگی عملکردی/عصبی-عضلانی، و آمادگی بیومکانیکی را ادغام می‌کند.

یافته‌ها بهبود بیومکانیکی پس از ACLR به نظر می‌رسد غیرخطی و وابسته به نوع تکلیف می‌باشد. پارامترهای راه‌رفتن ممکن است تا حدود ۱۲ ماه به حالت طبیعی نزدیک شوند، درحالی‌که مکانیک دویدن، کنترل صفحه فرونتال، تقارن بارگذاری اندام‌ها و هماهنگی عصبی‌عضلانی می‌توانند فراتر از این زمان همچنان دچار اختلال باقی بمانند. بنابراین ممکن است ورزشکاران در آزمون‌های پرش یا تقارن قدرت «قبول» شوند، درحالی‌که هنوز راهبردهای جبرانی در فرود، کاهش مشارکت عضلات بازکننده زانو، جبران‌های تنه و لگن، یا کم‌بارگذاری پای جراحی‌شده را نشان می‌دهند؛ ویژگی‌هایی که با افزایش خطر آسیب مجدد مرتبط هستند. تحلیل‌های راه‌رفتن و دویدن در ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه می‌تواند به شناسایی زودهنگام راهبردهای محافظتی، آشکارسازی بهبود ظاهری در پیگیری‌های میان‌مدت، و کشف نقص‌های باقی‌مانده در شرایط با تقاضای بالا (مانند سرعت بالا، خستگی و تغییر جهت) کمک کند. همچنین شواهد مربوط به ACLR زودهنگام در مقابل تأخیری همچنان متناقض است که این موضوع ضرورت ارزیابی‌های دقیق‌تر و زمان‌مند را برای مشخص کردن افرادی که از زمان‌بندی‌های مختلف جراحی سود می‌برند، برجسته می‌کند.

نتیجه‌گیری بازگشت موفق به ورزش پس از ACLR باید به‌عنوان یک الگوی پیوسته در نظر گرفته شود، نه یک تصمیم واحد برای اجازه بازگشت. زمان سپری‌شده از جراحی شرطی لازم اما ناکافی است؛ تصمیم‌گیری برای RTS باید وضعیت بالینی، آمادگی روان‌شناختی، بازیابی قدرت و حس‌حرکت، کیفیت حرکت و عملکرد اختصاصی ورزشی را در کنار هم در نظر بگیرد. دراین‌میان، بیومکانیک راه‌رفتن و به‌ویژه دویدن می‌تواند به‌عنوان پلی بالینی و معنادار میان پیشرفت توانبخشی و تصمیم‌گیری ایمن‌تر برای بازگشت به ورزش عمل کند.

کلیدواژه‌ها بازسازی رباط صلیبی قدامی، بازگشت به ورزش، بیومکانیک، راه‌رفتن، دویدن

تاریخ دریافت: ۱۲ آذر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۳ بهمن ۱۴۰۴
تاریخ انتشار: ۱۲ فروردین ۱۴۰۵

* **نویسنده مسئول:**
دکتر امیرعلی جعفرنژادگرو
نشانی: اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، گروه بیومکانیک ورزشی.
تلفن: ۵۱۴۶۲۱۴ (۹۱۰) ۹۸+
رایانامه: amiralijafarnezhad@gmail.com

Copyright © 2026 The Author(s);
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-By-NC: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

مقدمه

پارگی رباط صلیبی قدامی[1] (ACL)، یکی از شایع‌ترین و ناتوان‌کننده‌ترین آسیب‌های ارتوپدی در سراسر جهان است. بروز جهانی این آسیب حدود یک مورد در هر ۳۵۰۰ نفر برآورد شده است که تنها در ایالات متحده آمریکا تقریباً ۹۵ هزار مورد جدید بازسازی رباط صلیبی قدامی[2] (ACLR)، در سال را شامل می‌شود [۱]. نگران‌کننده آن‌که میزان بروز در جمعیت‌های پرخطر به‌ویژه نوجوانان و جوانان ۱۶ تا ۳۹ سال حتی بیشتر است و به حدود ۸۵ مورد در هر ۱۰۰ هزار نفر می‌رسد؛ درحالی‌که استرالیا با ۹۱ مورد در هر ۱۰۰ هزار نفر زیر ۲۵ سال بالاترین میزان بروز جهانی را گزارش کرده است [۲]. باتوجه‌به اینکه این آمار عمدتاً براساس پایگاه‌های داده جراحی به‌دست آمده‌اند، احتمالاً میزان واقعی آسیب ACL به‌مراتب بیشتر است؛ موضوعی که نشان‌دهنده نوعی «اپیدمی ورزشی» در سطح جهان است که همچنان در میان جمعیت‌های ورزشی رو به گسترش می‌باشد [۲].

