

A Systematic Review of Biomechanical Risk Factors for Non-Contact Anterior Cruciate Ligament Injury: Discrepancies Between Laboratory Assessments and Ecologically Valid Match Conditions

Shirin Aali¹
Farhad Rezazadeh²
Parya Sharifi³

¹ Assistant Professor, Department of Sport Science Education, Farhangian University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

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

(Received January 25, 2026; Accepted June 16, 2026)

Abstract

Background and purpose: Despite substantial efforts to correct biomechanical risk factors such as dynamic knee valgus and hip muscle weakness, the incidence of anterior cruciate ligament (ACL) injuries remains high among athletes. This systematic review aimed to examine the discrepancies between laboratory-based kinematic assessments and real-world ACL injury mechanisms, while also evaluating the role of cognitive factors in injury occurrence.

Materials and methods: A comprehensive literature search was conducted across PubMed, Web of Science, PEDro, and Scopus, with Google Scholar searched to identify grey literature. Eligible studies published between January 1, 2010, and January 1, 2025, were identified. Studies investigating landing and cutting biomechanics, systematic video analyses of real ACL injuries, and the effects of cognitive load on movement biomechanics were included. The methodological quality of the 26 eligible studies was assessed using a modified Downs and Black checklist, and the findings were synthesized narratively.

Results: Video analyses consistently demonstrated that real-world ACL injuries often occur during defensive and unpredictable situations and are not necessarily associated with severe knee valgus. In contrast, laboratory-based kinematic measures showed only weak correlations with movement patterns observed during competition. Furthermore, introducing cognitive load and decision-making requirements during cutting maneuvers significantly increased knee joint loading, joint torques, and other biomechanical variables associated with ACL injury risk, yet these factors are seldom incorporated into conventional screening protocols.

Conclusion: The evidence suggests that laboratory tests conducted under fully predictable conditions may be insufficient for predicting ACL injury risk in the dynamic and complex environment of competitive sport. Rather than being solely the consequence of biomechanical deficits, ACL injury appears to result from the interaction between impaired motor control and cognitive demands encountered during sport-specific tasks. Accordingly, screening and injury prevention programmes should extend beyond technique correction to incorporate cognitive challenges and training under unpredictable conditions, thereby improving their ecological validity and better reflecting the demands of real-game situations.

Keywords: ACL Injury, Biomechanics, Video Analysis, Unpredictability, Injury Screening, Knee Valgus.

J Mazandaran Univ Med Sci 2026; 36 (258): 171-183 (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 عوامل خطر بیومکانیکی آسیب غیربرخوردی رابط صلیبی قدامی با تأکید بر تفاوت ارزیابی‌های آزمایشگاهی و شرایط مسابقه با اعتبار اکولوژیک

شیرین عالی^۱

فرهاد رضازاده^۲

پریا شریفی^۳

چکیده

سابقه و هدف: با وجود تمرکز بر اصلاح عوامل خطر بیومکانیکی مانند والگوس دینامیک زانو و ضعف عضلات هیپ، نرخ آسیب روابط متقاطع قدامی در ورزشکاران همچنان بالاست. این مطالعه مروری سیستماتیک با هدف بررسی تفاوت بین کینماتیک آزمایشگاهی و مکانیزم‌های واقعی آسیب و نقش عوامل شناختی در بروز آن، انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه مروری سیستماتیک، جستجوی جامع در پایگاه‌های 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 ۲۰۱۰ تا ۱ ژانویه ۲۰۲۵ را پوشش داد. مطالعاتی که به بررسی بیومکانیک فرود/برش، آنالیز ویدئویی آسیب‌های واقعی و تأثیر بارهای شناختی پرداخته بودند، وارد مطالعه شدند. کیفیت روش شناسی ۲۶ مقاله نهایی با استفاده از چک لیست تعدیل شده Downs & Black ارزیابی شد و داده‌ها با روش سنتز روایی تحلیل گردیدند.

یافته‌ها: آنالیزهای ویدئویی نشان دادند که آسیب‌های واقعی اغلب در شرایط دفاعی و پیش‌بینی نشده رخ می‌دهند و الزاماً با والگوس شدید همراه نیستند. همچنین همبستگی ضعیفی بین کینماتیک آزمایشگاهی و حرکات واقعی مسابقه مشاهده شد. افزودن بار شناختی و تصمیم‌گیری حین مانورهای برش، مکانیک زانو و گشتاورهای مفصلی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد؛ عاملی که در غربالگری‌های رایج کم‌تر مورد توجه است.

