

A Systematic Review of the Effects of Neuromuscular and Sensorimotor Training on Re-injury Risk and Neuromuscular Function in Patients Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

Farhad Rezazadeh¹,
Shirin Ali²,
Fariborz Imani³,
Parinaz Fahimi⁴,
Hamed Sheikhalizadeh⁵

¹ Assistant Professor, Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Assistant Professor, Department of Sport Sciences Education, Farhangian University, Tehran, Iran

³ PhD Student in Sports Biomechanics, Department of Sports Biomechanics, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

⁴ MSc Student in Sports Biomechanics, Department of Sports Biomechanics, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

⁵ PhD Candidate in Sports Biomechanics, Department of Sports Biomechanics, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

(Received August 28, 2025; Accepted February 8, 2026)

Abstract

Background and purpose: Anterior cruciate ligament (ACL) rupture is one of the most common sports injuries, and its reconstruction is associated with a risk of persistent functional deficits and subsequent re-injury. Neuromuscular and sensorimotor training have been proposed as promising strategies to improve neuromuscular control and reduce re-injury risk. This systematic review aimed to determine the effectiveness of these training programs in reducing the risk of re-injury and improving neuromuscular function following ACL reconstruction (ACLR) in athletic populations.

Materials and methods: A comprehensive literature search was conducted in the PubMed, Web of Science, PEDro, and Scopus databases. Google Scholar was also searched to identify gray literature. The search covered the period from January 1, 2015, to October 1, 2025. Of the 4,279 studies identified, 10 eligible studies were included and assessed for methodological quality using the Downs and Black checklist, and for risk of bias using the Cochrane RoB 2 and ROBINS-I tools. The findings were synthesized narratively.

Results: Neuromuscular and sensorimotor training were associated with significant improvements in joint position sense, static and dynamic balance, muscle strength, and landing and jumping biomechanics, while reducing biomechanical risk factors (such as dynamic knee valgus). These interventions also contributed to enhanced joint stability and overall functional capacity. Multimodal training protocols incorporating cognitive-motor components within sport-specific simulated environments played a key role in preparing patients for a safe and effective return to sport.

Conclusion: Neuromuscular and sensorimotor training represent effective strategies for improving neuromuscular function and mitigating the risk of re-injury following ACL reconstruction. The integration of these interventions into structured, progressive, and comprehensive rehabilitation protocols is strongly recommended as a core component of post-ACLR rehabilitation programs.

Keywords: anterior cruciate ligament, ACL reconstruction, neuromuscular training, sensorimotor training, re-injury, neuromuscular function

J Mazandaran Univ Med Sci 2026; 35 (254): 108-120 (Persian).

Corresponding Author: Farhad Rezazadeh - Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran (E-mail: Rezazadeh.farhad@uma.ac.ir)

مروری سیستماتیک بر اثرات تمرینات عصبی-عضلانی و حسی-حرکتی بر خطر آسیب مجدد و عملکرد عصبی-عضلانی در بیماران پس از بازسازی رباط صلیبی قدامی

فرهاد رضازاده^۱
شیرین عالی^۲
فریبرز ایمانی^۳
پریناز فهیمی^۴
حامد شیخعلی زاده^۵

چکیده

سابقه و هدف: پارگی رباط صلیبی قدامی یکی از شایع ترین آسیب های ورزشی است و بازسازی آن با خطر نقص عملکرد و آسیب مجدد همراه می شود. تمرینات نوروماسکولار و حسی-حرکتی به عنوان راهکارهایی برای بهبود کنترل عصبی-عضلانی و پیشگیری از آسیب مجدد پیشنهاد شده اند. این مرور سیستماتیک با هدف تبیین اثربخشی این تمرینات را بر کاهش خطر آسیب مجدد و بهبود عملکرد عصبی عضلانی پس از ACLR در بیماران ورزشی، انجام پذیرفت.

مواد و روش ها: جستجوی جامع در پایگاه های داده PubMed، Web of Science، PEDro و Scopus انجام شد. از موتور جستجوی Google Scholar برای جستجوی منابع خاکستری استفاده شد. این جستجو دوره زمانی ۱ ژانویه ۲۰۱۵ تا ۱ اکتبر ۲۰۲۵ را پوشش داد. از بین ۴۲۷۹ مطالعه شناسایی شده، ۱۰ مطالعه واجد شرایط با استفاده از پرسشنامه داون و بلک و خطر سوگیری با استفاده از ابزارهای Cochrane RoB 2 و ROBINS-I ارزیابی شد و نتایج به صورت روایی ترکیب شدند.

یافته ها: تمرینات نوروماسکولار و حسی-حرکتی به طور معناداری منجر به بهبود حس وضعیت مفصل، تعادل ایستا و پویا، قدرت عضلانی، الگوهای فرود و پرش، و کاهش شاخص های خطر بیومکانیکی (مانند والگوس دینامیک زانو) شدند. این تمرینات هم چنین باعث افزایش پایداری مفصل و بهبود عملکرد گردید. تمرینات ترکیبی با مؤلفه های شناختی-حرکتی در شرایط شبیه سازی شده ورزشی، نقش کلیدی در آماده سازی بیماران برای بازگشت ایمن به ورزش داشتند.

استنتاج: تمرینات نوروماسکولار و حسی-حرکتی، مداخلاتی مؤثر برای بهبود عملکرد عصبی-عضلانی و کاهش خطر آسیب مجدد پس از بازسازی ACL هستند. گنجاندن این تمرینات در قالب پروتکل های پیشرونده و جامع به عنوان بخشی ضروری از برنامه های بازتوانی توصیه می شود.

واژه های کلیدی: رباط صلیبی قدامی، بازسازی ACL، تمرینات نوروماسکولار، تمرینات حسی-حرکتی، آسیب مجدد، عملکرد عصبی-عضلانی

E-mail: Rezazadeh.farhad@uma.ac.ir

مؤلف مسئول: فرهاد رضازاده-ارذیل: دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده روانشناسی و علوم تربیتی

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

۲. استادیار، گروه آموزش تربیت بدنی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

۳. دانشجوی دکتری تخصصی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۵. دانشجوی دکتری تخصصی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۶ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۴۰۴/۶/۲۳ تاریخ تصویب: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

