Sport Medicine Studies, 2026, 18(48): 32.48. DOI: 10.22089/smj.2026.18788.1843

Sport Medicine Studies

Journal hompage: https://smj.ssrc.ac.ir

Original Article

Comparison of the Effects of Eccentric Exercises and Traditional Rehabilitation on Muscle Strength and Single-Leg Balance in the Injured Limb of Elite Athletes after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

Mahdi Shabanzadeh [1], Ali Sharifnezhad*[2], Farhad Tabatabai Ghomshe[3], Kamran Hassani [1]

1. Department of Biomedical Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran;
2. Department of Sport Biomechanics and Technology, Sport Science Research Institute, Tehran, Iran;
3. Department of Pediatric Neurorehabilitation Research Center, Ergonomics Department, Faculty of Rehabilitation Sciences, University of Social Welfare and Rehabilitation Sciences, Tehran, Iran;

Received: 4-Dec-2025 | **Accepted:** 29-Jun-2026 | **Available Online:** 23-Sep-2026

*Corresponding Author: **Ali Sharifnezhad**, E-mail: a.sharifnezhad@ssrc.ac.ir

How to Cite: Shabanzadeh M., Sharifnezhad A., Tabatabai Ghomsheh F., Hassani K. Comparison of the Effects of Eccentric Exercises and Traditional Rehabilitation on Muscle Strength and Single-Leg Balance in the Injured Limb of Elite Athletes after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Studies in Sport Medicine. 2026;18(48): 32.48. (In Persian). https://doi.org/10.22089/smj.2026.18788.1843

Extended Abstract

Background and Purpose

The knee joint, because of its intricate anatomical structure and constant exposure to high mechanical loads, is among the most injury-prone joints, especially in elite athletes. Among knee injuries, anterior cruciate ligament (ACL) rupture holds particular significance as it not only compromises mechanical stability but also disrupts neuromuscular control and proprioception. Through its mechanoreceptors, the ACL transmits vital sensory–motor feedback to the central nervous system, contributing to joint coordination and dynamic stability. However, even after ACL injury or surgical reconstruction, persistent neuromuscular alterations affect both limbs, often impairing athletic performance and increasing the risk of re-injury. Although surgical advances have improved structural restoration, full recovery of neuromuscular and biomechanical function remains challenging. Given the ongoing deficits in muscle strength, coordination, and proprioceptive control, developing rehabilitation strategies that can

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

effectively restore functional symmetry, power, and postural balance is essential. This study aimed to compare the effects of isokinetic eccentric training and traditional rehabilitation on post-ACL reconstruction outcomes.

Methods

This quasi-experimental study recruited thirty elite athletes with a history of unilateral ACL rupture who were at least four months post-reconstruction. Participants were randomly assigned to one of two equal groups: a traditional rehabilitation group and an isokinetic eccentric training group using a Biodex System 4 dynamometer. All subjects had full knee range of motion, were able to walk independently, and had no concomitant injuries to the meniscus or collateral ligaments.The traditional rehabilitation group followed standard physiotherapy routines, including open- and closed-chain strengthening, stretching, and stabilization exercises focused on the quadriceps, hamstrings, and hip stabilizers. The eccentric group performed isolated eccentric contractions of the knee extensors and flexors on the Biodex device three times per week for ten weeks. Training intensity started at 50% of maximal torque and increased progressively by 10% each week until reaching full torque in week five. Each session began with a five-minute cycle ergometer warm-up at 25 watts followed by dynamic stretching.For assessment, maximal isometric peak torque normalized to body weight (PT/BW) and postural balance parameters were measured. Center of pressure (CoP) displacement was recorded using a force platform, and sample entropy (SampEn) values were calculated in the anterior–posterior (AP) and medial–lateral (ML) directions to evaluate postural stability. Data were analyzed using repeated-measures ANOVA with Tukey post hoc comparisons to determine within- and between-group effects over time.

Results

Both groups demonstrated significant increases in peak torque normalized to body weight (PT/BW) following the intervention; however, the isokinetic eccentric training group achieved markedly greater improvements ($p < 0.001$). In knee extension and flexion movements, main effects for group and time, as well as their interaction, were statistically significant. Post hoc Tukey analysis confirmed that although both groups improved from pre- to post-test, the magnitude of change was considerably larger in the eccentric group, highlighting its superior impact on muscle strength recovery.Analysis of postural control variables revealed a more complex pattern. In the eccentric group, despite substantial gains in strength, sample entropy (SampEn) values in the anterior–posterior (AP) direction increased significantly ($p < 0.001$). Given that SampEn reflects the regularity and complexity of center-of-pressure fluctuations, these findings suggest alterations in postural control dynamics rather than a direct deterioration of postural stability. As previously reported, the interpretation of SampEn values is highly dependent on signal processing procedures and should be made with caution. By contrast, the traditional rehabilitation group showed only minor and non-significant changes in SampEn.These findings imply that while eccentric training effectively enhances muscle strength, it may temporarily challenge neuromuscular coordination and stability. The heightened mechanical load and altered contraction patterns inherent to eccentric exercise may require additional time for the nervous system to adapt and refine motor control. This adaptation process could explain the transient decline in balance performance observed immediately following the eccentric training phase.Mechanistically, the improved muscle

strength observed in the eccentric group is likely due to increased mechanical tension, greater recruitment of fast-twitch (Type II) fibers, and enhanced neural drive. Furthermore, eccentric loading may help overcome quadriceps arthrogenic inhibition—commonly seen after ACL injury—thereby restoring more effective neuromuscular activation. Nevertheless, because eccentric protocols emphasize mechanical output rather than sensorimotor feedback, short-term instability may occur during the early adaptation period.

Conclusion

In summary, isokinetic eccentric training produced significantly greater improvements in muscle strength compared with traditional rehabilitation protocols among elite athletes following ACL reconstruction. However, eccentric training alone was not sufficient to enhance postural stability and, in the short term, appeared to increase movement variability, reflecting an ongoing neural adaptation process. Therefore, while eccentric exercises represent a powerful tool for restoring strength, they should be integrated with balance and sensorimotor training to promote comprehensive functional recovery. A combined approach—incorporating eccentric strengthening, proprioceptive challenges, and dynamic balance tasks—may optimize neuromuscular control and reduce the risk of re-injury. Future studies with larger samples, extended follow-up, and advanced motion monitoring are recommended to further clarify the long-term effects of eccentric training on performance and stability following ACL reconstruction.

Key Words: Center of Pressure (CoP), Isokinetic Strength, Peak Torque, Neuromuscular Coordination, Sample Entropy

Article Message

The findings of this study demonstrated that isokinetic eccentric training was more effective than conventional rehabilitation in improving knee extensor and flexor muscle strength in elite athletes following anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR). However, changes in center-of-pressure sample entropy indicated that improvements in muscle strength do not necessarily correspond to complete restoration of postural control and balance function. These findings suggest that recovery after ACLR is a multidimensional process, and that simultaneous assessment of muscular performance and postural control may provide a more comprehensive understanding of functional recovery. From a clinical perspective, isokinetic eccentric training may represent an effective strategy for enhancing functional strength in elite athletes; however, return-to-sport decisions should not be based solely on strength-related outcomes. Rather, multiple functional and biomechanical criteria should be considered when evaluating rehabilitation progress and readiness to return to sport following ACL reconstruction.

Ethical Considerations

This study was approved by the Ethics Committee of Islamic Azad University–Science and Research Branch (Approval No. IR.IAU.SRB.REC.1402.009) and conducted in accordance with the ethical standards of the 1964 Declaration of Helsinki and its later amendments or comparable ethical standards.

