

مکانیک دویدن در افراد با سابقه بازسازی رباط صلیبی قدامی: مطالعه مروری

چکیده

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴ آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

ابراهیم پیری^۱، امیر علی

جعفرنژادگرو^{۱*}، ماکوان جبارعلی^۲

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

۲- گروه تربیت بدنی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه حلبچه، حلبچه، اقلیم کردستان، عراق.

زمینه و هدف: بازسازی رباط صلیبی قدامی یکی از رایج‌ترین جراحی‌های ارتوپدی در بین افراد فعال و ورزشکاران است. علیرغم پیشرفت در تکنیک‌های جراحی و توانبخشی، بسیاری از بیماران تغییرات مداومی در الگوهای حرکتی، به ویژه در طول فعالیت‌های پویا مانند دویدن، نشان می‌دهند. این بررسی روایتی با هدف بررسی جامع تغییرات بیومکانیکی در دویدن پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی، شناسایی عوامل موثر و بحث در مورد چالش‌های فعلی و مسیرهای آینده در توانبخشی انجام شده است.

روش بررسی: یک مطالعه مروری از طریق جستجوی سیستماتیک و غیرسیستماتیک پایگاه‌های داده علمی از جمله PubMed، Scopus، Google Scholar و SID انجام شد. کلمات کلیدی مانند: بازسازی، رباط صلیبی قدامی، بیومکانیک دویدن، تحلیل راه رفتن، بازگشت به ورزش و کنترل عصبی-عضلانی استفاده شد. مطالعات منتشر شده به زبان‌های انگلیسی و فارسی بین سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۴ با تمرکز بر تحقیقات تجربی، بالینی و کیفی مرتبط با بیومکانیک دویدن پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی گنجانده شدند.

یافته‌ها: افراد پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی معمولاً بارگذاری نامتقارن بین اندام‌ها را نشان می‌دهند که با کاهش نیروهای واکنش زمین بر اندام درگیر مشخص می‌شود. تغییرات سینماتیکی شامل کاهش خم شدن ران و افزایش خم شدن زانو در طول تماس اولیه، همراه با کاهش گشتاور باز شدن زانو در طول فشار دادن پا است. تجزیه و تحلیل‌های الکترومیوگرافی نشان‌دهنده فعال‌سازی تاخیری و کاهش فعالیت عضلات چهارسر ران و همسترینگ و همچنین اختلال در کنترل عصبی-عضلانی و حس عمقی است. این انحرافات بیومکانیکی حتی پس از بهبودی بالینی و بازگشت به ورزش نیز ادامه دارند و خطر آسیب مجدد و آرتروز زودرس را افزایش می‌دهند.

نتیجه‌گیری: عدم تقارن‌های بیومکانیکی مداوم و نقص‌های عصبی-عضلانی در طول دویدن پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی شایع هستند و ممکن است سلامت مفاصل و عملکرد ورزشی را در درازمدت به خطر بیندازند. پروتکل‌های توانبخشی فعلی اغلب فاقد معیارهای بیومکانیکی برای بازگشت به ورزش هستند و به طور کافی به اصلاح الگوی حرکتی نمی‌پردازند.

کلمات کلیدی: رباط صلیبی قدامی، ورزشکاران، عدم تقارن حرکتی، بازسازی، توانبخشی، بیومکانیک دویدن.

* نویسنده مسئول: اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی.

تلفن: ۰۴۵-۳۱۵۰۵۲۵۳

E-mail: amiralijafamezhad@gmail.com

مقدمه

کنترل حرکات چرخشی و جلو عقبی تی‌پا نقش حیاتی ایفا می‌کند.^۱ پارگی ACL یکی از شایع‌ترین آسیب‌های ورزشی است که اغلب نیاز به جراحی بازسازی ACL دارد، به ویژه در افراد جوان و فعال.^۲ هدف اصلی از بازسازی ACL، بازگشت فرد به سطح فعالیت پیش از

رباط صلیبی قدامی (Anterior cruciate ligament, ACL)، یکی از مهمترین ساختارهای ثابت‌کننده دینامیکی مفصل زانو است که در

یافته‌ها

تغییرات بیومکانیکی دویدن پس از بازسازی ACL، الف) عدم تقارن بارگذاری و پارامترهای کینماتیکی. افراد پس از بازسازی ACL اغلب تمایل دارند تا بارگذاری را از پای آسیب‌دیده (عمل‌شده) به پای سالم (غیرعمل‌شده) منتقل کنند.^۸