مقدمه

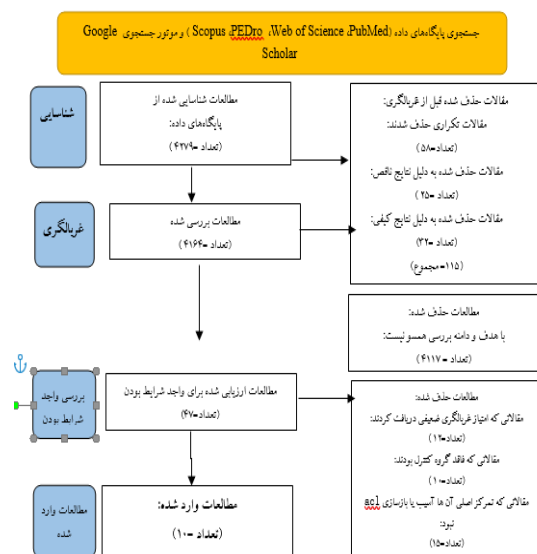
رباط صلیبی قدامی (ACL) (Anterior cruciate ligament) به عنوان یکی از عناصر کلیدی پایدارکننده زانو، نقشی اساسی در حفظ کنترل و ثبات مفصل طی فعالیت های پویا بر عهده دارد (۱). پارگی های کامل یا جزئی ACL از شایع ترین آسیب های ارتوپدی در میان ورزشکاران و افراد فعال به شمار می آیند (۲). برآوردها نشان می دهد سالانه نزدیک به ۲۰۰ هزار پارگی ACL در ایالات متحده گزارش می شود که خود بیانگر بار بالینی و اقتصادی قابل توجه این آسیب است (۳). آسیب ACL معمولاً در نتیجه والگوس پویای اندام تحتانی رخ می دهد که با اداکشن و چرخش داخلی ران، جابه جایی قدامی درشت نی و الگوهای چرخشی نامطلوب زانو و مچ پا همراه است (۴، ۵). این زنجیره حرکتی اغلب در ورزشکارانی دیده می شود که از کنترل عصبی عضلانی ناکافی رنج می برند، عاملی که موجب اختلال در الگوهای بیومکانیکی اندام تحتانی و در نهایت افزایش خطر پارگی ACL می گردد (۶).

اگر چه درمان غیرجراحی برای برخی بیماران امکان پذیر است، بسیاری از ورزشکاران و افراد فعال برای دستیابی به بازگشت ایمن و مؤثر به سطح فعالیت پیشین، بازسازی رباط صلیبی قدامی (ACL) (Anterior cruciate ligament reconstruction) را برمی گزینند (۷). با وجود پیشرفت در جراحی و توان بخشی، بازسازی ACL همچنان با چالش هایی مانند بهبود ناقص عملکرد و خطر آسیب مجدد همراه است (۸، ۹). مکانیسم غالب پارگی ACL غیرتماسی است و معمولاً در پی تغییر ناگهانی سرعت یا جهت، الگوهای فرود نامطلوب و حرکات چرخشی و پیچشی رخ می دهد (۸، ۱۰). در این میان ورزشکاران زن نسبت به هم تیان مرد خود بیش تر دچار آسیب ACL می شوند، مسئله ای که طراحی مداخلات پیشگیرانه و برنامه ریزی درمان را پیچیده تر می سازد (۱۱، ۱۲). بازگشت به ورزش (Return to Sport) (RTS) بعد از عمل بازسازی ACL یک مرحله مهم و سخت

است (۱۳). با این که معمولاً از برنامه های زمان بندی شده برای توان بخشی استفاده می شود، در عمل فقط حدود نصف بیماران واقعاً به ورزش برمی گردند (۱۴). به ویژه افراد زیر ۲۵ سال بیش تر در معرض آسیب مجدد هستند و پارگی ثانویه ACL تا ۲۳ درصد گزارش شده است، پس لازم است برنامه های توان بخشی دقیق تری مورد استفاده قرار گیرد (۱۵). با وجود توجه به این عوامل، هنوز دستورالعمل های جامع و کاملاً مبتنی بر شواهد که همه ی آن ها را پوشش دهد کم است.

حس عمقی زانو در بسیاری از ورزشکاران پس از بازسازی ACL، حتی پس از پایان توان بخشی، همچنان دچار نقص بوده و با بی ثباتی وضعیتی، کنترل حرکتی نامطلوب و افزایش ریسک آسیب مجدد همراه است (۱۶، ۱۷). تمرینات نوروماسکولار (Neuromuscular exercises) (تعدالی، تقویتی، پلايومتریك با بازخورد) می توانند حس عمقی و مکانیک های فرود و همچنین تغییر جهت را بهبود دهند و برای پیشگیری و بازتوانی توصیه می شوند (۱۸). Panics و همکاران (۲۰۰۸) در یک مطالعه بر روی دو تیم حرفه ای هندبال زنان نشان دادند برنامه تمرینی نوروماسکولار اختصاصی، دقت حس موقعیت مفصل زانو را به طور معناداری بهبود می دهد که این بهبود می تواند مکانیسمی برای اثر کاهش دهنده آسیب در برنامه های تمرینی نوروماسکولار باشد (۱۹).

تمرینات حسی- حرکتی مجموعه ای از تمرین های هدفمند برای بازآموزی هماهنگی حس و حرکت است (۲۰). این روش با هدف تقویت حس عمقی و تعادل، بهبود هم انقباضی عضلات و اصلاح الگوهای فرود و تغییر جهت به کار می رود و شامل تمرینات تعادلی، پلايومتریك هدایت شده، بازخورد بیرونی و تکالیف دو گانه شناختی- حرکتی است (۲۱، ۲۲). Strong و همکاران در سال ۲۰۲۵ در مطالعه ای به تاثیر تمرینات حسی- حرکتی بر کاهش ریسک آسیب مجدد و بهبود عملکرد عصبی- عضلانی در افراد با بازسازی ACL پرداختند. شواهد این پژوهش نشان داد، تمرینات تعادلی



تصویر شماره ۱: فرآیند جستجو، بررسی و انتخاب مقالات بر اساس دستورالعمل‌های PRISMA

معیارهای ورود و خروج

معیارهای ورود و خروج پیش از استخراج داده‌ها تعیین شد تا فرآیند بررسی سیستماتیک هدایت شود. مطالعاتی وارد بررسی شدند که تأثیر تمرینات نوروماسکولار و حسی - حرکتی را بر کاهش ریسک آسیب مجدد و بهبود عملکرد عصبی - عضلانی پس از بازسازی ACL بررسی کرده بودند. معیارهای ورود شامل، دسترسی به متن کامل انگلیسی، مطالعات کمی با هر نوع طراحی پژوهشی، شرکت کنندگان مبتلا به آسیب یا بازسازی ACL، و گزارش حداقل یکی از شاخص‌های مرتبط با ریسک آسیب مجدد یا عملکرد عصبی - عضلانی بود. مطالعاتی که از مداخلات غیر از تمرینات نوروماسکولار و حسی - حرکتی استفاده کرده بودند، مقالات مروری و پروتکل‌ها، مقالات فاقد داده کامل یا متن کامل، مطالعاتی که شاخص‌های مورد نظر را گزارش نکرده بودند و مقالات غیرانگلیسی، از بررسی حذف شدند. غربالگری عناوین، چکیده‌ها و متن کامل مقالات به صورت مستقل توسط دو داور انجام شد و اختلاف نظرها از طریق اجماع یا با نظر داور سوم برطرف گردید.