Authors' Contributions

Conceptualization: Ali Sharifnezhad
Data Collection: Mahdi Shabanzadeh
Data Analysis: Mahdi Shabanzadeh
Manuscript Writing: Kamran Hassani
Review and Editing: Farhad Tabatabai Ghomshe
Responsible for funding: Ali Sharifnezhad
Literature Review: Ali Sharifnezhad
Project Manager: Mahdi Shabanzadeh
Any other Contributions: Mahdi Shabanzadeh

Conflict of Interest

(The authors declare that there are no financial or non-financial conflicts of interest related to this work.

Acknowledgments

The authors would like to thank all the rehabilitation clinic staff who assisted with data collection and the patients who generously participated in this study. Furthermore, the authors used ChatGPT (OpenAI, 2024) for assistance with English translation and editing of the manuscript. All final wording and scientific content are the sole responsibility of the authors.

مطالعات طب ورزشی، تابستان ۱۴۰۵، دوره ۱۸، شماره ۴۸، صص ۴۸-۳۲ DOI: 10.22089/smj.2026.18788.1843

Sport Medicine Studies

Journal hompage: https://smj.ssrc.ac.ir

مقاله پژوهشی

مقایسه اثر تمرینات اکسنتریک و توان‌بخشی سنتی بر قدرت عضلانی و تعادل تک‌پا در پای آسیب‌دیده ورزشکاران نخبه پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی

سید مهدی شعبان زاده[۱]، علی شریف نژاد*[۲]، فرهاد طباطبایی قمشه[۳]، کامران حسنی[۴]

۱. گروه مهندسی پزشکی، دانشکده علوم و فناوری‌های پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲. گروه بیومکانیک و فناوری ورزشی، پژوهشگاه تربیت بدنی و علوم ورزشی، تهران، ایران

۳. گروه مرکز تحقیقات توانبخشی اعصاب اطفال، گروه ارگونومی، دانشکده علوم توانبخشی، دانشگاه علوم توانبخشی و سلامت اجتماعی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

*نویسنده مسئول: **علی شریف نژاد**، ایمیل: a.sharifnezhad@ssrc.ac.ir

How to Cite: Shabanzadeh M., Sharifnezhad A., Tabatabai Ghomsheh F., Hassani K. Comparison of the Effects of Eccentric Exercises and Traditional Rehabilitation on Muscle Strength and Single-Leg Balance in the Injured Limb of Elite Athletes after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Studies in Sport Medicine. 2026;18(48): 32.48. (In Persian). https://doi.org/10.22089/smj.2026.18788.1843

چکیده

هدف: آسیب رباط صلیبی قدامی (ACL) با ایجاد اختلال در ثبات مکانیکی و کنترل عصبی–عضلانی زانو، بازگشت ورزشکاران نخبه به سطح عملکرد پیشین را با چالش مواجه می‌کند. با توجه به نقش کلیدی قدرت عضلانی و تعادل در موفقیت بازتوانی پس از بازسازی ACL، هدف این مطالعه، مقایسه اثر تمرینات اکسنتریک و توان‌بخشی سنتی بر قدرت عضلانی و تعادل تک‌پا در پای بازسازی‌شده ورزشکاران نخبه بود

مواد و روش‌ها: این مطالعه نیمه‌تجربی روی ۳۰ ورزشکار نخبه که حداقل چهار ماه از جراحی بازسازی ACL آنان گذشته بود، انجام شد. شرکت‌کنندگان به صورت تصادفی در دو گروه مستقل تمرینات اکسنتریک و توان‌بخشی سنتی قرار گرفتند و به مدت ۱۰ هفته، سه جلسه در هفته، تحت مداخله قرار گرفتند. قدرت عضلات چهارسران و همسترینگ با دستگاه Biodex و شاخص‌های تعادل تک‌پا شامل نوسان و سرعت مرکز فشار (CoP sway) و (CoP velocity) با فورس‌پلیت ارزیابی شدند.

یافته‌ها: برای مقایسه ویژگی‌های اولیه دو گروه از آزمون t مستقل و برای بررسی تغییرات در طول زمان از تحلیل واریانس با اندازه‌گیری مکرر در سطح معناداری $p<0.05$ استفاده شد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که هر دو برنامه تمرینی موجب بهبود معنادار قدرت عضلانی و تعادل شدند، اما گروه تمرینات اکسنتریک افزایش بیشتری در گشتاور اوج عضلات و بهبود تقارن بین اندام بازسازی‌شده و سالم نشان داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تمرینات اکسنتریک در مقایسه با توان‌بخشی سنتی، رویکرد مؤثرتری برای ارتقای قدرت عضلانی و بهبود تعادل تک‌پا در ورزشکاران نخبه پس از بازسازی ACL هستند

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

واژگان کلیدی: مرکز فشار، قدرت ایزوکینتیک، گشتاور اوج، هماهنگی عصبی-عضلانی، آنتروپی نمونه.

مقدمه

مفصل زانو به دلیل ساختار آناتومیکی و قرار گرفتن درمعرض نیروهای مکانیکی شدید، یکی از شایع‌ترین مفاصل در معرض آسیب‌های ورزشی به‌ویژه پارگی رباط صلیبی قدامی (ACL) است (۱). این رباط علاوه‌بر نقش مکانیکی در پایداری زانو، از طریق گیرنده‌های مکانیکی خود، ورودی‌های حسی–حرکتی ارزشمندی را به سیستم عصبی مرکزی منتقل می‌کند و در کنترل عصبی–عضلانی مفصل نقش کلیدی دارد (۳، ۲).

ورزشکاران نخبه به دلیل انجام حرکات چرخشی و پرتنش در ورزش‌های رقابتی، درمعرض خطر بیشتری برای پارگی ACLهستند (۴). آسیب به این رباط نه‌تنها پایداری مکانیکی را مختل می‌کند، بلکه موجب کاهش بازده عصبی–عضلانی و حس عمقی نیز می‌شود (۶، ۵). شواهد نشان می‌دهند که حتی پس از جراحی بازسازی ACL ، تغییرات عملکردی و عصبی در هر دو اندام (آسیب‌دیده و سالم) باقی می‌مانند و بر عملکرد کلی فرد تأثیر می‌گذارند (۹-۷).

با وجود موفقیت جراحی در بازگرداندن ثبات مکانیکی، بازسازی کامل عملکرد عصبی-عضلانی و بیومکانیکی در ورزشکاران نخبه همچنان چالش‌برانگیز است (۱۰). مطالعات گزارش کرده‌اند که ضعف درخورتوجه در عضلات چهارسر و همسترینگ (بیش از ۲۰ درصد)، الگوهای حرکتی نامتقارن و افزایش هم‌انقباضی عضلات ازجمله عواملی هستند که خطر آسیب مجدد و کاهش عملکرد ورزشی را افزایش می‌دهند (۱۳-۱۱). این ضعف‌ها معمولاً ناشی از ترکیبی از آتروفی عضلانی، کاهش تحریک عصبی و وابستگی بیش از حد به بازخورد بصری به جای پروپریوسپشن[1]است (۱۵، ۱۴). همچنین کاهش گشتاور اکستنسوری زانو حتی تا دو سال پس از جراحی نیز مشاهده می‌شود (۱۶).