این امر منجر به کاهش نیروی تماس زمین (Grand Reaction Force, GRF) در پای آسیب‌دیده، به ویژه در مولفه عمودی و قدامی-خلفی، می‌شود.^۹ همچنین، تغییراتی در زاویه‌های مفصلی مشاهده می‌شود: - کاهش فلکشن ران: در فاز اولیه تماس پا با زمین، فلکشن ران در پای آسیب‌دیده کمتر از پای سالم است که نشان‌دهنده کاهش جذب ضربه است.^{۱۰} - افزایش فلکشن زانو: برای جبران کاهش فلکشن ران و کاهش بارگذاری، افراد اغلب زانوی خود را بیشتر خم می‌کنند.^{۱۱} - کاهش اکستنشن زانو در فاز هل دادن: این کاهش عملکرد پرش و دویدن را محدود می‌کند.^{۱۲}

ب) تغییرات کینتیکی و فعالیت عضلانی، تحلیل گشتاورهای مفصلی نشان می‌دهد که افراد پس از بازسازی ACL در پای آسیب‌دیده، گشتاورهای کمتری در مفصل ران و زانو تولید می‌کنند.^{۱۳} این کاهش به ویژه در فازهای اولیه تماس و فاز هل دادن مشهود است. ج) الگوی فعالیت الکترومیوگرافی عضلات اطراف زانو تغییر می‌کند: - کاهش فعالیت عضلات چهارسر ران: به ویژه در فاز اولیه تماس. - تاخیر در فعالیت عضلات همسترینگ: این تاخیر می‌تواند تعادل عضلانی را مختل کرده و بار بیشتری را به رباط بازسازی‌شده وارد کند.^{۱۴} - کاهش فعالیت عضلات کواکسیونر داخلی: این عضلات در کنترل حرکت جانبی لگن و پایداری محوری نقش دارند.^{۱۵} تغییرات در کنترل عصبی-عضلانی و حس عمقی، پس از آسیب و جراحی ACL، سیستم حس عمقی مختل می‌شود.^{۱۶} این اختلال منجر به کاهش توانایی بدن در تشخیص موقعیت و حرکت مفصل زانو می‌شود. این امر باعث می‌شود فرد برای جبران این کاهش، از الگوهای حرکتی محافظه کارانه استفاده کند.^{۱۸}

عوامل موثر بر بیومکانیک دویدن، مرحله توانبخشی و زمان از جراحی، بیومکانیک دویدن در مراحل اولیه توانبخشی (مثلاً سه تا شش ماه پس از جراحی) بیشترین تغییرات غیرطبیعی را نشان می‌دهد. با ادامه توانبخشی و گذشت زمان (۹-۱۲ ماه به بعد)،

آسیب، به ویژه در ورزش‌های پویا مانند دویدن، تغییر جهت و پرش است.^۳ با این حال، شواهد متعدد نشان می‌دهند که بسیاری از افراد پس از جراحی، با وجود بهبودی بالینی و بدون علائم درد یا ناپایداری، همچنان از تغییرات پایدار در الگوی حرکتی خود، به ویژه در فعالیت‌های پویا مانند دویدن، رنج می‌برند.^۴

این تغییرات، که اغلب به عنوان "بیومکانیک غیرطبیعی" یا "الگوی حرکتی جبرانی" شناخته می‌شوند، می‌توانند عملکرد ورزشی را محدود کرده و خطر تکرار آسیب ACL یا ایجاد استئوآرتریت زانو را افزایش دهند.^{۶،۵}

در حالی که تحقیقات زیادی بر روی راه رفتن پس از بازسازی ACL متمرکز شده‌اند، دویدن به عنوان یک فعالیت پویاتر و نزدیک‌تر به نیازهای ورزشی، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. دویدن شامل بارگذاری‌های دینامیکی بالاتر، زمان تماس کوتاه‌تر و نیاز به کنترل عصبی-عضلانی دقیق‌تر است که آن را به یک شاخص حساس برای ارزیابی کیفیت بازتوانی تبدیل می‌کند.^۶ این مقاله مروری روایتی، به بررسی جامع تغییرات بیومکانیکی دویدن در افراد با سابقه بازسازی ACL، عوامل موثر بر این تغییرات، چالش‌های موجود در توانبخشی و جهت‌های آینده تحقیقات و عملکرد بالینی می‌پردازد. هدف این است که با شناسایی این تغییرات، راهکارهایی برای بهبود برنامه‌های توانبخشی و کاهش خطر عوارض طولانی مدت ارائه شود.