و پلايومتریك با بازخورد بيروني و تمرينات حسي - حركتي ادغام شود باعث كم شدن الگوهاي پرخطر شده و مسير بازگشت به ورزش را ايمن تر مي كند (۲۳). با وجود شواهد پراكنده، تاكنون هيچ مرور سيستماتيكي به صورت جامع و يکپارچه به بررسي هم زمان اثرات تمرينات نوروماسكولار و حسي - حركتي پس از بازسازي رباط صليبي قدامي بر دو محور کاهش خطر آسيب مجدد و بهبود عملکرد عصبی - عضلانی همراه با ارزيابی کیفیت روش شناختی مطالعات نپرداخته است. از اين رو، هدف اين مرور سيستماتيک، تبیین و يکپارچه سازی شواهد موجود پيرامون اثربخشی اين تمرينات بر کاهش ريسک آسيب مجدد و ارتقای عملکرد عصبی - عضلانی پس از بازسازی ACL است.

مواد و روش‌ها

این بررسی سیستماتیک با هدف ارزیابی شواهد موجود درباره تأثیر تمرینات نوروماسکولار و حسی - حرکتی بر کاهش ریسک آسیب مجدد و بهبود عملکرد عصبی - عضلانی پس از بازسازی ACL انجام شد و قابل ذکر است که با توجه به مروری بودن، این مطالعه کد اخلاق ندارد. مطالعه مطابق دستورالعمل PRISMA طراحی و اجرا گردید که جزئیات آن در نمودار PRISMA ارائه شده است (تصویر شماره ۱).

استراتژی جستجو

جستجوی سیستماتیک در PubMed، Web of Science، Scopus و PEDro انجام شد و برای منابع خاکستری، ۱۰۰ نتیجه اول Google Scholar بررسی شدند. دوره زمانی جستجو از ژانویه ۲۰۱۵ تا اکتبر ۲۰۲۵ بود و نتایج در EndNote وارد و موارد تکراری حذف شدند. غربالگری عناوین، چکیده و متن کامل توسط دو پژوهشگر مستقل انجام شد و اختلاف‌ها با بحث یا داور سوم حل شد. منابع مقالات نیز به روش گلوله برفی بررسی شدند. جدول شماره ۱، استراتژی جستجوی PubMed را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۱: استراتژی جست‌وجو در پایگاه داده PubMed

پایگاه داده	تاریخ جست‌وجو	کلیدواژه‌ها / نحوه جست‌وجو	فیلترها	نتایج
PubMed	۱۰ مهر ۱۴۰۴	("Anterior Cruciate Ligament"[MeSH Terms] OR "ACL reconstruction"[All Fields] OR "ACLR"[All Fields]) AND ("exercise therapy"[MeSH Terms] OR "neuromuscular training"[All Fields] OR "sensorimotor training"[All Fields] OR proprioceptive[All Fields]) AND (reinjury[All Fields] OR retrain[All Fields] OR "return to sport"[All Fields] OR "neuromuscular performance"[All Fields] OR electromyography[All Fields]) AND ((english[Filter]) AND (2015:2025[pdat]))	زبان: انگلیسی، سال ۱ نشار: ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵	۱۵۸

استخراج داده

برای استخراج داده‌ها، یک فرم استاندارد طراحی و پیش از اجرا روی چند مطالعه آزمایش شد و پس از اصلاح، نهایی گردید. دو نویسنده با تجربه به‌طور مستقل داده‌ها را شامل مشخصات مطالعه، جزئیات شرکت کنندگان، اهداف، مدت زمان، ابزار و متغیرهای اندازه‌گیری، تمرینات و نتایج اصلی استخراج کردند. اختلاف نظرها ابتدا با بحث حل و در صورت نیاز با نظر داور سوم نهایی شد.

خطر سوگیری

ابزارهای خاصی برای ارزیابی خطر سوگیری بر اساس طراحی مطالعه استفاده شدند. برای همه کارآزمایی‌های کنترل شده تصادفی (RCTs) و مطالعه آزمایشگاهی تصادفی سازی شده، از ابزار خطر سوگیری کاکرین ۲ (RoB 2) استفاده شد (۲۵). برای مطالعات نیمه تجربی و کوهورت، از ابزار خطر سوگیری در مطالعات مداخلات غیر تصادفی (ROBINS-I) استفاده شد (۲۶).

ارزیابی کیفیت و خطر سوگیری

کیفیت روش شناسی و خطر سوگیری برای همه مطالعات انتخاب شده به‌طور مستقل توسط دو نویسنده بررسی و ارزیابی شد. هرگونه اختلاف نظر با اجماع با کمک نفر سوم حل شد.

ترکیب و تحلیل داده‌ها

به‌دلیل ناهمگونی قابل توجه در طراحی مطالعات، ویژگی‌های شرکت کنندگان، پروتکل‌های تمرینی و ابزارهای ارزیابی، امکان انجام متاآنالیز وجود نداشت؛ بنابراین از سنتز روایی استفاده شد. داده‌ها بر اساس نوع تمرینات (نوروماسکولار و حسی - حرکتی)، شاخص‌های عملکردی (حس وضعیت مفصل، قدرت، تعادل و بیومکانیک پرش و فرود) و پیامدهای بالینی (ریسک آسیب مجدد و عملکرد عصبی - عضلانی) دسته‌بندی شدند. سپس یافته‌ها به‌صورت مقایسه‌ای تحلیل شد تا الگوهای مشترک در اثربخشی این تمرینات بر بهبود کنترل عصبی - عضلانی و کاهش خطر آسیب مجدد در بیماران بازسازی شده ACL مشخص شود.

ارزیابی کیفیت

کیفیت روش شناسی هر ۱۰ مطالعه‌ی وارد شده با استفاده از چک لیست داون و بلک (Downs and Black Checklist) ارزیابی شد (۲۴). این ابزار ۲۷ سؤالی برای ارزیابی کیفیت مطالعات تصادفی و غیر تصادفی مداخله‌ی مراقبت‌های بهداشتی طراحی شده است. این چک لیست جنبه‌های متعددی از کیفیت مطالعه را در پنج زیرمقیاس، گزارش‌دهی (۱۰ سؤال)، اعتبار خارجی (۳ سؤال)، اعتبار داخلی - سوگیری (۷ سؤال)، اعتبار داخلی - مخدوش‌کننده (۶ سؤال) و قدرت (۱ سؤال)، ارزیابی می‌کند. هر سؤال به صورت ۱ (بله) یا ۰ (خیر) نمره‌گذاری می‌شود، به استثنای سؤال گزارش‌دهی برای مخدوش‌کننده‌های اصلی (امتیاز ۰-۲) و سؤال قدرت (امتیاز ۰-۵) که منجر به حداکثر امتیاز ممکن ۳۲ می‌شود.

یافته‌ها

انتخاب مطالعات

در جستجوی سیستماتیک، ابتدا ۴۲۷۹ مقاله شناسایی شد و پس از حذف موارد تکراری و ناقص، ۴۱۶۴ مقاله باقی ماند. پس از غربالگری عنوان و چکیده، ۴۱۱۷ مطالعه حذف و ۴۷ مقاله برای ارزیابی متن کامل باقی

ماندند که ۳۷ مورد دیگر به دلیل کیفیت پایین، نبود متن کامل، عدم تمرکز بر آسیب/بازسازی ACL یا فقدان گروه کنترل حذف شدند. در نهایت، ۱۰ مطالعه وارد بررسی سیستماتیک شدند. جریان انتخاب مطالعات در نمودار PRISMA ارائه شده است (تصویر شماره ۱).