در ایالات متحده آمریکا سالانه حدود ۶۰ تا ۷۵ هزار جراحی بازسازی ACL انجام می‌شود و نرخ موفقیت بلندمدت آن بین ۷۵ تا ۹۵ درصد گزارش شده است [۱]. بااین‌حال، توانایی بازگشت موفق به ورزش[3] (RTS) پس از ACLR بسیار متغیر بوده و برای بسیاری از بیماران دست‌یافتنی نیست. شواهد نشان می‌دهد درحالی‌که حدود ۸۰ درصد از بیماران به نوعی فعالیت ورزشی بازمی‌گردند، تنها ۶۵ درصد به سطح عملکرد پیش از آسیب خود بازمی‌گردند و تنها ۵۵ درصد موفق به بازگشت به ورزش در سطح رقابتی می‌شوند [۳]. در میان بازیکنان فوتبال، تا ۴۰ درصد پس از آسیب ACL حتی باور ندارند که بتوانند به ورزش خود بازگردند؛ موضوعی که نشان‌دهنده موانع روان‌شناختی و جسمانی قابل‌توجه در مسیر بازگشت موفق به ورزش است [۴]. مهم‌تر اینکه در میان افرادی که به ورزش بازمی‌گردند، نرخ آسیب مجدد همچنان به‌طور نگران‌کننده‌ای بالا است؛ به‌طوری که ۲۳/۵ درصد بیماران دچار آسیب مجدد می‌شوند و ۲۴/۵ درصد به جراحی مجدد نیاز پیدا می‌کنند. این آمارهای نگران‌کننده یک پرسش اساسی را مطرح می‌کند: «چه چیزی بازگشت باکیفیت و پایدار به ورزش را از بازگشتی پرخطر و مستعد آسیب مجدد متمایز می‌کند؟»

مجموعه روبه‌رشدی از مطالعات اجماعی چند عامل کلیدی را به‌عنوان تعیین‌کننده‌های بازگشت موفق به ورزش معرفی کرده‌اند. مطالعه گذشته نگر رباط صلیبی قدامی دلاور- اوسلو[4]، یک اجماع بین‌المللی درباره شش شاخص تعیین‌کننده پیامد موفق پس از آسیب و بازسازی ACL ارائه کرده است: عدم احساس خالی شدن مفصل زانو، بازگشت به مشارکت ورزشی، قدرت عضلات چهارسر و همسترینگ بیش از ۹۰ درصد اندام مقابل سالم، عدم وجود بیش از افیوژن خفیف در مفصل زانو، و نتایج مطلوب گزارش‌شده توسط بیمار [۵]. افزون‌براین، شواهد آینده‌نگر نشان داده‌اند بازگشت زودهنگام به ورزش به‌ویژه پیش از ۹ ماه پس از جراحی می‌تواند خطر آسیب مجدد ACL را تا ۷ برابر افزایش دهد، درحالی‌که به تأخیر انداختن بازگشت به ورزش به‌ازای هر ماه، تا ۹ ماه می‌تواند خطر آسیب مجدد را حدود ۵۰ درصد کاهش دهد.

پیامدهای توانبخشی ناقص یا ناکافی عمیق و طولانی‌مدت هستند. توانبخشی ناکافی، همراه با بازگشت ناآماده به ورزش، نه‌تنها عملکرد ورزشی را محدود می‌کند بلکه خطر آسیب مجدد را نیز به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد [۶]. ناهنجاری‌های پایدار در الگوی راه‌رفتن اغلب حتی در ۶ تا ۱۲ ماه پس از جراحی مشاهده می‌شوند و ممکن است تا ۲ سال یا بیشتر ادامه یابند [۷]. چنین اختلالات بیومکانیکی ازجمله کاهش زاویه اوج فلکشن زانو، کاهش فلکشن زانو و تغییر در تقارن راه‌رفتن نه‌تنها با افزایش خطر آسیب مجدد ACL مرتبط هستند بلکه با شروع زودهنگام استئوآرتریت پس از تروما نیز ارتباط دارند [۷]. به‌طور نگران‌کننده، بیش از ۸۰ درصد از بیماران که تحت ACLR با اتوگرافت تاندون همسترینگ قرار گرفته‌اند، در پیگیری میانگین ۱۵/۶ ساله شواهد رادیوگرافیک استئوآرتریت پس از تروما[5] (PTOA) را نشان می‌دهند [۸].

این سرمقاله یک چارچوب مفهومی جدید معرفی می‌کند که شکاف مهم میان برنامه‌های توانبخشی ساختاریافته و ارزیابی سیستماتیک بیومکانیکی را پر می‌کند. به‌طور مشخص، ما پیشنهاد می‌کنیم تحلیل‌های جامع کینماتیکی و کینتیکی در راه‌رفتن و دویدن در سه نقطه زمانی پس از جراحی ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه ادغام شوند تا مسیر بیومکانیکی بیماران که به پروتکل‌های توانبخشی مبتنی بر معیار پایبند هستند از بیمارانی که چنین پایبندی‌ای ندارند، متمایز گردد؛ درحالی‌که مطالعات متعددی ناهنجاری‌های راه‌رفتن پس از ACLR را توصیف کرده‌اند [۹]، هیچ مطالعه‌ای تاکنون سیر زمانی تغییرات مکانیک حرکت را در ارتباط با میزان پایبندی به توانبخشی ساختاریافته به‌طور سیستماتیک ترسیم نکرده است؛ همچنین هیچ پژوهشی به‌صورت آینده‌نگر پیامدهای بیومکانیکی را براساس زمان انجام جراحی مقایسه نکرده است.