برنامه‌های توان‌بخشی پس از بازسازی ACL با هدف بازگرداندن قدرت، تعادل و کنترل عصبی–عضلانی طراحی می‌شوند (۱۷)؛ با این حال، پروتکل‌های سنتی اغلب قادر به بازتولید چالش‌های مکانیکی و عصبی موجود در حرکات ورزشی واقعی نیستند و ممکن است در ایجاد تغییرات پایدار در الگوی فعال‌سازی عضلات ناکام بمانند (۱۹، ۱۸). در این میان، تمرینات اکسنتریک (برون‌گرا) به‌عنوان رویکرد مؤثرتری برای بازیابی عملکرد عضلانی و کنترل پاسچر مطرح شده‌اند (۲۰). تمرینات اکسنتریک به‌دلیل توانایی ایجاد تنش بیشتر بر واحدهای حرکتی و تحریک انطباق‌های طولی عضلانی، باعث افزایش قدرت، بهبود نرخ تولید نیرو[2]و بهینه‌سازی پاسخ‌های عصبی–عضلانی می‌شوند (۲۲، ۲۱). این ویژگی‌ها می‌توانند به بهبود ثبات دینامیکی زانو و کاهش خطر آسیب مجدد کمک کنند (۲۳). از سوی دیگر، توان‌بخشی سنتی با تمرکز بر حرکات کانسنتریک، تمرینات تعادلی پایه و تمرینات زنجیره بسته حرکتی، نقش مهمی در فاز اولیه بازتوانی دارد، اما ممکن است در بازسازی کامل تقارن عملکردی بین دو اندام محدودیت‌هایی داشته باشد (۲۴). ازآنجاکه تعادل و قدرت عضلانی از شاخص‌های کلیدی بازگشت به ورزش محسوب می‌شوند، بررسی اثرات نسبی تمرینات اکسنتریک و سنتی بر این متغیرها می‌تواند به بهینه‌سازی پروتکل‌های بازتوانی کمک کند (۲۵)؛ بنابراین هدف مطالعه حاضر مقایسه اثر تمرینات

۱ Proprioception

۲ Rate of Force Development

اکسنتریک و توان‌بخشی سنتی بر قدرت عضلانی و تعادل تک‌پا در پای سالم و بازسازی‌شده ورزشکاران نخبه پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی بود.

روش پژوهش

روش پژوهش در این مطالعه نیمه‌تجربی، حجم نمونه با استفاده از نرم‌افزار G*Power نسخه ۳,۱ و براساس طرح تحلیل واریانس با اندازه‌گیری مکرر (دو گروه × دو زمان) محاسبه شد. با در نظر گرفتن اندازه اثر (Effect size=۰/۲۵)، سطح معناداری (α=۰/۰۵) و توان آزمون (β=۰/۸۵ - ۱)، حداقل حجم نمونه موردنیاز ۳۰ نفر برآورد شد؛ بر این اساس، ۳۰ ورزشکار نخبه دارای پارگی یک‌طرفه رباط صلیبی قدامی (ACL) که حداقل چهار ماه از جراحی بازسازی رباط صلیبی قدامی (ACLR) آن‌ها گذشته بود، داوطلبانه وارد مطالعه شدند. تمامی شرکت‌کنندگان پیش از ورود به مطالعه، فرم رضایت‌نامه آگاهانه را امضا کردند. پژوهش حاضر دارای تأییدیه کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران با کد اخلاق IR.IAU.SRB.REC.1402.009 بود. پس از اعمال معیارهای ورود و خروج، شرکت‌کنندگان به صورت تصادفی و با نسبت تخصیص ۱:۱ در دو گروه پانزده‌نفری شامل گروه توان‌بخشی سنتی و گروه تمرینات اکسنتریک قرار گرفتند. تمرینات اکسنتریک به‌وسیله داینامومتر آیزوکینتیک Biodex System 4 Pro اجرا شدند.

ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و آنتروپومتریک شرکت‌کنندگان در جدول (۱) ارائه شده است. معیارهای ورود شرکت‌کنندگان به مطالعه عبارت بودند از: ورزشکار نخبه با پارگی یک‌طرفه رباط صلیبی قدامی و گذشت حداقل چهار ماه از جراحی بازسازی رباط صلیبی قدامی (ACLR)؛ سن ۱۸ تا ۳۵ سال؛ توانایی راه رفتن مستقل بدون استفاده از وسایل کمکی و برخورداری از دامنه حرکتی کامل مفصل زانو؛ نبود آسیب درخورتوجه هم‌زمان در مینیسک یا رباط‌های جانبی که نیازمند مداخله جراحی یا محدودیت عملکردی باشد؛ نبود اختلالات عصبی، وستیبولار یا بینایی مؤثر بر تعادل؛ استفاده نکردن از بریس یا سایر وسایل حمایتی حین انجام آزمون‌ها و تمرینات؛ رضایت آگاهانه برای شرکت در مطالعه. همچنین معیارهای خروج شرکت‌کنندگان از مطالعه عبارت بودند از: حضور نداشتن در بیش از ۱۰ درصد جلسات تمرینی؛ بروز آسیب مجدد یا هرگونه آسیب اسکلتی‌عضلانی جدید در طول مطالعه؛ تشدید درد یا تورم زانو به‌گونه‌ای که ادامه تمرینات را محدود کند؛ مصرف داروها یا انجام مداخلات درمانی مؤثر بر عملکرد عصبی‌عضلانی و تعادل؛ انصراف داوطلبانه شرکت‌کننده از ادامه همکاری در هر مرحله از پژوهش (۲۶).

جدول ۱- ویژگی‌های جمعیت‌شناختی ورزشکاران نخبه مبتلا به آسیب رباط صلیبی قدامی در دو گروه مطالعه (میانگین±انحراف معیار)
(مقادیر p حاصل از آزمون t مستقل هستند)

Table 1- Baseline demographic characteristics of athletes with anterior cruciate ligament injury in the two study groups (Mean ± SD)

(p-values were obtained using independent t-tests)

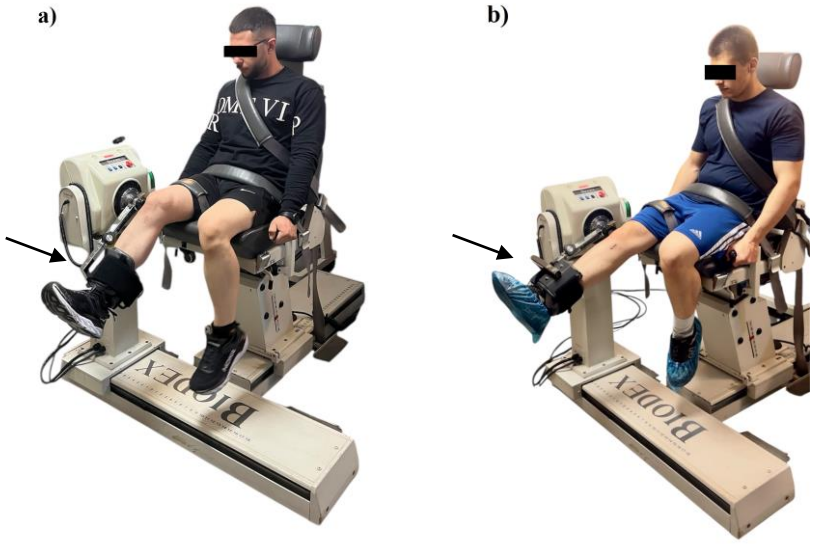
ویژگی گروه‌ها Group characteristics	گروه توان‌بخشی سنتی (n=15) (انحراف معیار ± میانگین) Conventional rehabilitation group (n=15) (Mean±SD)	گروه اکسنتریک آیزوکینتیک (n=15) (انحراف معیار ± میانگین) Eccentric isokinetic group (n=15) (Mean±SD)	p-value

سن Year	23.20±5.60	24.20±5.50	0.626
قد cm	173.71±4.96	173.11±6.24	0.773
وزن kg	81.02±14.87	86.80±14.12	0.284
شاخص توده بدنی kg/m^2	26.74±3.83	28.55±3.20	0.171

۱) گروه توان‌بخشی سنتی: شرکت‌کنندگان این گروه تحت برنامه توان‌بخشی رایج خود، مطابق با نظر فیزیوتراپیست یا پزشک معالج قرار گرفتند. برنامه شامل تمرینات باز و بسته زنجیره حرکتی، حرکات کششی و تقویتی برای عضلات چهارسر، همسترینگ و عضلات ثبات‌دهنده لگن بود. شدت تمرین براساس تحمل فرد و قضاوت بالینی درمانگر تنظیم شد. اهداف این پروتکل، بهبود قدرت عضلانی، هماهنگی عصبی–عضلانی و پایداری دینامیک زانو بود (۲۷).