ویژگی‌های مطالعه

مطالعات شامل طرح‌های تحقیقاتی متنوعی بودند. ۱ مطالعه آزمایشگاهی، ۲ مطالعه نیمه تجربی، ۱ مطالعه کوهورت و ۶ مطالعه کارآزمایی بالینی (RCT) بود. جمعیت شرکت کنندگان شامل مردان و زنان با محدوده سنی ۱۲ تا ۵۳ سال بود. اندازه نمونه در مطالعات متفاوت بود و از ۱۶ تا ۸۰ شرکت کننده متغیر بود.

کیفیت روش‌شناسی

کیفیت روش‌شناسی ۱۰ مطالعه‌ی مورد بررسی با استفاده از چک لیست داون و بلک ارزیابی شد، نمرات

از ۱۶ تا ۳۱ از حداکثر نمره ممکن ۳۲ (میانگین نمره: $21/9 \pm 4/72$)، بوده است که به طور کلی، کیفیت مطالعات مورد بررسی از متوسط تا بالا بود. اکثر مطالعات، گزارش قوی از اهداف مطالعه، نتایج اصلی و ویژگی شرکت کنندگان نشان دادند (جدول شماره ۲).

چک لیست داون و بلک شامل ۲۷ مورد در پنج زیرمقیاس (گزارش دهی، اعتبار خارجی، اعتبار داخلی - سوگیری، اعتبار داخلی - مخدوش کننده و قدرت) است. امتیاز برای موارد ۱۳-۱ و ۲۵-۱۵ برای «بله» ۱ و برای «خیر» یا «قادر به تعیین» ۰ است. مورد ۵ (مخدوش کننده‌ها) از ۰ تا ۲ نمره گذاری می‌شود. مورد ۲۷ (قدرت) از ۰ تا ۵ نمره گذاری می‌شود. حداکثر امتیاز ممکن ۳۲ است. امتیاز بالاتر نشان دهنده کیفیت روش‌شناختی بالاتر است. خطر سوگیری برای هر ۱۰ مطالعه ارزیابی شد. از میان هفت مقاله‌ای که با ابزار Cochrane RoB 2 ارزیابی شدند، ۴ مطالعه (۵۷/۱ درصد) در مجموع دارای «خطر سوگیری کم» و ۳ مطالعه (۴۲/۹ درصد) در سطح «برخی نگرانی‌ها» تشخیص داده شدند.

جدول شماره ۲: ارزیابی کیفیت روش‌شناختی با استفاده از چک لیست داون و بلک

نویسنده/سال	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	مجموع (۳۲)
Strong مکون ۲۰۲۵ (۳۳)	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۲
Ghadri مکون ۲۰۲۰ (۳۷)	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۳
Khalid مکون ۲۰۲۲ (۵۵)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
Ghadri مکون ۲۰۲۱ (۳۹)	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳۱
Mazdhuie مکون ۲۰۲۳ (۳۰)	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۷
Nagali مکون ۲۰۲۱ (۳۱)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۷
Kaya مکون ۲۰۱۹ (۳۳)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۰
Shim مکون ۲۰۱۵ (۳۳)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۷
Eslami مکون ۲۰۲۴ (۳۴)	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۲
Chmielewski مکون ۲۰۲۴ (۳۵)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶
مجموع	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۳	۱۰	۱۰	۱۰	۸	۱۰	۲	۱	۷	۰	۶	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۶	۴	۶	۹	۱۸	-

خطر سوگیری

برای سه مطالعه نیمه تجربی و کوهورت که با ابزار ROBINS-I ارزیابی شدند، ۱ مطالعه (۳۳ درصد) به عنوان «خطر متوسط سوگیری» ارزیابی شد، در حالی که ۲ مطالعه (۶۷ درصد) به عنوان «خطر جدی سوگیری» ارزیابی شدند. منابع اصلی سوگیری بالقوه در این مطالعات غیر تصادفی مربوط به متغیرهای مخدوش کننده و انتخاب شرکت کنندگان در گروه مطالعه بود. قضاوت‌های دقیق در سطح دامنه برای همه مطالعات گنجانده شده در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

ابزار RoB Cochrane ۲ برای کارآزمایی‌های تصادفی کنترل شده (RCTs) و آزمایشگاهی و ابزار I-ROBINS برای مطالعات شبه تجربی و کوهورت استفاده شد. دامنه‌های RoB Cochrane ۲: ۱: سوگیری ناشی از فرآیند تصادفی سازی، ۲: سوگیری ناشی از انحراف از مداخلات مورد نظر، ۳: سوگیری ناشی از

داده‌های از دست رفته پیامد، ۴: سوگیری در اندازه گیری پیامد، ۵: سوگیری در انتخاب نتیجه گزارش شده، قضاوت‌ها «کم خطر»، «برخی نگرانی‌ها» یا «پرخطر» هستند. دامنه‌های I-ROBINS ۱: سوگیری ناشی از مخدوش کننده‌ها، ۲: سوگیری در انتخاب شرکت کنندگان، ۳: سوگیری در طبقه بندی مداخلات، ۴: سوگیری ناشی از انحراف از مداخلات، ۵: سوگیری ناشی از داده‌های از دست رفته، ۶: سوگیری در اندازه گیری پیامدها، ۷: سوگیری در انتخاب نتیجه گزارش شده، قضاوت‌ها ریسک «کم»، «متوسط»، «جدی» یا «بحرانی» هستند.

ویژگی‌های مطالعه

مطالعات این مرور شامل طرح‌های مختلف پژوهشی بودند و از تمرینات متنوع نوروماسکولار و حسی-حرکتی در بیماران پس از بازسازی ACL استفاده کردند.