روش بررسی

این مطالعه به صورت مروری است که با جستجوی سیستماتیک و غیرسیستماتیک در پایگاه‌های علمی معتبر مانند PubMed، Scopus، Google Scholar و SID انجام شده است. کلید واژه‌های اصلی شامل "ACL reconstruction"، "running biomechanics"، "gait analysis"، "return to sport"، "neuromuscular control"، و "rehabilitation" بودند. مقالات مرتبط به زبان انگلیسی و فارسی در بازه زمانی ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۴ انتخاب شدند. معیارهای ورود، مطالعات تجربی، کارآزمایی‌های بالینی، مطالعات موردی و مرورهای سیستماتیک بودند. معیارهای خروج شامل مقالات غیرمرتبط، مطالعات حیوانی و مقالات بدون دسترسی به متن کامل بود. یافته‌ها به صورت موضوعی دسته‌بندی و تحلیل شدند.

فرصت‌ها و روندهای آینده، فناوری‌های نوین در ارزیابی و توانبخشی. - تحلیل بیومکانیکی قابل حمل: استفاده از سنسورهای حرکتی و دوربین‌های هوشمند برای ارزیابی بیومکانیک دویدن در محیط‌های بالینی و ورزشی.^{۲۵} - واقعیت مجازی: ایجاد محیط‌های شبیه‌سازی شده برای تمرین مهارت‌های حرکتی پیچیده.^{۲۶} - هوش مصنوعی: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خطر آسیب و شخصی‌سازی برنامه‌های توانبخشی.^{۲۷}

توانبخشی مبتنی بر بیومکانیک، توسعه پروتکل‌های توانبخشی که به طور سیستماتیک بر اصلاح عدم تقارن و بهبود کنترل عصبی-عضلانی در فعالیت‌های پویا متمرکز هستند.^{۲۸}

رویکرد چندوجهی، ادغام تیم‌های فیزیوتراپی، پزشکی ورزشی، روانشناسی ورزشی و مهندسی پزشکی برای ارائه مراقبت جامع.^{۲۹} نتیجه‌گیری، افراد با سابقه بازسازی رباط صلیبی قدامی اغلب دچار تغییرات پایدار در بیومکانیک دویدن می‌شوند که شامل عدم تقارن بارگذاری، تغییر در زاویه و گشتاور مفصلی و اختلال در فعالیت عضلانی است. این تغییرات، خطر عوارض طولانی‌مدت مانند تکرار آسیب و استئوآرتریت را افزایش می‌دهد. توانبخشی فعلی با چالش‌هایی مانند نبود معیارهای دقیق بازگشت به ورزش و کمبود تمرین‌های اصلاحی مواجه است. آینده این حوزه با استفاده از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی و واقعیت مجازی، امکان شخصی‌سازی و بهبود کیفیت توانبخشی را فراهم می‌کند. برای دستیابی به نتایج بهتر، ضروری است که ارزیابی‌های بیومکانیکی دقیق در تمام مراحل توانبخشی ادغام شود و مداخلاتی طراحی شوند که به‌طور خاص به اصلاح الگوهای حرکتی غیرطبیعی در فعالیت‌های پویا مانند دویدن بپردازند.

بسیاری از پارامترها بهبود می‌یابند، اما در بسیاری از افراد، عدم تقارن و تغییرات کوچکی همچنان باقی می‌ماند.^{۱۹}

نوع گرافت و تکنیک جراحی، شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد نوع گرافت (مثلاً گرافت کندل-تی‌بیا در مقابل گرافت همسترینگ) ممکن است بر عملکرد عضلانی و بیومکانیک تاثیر متفاوتی داشته باشد، هرچند تفاوت‌های بالینی قابل توجهی گزارش نشده است.^{۲۰}

عوامل فردی، عواملی مانند سن، جنسیت، سطح فعالیت ورزشی پیش از آسیب، و انگیزه فرد در توانبخشی، بر میزان بهبودی و بازگشت به الگوی حرکتی طبیعی تاثیرگذار هستند.^{۲۱}

چالش‌های موجود در توانبخشی و بازگشت به ورزش، معیارهای ناکافی بازگشت به ورزش، بسیاری از پروتکل‌های توانبخشی فعلی بر معیارهای بالینی (مثل دامنه حرکتی، قدرت عضلانی و بدون درد بودن) تمرکز دارند، اما از ارزیابی‌های بیومکانیکی دقیق و ورزشکار محور (مثل تحلیل دویدن یا تست‌های تغییر جهت) غافل هستند.^{۲۲} این امر منجر به بازگشت زودهنگام و با خطر بالا به ورزش می‌شود.