۲) گروه تمرین اکسنتریک ایزوکینتیک: شرکت‌کنندگان این گروه از دستگاه داینامومتر آیزوکینتیک بایودکس (Biodex System 4Pro) برای تمرین اکسنتریک خالص عضلات اکستنسور[۱] و فلکسور[۲] زانو (همسترینگ[۳] و کوادریسپس[۴]) استفاده کردند. شرکت‌کنندگان پنج ست در هر جلسه، سه بار در هفته، به مدت ۱۰ هفته انجام دادند. ابتدا عضلات کوادریسپس در حالت فلکشن زانو (سرعت ۱۸۰ درجه/ثانیه) و سپس همسترینگ در حالت اکستنشن زانو با همان سرعت تحت بار اکسنتریک قرار گرفتند. بار تمرینی از ۵۰ درصد حداکثر گشتاور در هفته اول آغاز شد و به صورت تدریجی ۱۰ درصد در هر هفته افزایش یافت تا در هفته پنجم به حداکثر گشتاور رسید. بین هر ست ۵ دقیقه استراحت در نظر گرفته شد. انتخاب پارامترهای تمرین اکسنتریک ازجمله سرعت زاویه‌ای و بارگذاری تدریجی، براساس شواهد موجود در مطالعات بیومکانیکی و تمرینات مقاومتی اکسنتریک صورت گرفت که اثر بار، سرعت و طول عضله را بر سازگاری‌های عضلانی نشان داده‌اند (۲۸). داده‌های پیش‌آزمون و پس‌آزمون با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی پردازش شدند.

۱. Extensor
۲. Flexor
۳. Hamstring
۴. Quadriceps



شکل ۱- تمرین ایزوکینتیک برونگرا روی دستگاه ایزوکینتیک بایودکس: تمرین برونگرا برای هر دو گروه عضلانی همسترینگ و چهارسران در شرایط a) حرکت فلکشن زانو و b) حرکت اکستنشن زانو انجام شد.

Figure 1- Eccentric Isokinetic Training on the Biodex isokinetic machine: Eccentric exercise was performed for both hamstring and quadriceps muscle groups in a) toward and b) away movement conditions.

پیش از آزمایش، شرکت‌کنندگان با استفاده از ارگومتر دوچرخه (Cybex Inc) با مقاومت ۲۵ وات به مدت ۵ دقیقه گرم‌کردند و سپس حرکات کششی دینامیکی برای عضلات همسترینگ و چهارسر انجام دادند. سرعت بهینه راه‌رفتن از طریق تست ۱۰ متری با ثبت زمان و محاسبه حداکثر سرعت تعیین شد (۲۹).

ارزیابی حداکثر فعالیت الکتریکی و قدرت ایزومتریک عضلات چهارسران و همسترینگ با دینامومتر ایزوکینتیک (Biodex Medical Systems) در وضعیت نشسته و زاویه لگن ۸۵ درجه فلکسور هیپ ارزیابی شد. کمربندهای تثبیت‌کننده برای جلوگیری از حرکات اضافی استفاده شدند و محور دستگاه با کوندیل فمورال جانبی هم‌تراز شد. حداکثر گشتاور ایزومتریک در زوایای ۲۵ تا ۱۰۰ درجه زانو (با افزایش ۱۰ درجه‌ای) برای عضلات کوادریسپس و همسترینگ اندازه‌گیری شد. بارگذاری براساس حداکثر انقباض آیزومتریک تنظیم شد تا امکان اجرای تمام تکرارها فراهم شود (۲۸).

ثبت جابه‌جایی مرکز فشار (CoP) در حالت ایستادن تک‌پا (۶۰ ثانیه) با فرکانس ۱۰۰ هرتز توسط پلتفرم نیرویی (AMTI)اندازه‌گیری شد (۳۰). شاخص‌های تقارن نیروی عکس العمل زمین (GRF[۱]) در طول کل فاز ایستایی تحلیل شدند (۳۱). در فرایند آشنایی، دستورالعمل‌های کلامی استاندارد ارائه شد و چندین تلاش تمرینی زیرحداکثری انجام شد. استراحت ۶۰ ثانیه‌ای بین ست‌ها برای پیشگیری از خستگی در نظر گرفته شد. بازخورد بصری از گشتاور ثبت‌شده برای اطمینان از حداکثر تلاش شرکت‌کنندگان ارائه شد

۱. Ground Reaction Force

مقادیر آنتروپی نمونه (SampEn) و نسبت حداکثر گشتاور اوج به وزن بدن (PT/BW) برای عضلات همسترینگ و چهارسرران در هر شرکت‌کننده محاسبه شد. به‌منظور حذف اثر تفاوت‌های آنتروپومتریک، مقادیر گشتاور اوج نسبت به وزن بدن نرمال‌سازی شدند. تغییرات متغیرها در دو گروه و در دو زمان (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) بررسی شد. برای ارزیابی اثر زمان، گروه و برهم‌کنش زمان × گروه، از تحلیل واریانس با اندازه‌گیری مکرر[۲] استفاده شد. جزئیات مربوط به الگوریتم محاسبه آنتروپی نمونه (SampEn) در مطالعات پیشین به‌طور کامل گزارش شده است (۳۲). این راهنما قبلاً برای بررسی دینامیک‌های مرکز فشار (CoP) در وظایف مختلف ایستایی استفاده شده است (۳۵-۳۲). پردازش داده‌های Force plate با فیلتر پایین گذر ۲۰ هرتز با مرتبه چهارم برای ایجاد یک پوشش خطی انجام شد (۳۶).

هش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش روش پژوهش

نتایج

نرخ پیک گشتاور به وزن بدن در حرکات اکستنشن (بازشدن) و فلکشن (خم شدن) زانو را بین دو گروه مستقل، قبل و بعد از مداخله (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) بررسی شد. گروه‌های ۱ و ۲ نرمال بودند (p>۰/۰۵). در اکستنشن زانو، تفاوت بین گروه‌ها (F=۱۸/۴۵ ،p<۰/۰۰۱)، بین پیش‌آزمون و پس‌آزمون (p=۰/۰۰۲ ،F=۹/۱۲) و اثر تعاملی گروه و زمان معنادار بود (p=۰/۰۲ ،F=۵/۶۷). همچنین در فلکشن زانو تفاوت بین گروه‌ها (p<۰/۰۰۱ ،F=۱۵/۶۷)، بین پیش‌آزمون و پس‌آزمون (p=۰/۰۰۲ ،F=۸/۴۵) و اثر تعاملی گروه و زمان معنادار بود (p=۰/۰۲ ،F=۵/۲۳). در بررسی تفاوت‌ها با آزمون توکی، در گروه‌های ۱ و ۲، تفاوت معناداری بین پیش‌آزمون و پس‌آزمون مشاهده شد (p<۰/۰۰۱). همچنین تفاوت بین گروه‌ها معنادار بود (p<۰/۰۵). به طور کلی، مداخله انجام‌شده بر نرخ پیک گشتاور زانو در هر دو گروه تأثیر معنادار داشت، اما میزان تغییرات در گروه‌ها متفاوت بود و گروه ۲ بیشترین بهبود را تجربه کرد.