جدول شماره ۳: ارزیابی خطر سوگیری با استفاده از RoB 2 و ROBINS-I

نویسنده/سال	دامنه ۱	دامنه ۲	دامنه ۳	دامنه ۴	دامنه ۵	دامنه ۶	دامنه ۷	مجموع
ابزار خطر سوگیری کاکرین ۲ (RoB 2)	تصادفی سازی	انحرافات	داده‌های گم شده	معیارهای پیامد	گزارش دهی	-	-	-
Strong همکاران/ ۲۰۲۵ (۳۳)	کم خطر	کم خطر	کم خطر	برخی نگرانی‌ها	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر
Ghaderi همکاران/ ۲۰۲۰ (۲۷)	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	برخی نگرانی‌ها	برخی نگرانی‌ها	برخی نگرانی‌ها	برخی نگرانی‌ها
Khalid همکاران/ ۲۰۲۲ (۲۸)	کم خطر	برخی نگرانی‌ها	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	برخی نگرانی‌ها	برخی نگرانی‌ها
Ghaderi همکاران/ ۲۰۲۱ (۲۹)	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر
Mazidluie همکاران/ ۲۰۲۴ (۳۰)	کم خطر	برخی نگرانی‌ها	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر
Kaya همکاران/ ۲۰۱۹ (۳۳)	برخی نگرانی‌ها	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	برخی نگرانی‌ها	برخی نگرانی‌ها
Eslami همکاران/ ۲۰۲۴ (۳۴)	تصادفی تک‌سو کور	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر
مداخلات نیمه تجربی (ROBINS-I)	عوامل مخدوش کننده	انتخاب شرکت کنندگان	مداخله	انحرافات از پروتکل مداخله	داده‌های از دست رفته	پیامدها	گزارش دهی	-
Nagelli همکاران/ ۲۰۲۱ (۳۱)	متوسط	جدی	پایین	متوسط	پایین	پایین	پایین	متوسط
Shim همکاران/ ۲۰۱۵ (۳۳)	جدی	جدی	پایین	متوسط	پایین	متوسط	پایین	جدی
Chmielewski همکاران/ ۲۰۲۴ (۳۵)	جدی	جدی	پایین	متوسط	جدی	متوسط	پایین	جدی

مداخلات عمدتاً شامل تمرینات تعادلی، پرش، اسکوات و حرکات چابکی (گاه همراه با تکالیف شناختی) بود که به صورت پیش‌رونده و با فراوانی ۲-۳ جلسه در هفته طی ۴ تا ۲۴ هفته اجرا شدند. ویژگی‌های هر مطالعه در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