کمبود تمرین‌های تخصصی برای اصلاح الگوی حرکتی، برنامه‌های توانبخشی اغلب بر قدرت عضلانی و تحمل قلبی-تنفسی متمرکز هستند، اما تمرین‌های اختصاصی برای اصلاح الگوهای حرکتی غیرطبیعی در دویدن (مثل تمرین‌های فیدبک بیومکانیکی، تمرین‌های حس عمقی پیشرفته و تمرین‌های شبیه‌سازی ورزشی) کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند.^{۲۳}

نبود پیگیری بلندمدت، پیگیری‌های بالینی اغلب پس از بازگشت به ورزش خاتمه می‌یابند، درحالی‌که تغییرات بیومکانیکی و خطر استئوآرتریت می‌تواند سال‌ها بعد ظاهر شود.^{۲۴}

References

- Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part I, mechanisms and risk factors. *Am J Sports Med.* 2006;34(2):299-311.
- Ardern CL, Webster KE, Taylor NF, Feller JA. Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis of the state of play. *Br J Sports Med.* 2011;45(7):596-606.
- Barber-Westin SD, Noyes FR. Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy.* 2011;27(12):1697-1705.
- Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, et al. Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. *Am J Sports Med.* 2010;38(10):1968-1978.
- Logerstedt D, Grindem H, Lynch A, et al. Single-legged hop tests as predictors of self-reported knee function after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2012;42(7):574-582.
- Gustavsson A, Neuman P, Thomeé C, et al. A test battery for measurements of functional performance in patients following ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2006;14(8):772-784.
- Besier TF, Lloyd DG, Cochrane JL, Ackland TR. External loading of the knee joint during running and cutting maneuvers. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(6):1192-1201.

8. Alentorn-Geli E, Myer GD, Silvers HJ, et al. Prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries in soccer players. Part I: Mechanisms and underlying risk factors. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17(7):705-729.
9. Sigward SM, Pollard CD, Powers CM. The influence of sex and maturation on landing biomechanics. *Scand J Med Sci Sports.* 2012;22(5):685-690.
10. Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, Goldberg B, Cholewicki J. Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk: a prospective biomechanical-epidemiologic study. *Am J Sports Med.* 2007;35(7):1123-1130.
11. Schmitt LC, Paterno MV, Hewett TE. Noncontact anterior cruciate ligament injuries: risk factors and prevention strategies. *J Am Acad Orthop Surg.* 2012;20(2):69-78.
12. Ford KR, Myer GD, Toms HE, Hewett TE. Gender differences in the kinematics of unanticipated cutting in young athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(1):124-129.
13. Lepley LK, Gribble PA. Neuromuscular outcomes following bilateral and unilateral anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. *J Athl Train.* 2012;47(5):539-550.
14. Hartigan EH, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Time line for noncopers to pass return-to-activity criteria after primary anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2010;40(3):141-154.
15. Benjaminse A, Welling W, Alferink M, et al. Return to sport after ACL reconstruction: a qualitative review of return-to-sport decision-making criteria. *Orthop J Sports Med.* 2021; 9(1): 2325967120974937.
16. Powers CM, Schmitz RJ, Shroyer JF. Hip- and knee-muscle activation patterns during running in healthy and ACL-reconstructed individuals. *J Athl Train.* 2011;46(6):606-612.
17. Gokeler A, Benjaminse A, Hewett TE, et al. Neuromuscular training techniques to target deficits before return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2013;43(12):829-844.
18. Logerstedt D, Di Stasi S, Grindem H, et al. Self-reported function and knee quality of life are impaired in subjects with unilateral anterior cruciate ligament reconstruction: a cross-sectional evaluation. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2012;42(3):203-213.
19. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC, Ford KR, Hewett TE. Incidence of second ACL injury after pediatric or adolescent ACL reconstruction and return to sport. *Am J Sports Med.* 2014;42(7): 1488-1494.
20. Kvist J, Ek A, Sporrstedt K, Good L. Fear of re-injury: a hindrance for returning to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2005;13(5):393-397.
21. Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, Webster KE. Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: an updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning and contextual factors. *Br J Sports Med.* 2014;48(21):1543-1552.
22. Barber Foss KD, Myer GD, Ford KR, Hewett TE. Favorable changes in lower extremity biomechanics in female athletes after a 6-week neuromuscular training program. *Am J Sports Med.* 2005;33(10):1482-1489.
23. Myer GD, Paterno MV, Ford KR, Hewett TE. Neuromuscular training techniques to target deficits after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Strength Cond Res.* 2008;22(3):983-993.
24. Roos PE, Marshall PWM, Hides JA, Hodges PW. Lumbar multifidus muscle morphology differentiates specific spinal conditions. *Med Sci Sports Exerc.* 2015;47(1):142-149.
25. Schütze DM, Schütze LA, O'Sullivan PB, Straker LM. The effect of real-time biofeedback on movement patterns in people with low back pain: a systematic review. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2018;48(3):165-176.
26. Munoz-Martinez T, Montalvo AM, Myer GD. Virtual reality and augmented reality in sports injury prevention and rehabilitation: a systematic review. *Front Sports Act Living.* 2022; 4:787778.
27. Lee J, Kim S, Kim D, et al. Artificial intelligence-based movement analysis for anterior cruciate ligament injury risk screening: a feasibility study. *Sensors (Basel).* 2022;22(18):6997.
28. Gokeler A, Welling W, Zaffagnini S, et al. Development of a framework for movement pattern analysis (F-MPA) to optimize return to sports decisions after ACL reconstruction: a Delphi study. *Br J Sports Med.* 2021;55(11):607-614.
29. Collins NJ, Misra D, Felson DT, Crossley KM, Roos EM. Measures of knee function: International Knee Documentation Committee (IKDC) Subjective Knee Evaluation Form, Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS), Functional Assessment of Chronic Illness Therapy (FACIT)-Fatigue, Short Form-36 Physical Function Scale (SF-36 PF), and Sports Activity Level Scale (SALS). *Arthritis Care Res (Hoboken).* 2011;63(Suppl 11): S208-S228.