این سرمقاله همچنین به بررسی منحصربه‌فرد رابطه زمانی بین آسیب و جراحی می‌پردازد؛ به‌ویژه اینکه آیا ACLR زودهنگام (کمتر از ۶ هفته پس از آسیب) نسبت به بازسازی تأخیری (بیش از ۶ ماه) مزایای بیومکانیکی ایجاد می‌کند یا اینکه دوره طولانی پیش از جراحی همراه با پری‌هبیلیتیشن

1. Anterior Cruciate Ligament (ACL)
2. Anterior Cruciate Ligament reconstruction (ACLR)
3. Return To Sport (RTS)
4. Delaware-Oslo ACL cohort
5. Post-Traumatic Osteoarthritis (PTOA)

ناکافی به الگوهای نامطلوب پایدار در راه‌رفتن و دویدن منجر می‌شود که سلامت بلندمدت مفصل را به خطر می‌اندازد. شواهد نوظهور نشان می‌دهد ACLR زودهنگام ممکن است در مقایسه با جراحی تأخیری، بهبود بیشتری در حرکت اکستنشن زانو و ممان اکستنشن زانو در هنگام راه‌رفتن در ۱۲ ماه پس از جراحی ایجاد کند [۱۰]. در مقابل، برخی مطالعات گزارش کرده‌اند بیش از ۸۰ درصد از بیماران با جراحی زودهنگام یا تأخیری در پیگیری بلندمدت در نهایت دچار استئوآرتریت پس از تروما می‌شوند و تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها وجود ندارد [۸]. این یافته‌های متناقض نشان‌دهنده نیاز فوری به تحلیل دقیق‌تر و زمان‌محور برای تعیین این است که چه زمانی و برای چه افرادی زمان انجام جراحی واقعاً اهمیت دارد.

براین‌اساس، هدف اصلی این سرمقاله دو جنبه دارد: نخست، ایجاد پیوندی میان پایبندی کامل به توانبخشی و ارزیابی‌های سریالی بیومکانیکی در ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه پس از جراحی؛ و دوم، ارزیابی انتقادی تأثیر فاصله زمانی بین آسیب و جراحی بر مکانیک راه‌رفتن و دویدن. با پیوند دادن فرآیند (کیفیت و پایبندی به توانبخشی) به پیامد (بهبود بیومکانیکی)، این سرمقاله تلاش می‌کند راهنمایی‌های عملی و مبتنی بر شواهدی را برای متخصصان بالینی، جراحان و دانشمندان علوم ورزشی فراهم کند تا مشخص شود نه‌تنها چه زمانی بیمار می‌تواند به ورزش بازگردد، بلکه چگونه باید بازگردد؛ به‌گونه‌ای که کیفیت حرکت، تاب‌آوری و سلامت پایدار مفصل به‌عنوان اهداف نهایی در نظر گرفته شوند.

در ۶ ماه پس از ACLR، بیماران معمولاً الگوهای محافظتی در راه‌رفتن و دویدن نشان می‌دهند؛ با کاهش بارگذاری اندام جراحی‌شده، کاهش ممان اکستنشن زانو، مهار عصبی‌عضلانی قابل‌توجه و عدم تقارن زیاد بین اندام‌ها مشخص می‌شود. در ۱۲ ماه پس از جراحی، بسیاری از پارامترهای زمانی–فضایی مرتبط با راه‌رفتن به مقادیر طبیعی نزدیک می‌شوند؛ بااین‌حال، مکانیک دویدن اغلب همچنان مختل باقی می‌ماند، به‌ویژه از نظر تقارن بارگذاری و کنترل زانو که نشان می‌دهد راه‌رفتن ظاهراً طبیعی ممکن است نقص‌های پایدار در تکالیف با تقاضای بیشتر را پنهان کند. در ۱۸ ماه پس از جراحی، بیومکانیک راه‌رفتن در اغلب افراد تقریباً طبیعی می‌شود و بسیاری از متغیرهای دویدن نیز بهبود قابل‌توجهی نشان می‌دهند؛ هرچند عدم تقارن‌های ظریف به‌ویژه در مکانیک زانو در صفحه فرونتال و کنترل مفصل ران ممکن است در بخشی از بیماران باقی بماند و بالقوه به خطر آسیب مجدد و تخریب بلندمدت مفصل کمک کند [۹]. **جدول شماره ۱** شواهد مبتنی بر زمان را درباره یافته‌های بیومکانیکی پس از ACLR در ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه پس از جراحی خلاصه می‌کند، با تأکید بر عدم تقارن بین اندام‌ها، راهبردهای بارگذاری حرکتی و کنترل عصبی‌عضلانی در راه‌رفتن و دویدن عواملی که نقش مرکزی در کیفیت بازگشت به ورزش و خطر آسیب مجدد دارند.

ادغام بازیابی بیومکانیکی با پروتکل بازگشت به ورزش

اگرچه زمان سپری‌شده از جراحی اغلب به‌عنوان یک معیار عملی در توانبخشی بازسازی رباط صلیبی قدامی استفاده می‌شود، اما زمان به تنهایی معیار کافی برای صدور مجوز بازگشت به ورزش نیست. شواهد خلاصه‌شده در **جدول شماره ۱** نشان می‌دهد بهبودی بیومکانیکی پس از ACLR وابسته به تکلیف و غیرخطی است: مکانیک راه‌رفتن ممکن است تا ۱۲ ماه به حالت طبیعی نزدیک شود، درحالی‌که مکانیک دویدن، کنترل صفحه فرونتال، تقارن بارگذاری اندام و هماهنگی عصبی–عضلانی ممکن است فراتر از این نقطه همچنان مختل باقی بمانند. براین‌اساس، تصمیم‌گیری برای بازگشت به ورزش نباید تنها براساس بهبودی زمانی باشد، بلکه براساس چارچوبی چندبعدی شامل وضعیت گرافت، عملکرد زانو، آمادگی روانشناختی، بازیابی قدرت، کیفیت حرکت و عملکرد ویژه ورزشی است.