بحث

هدف از مطالعه حاضر، بررسی تاثیر تمرینات نوروماسکولار و حسی-حرکتی بر کاهش ریسک

جدول شماره ۴: ویژگی مطالعات

ردیف	نویسنده، سال	طراحی مطالعه	اهداف تحقیق	تمرینات	شرکت‌کنندگان (تعداد، جنسیت، سن)	مدت زمان تحقیق	ابزار اندازه‌گیری	نتیجه‌گیری
۱	Strong و همکاران/ ۲۰۲۵ (۳۳)	مطالعه آزمایشگاهی کنترل شده	پایان پس از بازسازی ACL دپلر تعامل شناختی-حرکتی بیشتر نسبت به گروه کنترل می‌شود و نقش احتمالی جنسیت در این پدیده	پرش عمودی، هفت دیون و با وظایف شناختی همزمان شامل حافظه کوتاه‌مدت، توجه، تصمیم‌گیری سریع و کنترل مهارت	N=۸۰ ۴۰ مرد و ۴۰ زن، ۲۰ تا ۳۰ سال	یک جلسه آزمایشگاهی	فورس پلنت Kistler، سیستم موشن کیپر Qualisys، آزمون‌های شناختی CANTAB (iPad)، سیستم سفارشی قفس و لیزر برای ثبت واکنش	۱. پایان ACLR عملکرد صعب‌تری در تکلیف شناختی حرکتی همزمان داشت.
۲	Ghaderi و همکاران/ ۲۰۲۰ (۲۷)	کارآزمایی بالینی تصادفی (RCT)	تمرینات نوروماسکولار و حس وضعت زانو در ورزش‌گرانی که پس از بازسازی ACL به ورزش برگشته‌اند	تمرینات نوروماسکولار شامل اسکوات تک و دوپا، لانج، پرش از ارتفاع، ایستادن تک‌پا روی سطح ناپایدار، پرش کثرموت، پرش طولی، پاندیهای افقی	N=۲۴ مرد ۱۸ تا ۲۴ سال	۸ هفته، ۲۲ جلسه (۲ بار در هفته)	ایزو کینتیک دینامومتر Biodex برای سنجش حس وضعت مفصل	۱. گروه تمرین کاهش معنی‌دار خطای حس وضعت مفصل زانو را نشان داد. ۲. تمرینات نوروماسکولار موجب بهبود پایدار حس عضلانی زانو پس از پایان فیزیوتراپی استاندارد شد. ۳. این تمرینات عملکرد حس عضلانی ورزشکاران ACLR را قوی‌تر می‌کند.
۳	Khalid و همکاران/ ۲۰۲۲ (۲۸)	کارآزمایی بالینی تصادفی (RCT)	اثربخشی تمرینات نوروماسکولار با تمرینات قدرتی پس از بازسازی ACL در درد، عملکرد، کیفیت زندگی، قدرت و توان	گروه نوروماسکولار شامل اسکوات، لانج، تعادل روی تخته خنثی، پرش‌ها، تمرینات پایداری و چابکی (به تدریج پیشرفته طی هفته ۶ تا ۱۲)، تمرینات قدرتی: تمرینات قهقهی سنی (۸۰٪ کشش زانو، لانج، آرواز، پرس پا)	N=۷۶ ۴۳ مرد و ۳۳ زن، ۲۰ تا ۴۰ سال	۶ هفته، ۱۸ جلسه (۳ جلسه در هفته)	پروستامه عملکرد، پروستامه درد، تست‌های قدرت توان	۱. تمرینات نوروماسکولار کاهش معنی‌دار درد نسبت به تمرینات قدرتی ایجاد کردند. ۲. نتایج تست‌های پرس و توان در گروه نوروماسکولار برتر از گروه تمرین قدرتی بود.
۴	Ghaderi و همکاران/ ۲۰۲۱ (۲۹)	کارآزمایی بالینی تصادفی (RCT)	تمرینات نوروماسکولار با نشانه گذاری تمرکز یونیفرم روی عملکرد	تمرینات نوروماسکولار: اسکوات دوپا، تک‌پا، لانج، دراپ‌جلب، تعادل تک‌پا روی سطح ناپایدار، پرش کثرموت، تک‌پا، پاندیهای افقی، پرش طولی تک‌پا، همه تمرینات با راهنمای تمرکز یونیفرم اجرا شدند.	N=۲۴ مرد، ۲۲ تا ۳۰ سال	۸ هفته ۲۲ جلسه (۲ بار در هفته)	سیستم موشن آتالیز ۴ دورینه (H2۵۰)، فورس پلنت AMTI، ایزو کینتیک دینامومتر Biodex (حس وضعت مفصل، پروستامه عملکرد زانو)	۱. تمرینات نوروماسکولار با تمرکز یونیفرم موجب بهبود یونیفرمیت پرش خورد شد. افزایش شکست تار، توان و زانو کاهش یافت. افزایش توان و توانایی خط‌یافت. ۲. حس وضعت مفصل زانو و امتیاز عملکرد زانو به‌طور معناداری افزایش یافت. ۳. این مداخله به کاهش ریسک آسیب مجدد ACL منجر شد.
۵	Mazidhvie و همکاران/ ۲۰۲۴ (۳۰)	کارآزمایی بالینی تصادفی (RCT)	اثر تمرینات تعادلی شناختی، دو گه با تمرینات تعادلی	هر دو گروه تمرینات تعادلی روی زمین، فرم و پرورد تعادلی انجام دادند. در گروه دو گه، همزمان تکلیف شناختی مثل معکوس گفتن اعداد/روزها	N=۲۸ ۲۵ مرد و ۳ زن، ۱۸ تا ۲۵ سال	۴ هفته، ۱۲ جلسه (۳ جلسه در هفته)	پلتفرم فشار FDM برای COP، پروستامه عملکرد و کیفیت زندگی زانو	۱. تمرینات شناختی-دو گه برتری معناداری نسبت به تمرینات تعادلی ساده نشان داد. ۲. هر دو نوع تمرین بهبود عملکرد حسی-عضلانی پس از بازسازی ACL منجر شد.
۶	Nagelli و همکاران/ ۲۰۲۱ (۳۱)	مطالعه کوهورت	اثر تمرینات نوروماسکولار بر یونیفرمیت زانو در ورزشکاران	پروتکل تمرینات نوروماسکولار شامل ۷ نوع تمرین: ۴۴ پرش روئند، پرش‌های تک‌پا، دلفیت تک‌پا، لانج‌ها، پرش‌های دوپا، تمرینات پایداری مرکزی و چابکی	N=۲۸ ۱۸ ورزشکار ACLR (۸ مرد، ۱۰ زن، ۲۷ تا ۲۹ سال) و ۱۰ ورزشکار سالم (۴ مرد، ۶ زن، ۲۰ تا ۲۲ سال)	۴ هفته، ۱۲ جلسه	سیستم Motion Capture (۱۷ دوربین، H2۲۰)، فورس پلنت، مارکر گذاری سه بعدی	۱. پس از تمرینات نوروماسکولار، زانو، عملکرد زانو افزایش و زمان شکست کاهش یافت. ۲. این تغییرات با یکدیگر بهبود کنترل حرکتی، کاهش استرس مکانیکی زانو و ارتقای عملکرد حسی-عضلانی بود.
۷	Kaya و همکاران/ ۲۰۱۹ (۳۲)	کارآزمایی بالینی تصادفی (RCT) با پیگیری سه ساله	تاثیر تمرینات نوروماسکولار قدام تحتانی بر حس وضعت زانو، قدرت عضلات و سطح عملکرد پایداری پس از بازسازی ACL	گروه مداخله علاوه بر فیزیوتراپی استاندارد، تمرینات نوروماسکولار (کنترل حرکتی شامل: تک‌پا، ایستادن، رسیدن با دست و پا لانج، هل اسب‌آپ، اسب‌خون اسکوات تک‌پا، پلی لگی تک‌پا، دلفیت تک‌پا، اسکوات سومو)	N=۳۲ مرد، ۱۶ تا ۵۳ سال	۲۴ هفته، ۳ تا ۲ جلسه در هفته	Biodex Isokinetic Dynamometer (قدرت و حس وضعت مفصل، تست پرش تک‌پا، آزمون‌های کینتیک)	۱. تمرینات نوروماسکولار موجب بهبود معنادار حس وضعت مفصل زانو شدند. ۲. افزودن تمرینات نوروماسکولار به پروتکل استاندارد فیزیوتراپی در قدرت حس عضلانی و عملکرد حسی-عضلانی مؤثر بود.
۸	Shim و همکاران/ ۲۰۱۵ (۳۳)	نیمه تجربی	اثر تمرینات نوروماسکولار بر پایداری مفصل زانو بعد از بازسازی ACL	تمرینات نوروماسکولار شامل کار با بالاس‌بال در وضعت نیمه اسکوات تک‌پا	N=۱۶ ۱۱ مرد و ۵ زن، ۱۹ تا ۵۰ سال	۱۲ هفته، ۳ جلسه در هفته	پروستامه عملکرد و علائم، تست چابایی قدامی درشتنی، قابلیت عضلانی عضلات منتخب	۱. تمرینات نوروماسکولار به کاهش چابایی قدامی درشتنی پس از بازسازی ACL منجر شدند. ۲. این تمرینات پایداری عملکردی مفصل زانو را به‌طور قابل توجهی بهبود دادند.
۹	Eslami و همکاران/ ۲۰۲۴ (۳۴)	کارآزمایی بالینی تصادفی تک سوگرو (RCT)	تاثیر تمرینات شناختی-حرکتی تعادلی تک‌دووظیفه‌ای و دووظیفه‌ای بر تعادل ایستادگی و عملکرد زانو بعد از بازسازی ACL	گروه تک‌دووظیفه‌ای: تمرینات تعادلی ایستادگی زمین، فرم، پرورده‌ها، گروه دووظیفه‌ای: همان تمرینات + تکلیف حرکتی همزمان (ایستادگی، کنترل لوان آب، دنبال کردن هدف با لیزر، پرش توپ)	N=۲۷ ۲۶ مرد و ۱ زن، ۱۸ تا ۲۵ سال	۴ هفته، ۱۲ جلسه (۳ جلسه در هفته)	سکو فشار، پروستامه عملکرد و کیفیت زندگی زانو	۱. هر دو نوع تمرین موجب بهبود معنادار و عملکرد حسی-عضلانی شدند.
۱۰	Chmielewski و همکاران/ ۲۰۲۴ (۳۵)	نیمه تجربی	تغییرات در تست‌های واکنش دیداری حرکتی و تست‌های پرش تک‌پا پس از تمرینات پیشرفته نوروماسکولار در پیمان بازسازی ACL	تمرینات پیشرفته نوروماسکولار شامل پایداری دینامیک، پلایومتریک، چابکی و قدرتی، با شدت افزایش یافته همراه با تکلیف دو گه ساده (مثل پرش توپ با فرمان کلامی)	N=۲۵ ۱۱ مرد و ۱۴ زن، ۱۴ تا ۳۰ سال	۵ هفته، ۱۰ جلسه (۲ جلسه در هفته)	تست واکنش دیداری حرکتی، تست‌های پرش تک‌پا	۱. عملکرد حرکتی در تست‌های پرش به‌طور معناداری بهبود یافت. ۲. بهبود در تست‌های واکنش دیداری-حرکتی کمتر مشاهده شد.

این تمرینات با هدف قرار دادن مستقیم سیستم عصبی - عضلانی، از طریق سازوکارهای نوروپلاستیته به ایجاد پایداری عملکردی مفصل پس از بازسازی ACL کمک می کنند. تمرینات نوروماسکولار با تأکید بر تمرکز بیرونی توجه، کارایی بیومکانیکی و دقت حس عمقی را پس از بازسازی ACL از طریق بازسازمان دهی در سیستم های عصبی - عضلانی بهبود می بخشد (۳۶، ۳۷). این بهبود از طریق هماهنگی بهتر بین عضلات چهارسر و همسترینگ حاصل می شود (۳۸، ۳۹).

همان گونه که قادری و همکاران (۲۰۲۰) و Kaya و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند (۲۷، ۳۲)، بهبود در حس وضعیت مفصل و قدرت عضلانی پس از هشت تا بیست و چهار هفته تمرین، نشان دهنده بازسازی مؤثر مسیرهای حسی - حرکتی و کاهش وابستگی به راهبردهای جبرانی است. این فرایند، بازتابی از نوروپلاستیته در قشر حرکتی و مخچه محسوب می شود که اساس عملکرد پایدار مفصل را پس از آسیب فراهم می کند.