Running mechanics in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction: a review study

Ebrahim Piri Ph.D.¹
Amir Ali Jafarnejadgro Ph.D.^{1*}
Makwan JabarAli Ph.D.²

1- Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2- Department of Physical Education, College of Physical Education and Sport Sciences, University of Halabja, Halabja, Kurdistan Region, Iraq .

* Corresponding author: Department of Physical Education and Sports Sciences, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
Tel: +98-45-31505253
E-mail: amiralijafarnejad@gmail.com

Abstract

Received: 14 Oct. 2025 Revised: 21 Oct. 2025 Accepted: 15 Nov. 2025 Available online: 22 Nov. 2025

Background: Anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) is one of the most common orthopedic surgeries among active individuals and athletes. Despite advances in surgical and rehabilitation techniques, many patients exhibit persistent alterations in movement patterns, particularly during dynamic activities such as running. This narrative review aims to comprehensively examine the biomechanical changes in running following ACLR, identify contributing factors, and discuss current challenges and future directions in rehabilitation.

Methods: A narrative review was conducted through a systematic and non-systematic search of scientific databases including PubMed, Scopus, Google Scholar, and SID. Keywords such as "ACL reconstruction," "running biomechanics," "gait analysis," "return to sport," and "neuromuscular control" were used. Studies published in English and Persian between 1999 and 2025 were included, focusing on experimental, clinical, and qualitative research related to running biomechanics after ACLR.

Results: Individuals after ACLR commonly demonstrate asymmetrical loading between limbs, characterized by reduced ground reaction forces on the involved limb. Kinematic alterations include decreased hip flexion and increased knee flexion during initial contact, along with reduced knee extension torque during push-off. Electromyographic analyses reveal delayed activation and reduced activity of the quadriceps and hamstrings, as well as impaired neuromuscular control and proprioception. These biomechanical deviations persist even after clinical recovery and return to sport, increasing the risk of re-injury and early-onset osteoarthritis.

Conclusion: Persistent biomechanical asymmetries and neuromuscular deficits during running are prevalent after ACLR and may compromise long-term joint health and athletic performance. Current rehabilitation protocols often lack biomechanically informed criteria for return to sport and fail to adequately address movement pattern correction.

Keywords: anterior cruciate ligament, athletes, movement asymmetry, reconstruction, rehabilitation, running biomechanics.