جدول ۲- میانگین و انحراف معیار نسبت حداکثر گشتاور اوج به وزن بدن در قدرت ایزوکینتیک عضلات بازکننده و خم‌کننده زانو در ورزشکاران نخبه پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی

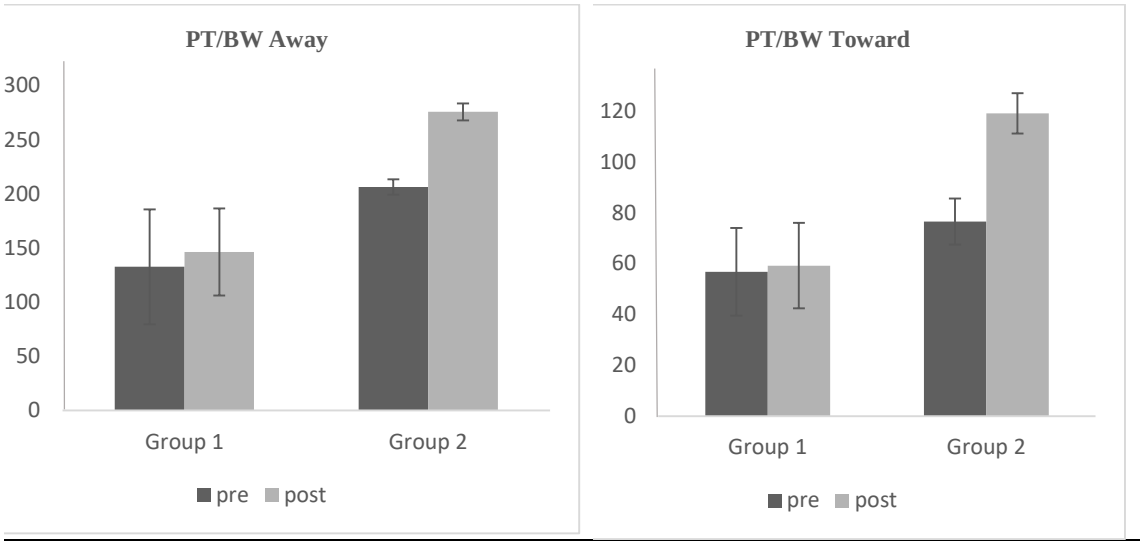
Table 2. Mean ± SD of peak torque-to-body weight ratios for isokinetic knee extensor and flexor strength in elite athletes after anterior cruciate ligament reconstruction

گروه Group	زمان Time	اکستنشن زانو (بازکننده) (انحراف معیار ± میانگین) Knee extension (extensor) (Mean ± SD)	فلکشن زانو (خم‌کننده) (انحراف معیار ± میانگین) Knee flexion (flexor) (Mean ± SD)
گروه توان‌بخشی سنتی (گروه ۱) Conventional rehabilitation group (Group 1)	پیش‌آزمون Pre-test	132.74 ± 40.21	56.74 ± 16.80
گروه توان‌بخشی سنتی Conventional rehabilitation group	پس‌آزمون Post-test	146.40 ± 53.07	59.17 ± 17.23
گروه تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک (گروه ۲)	پیش‌آزمون	206.35 ± 7.74	76.50 ± 7.93

۱. Sample Entropy

۲. Repeated Measures ANOVA

		Pre-test	Eccentric isokinetic training group (Group 2)
119.00 ± 9.04	275.70 ± 7.08	پس‌آزمون Post-test	گروه تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک Eccentric isokinetic training group
گروه توان‌بخشی سنتی = گروه ۱؛ گروه تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک = گروه ۲؛ مقادیر به صورت میانگین و انحراف معیار گزارش شده‌اند. پیش‌آزمون = قبل از مداخله؛ پس‌آزمون = بعد از مداخله			
Values are presented as mean ± standard deviation. Pre-test = before intervention; post-test = after intervention. Conventional rehabilitation group = Group 1; eccentric isokinetic training group = Group			



شکل ۲- میانگین و انحراف معیار مقادیر پارامتر PT/BW در دو گروه مختلف در شرایط پیش‌آزمون و پس‌آزمون

(گروه ۱ = توان‌بخشی سنتی؛ گروه ۲ = تمرین ایزوکینتیک برون‌گرا)

Figure 2- Mean Value with SDs of PT/BW parameter across three different groups under pre-test and post-test conditions

(Group1= Conventional rehabilitation; Group2= Eccentric Isokinetic Training)

آنتروپی قدامی-خلفی

تحلیل واریانس مکرر تفاوت معنادار بین گروه‌ها ($F(۲،۱۸)=۱۳/۲۱$ ،$p<۰/۰۰۱$)، زمان‌های پیش‌آزمون و پس‌آزمون ($F(۱،۱۸)=۷/۸۹$ ،$p=۰/۰۰۳$) و اثر تعاملی گروه-زمان ($F=۵/۱۲$ ،$p=۰/۰۲$) را نشان داد. در گروه ۲ (داده‌های غیرنرمال) تفاوت معنادار بین دو زمان با آزمون فریدمن ($\chi^2=۱۱/۵۶$ ، $p=۰/۰۱$) مشاهده شد. در بررسی با آزمون توکی تفاوت معنادار درون گروهی ($p<۰/۰۰۱$) برای همه گروه‌ها و بین‌گروهی ($p<۰/۰۵$) مشاهده شد.گروه ۲ بیشترین افزایش نامطلوب در آنتروپی AP[۱] را نشان داد ($p<۰/۰۰۱$)، که نشان‌دهنده کاهش ثبات پاسچرال در جهت

۱ Anterior-Posterior

قدامی-خلفی است. گروه ۱ کمترین تغییر را تجربه کرد (p۰/۰۸=). می‌توان نتیجه گرفت که افزایش پارامتر در همه گروه‌ها (برخلاف هدف کاهش)، نشان‌دهنده اثر نامطلوب مداخله در این شاخص است.

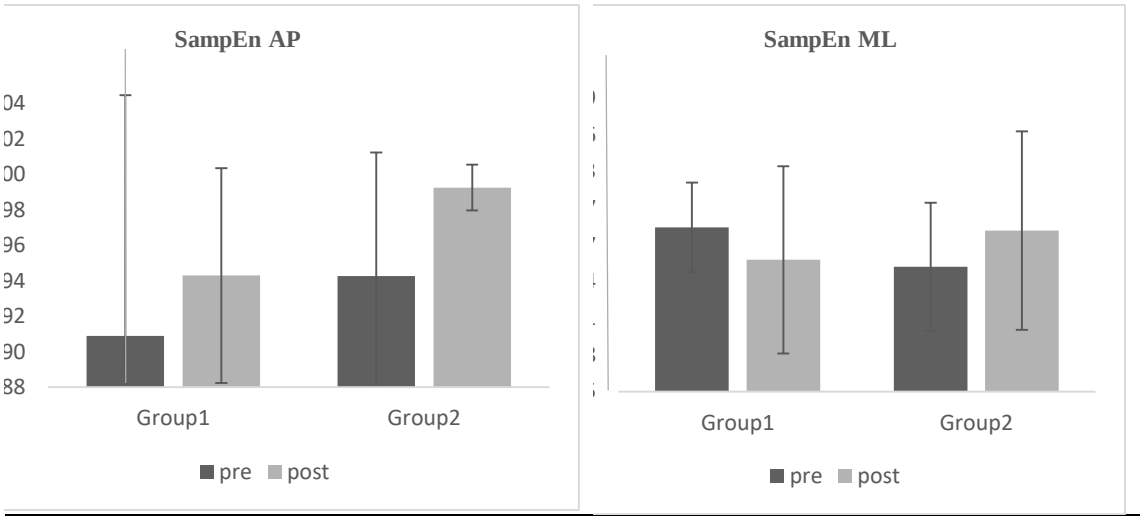
آنتروپی میانی-جانبی

براساس تحلیل واریانس مکرر، تفاوت معنادار بین گروه‌ها (p<۰/۰۰۱، F(۲،۱۸)=۱۰/۸۹)، زمان‌ها (p=۰/۰۲، F(۱،۱۸)=۵/۳۴) و اثر تعاملی (p=۰/۱۴، F(۲،۱۸)=۲/۱۵) مشاهده شد. همچنین در گروه ۲، تفاوت معنادار با آزمون فریدمن (p=۰/۰۱) مشاهده شد. در بررسی با آزمون توکی، افزایش در گروه ۲ روی داد (p<۰/۰۰۱). می‌توان نتیجه گرفت که گروه ۲ افزایش نامطلوبی را نشان داد.