تمرینات نوروماسکولار با اصلاح الگوهای حرکتی پرخطر و بازآموزی هماهنگی عصبی - عضلانی، خطر آسیب مجدد ACL را کاهش می دهند (۴۰). مطالعات Nigelli (۲۰۲۱) و Khalid (۲۰۲۲)، نشان دادند (۲۸، ۳۱)، که این تمرینات با افزایش فلکشن زانو و کاهش نیروهای برشی قدامی، بار مکانیکی وارد بر رباط را کم می کنند. تمرینات نوروماسکولار علاوه بر تقویت عضلات، نحوه فعال سازی و زمان بندی پاسخ عصبی را نیز بازسازی می کنند و از طریق کاهش والگوس دینامیک و اصلاح استراتژی های فرود، زمینه را برای بازگشت ایمن به ورزش و جلوگیری از آسیب مجدد فراهم می سازند (۲۸، ۳۱). این نتایج با یافته های قادری (۲۰۲۰)، Kaya (۲۰۱۹) و Shim (۲۰۱۵) همسو است (۲۷، ۳۲، ۳۳)، زیرا همگی از تمرینات نوروماسکولار چندبعدی شامل اسکوات، لانج، پرش از ارتفاع، تمرینات تعادلی روی سطوح ناپایدار و حرکات پلايومتریك با بار تدریجی استفاده کردند.

در یک مرور نظام مند Arumugam و همکاران، نشان دادند که تمرینات نوروماسکولار پس از آسیب یا بازسازی ACL می توانند حس وضعیت مفصل و کنترل عضلانی چهارسر را بهبود دهند، اگر چه کیفیت شواهد پایین و نتایج ناهمگون بود (۴۱). با وجود حمایت نسبی از نقش این تمرینات در بهبود کنترل عصبی - عضلانی، شواهد کافی برای تعیین یک پروتکل تمرینی بهینه وجود ندارد. این یافته ها با نتایج مرور حاضر همسو است و بر ضرورت انجام مطالعات با طراحی دقیق تر و پروتکل های استانداردتر برای کاهش ریسک آسیب مجدد تأکید دارد.

از نظر بالینی، ادغام تمرینات نوروماسکولار و حسی - حرکتی در برنامه بازتوانی پس از بازسازی ACL ضروری به نظر می رسد. این تمرینات با بهبود حس عمقی، تعادل و الگوهای حرکتی، خطر آسیب مجدد را کاهش داده و بازگشت ایمن تر به ورزش را تسهیل می کنند. با این حال، این مرور دارای محدودیت هایی چون ناهمگونی در طراحی مطالعات، پروتکل های مداخله و ابزارهای اندازه گیری بود که امکان انجام متاآنالیز را فراهم نکرد. همچنین محدود شدن جستجو به مقالات انگلیسی و در دسترس بودن متن کامل، احتمال حذف برخی مطالعات مرتبط را به همراه دارد. اندازه نمونه کوچک و فقدان پیگیری بلندمدت در بسیاری از مطالعات، تفسیر نتایج در پیشگیری بلندمدت از آسیب مجدد را محدود می کند.

پیشنهاد می شود پژوهش های آینده با طراحی کارآزمایی های تصادفی شده با کیفیت بالا، نمونه های بزرگ تر و دوره های پیگیری طولانی مدت، به شناسایی مؤثرترین مؤلفه های تمرینات نوروماسکولار و حسی - حرکتی بر کاهش ریسک آسیب مجدد و بهبود عملکرد عصبی - عضلانی بپردازند. همچنین بررسی این مداخلات در جمعیت های خاص مانند ورزشکاران زن می تواند مسیر مهمی برای تحقیقات آینده باشد.

نتایج مرور حاضر نشان می دهد که تمرینات نوروماسکولار و حسی - حرکتی به طور معناداری منجر به

سپاسگزاری

از همکاری و مشارکت همه افرادی که در انجام و پیاده سازی این پژوهش نقش داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نماییم. این تحقیق هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است و نویسندگان هیچ گونه تضاد منافی را اعلام نمی کنند.

بهبود عملکرد عصبی - عضلانی (از جمله افزایش قدرت، تعادل و حس عمقی) و کاهش عوامل خطر بیومکانیکی مرتبط با آسیب مجدد می شوند. این تمرینات با اصلاح الگوهای حرکتی پرخطر، بازگشت ایمن تر به ورزش را تسهیل می کنند. بنابراین، گنجاندن این تمرینات در قالب پروتکل های جامع و پیشرونده، به عنوان بخشی ضروری از بازتوانی پس از بازسازی ACL توصیه می شود.

References

1. Anderson D, Cosgarea A. Failed anterior cruciate ligament reconstruction and loss of motion. *Sports Med Arthrosc Rev* 2005; 13(1): 17-24.
2. Buckthorpe M, Danelon F, La Rosa G, Nanni G, Stride M, Della Villa F. Recommendations for hamstring function recovery after ACL reconstruction. *Sports Med* 2021; 51(4): 607-624. PMID: 33332017.
3. Sanders T, Maradit Kremers H, Bryan A, Larson D, Dahm D, Levy B, et al. Incidence of anterior cruciate ligament tears and reconstruction. *Am J Sports Med* 2016; 44(6): 1502-1507. PMID: 26920430.
4. Hopper A, Haff E, Joyce C, Lloyd R, Haff G. Neuromuscular training improves lower extremity biomechanics associated with knee injury during landing in 11- 13year old female netball athletes: a randomized control study. *Front Physiol* 2017; 8:883. PMID: 29163219.
5. Johnston J, Mandelbaum B, Schub D, Rodeo S, Matava M, Silvers-Granelli H, et al. Video analysis of anterior cruciate ligament tears in professional American football athletes. *Am J Sports Med* 2018; 46(4): 862-868. PMID: 29466019.
6. Olivier F, Olivier B, MacMillan C, Briel S. Effect of neuromuscular injury prevention strategies on injury rates in adolescent males playing sport: a systematic review protocol. *JBIC Evid Synth* 2024;22(4):689-699. PMID: 37972948.
7. Annear P, Henderson A. Partial anterior cruciate ligament knee reconstruction with accelerated anterior cruciate ligament rehabilitation. *Orthop J Sports Med* 2016; 4(2 Suppl): 2325967116S00025.
8. Wetters N, Weber A, Wuerz T, Schub D, Mandelbaum B. Mechanism of injury and risk factors for anterior cruciate ligament injury. *Oper Tech Sports Med* 2016; 24(1): 2-6.
9. Wu J, Che X. Evaluation on curative effects of isokinetic muscle strength training for improving muscle function in patients with knee osteoarthritis. *Medicine (Baltimore)* 2021; 100(45): e27655. PMID: 34766567.
10. Beynnon B, Vacek P, Newell M, Tourville T, Smith H, Shultz S, et al. The effects of level of competition, sport, and sex on the incidence of first-time noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med* 2014; 42(8):1806-1812. PMID: 25016012.