یک محدودیت عمده در تصمیم‌گیری معمول برای بازگشت به ورزش، اتکای بیش از حد به معیارهای جداگانه موفقیت/شکست است، به‌ویژه زمانی که این معیارها بدون توجه به استراتژی‌های حرکتی زیربنایی ارزیابی می‌شوند. به‌عنوان‌مثال، یک ورزشکار ممکن است فاصله پرش قابل‌قبول یا شاخص تقارن اندام چهارسر ران را نشان دهد، درحالی‌که همچنان مکانیک فرود تغییر یافته، کاهش مشارکت اکستنسور زانو، حرکت جبرانی تنه، یا بارگذاری ناکافی مداوم اندام جراحی‌شده را از خود نشان می‌دهد. چنین یافته‌هایی تمایز بین بازگشت به مشارکت و بازگشت با آمادگی بیومکانیکی را تقویت می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر، ممکن است به ورزشکار اجازه داده شود که قرار گرفتن در معرض ورزش را از سر بگیرد، درحالی‌که هنوز به گونه‌ای حرکت می‌کند که خطر آسیب مجدد را افزایش می‌دهد و ممکن است آسیب مفصل را در درازمدت تسریع کند [۱۱].

برای رفع این شکاف، پیشنهاد می‌کنیم پروتکل بازگشت به ورزش پس از ACLR در سه حوزه مرتبط با یکدیگر تفسیر شود: آمادگی بالینی، آمادگی عملکردی و عصبی–عضلانی، و آمادگی بیومکانیکی. آمادگی بالینی شامل تأیید پزشک، شواهدی از بهبود کافی گرافت یا بلوغ گرافت در صورت وجود، بازیابی دامنه حرکتی زانو، افیوژن حداقل یا عدم وجود آن، معاینه رباط پایدار، و شلی قابل‌قبول قدامی زانو که با دستگاه‌هایی مانند آرترومتر KT–۱۰۰۰ یا KT–۲۰۰۰ اندازه‌گیری می‌شود [۱۲]. این شاخص‌ها پایه لازم برای پیشرفت را فراهم می‌کنند، اما به تنهایی آمادگی برای فعالیت ورزشی را تأیید نمی‌کنند. آمادگی عملکردی و عصبی–عضلانی باید شامل معیارهای پیامد گزارش‌شده توسط بیمار، تست عملکرد عضلانی، ارزیابی حس عمقی، و وظایف عملکردی با پیشرفت تدریجی باشد [۱۳].

معیارهای خودگزارشی مرتبط شامل مقیاس

جدول ۱. خلاصه تغییرات کلیدی بیومکانیکی راه‌رفتن و دویدن پس از ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه پس از جراحی

تکلیف	ویژگی بیومکانیکی کلیدی	۶ ماه	۱۲ ماه	۱۸ ماه
راه‌رفتن	تقارن زمانی–فضایی	کاهش سرعت راه‌رفتن، کوتاه‌تر شدن طول گام و کاهش زمان اتکای تک‌اندامی روی اندام جراحی‌شده	تا حد زیادی بازگشته، با عدم تقارن خفیف باقیمانده در برخی بیماران	عموماً طبیعی
	مکانیک زانو در صفحه ساژیتال	کاهش دامنه فلکشن و اکستنشن زانو؛ الگوی اجتناب از چهارسر شایع است.	بهبود یافته، هرچند نقص‌های خفیف ممکن است باقی بماند.	در اغلب بیماران نزدیک به طبیعی
	بارگذاری اندام	کاهش محافظتی بار روی اندام جراحی‌شده؛ کاهش نیروی عکس‌العمل عمودی زمین (vGRF) و نرخ بارگذاری	تقارن بارگذاری بهبود می‌یابد.	معمولاً طبیعی
	کنترل صفحه فرونتال / لگن	افت خفیف لگن و تغییر در بارگذاری اداکشن زانو ممکن است وجود داشته باشد	عمدتاً بهبود یافته، هرچند نقص‌های ظریف ممکن است باقی بماند.	تا حد زیادی طبیعی، با ناهنجاری‌های محدود در برخی افراد
	عملکرد عصبی‌عضلانی	مهار عضله چهارسر، افزایش هم‌فعالی همسترینگ و تأخیر در فعال‌سازی گلوتئال	فعال‌سازی عضلانی بهبود یافته، اما بهبودی کامل ممکن است حاصل نشود.	عمدتاً طبیعی
دویدن	تقارن زمانی–فضایی	کوتاه‌تر شدن طول گام، افزایش زمان تماس با زمین و کاهش زمان پرواز	بهبود نسبی، هرچند عدم تقارن ممکن است باقی بماند.	در بیشتر موارد نزدیک به طبیعی
	مکانیک زانو در صفحه ساژیتال	کاهش فلکشن زانو در لحظه تماس و فاز اتکا؛ الگوی فرود سفت و سخت مشهود است	بهبود یافته اما اغلب نسبت به راه‌رفتن همچنان غیرطبیعی	تا حد زیادی بازگشته، با نقص‌های خفیف باقی‌مانده در برخی
	بارگذاری اندام	کاهش بارگذاری اندام جراحی‌شده و اضافه‌بار جبرانی روی اندام مقابل	متقارن‌تر، اما عدم تعادل ظریف بارگذاری ممکن است باقی بماند.	عمدتاً طبیعی
	کنترل صفحه فرونتال	افزایش ممان/زاویه ابداکشن زانو و خم‌شدن جبرانی تنه؛ مرتبط با خطر آسیب مجدد	نقص‌های پایدار ممکن است در بخشی از بیماران باقی بماند.	معمولاً بهبود یافته، اما در شرایط پرفشار ممکن است ناهنجاری‌های ظریف باقی بماند.
	عملکرد عصبی‌عضلانی	کاهش مشارکت چهارسر، افزایش هم‌فعالی همسترینگ و تأخیر در فعال‌سازی گلوتئال	بهبود عصبی‌عضلانی پیشرفت می‌کند، اما ممکن است نسبت به راه‌رفتن عقب‌تر باشد.	در اغلب بیماران عمدتاً طبیعی
کلی	عدم تقارن بین اندام‌ها و ارتباط با RTS	عدم تقارن قابل‌توجه و راهبردهای حرکتی محافظتی شایع است.	راه‌رفتن ممکن است طبیعی به نظر برسد، اما نقص‌های دویدن اغلب باقی می‌ماند.	بیشتر متغیرهای بیومکانیکی بهبود می‌یابند، هرچند عدم تقارن‌های ظریف ممکن است همچنان بر خطر آسیب مجدد و سلامت بلندمدت مفصل تأثیر بگذارد.