جدول ۳- میانگین و انحراف معیار آنتروپی نمونه مرکز فشار در جهت قدامی–خلفی و داخلی–خارجی در دو گروه مطالعه

Table 3- Mean and standard deviation of center of pressure sample entropy in the anterior–posterior and medial–lateral directions in the two study groups

ML (انحراف معیار ± میانگین) ML (Mean ± SD)	AP (انحراف معیار ± میانگین) AP (Mean ± SD)	زمان Time	گروه Group
0.684279 ± 0.036641	0.999089 ± 0.001359	پیش‌آزمون Pre-test	توان‌بخشی سنتی (گروه ۱) Conventional rehabilitation (Group 1)
0.657647 ± 0.076512	0.999430 ± 0.000606	پس‌آزمون Post-test	توان‌بخشی سنتی Conventional rehabilitation
0.652012 ± 0.052326	0.999428 ± 0.000697	پیش‌آزمون Pre-test	اکسنتریک آیزوکینتیک (گروه ۲) Eccentric isokinetic (Group 2)
0.681659 ± 0.081131	0.999926 ± 0.000129	پس‌آزمون Post-test	اکسنتریک آیزوکینتیک Eccentric isokinetic
مقادیر به صورت میانگین و انحراف معیار گزارش شده‌اند. AP = جهت قدامی–خلفی؛ ML = جهت داخلی–خارجی؛ SampEn = آنتروپی نمونه. پیش‌آزمون = قبل از مداخله؛ پس‌آزمون = بعد از مداخله			
Values are presented as mean and standard deviation. AP = anterior–posterior direction; ML = medial–lateral direction; SampEn = sample entropy. Pre-test = before intervention; post-test = after intervention Conventional rehabilitation group = Group 1; eccentric isokinetic training group = Group			



شکل ۳- مقدار میانگین و انحراف معیار پارامترهای AP و ML مربوط به SampEn در دو گروه مختلف در شرایط پیش‌آزمون و پس‌آزمون (گروه ۱ = توان‌بخشی سنتی، گروه ۲ = تمرین ایزوکینتیک برون‌گرا)

Figure 3- Mean Value and SDs of SampEn AP and ML parameters across three different groups under pre-test and post-test conditions

(Group1= Conventional rehabilitation, Group2= Eccentric Isokinetic Training)

جدول ۱- میانگین و انحراف استاندارد متغیرهای پژوهش

Table 1- Mean and standard deviations of study

کنترل Control	تجربی Experimental	مرحله Phase	متغیر Variable
304.0±112.3	304.0±112.3	قبل | Pre	سطح مرکز فشار Center of pressure surface
118.0±113.1	118.0±113.1	بعد | Post	
96.6±11.9	96.6±11.9	قبل | Pre	مسافت مرکز فشار Center of pressure distance
67.4±6.7	67.4±6.7	بعد | Post	
33.1±9.2	33.1±9.2	قبل | Pre	دامنه مرکز فشار (AP) (AP)Center of pressure range
25.3±1.3	25.3±1.3	بعد | Post	
48.1±3.9	48.1±3.9	قبل | Pre	دامنه مرکز فشار(ML) (ML)Center of pressure range
37.1±11.8	37.1±11.8	بعد | Post	

بحث و نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه مقایسه اثر تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک و توان‌بخشی سنتی بر قدرت عضلانی و تعادل تک‌پا در ورزشکاران نخبه پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی بود. یافته‌های اصلی نشان داد که هر دو مداخله موجب بهبود عملکرد شدند، اما تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک در مقایسه با توان‌بخشی سنتی، افزایش بیشتری در نسبت حداکثر گشتاور اوج به وزن بدن (PT/BW) عضلات بازکننده و خم‌کننده زانو ایجاد کردند. همچنین، با وجود بهبود قدرت عضلانی، برخی شاخص‌های کنترل پاسچرال به‌ویژه آنتروپی نمونه در جهت قدامی–خلفی (SampEn AP) نشان دادند که بازگشت کامل عملکرد عصبی-عضلانی و کنترل تعادلی هنوز حاصل نشده است.

برتری تمرینات اکسنتریک در افزایش قدرت عضلانی با نتایج مطالعات پیشین همسوست که نشان داده‌اند این نوع تمرینات به دلیل ایجاد تنش مکانیکی بیشتر، موجب تحریک هایپرتروفی عضلانی، افزایش سنتز پروتئین و بهبود عملکرد عصبی-عضلانی می‌شوند (۳۸، ۳۷). همچنین انقباضات اکسنتریک با ایجاد بار بیشتر بر واحدهای حرکتی و بافت همبند، موجب افزایش سنتز کلاژن و بهبود ظرفیت تولید نیرو می‌شوند (۳۹). مطالعات الکترومایوگرافی نیز نشان داده‌اند که فعال‌سازی عضله چهارسران در فاز اکسنتریک نسبت به فاز کانسنتریک بیشتر بوده و این موضوع احتمالاً ناشی از مشارکت بیشتر فیبرهای تندانقباض نوع II است (۴۰). از سوی دیگر، پس از آسیب ACL، بازدارندگی آرتروژنیک سبب کاهش فعال‌سازی عضلات چهارسر می‌شود و تمرینات اکسنتریک از طریق تحریک گیرنده‌های عمقی و بهبود کنترل عصبی-عضلانی، این بازدارندگی را کاهش می‌دهند (۴۱).

با وجود بهبود قدرت عضلانی، تغییرات مشاهده‌شده در شاخص آنتروپی نمونه (SampEn) در جهت قدامی–خلفی نشان می‌دهد که افزایش قدرت عضلانی لزوماً با بهبود کامل کنترل پاسچرال همراه نیست. این یافته می‌تواند بیانگر آن باشد که بازیابی عملکرد عصبی–عضلانی و کنترل پاسچرال پس از بازسازی ACL فرایندی چندبعدی است و صرف بهبود قدرت عضلانی برای بازگشت کامل عملکرد تعادلی کافی نیست. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که اختلال در ورودی‌های حسی ناشی از آسیب گیرنده‌های مکانیکی رباط صلیبی قدامی و تغییر در راهبردهای کنترل پاسچرال ممکن است در تغییرات الگوهای تعادلی پس از بازسازی ACL نقش داشته باشند (۴۲)؛ با این حال، ازآنجاکه در مطالعه حاضر متغیرهایی مانند حس عمقی، وابستگی بینایی یا فعالیت عضلانی به طور مستقیم ارزیابی نشدند، تبیین مکانیسم‌های زیربنایی نیازمند مطالعات بیشتری با اندازه‌گیری‌های عینی و اختصاصی است؛ بنابراین بهبود قدرت عضلانی به‌تنهایی برای بازگشت کامل عملکرد کافی نیست و باید هم‌زمان با تمرینات اختصاصی تعادلی و بازآموزی عصبی-عضلانی همراه شود.

یافته‌های این مطالعه دارای اهمیت بالینی درخورتوجهی هستند. نتایج نشان داد که تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک می‌توانند به‌عنوان جزء مؤثری در برنامه‌های بازتوانی ورزشکاران نخبه پس از ACLR استفاده شوند؛ با این حال، استفاده از این تمرینات بدون توجه به کنترل پاسچرال و بازآموزی حس عمقی ممکن است منجر به نبود تعادل عملکردی و افزایش خطر آسیب مجدد شود؛ ازاین‌رو به نظر می‌رسد، ترکیب تمرینات اکسنتریک با تمرینات تعادلی، تمرینات حس عمقی و تکالیف عملکردی اختصاصی ورزش، رویکرد مناسب‌تری برای بازتوانی این بیماران باشد.