استنتاج: تست‌های آزمایشگاهی که در محیط‌های کاملاً قابل پیش‌بینی انجام می‌شوند، ممکن است به‌تنهایی برای پیش‌بینی آسیب در محیط پیچیده مسابقه کافی نباشند. به نظر می‌رسد آسیب روابط متقاطع قدامی حاصل تعامل نقص در کنترل حرکتی و خطاهای شناختی است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود پروتکل‌های غربالگری و پیشگیری، علاوه بر اصلاح تکنیک، شامل چالش‌های عصبی-شناختی و تمرینات در شرایط پیش‌بینی نشده باشند تا شرایط واقعی مسابقه را بهتر بازتاب دهند.

واژه‌های کلیدی: آسیب روابط متقاطع قدامی، بیومکانیک، آنالیز ویدئویی، پیش‌بینی ناپذیری، غربالگری آسیب، والگوس زانو

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

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

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

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

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۵ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۴۰۴/۱/۱۹ تاریخ تصویب: ۱۴۰۵/۳/۲۶

مقدمه

آسیب رباط متقاطع قدامی (ACL) (Anterior cruciate ligament) همچنان یکی از جدی ترین چالش ها در طب ورزشی محسوب می شود که علاوه بر تحمیل هزینه های اقتصادی سنگین به سیستم های درمانی، تهدیدی اساسی برای تداوم فعالیت حرفه ای ورزشکاران است (۱). با وجود توسعه برنامه های پیشگیری از آسیب در دو دهه اخیر، شیوع این آسیب کاهش پایداری نشان نداده است و به ویژه در ورزشکاران زن نخبه در رشته های پر برخوردی مانند فوتبال و بسکتبال همچنان بالا گزارش می شود (۲).

رویکرد سنتی بیومکانیک، نقص های عصبی عضلانی و کینماتیک نامطلوب اندام تحتانی را عامل اصلی آسیب ACL می داند. ضعف تثبیت کننده های پروگزیمال هیپ می تواند به والگوس دینامیک زانو منجر شود و منبای توسعه ابزارهای غربالگری و مداخلات پیشگیرانه است (۳). سیستم های امتیازدهی خطای فرود و تست های پرش فرود عمودی برای شناسایی ورزشکاران پرخطر در محیط کنترل شده طراحی شده اند (۴، ۵). فرض اصلی این رویکرد آن است که اصلاح الگوهای حرکتی آزمایشگاهی، با تمرین و بازخورد، نرخ آسیب را در زمین مسابقه کاهش می دهد (۶).

با این حال، اعتبار اکولوژیکی آزمون های غربالگری آزمایشگاهی در پیش بینی آسیب ACL محدود است (۱). مطالعات طولی نشان می دهند که اگر چه نمرات این آزمون ها با کینماتیک پرخطر در همان شرایط مرتبط اند، اما توان پیش بینی محدودی برای وقوع آسیب در آینده دارند (۴، ۷). شواهد جدید حاکی از آن است که الگوهای حرکتی آزمایشگاهی با رفتار ورزشکاران در شرایط پیچیده و غیرقابل پیش بینی مسابقه تفاوت اساسی دارند و توزیع بار مفصلی در میدان واقعی متفاوت است (۸). تضاد میان یافته های آزمایشگاهی و رخداد های میدانی زمانی برجسته تر می شود که نتایج آنالیزهای ویدئویی آسیب های واقعی بررسی می گردند (۹). مطالعات اخیر بر روی فوتبالست ها

و بسکتبالیست های حرفه ای نشان داده اند که آسیب ها اغلب در موقعیت های دفاعی، پرس کردن حریف یا پس از فرودهای تک پا رخ می دهند و لزوماً همیشه با الگوی کلاسیک والگوس شدید همراه نیستند (۱۰، ۱۱).

یکی از محدودیت های اساسی مدل های سنتی آسیب ACL، نادیده گرفتن نقش عوامل شناختی و شرایط پیش بینی ناپذیر است (۱۲). در محیط واقعی ورزش، حرکات برش و فرود غالباً در پاسخ به محرک های محیطی و تحت فشار زمانی انجام می شوند (۱۳). شواهد نشان می دهد اجرای تکالیف غیرقابل پیش بینی و همراه با بار شناختی، با افزایش گشتاور ابداکشن زانو، نیروهای برشی قدامی و زاویه والگوس زانو همراه است (۱۳، ۱۴). علاوه بر این، یافته های تصویربرداری عصبی ارتباط میان تغییرات فعالیت نواحی حسی - حرکتی مغز و الگوهای بیومکانیکی پرخطر را تأیید می کنند که بر ماهیت عصبی-شناختی آسیب ACL دلالت دارد (۱۵).