vGRF: نیروی عکس‌العمل عمودی زمین

مقیاس بازگشت به ورزش پس از آسیب رباط صلیبی قدامی[6]، نمره کمیته بین‌المللی مدارک زانو[7] (IKDC)، نمره پیامد آسیب زانو و استئوآرتریت[8] (KOOS)، مقیاس فعالیت تگنر، نمره لیزهولم، مقیاس‌های کینزیوفوبیا مانند مقیاس تامپا، معیارهای فعالیت‌های زندگی روزمره، و پرسش‌نامه‌های اختصاصی ورزش در صورت لزوم است [۱۴]. این فاکتورهای ویژه مهم هستند زیرا ترس از آسیب مجدد، اعتمادبه‌نفس پایین، و بی‌ثباتی درک‌شده اغلب حتی زمانی که اختلالات عینی خفیف به نظر می‌رسند، ادامه می‌یابند. بنابراین آمادگی روان‌شناختی یک ملاحظات جانبی نیست، بلکه تعیین‌کننده اصلی بازگشت موفق و پایدار به ورزش است. تست عملکرد عضلانی باید شامل ارزیابی‌های زنجیره حرکتی باز[9] (OKC) و زنجیره حرکتی بسته[10] (CKC) باشد. تست OKC شامل تست دستی عضلات، دینامومتری دستی، تست تمرین مقاومتی پیش‌رونده، و به‌ویژه دینامومتری ایزوکینتیک امکان بررسی مجزاتری از عملکرد چهارسر ران و همسترینگ را فراهم می‌کند [۱۵].

این موضوع به‌ویژه پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی (ACLR) اهمیت دارد، زیرا ضعف ایزوله عضلات چهارسر ران ممکن است در طی فعالیت‌های ترکیبی از طریق راهبردهای جبرانی در مفصل ران، مچ پا یا اندام مقابل پنهان بماند. تست ایزوکینتیک با وجود انتقادات مربوط به ارتباط عملکردی، همچنان ارزشمند باقی می‌ماند، زیرا اطلاعات قابل‌اندازه‌گیری درباره اوج گشتاور، زاویه گشتاور، نامتقارنی قدرت، و در برخی موارد نرخ توسعه

6.ACL-Return to Sport after Injury (ACL-RSI)
7. International Knee Documentation Committee (IKDC)
8. Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS)

9. Open Kinetic Chain (OKC)
10. Closed Kinetic Chain (CKC)

جدول ۲. چارچوب پیشنهادی چندبعدی ارزیابی بازگشت به ورزش پس از ACLR

هدف بالینی	نمونه ارزیابی‌ها	حوزه
تعیین وضعیت پایه‌ای مفصل و ایمنی برای پیشرفت مراحل توانبخشی	تأیید پزشک، بلوغ گرافت در MRI، دامنه حرکتی (ROM)، افیوژن، KT1000/2000، تست لاچمن، Pivot shift	آمادگی بالینی
ارزیابی اعتمادبه‌نفس، علائم، عملکرد و ترس از آسیب مجدد	ACLRSI، IKDC، KOOS، Lysholm، Tegner، مقیاس Tampa	آمادگی گزارش‌شده توسط بیمار/ روان‌شناختی
سنجش تولید نیرو، عدم تقارن و نقص‌های عضلانی اختصاصی	MMT، HHD، تمرین مقاومتی پیش‌رونده (PRE)، تست ایزوتونیک، ایزوکینتیک، RFD	آمادگی قدرت و عصبی‌عضلانی
ارزیابی آگاهی و کنترل دینامیک مفصل	تعادل، حس عمقی، کینستزی، حس موقعیت مفصل	آمادگی حسی‌حرکتی
ارزیابی عملکرد یکپارچه اندام تحتانی	تست‌های پرش، تست‌های هاپ، LEFT، وال اسلاید، Vail Sport Cord test	آمادگی عملکردی
شناسایی الگوهای جبرانی و نقص‌های پنهان حرکتی	تحلیل راه‌رفتن، تحلیل دویدن، کینماتیک، کینتیک	آمادگی بیومکانیکی
تعیین آمادگی برای تقاضاهای اختصاصی ورزش	چابکی، تغییر جهت (Cutting)، تمرین‌های واکنشی، برنامه‌های پیشگیری	آمادگی اختصاصی ورزشی