هر دو روش توان‌بخشی سنتی و تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک موجب بهبود قدرت عضلانی و تعادل در ورزشکاران نخبه پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی شدند، اما تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک در افزایش قدرت عضلانی اثربخشی بیشتری داشتند؛ با این حال، بازیابی قدرت عضلانی به‌تنهایی برای بازگشت کامل کنترل عصبی-عضلانی کافی نیست و استفاده از برنامه‌های ترکیبی شامل تمرینات قدرتی و تعادلی می‌تواند راهبرد مناسب‌تری برای بهینه‌سازی بازتوانی و کاهش خطر آسیب مجدد باشد. به طور کلی، تمرینات اکسنتریک (گروه ۲) اگرچه در افزایش قدرت برتر است، اما نیاز به تنظیم فردی بار تمرینی و ترکیب با تمرینات تعادلی دارد تا از نبود تعادل عضلانی جلوگیری شود. در گروه توان‌بخشی سنتی (گروه ۱)، ادغام این روش با تمرینات اکسنتریک می‌تواند محدودیت‌های آن در مشارکت بیمار و اختصاصی بودن را جبران کند.

مطالعه حاضر دارای محدودیت‌هایی بود. حجم نمونه نسبتاً کم، پیگیری کوتاه‌مدت، بررسی نشدن تفاوت‌های جنسیتی و محدود شدن نمونه‌ها به ورزشکاران نخبه، تعمیم‌پذیری نتایج را محدود می‌کند. همچنین میزان پایبندی شرکت‌کنندگان به برنامه تمرینی و ارزیابی نشدن پیامدهای عملکردی بلندمدت ممکن است بر نتایج تأثیر گذاشته باشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که مطالعات آینده با حجم نمونه بیشتر، دوره پیگیری طولانی‌تر و بررسی پاسخ زنان و مردان به مداخلات مختلف انجام شوند. همچنین بررسی اثربخشی پروتکل‌های ترکیبی شامل تمرینات اکسنتریک، تمرینات تعادلی و بازآموزی عصبی-عضلانی می‌تواند در طراحی برنامه‌های بازتوانی مؤثرتر برای ورزشکاران پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی سودمند باشد.

پیام مقاله

نتایج این پژوهش نشان داد که تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک در مقایسه با توان‌بخشی سنتی، اثربخشی بیشتری در بهبود قدرت عضلات بازکننده و خم‌کننده زانو در ورزشکاران نخبه پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی دارند؛ با این حال، تغییرات شاخص آنتروپی نمونه مرکز فشار نشان داد که بهبود قدرت عضلانی الزاماً با بازیابی کامل کنترل پاسچرال و عملکرد تعادلی همراه نیست. این یافته بیانگر آن است که بازتوانی پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی فرایندی چندبعدی است و ارزیابی هم‌زمان عملکرد عضلانی و کنترل پاسچرال می‌تواند تصویر جامع‌تری از روند بهبودی ورزشکاران ارائه دهد. از دیدگاه بالینی، استفاده از تمرینات اکسنتریک آیزوکینتیک می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای ارتقای قدرت عملکردی در ورزشکاران نخبه مدنظر قرار گیرد، اما تصمیم‌گیری درخصوص آمادگی بازگشت به ورزش نباید صرفاً برمبنای شاخص‌های قدرت عضلانی انجام شود. این نتایج بر ضرورت به‌کارگیری معیارهای عملکردی چندگانه در ارزیابی و پایش روند بازتوانی پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی تأکید دارد.

ملاحظات اخلاقی

این پژوهش برطبق اصول اخلاقی پژوهش‌های پزشکی و با تأییدیه کمیته اخلاق دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات (کد اخلاق: IR.IAU.SRB.REC.1402.009) انجام شده است. تمامی شرکت‌کنندگان قبل از شروع پژوهش فرم رضایت‌نامه آگاهانه را مطالعه و امضا کردند. حفظ حریم خصوصی شرکت‌کنندگان و محرمانگی داده‌ها طبق اصول اخلاقی رعایت شد.

مشارکت نویسندگان

ایده‌پردازی: علی شریف‌نژاد

جمع‌آوری داده‌ها: سید مهدی شعبان زاده
تحلیل داده‌ها: سید مهدی شعبان زاده
نوشتن مقاله: سید مهدی شعبان زاده
بازبینی و ویرایش: سید مهدی شعبان زاده
مرور ادبیات: کامران حسنی
مدیر پروژه: فرهاد طباطبایی قمشه

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

تشکر و قدردانی

محققان این مطالعه بر خود لازم می‌دانند از تمامی آزمودنی‌هایی که در این تحقیق همکاری کردند، تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

1. Shultz SJ, Carcia CR, Perrin DH. Knee joint laxity affects muscle activation patterns in the healthy knee. Journal of Electromyography and Kinesiology. 2004;14(4):475-83. https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2003.11.001
2. Williams GN, Chmielewski T, Rudolph K, Buchanan TS, Snyder-Mackler L. Dynamic knee stability: current theory and implications for clinicians and scientists. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy. 2001;31(10):546-66. https://doi.org/10.2519/jospt.2001.31.10.546
3. Zimny ML, Schutte M, Dabezies E. Mechanoreceptors in the human anterior cruciate ligament. The Anatomical Record. 1986;214(2):204-9. https://doi.org/10.1002/ar.1092140216
4. Fitzgerald GK, Axe MJ, Snyder-Mackler L. The efficacy of perturbation training in nonoperative anterior cruciate ligament rehabilitation programs for physically active individuals. Physical Therapy. 2000;80(2):128-40. https://doi.org/10.1093/ptj/80.2.128
5. Solomonow M, Krogsgaard M. Sensorimotor control of knee stability. A review. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. 2001;11(2):64-80. https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2001.011002064.x
6. Diekfuss JA, Grooms DR, Nissen CW, Slutsky-Ganesh AB, Bonnette S, Riley MA, et al. Can we capitalize on central nervous system plasticity in young athletes to inoculate against injury? Journal of Science in Sport and Exercise. 2020;2(4):305-18. https://doi.org/10.1007/s42978-020-00080-3
7. Grooms DR, Page SJ, Nichols-Larsen DS, Chaudhari AM, White SE, Onate JA. Neuroplasticity associated with anterior cruciate ligament reconstruction. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy. 2017;47(3):180-9. https://doi.org/10.2519/jospt.2017.7003
8. Norasteh AA, Payandeh M, Mohammad Ashour Z. Investigation of knee arthrokinematic changes before and after reconstruction of anterior cruciate ligament: A systematic review. Journal of Sport Biomechanics. 2020;6(2):66-85. https://doi.org/10.32598/biomechanics.6.2.1
9. Lewek MD, Rudolph KS, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Dynamic knee stability after anterior cruciate ligament rupture. Exercise and Sport Sciences Reviews. 2003;31(4):195-200. https://doi.org/10.1097/00003677-200310000-00007
10. Gokeler A, Benjaminse A, Hewett TE, Lephart SM, Engebretsen L, Ageberg E, et al. Quadriceps function following ACL reconstruction and rehabilitation: implications for optimisation of current practices. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2014;22(5):1163-74. https://doi.org/10.1007/s00167-013-2577-x
11. Kannus P, Järvinen M. Function of the quadriceps and hamstrings muscles in knees with chronic partial deficiency of the anterior cruciate ligament: Isometric and isokinetic evaluation. The