تضاد میان یافته های آزمایشگاهی و عملکرد واقعی هنگام بررسی آنالیزهای ویدئویی آسیب به وضوح آشکار می شود (۹). آسیب های ACL در مسابقات واقعی اغلب در موقعیت های دفاعی و درگیری بر سر توپ رخ می دهند. این شرایط با سناریوهای کنترل شده آزمایشگاهی تفاوت اساسی دارد (۱۰، ۱۶). نکته قابل توجه این است که الگوی کلاسیک والگوس شدید که در آزمایشگاه به عنوان مکانیزم اصلی معرفی می شود، همیشه در لحظه آسیب مشاهده نمی گردد (۹). در عوض، ترکیبی از چرخش تنه، بارگذاری نامتقارن و اکستنشن نسبی زانو گزارش شده است (۲، ۱۱). علاوه بر این، مطالعات کلاستر نشان می دهند هیچ تکنیک برش واحدی پیش بینی کننده قطعی آسیب نیست (۱۷).

بنابراین، به نظر می رسد یک شکاف شواهد (Evidence Gap) اساسی میان مدل های بیومکانیکی آزمایشگاهی و مکانیزم های واقعی آسیب در میدان وجود دارد (۱۸). تمرکز انحصاری بر اصلاح کینماتیک در

متاآنالیزها (پریسما ۲۰۲۰) برای هدایت این بررسی جامع استفاده گردید (۱۹). فرایند سیستماتیک شامل چهار مرحله کلیدی، شناسایی مقالات مرتبط با بیومکانیک و ویدئو آنالیز، غربالگری دقیق بر اساس معیارهای ورود، ارزیابی کیفیت روش شناختی مطالعات، و گنجاندن نهایی مقالات واجد شرایط برای سنتز روایی، بود. جریان کامل این فرایند انتخاب، شامل تعداد مطالعات شناسایی شده و حذف شده در هر مرحله، در نمودار PRISMA نشان داده شده است (تصویر شماره ۱).

استراتژی جستجو

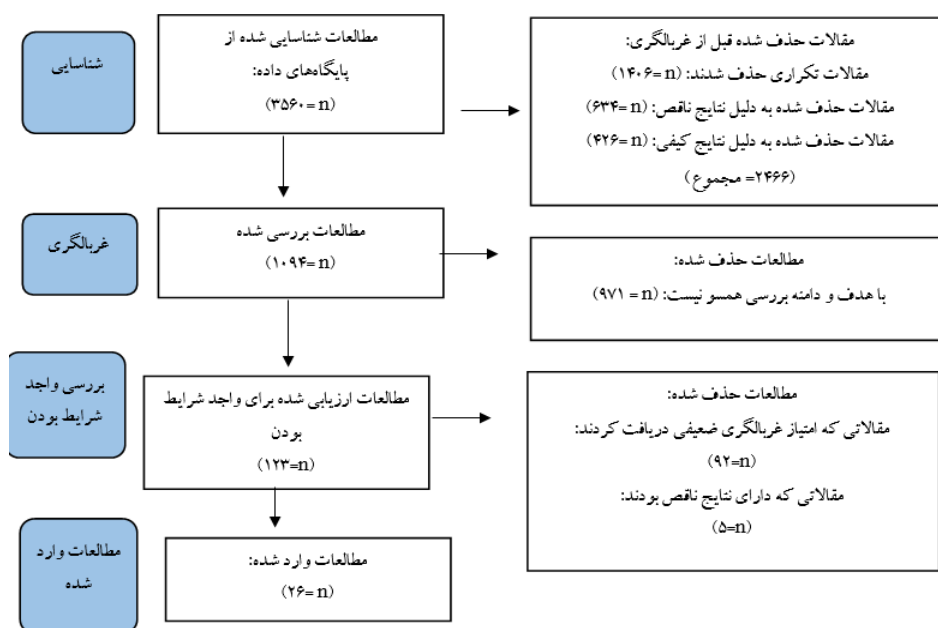
پایگاه‌های داده PubMed، Web of Science، Scopus و PEDro در بازه زمانی ۱ ژانویه ۲۰۱۰ تا ۱ ژانویه ۲۰۲۵ جستجو شدند. به منظور پوشش منابع خاکستری و ادبیات نوین، Google Scholar نیز بررسی شد و ۱۰۰ نتیجه نخست (۱۰ صفحه اول) بر اساس میزان ارتباط غربالگری گردید (۲۰).

محیط‌های بسته و بدون در نظر گرفتن تقاضاهای شناختی و محیطی، ممکن است دلیل اصلی شکست در کاهش نرخ آسیب‌های رابط متقاطع قدامی باشد (۱). هدف از این مطالعه مروری سیستماتیک، سنتز انتقادی شواهد موجود پیرامون این پارادوکس است تا با مقایسه یافته‌های کینماتیک آزمایشگاهی با واقعیت‌های آنالیز ویدئویی و مطالعات شناختی، درک جامع‌تری از اتیولوژی آسیب رابط متقاطع قدامی ارائه دهد و راهکارهای نوین مبتنی بر شواهد را برای پر کردن این شکاف پیشنهاد نماید.