توانبخشی

MMT: آزمون دستی قدرت عضلانی
HHD: دینامومتر دستی
PRE: تمرین مقاومتی پیش‌رونده
Isotonic: آزمون قدرت ایزوتونیک
Isokinetic: دینامومتری ایزوکینتیک
RFD: نرخ توسعه نیرو
LEFT: آزمون عملکردی اندام تحتانی

ACLR: بازسازی رباط صلیبی قدامی
ROM: دامنه حرکتی
KT1000/KT2000: آرترومترهای زانو برای اندازه‌گیری جابه‌جایی قدامی درشت‌نی
ACLRSI: مقیاس بازگشت به ورزش پس از آسیب
IKDC ،ACL: کمیته بین‌المللی مستندسازی زانو
KOOS: پرسش‌نامه پیامد آسیب زانو و استئوآرتریت
Tampa Scale: مقیاس تامپا برای کینزیوفوبیا

نیرو ارائه می‌دهد. این متغیرها برای بازگرداندن ثبات دینامیکی زانو و کاهش سرعت کنترل‌شده بسیار مرتبط هستند. درمقابل، ارزیابی‌های زنجیره حرکتی بسته (CKC) بیشتر منعکس‌کننده عملکرد هماهنگ اندام تحتانی هستند، زیرا هم‌زمان مفاصل و گروه‌های عضلانی متعددی را به چالش می‌کشند [۱۶]. بااین‌حال، محدودیت تفسیری آن‌ها به همان اندازه مهم است: هنگامی که یک نقص در یک وظیفه CKC تشخیص داده می‌شود، منبع دقیق اختلال ممکن است نامشخص باشد. به همین دلیل، تست‌های مجزا و یکپارچه باید به‌عنوان رویکردهایی مکمل در نظر گرفته شوند، نه رقابتی. بیماری که در یک وظیفه مبتنی بر اسکوات یا پرش عملکرد خوبی دارد، ممکن است هنوز نقص‌هایی در تولید نیروی مجزای چهارسر ران داشته باشد، درحالی‌که دیگری ممکن است قدرت مجزای خوب اما کیفیت حرکتی ضعیفی را در شرایط دینامیک نشان دهد.

بنابراین تست عملکردی باید از موفقیت حرکتی پایه به سمت وظایف ورزشی پیشرفت کند. این پیشرفت ممکن است شامل تست تعادل و حس عمقی، ارزیابی حس حرکتی یا حس موقعیت مفصل، ارزیابی‌های کیفیت حرکت، تست‌های پرش و جامپ، تست عملکردی اندام تحتانی مانند تست عملکردی اندام تحتانی[11] (LEFT)، و درنهایت تست اختصاصی ورزش که در شرایط واقعی انجام می‌شود، باشد. نکته مهم این است که نتایج عملکردی به تنهایی کافی نیستند. اجرای کیفی هر وظیفه نیز باید باتوجه‌به کنترل زانو در صفحه فرونتال، ثبات لگن، راستای تنه، استراتژی فرود، و تقارن بارگذاری بین اندام‌ها ارزیابی شود. اینجاست که تحلیل جنبش‌شناختی سه‌بعدی، تحلیل جنبشی، ارزیابی راه رفتن، و تحلیل دویدن ارزش بالینی قابل‌توجهی ارائه می‌دهند. این روش‌ها می‌توانند نقص‌های باقیمانده‌ای را که تست‌های بالینی معمولی ممکن است نادیده بگیرند، به‌ویژه در افرادی که یاد گرفته‌اند به اندازه کافی موفقیت‌آمیز جبران کنند تا از فاکتورهای استاندارد بازگشت به ورزش عبور کنند، تشخیص دهند.

از دیدگاه توانبخشی، ادغام تحلیل راه‌رفتن و دویدن در ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه پس از ACLR، چارچوبی عملی و از نظر مفهومی قدرتمند ارائه می‌دهد. در حدود ۶ ماه، بسیاری از افراد در وضعیت بیومکانیکی محافظتی باقی می‌مانند که با بارگذاری ناکافی اندام جراحی‌شده، گشتاورهای کاهش‌یافته اکستنسور زانو، انقباض هم‌زمان افزایش‌یافته، و استراتژی‌های حرکتی محتاطانه مشخص می‌شود [۱۷]. در این مرحله، توانبخشی باید به اولویت‌بندی حفاظت از گرافت، بازگرداندن عملکرد چهارسر ران، تمرین مقاومتی پیش‌رونده، بازآموزی حس عمقی، و کیفیت حرکتی بنیادین ادامه دهد. پیشرفت به سمت وظایف عملکردی سطح بالاتر باید منوط به ثبات بالینی قابل‌قبول، دامنه حرکتی کافی، و بهبود قابل‌اثبات در نامتقارنی باشد. تا ۱۲ ماه، بسیاری

11. Lower Extremity Functional Test (LEFT)

از ورزشکاران از نظر بالینی بهبودیافته به نظر می‌رسند و ممکن است به‌طور ذهنی احساس آمادگی برای بازگشت داشته باشند؛ بااین‌حال، این مرحله ممکن است نشان‌دهنده فاز به‌خصوص فریبنده‌ای از بهبودی باشد. پارامترهای راه‌رفتن اغلب زودتر از مکانیک دویدن نرمالیزه می‌شوند، و تست‌های استاندارد قدرت یا پرش ممکن است پیشرفت قابل‌قبولی را نشان دهند، حتی درحالی‌که نقص‌هایی در کنترل صفحه فرونتال، استراتژی بارگذاری زانو، و زمان‌بندی عصبی-عضلانی در طول وظایف پرچالش‌تر باقی می‌ماند [۱۸].