11. Hewett T, Myer G, Ford K. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes. *Am J Sports Med* 2006; 34(2):299-311. PMID: 16423913
12. Rezazadeh F, Shojaeddin SS, Badicu G. Functional stretching decreases knee joint loading in male athletes with gastroc-soleus tightness. *J Mens Health* 2021; 17(2):84-93.
13. Ardern C, Taylor N, Feller J, Webster K. 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. PMID: 25157180.
14. Webster K, Feller J. Expectations for return to preinjury sport before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2019; 47(3): 578-583. PMID: 30649903.
15. Wiggins A, Grandhi R, Schneider D, Stanfield D, Webster K, Myer G. Risk of secondary injury in younger athletes after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2016; 44(7): 1861-1876. PMID: 26772611.
16. Courtney C, Atre P, Foucher K, Alsouhibani A. Hypoesthesia after anterior cruciate ligament reconstruction: the relationship between proprioception and vibration perception deficits in individuals greater than oneyear post-surgery. *Knee* 2019; 26(1): 194-200. PMID: 30497806.
17. Relph N, Herrington L. Knee joint position sense ability in elite athletes who have returned to international level play following ACL reconstruction: a cross-sectional study. *Knee* 2016; 23(6):1029-1034. PMID: 27712856.
18. Arundale A, Bizzini M, Giordano A, Hewett T, Logerstedt D, Mandelbaum B, et al. Exercise-based knee and anterior cruciate ligament injury prevention. *J Orthop Sports Phys Ther* 2018;48(9): A1-A42. PMID: 30170521.
19. Panics G, Tallay A, Pavlik A, Berkes I. Effect of proprioception training on knee joint position sense in female team handball players. *Br J Sports Med* 2008; 42(6):472-476. PMID: 18390919.
20. Leone C, Feys P, Moumdjian L, D'Amico E, Zappia M, Patti F. Cognitive-motor dual-task interference: a systematic review of neural correlates. *Neurosci Biobehav Rev* 2017; 75:348-360. PMID: 28104413.
21. Moreira P, Dieguez G, Bredt S, Praça G. The acute and chronic effects of dual-task on the motor and cognitive performances in athletes: a systematic review. *Int J Environ Res Public Health* 2021; 18(4): 1732. PMID: 33579018.
22. Wu J, Qiu P, Lv S, Chen M, Li Y. The effects of cognitive-motor dual-task training on athletes' cognition and motor performance. *Front Psychol* 2024; 15: 1284787. PMID: 38390413.
23. Strong A, Boraxbekk C, Markström J. Greater cognitive-motor interference among patients after anterior cruciate ligament reconstruction compared with controls. *Am J Sports Med* 2025; 53(5): 1041-1049. PMID: 40035612.
24. Downs S, Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. *J Epidemiol Community Health* 1998; 52(6): 377-384. PMID: 9764259.

25. Sterne J, Savović J, Page M, Elbers R, Blencowe N, Boutron I, et al. RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ* 2019; 366: 14898. PMID: 31462531.
26. Sterne J, Hernán M, Reeves B, Savović J, Berkman N, Viswanathan M, et al. ROBINS-I: a tool for assessing risk of bias in non-randomised studies of interventions. *BMJ* 2016;355: i4919. PMID: 27733354.
27. Ghaderi M, Letafatkar A, Almonroeder T, Keyhani S. Neuromuscular training improves knee proprioception in athletes with a history of anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2020; 80:105157. PMID: 32871397.
28. Khalid K, Anwar N, Saqulain G, Afzal M. Neuromuscular training following anterior cruciate ligament reconstruction - pain, function, strength, power & quality of life perspective: a randomized control trial. *Pak J Med Sci* 2022;38(8):2175-2181. PMID: 36415269.
29. Ghaderi M, Letafatkar A, Thomas A, Keyhani S. Effects of a neuromuscular training program using external focus attention cues in male athletes with anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 2021; 13(1): 49. PMID: 33964961.
30. Eslami F, Ahadi J, Mazidluie M, Ghanava T, Moradi A. Comparative analysis of dual-task and single-task balance exercises in improving static balance in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction. *J Modern Rehabil* 2024;18(3):1-8.
31. Nagelli C, Wordeman S, Di Stasi S, Hoffman J, Marulli T, Hewett T. Neuromuscular training improves biomechanical deficits at the knee in anterior cruciate ligament-reconstructed athletes. *Clin J Sport Med* 2021; 31(2):113-119. PMID: 30747746.
32. Kaya D, Guney-Deniz H, Sayaca C, Calik M, Doral M. Effects on lower extremity neuromuscular control exercises on knee proprioception, muscle strength, and functional level in patients with ACL reconstruction. *Biomed Res Int* 2019; 2019: 1694695. PMID: 31828089.
33. Shim J, Choi H, Shin J. Effects of neuromuscular training on knee joint stability after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Phys Ther Sci* 2015; 27(12): 3613-3617. PMID: 26834316.
34. Eslami F, Ahadi J, Mazidluie M, Ghanava T, Moradi A. Comparative analysis of dual-task and single-task balance exercises in improving static balance in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction. *J Modern Rehabil* 2024; 18(3):1-8.
35. Chmielewski T, Obermeier M, Meierbachtol A, Jenkins A, Stuart M, Sikka R, et al. Advanced neuromuscular training differentially changes performance on visuomotor reaction tests and single-leg hop tests in patients with ACL reconstruction. *Int J Sports Phys Ther* 2024; 19(11): 1324-1337. PMID: 39502551.
36. Blackburn J, Norcross M, Cannon L, Zinder S. Hamstrings stiffness and landing biomechanics linked to anterior cruciate ligament loading. *J Athl Train* 2013; 48(6):764-772. PMID: 24303987.
37. Cruz A, Bell D, McGrath M, Blackburn T, Padua D, Herman D. The effects of three jump landing tasks on kinetic and kinematic measures: implications for ACL

- injury research. *Res Sports Med* 2013; 21(4): 330-342. PMID: 24067119.
38. Withrow T, Huston L, Wojtys E, Ashton-Miller J. Effect of varying hamstring tension on anterior cruciate ligament strain during in vitro impulsive knee flexion and compression loading. *J Bone Joint Surg Am* 2008; 90(4): 815-823. PMID: 18381320.
 39. Shao Q, MacLeod T, Manal K, Buchanan T. Estimation of ligament loading and anterior tibial translation in healthy and ACL-deficient knees during gait and the influence of increasing tibial slope using EMG-driven approach. *Ann Biomed Eng* 2011; 39(1): 110-121. PMID: 20683675.
 40. Pangestuputra A, Changestu D. Neuromuscular training in ACL injury prevention: a narrative review. *Orthop J Sports Med* 2024; 12(10 Suppl 3): 2325967124S00394.
 41. Arumugam A, Björklund M, Mikko S, Häger C. Effects of neuromuscular training on knee proprioception in individuals with anterior cruciate ligament injury: a systematic review and GRADE evidence synthesis. *BMJ Open* 2021; 11(5): e049226. PMID: 34006560.