American Journal of Sports Medicine. 1992;20(2):162-8. https://doi.org/10.1177/036354659202000212
12. Lepley LK, Davi SM, Burland JA, Lepley AS. Muscle atrophy after ACL injury: implications for clinical practice. Sports Health. 2020;12(6):579-86. https://doi.org/10.1177/1941738120944256
13. McHugh MP, Tyler TF, Browne GS, Nicholas MR, Nicholas SJ. Electromyographic predictors of residual quadriceps muscle weakness after anterior cruciate ligament reconstruction. The American Journal of Sports Medicine. 2002;30(3):334-9. https://doi.org/10.1177/03635465020300030601
14. Soma Y, Yoshioka H, Mutsuzaki H, Koseki T, Kadone H, Kubota S, et al. Electromyographic examination of knee training using a hybrid assistive limb after anterior cruciate ligament reconstruction: a case report. Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology. 2022;27:13-8. https://doi.org/10.1016/j.asmart.2021.12.002
15. Papandreou M, Malliaropoulos N, Mitsiokapa E, Tsitas K, Kakavelakis G. Cross-exercise on quadriceps deficit after ACL reconstruction. The Journal of Knee Surgery. 2013;26(1):51-8. https://doi.org/10.1055/s-0032-1313744
16. Keays SL, Bullock-Saxton JE, Newcombe P, Keays AC. Muscle strength and function before and after anterior cruciate ligament reconstruction using semitendonosus and gracilis. The Knee. 2001;8(3):229-34. https://doi.org/10.1016/S0968-0160(01)00086-X
17. Wohl TR, Criss CR, Grooms DR. Visual perturbation to enhance return to sport rehabilitation after anterior cruciate ligament injury: A clinical commentary. International Journal of Sports Physical Therapy. 2021;16(2):552-64. https://doi.org/10.26603/001c.21251
18. Davies GJ, Riemann B, Ellenbecker T. Role of isokinetic testing and training after ACL injury and reconstruction. In: ACL Injuries in the Female Athlete: Causes, Impacts, and Conditioning Programs. Berlin, Heidelberg: Springer; 2018. p. 567-88. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56558-2_24
19. Vidmar MF, Castro PS, Salles MVM, Pimentel GL, Bazzan D, Pinho CD, et al. Isokinetic eccentric training is more effective than constant load eccentric training for quadriceps rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. Brazilian Journal of Physical Therapy. 2020;24(5):424-32. https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2019.07.006
20. Herrington L, Myer G, Horsley I. Task based rehabilitation protocol for elite athletes following anterior cruciate ligament reconstruction: a clinical commentary. Physical Therapy in Sport. 2013;14(4):188-98. https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2013.08.001
21. Waldron K, Sisson R, Gill K, Yanke AB, Cole BJ, Verma NN, et al. Anterior cruciate ligament rehabilitation and return to sport: how fast is too fast? Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation. 2022;4(1):e175-9. https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.09.028
22. Wikstrom EA, Tillman MD, Chmielewski TL, Cauraugh JH, Naugle KE, Borsa PA, et al. Measurement and evaluation of dynamic joint stability of the knee and ankle after injury. Sports Medicine. 2006;36(5):393-410. https://doi.org/10.2165/00007256-200636050-00003
23. Hewett TE, Zazulak BT, Myer GD, Ford KR. A review of electromyographic activation levels, timing differences, and increased anterior cruciate ligament injury incidence in female athletes. British Journal of Sports Medicine. 2005;39(6):347-50. https://doi.org/10.1136/bjsm.2005.018572
24. Myer GD, Ford KR, Palumbo JP, Hewett TE. Neuromuscular training improves performance and lower-extremity biomechanics in female athletes. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2005;19(1):51-60. https://doi.org/10.1519/13643.1
25. Ihara H, Takayama M, Fukumoto T. Postural control capability of ACL-deficient knee after sudden tilting. Gait & Posture. 2008;28(3):478-82. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2008.03.009
26. Bjornaraa J, Di Fabio RP. Knee kinematics following ACL reconstruction in females; the effect of vision on performance during a cutting task. International Journal of Sports Physical Therapy. 2011;6(4):271-84. https://doi.org/10.26603/001c.0061
27. van Melick N, van Cingel RE, Brooijmans F, Neeter C, van Tienen T, Hullegie W, et al. Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation.

British Journal of Sports Medicine. 2016;50(24):1506-15. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095898
28. Sharifnezhad A, Marzilger R, Arampatzis A. Effects of load magnitude, muscle length and velocity during eccentric chronic loading on the longitudinal growth of the vastus lateralis muscle. Journal of Experimental Biology. 2014;217(15):2726-33. https://doi.org/10.1242/jeb.100370
29. Adams J, Cerny K. Observational Gait Analysis: A Visual Guide. Boca Raton: Taylor & Francis; 2018. https://doi.org/10.4324/9781003525288
30. Kuznetsov N, Bonnette S, Gao J, Riley MA. Adaptive fractal analysis reveals limits to fractal scaling in center of pressure trajectories. Annals of Biomedical Engineering. 2013;41(8):1646-60. https://doi.org/10.1007/s10439-012-0646-9
31. Vaverka F, Janura M, Elfmark M, Svoboda Z. System of gait analysis based on ground reaction force assessment. Acta Gymnica. 2015;45(4):187-93. https://doi.org/10.5507/ag.2015.023
32. Lake DE, Richman JS, Griffin MP, Moorman JR. Sample entropy analysis of neonatal heart rate variability. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology. 2002;283(3):R789-97. https://doi.org/10.1152/ajpregu.00069.2002
33. Berens P. CircStat: A MATLAB toolbox for circular statistics. Journal of Statistical Software. 2009;31(10):1-21. https://doi.org/10.18637/jss.v031.i10
34. Roerdink M, De Haart M, Daffertshofer A, Donker SF, Geurts AC, Beek PJ. Dynamical structure of center-of-pressure trajectories in patients recovering from stroke. Experimental Brain Research. 2006;174(2):256-69. https://doi.org/10.1007/s00221-006-0441-7
35. Roerdink M, Hlavackova P, Vuillerme N. Center-of-pressure regularity as a marker for attentional investment in postural control: a comparison between sitting and standing postures. Human Movement Science. 2011;30(2):203-12. https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.04.005
36. Levin O, Van de Moortele V, Swinnen S, Mizrahi J. On the correlation between force plate data and EMG in various standing conditions. In: Sinkjaer T, Popovic D, Struijk JJ, editors. Proceedings of the 5th Annual Conference of the International Functional Electrical Stimulation Society. Aalborg: Aalborg University; 2000. p. 115-8. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2003.819876
37. Kakavas G, Malliaropoulos N, Bikos G, Maffulli N. Periodization in anterior cruciate ligament rehabilitation: a novel framework. Medical Principles and Practice. 2021;30(2):101-8. https://doi.org/10.1159/000511228
38. Myer GD, Ford KR, Di Stasi SL, Foss KD, Micheli LJ, Hewett TE. High knee abduction moments are common risk factors for patellofemoral pain (PFP) and anterior cruciate ligament (ACL) injury in girls: is PFP itself a predictor for subsequent ACL injury? British Journal of Sports Medicine. 2015;49(2):118-22. https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093836
39. Hortobágyi T, Hill JP, Houmard JA, Fraser DD, Lambert NJ, Israel RG. Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. Journal of Applied Physiology. 1996;80(3):765-72. https://doi.org/10.1152/jappl.1996.80.3.765
40. Lepley LK, Palmieri-Smith RM. Effect of eccentric strengthening after anterior cruciate ligament reconstruction on quadriceps strength. Journal of Sport Rehabilitation. 2013;22(2):150-6. https://doi.org/10.1123/jsr.22.2.150
41. Gerber JP, Marcus RL, Dibble LE, Greis PE, Burks RT, Lastayo PC. Effects of early progressive eccentric exercise on muscle size and function after anterior cruciate ligament reconstruction: a 1-year follow-up study of a randomized clinical trial. Physical Therapy. 2009;89(1):51-9. https://doi.org/10.2522/ptj.20070189
42. Lohse KR, Hilderman CG, Cheung KL, Tatla S, Van der Loos HF. Virtual reality therapy for adults post-stroke: a systematic review and meta-analysis exploring virtual environments and commercial games in therapy. PLOS ONE. 2014;9(3):e93318. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093318