براین‌اساس، ورزشکاران در این مرحله باید تحت تست‌های چالش‌برانگیزتری قرار گیرند، ازجمله تحلیل دویدن، ارزیابی پرش-فرود، وظایف عملکردی یک‌طرفه، و در صورت امکان، ارزیابی ایزوکینتیک نقص‌های باقیمانده در عملکرد چهارسر ران و همسترینگ. بیماری که عملکرد پایه قابل‌قبولی را نشان می‌دهد اما مکانیک جبرانی مداوم دارد، نباید برای بازگشت به ورزش بدون محدودیت کاملاً آماده در نظر گرفته شود. در ۱۸ ماه، انتظار می‌رود اکثر نقص‌های بیومکانیکی درشت به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابند، به‌ویژه در افرادی که توانبخشی ساختاریافته و مبتنی بر معیار را تکمیل کرده‌اند. باوجوداین، ممکن است نقص‌های ظریفی در زیرگروهی از بیماران به‌ویژه در شرایط سرعت، خستگی، برش، یا غیرقابل‌پیش‌بینی بودن اختصاصی ورزش باقی بماند [۱۸].

این نقص‌های باقیمانده ممکن است از نظر بزرگی کوچک بوده اما از نظر بالینی معنادار باشد که احتمال دارد دررابطه‌با خطر آسیب دوم ACL و الگوهای بارگذاری تجمعی مفصل مرتبط با استئوآرتریت پس از سانحه ارتباط نزدیکی داشته باشد. بنابراین، تست بازگشت به ورزش در مراحل بعدی باید فراتر از آستانه‌های تقارن آزمایشگاهی باشد و شامل توان انفجاری اختصاصی ورزش، عملکرد تلاش مکرر، کنترل واکنشی، و کیفیت حرکت در شرایط ورزشی باشد.

براین‌اساس، مطابق با **جدول شماره ۲**، پیشنهاد می‌کنیم بازگشت به ورزش پس از ACLR باید به‌عنوان یک الگوی تمرینی پیوسته در نظر گرفته شود، نه یک رویداد مجوزدهی واحد. ترخیص به مشارکت کامل ورزشی در حالت ایدئآل باید منعکس‌کننده هم‌گرایی در چندین بعد باشد: تأیید پزشک، ثبات گرافت و زانو، دامنه حرکتی کافی، پیامدهای گزارش‌شده توسط بیمار رضایت‌بخش، اجتناب روان‌شناختی کم، تقارن قدرت قابل‌قبول، عملکرد حس عمقی و تعادلی بازسازی‌شده، مکانیک حرکتی با کیفیت بالا، و ظرفیت مناسب اختصاصی ورزش.

در این مدل، تحلیل بیومکانیکی راه‌رفتن و به‌ویژه دویدن نه به‌عنوان یک ابزار تحقیقاتی اختیاری، بلکه به‌عنوان پلی بالینی معنادار بین فرآیند توانبخشی و کیفیت تصمیم‌گیری بازگشت به ورزش عمل می‌کند. در عمل، پیام اصلی واضح است: یک بیمار ممکن است بتواند قبل از اینکه واقعاً برای بازگشت ایمن آماده باشد، به ورزش بازگردد: ۱. اگر راه‌رفتن نرمالیزه شده اما دویدن همچنان نامتقارن باقی بماند، ۲. اگر فاصله پرش بازیابی شده اما کنترل فرود ضعیف باشد، یا اگر تقارن قدرت قابل‌قبول است اما مکانیک زانو در صفحه فرونتال همچنان تغییر یافته باشد، در آن صورت ورزشکار ممکن است نه به عملکرد، بلکه به ریسک بازگردد. به همین دلیل، پزشکان باید از نقاط عطف مبتنی بر زمان و آستانه‌های تست مجزا به سمت یک مدل بازگشت به ورزش یکپارچه‌تر، طولی‌تر، و مبتنی بر بیومکانیک پس از ACLR حرکت کنند.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی، شواهد موجود نشان می‌دهد بازگشت موفقیت‌آمیز به ورزش پس از ACLR صرفاً با زمان سپری‌شده پس از عمل یا عملکرد عملکردی مجزا تعریف نمی‌شود، بلکه با بازگرداندن حرکت با کیفیت بالا، متقارن و متناسب با تکلیف در حوزه‌های بالینی، عصبی-عضلانی و بیومکانیکی تعریف می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مقاله مرور نظام‌مند می‌باشد که بر روی نمونه‌های انسانی و حیوانی انجام نشده است. براین‌اساس نیاز به کد اخلاق نبود و تمام قوانین اخلاق در پژوهش رعایت شده است.

حامی مالی

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

مشارکت نویسندگان

مفهوم‌پردازی، روش‌شناسی، منابع برای نگارش پیش‌نویس: لیلا صابوری و ابراهیم پیری؛ اعتبارسنجی: ابراهیم پیری؛ تحلیل، پژوهش و مرور: لیلا صابوری؛ ویرایش و نهایی‌سازی متن: همه نویسندگان؛ بصری‌سازی: ابراهیم پیری و مکوان جبارعلی؛ نظارت و مدیریت پروژه: امیرعلی جعفرنژادگرو؛

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

[1] Taylor KS, Achar SA. 5 Minute Sports Medicine Consult. Netherlands: Wolters Kluwer Health; 2025. [Link]

[2] Dubé MO, Crossley KM, Bruder AM, Patterson BE, Haberfield MJ, Culvenor AG. Addressing rising knee injury and surgery rates with real-word data; the need for a clinical knee injury registry. JSAMS Plus. 2024; 4:100077. [DOI:10.1016/j.jsampl.2024.100077] [PMID] [PMCID]

[3] Andriolo L, Filardo G, Kon E, Ricci M, Della Villa F, Della Villa S, et ak. Revision anterior cruciate ligament reconstruction: clinical outcome and evidence for return to sport. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2015; 23(10):2825-45. [DOI:10.1007/s00167-015-3702-9] [PMID]

[4] Hållén I, Kvist J, Forssblad M, Sandon A. Return to soccer after anterior cruciate ligament reconstruction: an outcome or a decision? Orthopaedic Journal of Sports Medicine. 2024; 12(12):23259671241295834. [DOI:10.1177/23259671241295834] [PMID] [PMCID]

[5] Lynch AD, Logerstedt DS, Grindem H, Eitzen I, Hicks GE, Axe MJ, et al. Consensus criteria for defining 'successful outcome'after ACL injury and reconstruction: A Delaware-Oslo ACL cohort investigation. British Journal of Sports Medicine. 2015; 49(5):335-42. [DOI:10.1136/bjsports-2013-092299] [PMID] [PMCID]

[6] Bien DP, Dubuque TJ. Considerations for late stage ACL rehabilitation and return to sport to limit re□injury risk and maximize athletic performance. International Journal of Sports Physical Therapy. 2015; 10(2):256-71. [PMID]

[7] Chen S, Gong H, Lyu C, Li K, Shaharudin S. Time to normalization of gait following ACL reconstruction compared with healthy controls: A systematic review and meta-analysis. Gait & Posture. 2026; 123:109972. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2025.109972] [PMID]

[8] Cruz CA, Pruneski JA, McAllister RN, Riopelle D, Bottoni CR. Fifteen-year radiographic follow-up comparison of early versus delayed ACL reconstruction: A retrospective review of a previous prospective randomized clinical trial. Orthopaedic Journal of Sports Medicine. 2024; 12(12):23259671241298753. [DOI:10.1177/23259671241298753] [PMID] [PMCID]

[9] Piri E, Jafarnezhadgero A. Walking and Running Mechanics After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: An Editorial Review. Physical Treatments-Specific Physical Therapy Journal. 2026; 16(2):127-32. [DOI:10.32598/ptj.2026.348.19]

[10] Kono Y, Deie M, Hirata K, Asaeda M, Terai C, Kimura H, et al. Influence of time from injury to surgery on knee biomechanics during walking in patients with anterior cruciate ligament reconstruction. Sports Biomechanics. 2024; 23(12):3112-20. [DOI:10.1080/14763141.2023.2236978] [PMID]

[11] Paterno MV, Schildmeyer C, Thomas S, Kronenberg J, Fitzgerald KG. Booster Visits Assist Return to Sport Progression After ACL Reconstruction: A pilot study: SPL28. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy. 2023; 53(2):38-9. [Link]

[12] Davies GJ, McCarty E, Provencher M, Manske RC. ACL return to sport guidelines and criteria. Current Reviews in Musculoskeletal Medicine. 2017; 10(3):307-14. [DOI:10.1007/s12178-017-9420-9] [PMID] [PMCID]

[13] Voet N, Pater R, Garmendia J, Sistiaga A, Labayru G, Gallais B, et al. Patient-Reported outcome measures in neuromuscular diseases: A scoping review. Journal of Neuromuscular Diseases. 2024; 11(3):567-77. [DOI:10.3233/JND-240003] [PMID] [PMCID]

[14] Kim Y, Kubota M, Sato T, Inui T, Ohno R, Ishijima M. Psychological Patient-reported outcome measure after anterior cruciate ligament reconstruction: Evaluation of subcategory in ACL-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) scale. Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research. 2022; 108(3):103141. [DOI:10.1016/j.otsr.2021.103141] [PMID]

[15] Mulligan T. What are the Effects of Open and Closed Kinetic Chain Exercises on Knee Laxity, Functional Performance, Self-Report Function Questionnaires, and Muscle Strength of ACL Deficient or Reconstructed Patients? A systematic review [Bachelor thesis]. Ohio: Walsh University; 2018. [Link]

[16] Rivera JE. Open versus closed kinetic chain rehabilitation of the lower extremity: a functional and biomechanical analysis. Journal of Sport Rehabilitation. 1994; 3(2):154-67. [DOI:10.1123/jsr.3.2.154]

[17] Piri E, Jafarnezhadgero A, Dehghani M, Sajedi H, Dionisio VC. Effect of foot orthotics on running kinetics in adults with anterior cruciate ligament reconstruction: A controlled laboratory study. Scientific Reports. 2026. [DOI:10.1038/s41598-026-55763-8]

[18] Piri E, Jafarnezhadgero A, Dehghani M, Dionisio VC. Response to fatigue protocol on running ground reaction forces in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction and pronated feet: A cross-sectional observational study. BMC Musculoskeletal Disorders. 2026; 27(1):501. [DOI:10.1186/s12891-026-09876-w] [PMID] [PMCID]