مواد و روش‌ها

این مطالعه مروری سیستماتیک به ارزیابی شواهد موجود درباره تفاوت میان یافته‌های آزمایشگاهی و مکانیزم‌های واقعی آسیب رابط متقاطع قدامی پرداخت تا درک دقیق‌تری از اتیولوژی این آسیب ارائه دهد. با پیروی از استانداردهای روش شناختی تعیین شده برای گزارش دهی شفاف، از دستورالعمل‌های موارد گزارش دهی ترجیحی برای بررسی‌های سیستماتیک و

جستجوی پایگاه‌های داده (PubMed، Web of Science، PEDro، Scopus) و موتور جستجوی Google Scholar



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

جستجو در PubMed از طریق پلتفرم MEDLINE انجام شد و در Web of Science، بخش Web of Science Core Collection شامل SCI-EXPANDED مورد بررسی قرار گرفت. فرآیند جستجو بین ۲ تا ۵ ژانویه ۲۰۲۵ تکمیل شد. تمامی نتایج در نرم افزار EndNote (نسخه ۲۰۲۵) وارد شده و موارد تکراری به صورت دستی حذف شدند. غربالگری عناوین، چکیده‌ها و متون کامل توسط دو پژوهشگر مستقل انجام شد و در صورت بروز اختلاف، تصمیم نهایی از طریق بحث، توافق و در صورت لزوم با نظر پژوهشگر سوم اتخاذ گردید.

در هر پایگاه داده، جستجو بر اساس چارچوب PICOS و با استفاده از عملگرهای بولی (OR/AND) در عناوین، چکیده‌ها و کلمات کلیدی انجام شد. استراتژی جستجو بر پایه سه مفهوم اصلی، جامعه هدف (رباط صلیبی قدامی و آسیب‌های آن)، متغیرهای بیومکانیکی (مانند عضلات دور کننده ران، والگوس پویای زانو و کینماتیک) و بستر ارزیابی (شامل تحلیل ویدئویی، شرایط پیش‌بینی نشده و بار شناختی)، تدوین شد. عبارات جستجو به گونه‌ای بسط داده شدند که طیف وسیعی از مطالعات، از پژوهش‌های کلاسیک تا رویکردهای نوین مبتنی بر آنالیز ویدئویی و هوش مصنوعی را به طور جامع پوشش دهند. همچنین، فهرست منابع مقالات مروری کلیدی و مطالعات مرتبط به صورت دستی و با روش گلوله‌برفی غربالگری شد (۲۱).

معیارهای واجد شرایط بودن و انتخاب مطالعه

مطالعات در صورتی وارد این مرور شدند که شامل ورزشکاران زن و مرد در سطوح حرفه‌ای یا دانشگاهی رشته‌های تیمی پرخطر (مانند فوتبال، بسکتبال و هندبال) یا افراد دارای سابقه بازسازی ACL بوده و بیومکانیک اندام تحتانی را طی مانورهای فرود یا برش در محیط آزمایشگاهی یا حین مسابقه بررسی کرده باشند. بستر

ارزیابی شامل آنالیز ویدئویی صحنه‌های آسیب واقعی، سیستم‌های ثبت حرکت (Motion Capture Systems) آزمایشگاهی یا شرایط پیش‌بینی نشده و بار شناختی بود و مطالعات می‌بایست داده‌های کمی یا توصیفی مشخصی از کینماتیک اندام تحتانی، با تأکید بر ضعف عضلات ابداکتور و اکسترنال روتاتور هپ و والگوس دینامیک زانو، گزارش می‌کردند. تنها مطالعات منتشر شده به زبان فارسی یا انگلیسی در نظر گرفته شدند. مطالعاتی که صرفاً بر تکنیک‌های جراحی تمرکز داشتند، مطالعات جسدی فاقد بارگذاری دینامیک واقعی (به جز موارد ضروری برای تبیین مکانیسم پایه) یا پژوهش‌هایی که داده‌های شفاف از الگوهای حرکتی تنه و اندام تحتانی ارائه نمی‌دادند، از مرور حذف شدند. غربالگری عناوین، چکیده‌ها و متون کامل به صورت مستقل توسط دو داور انجام شد و اختلاف نظرها از طریق اجماع یا در صورت لزوم با نظر داور سوم برطرف گردید.

استخراج داده‌ها

به منظور استخراج نظام‌مند داده‌ها، یک فرم استاندارد استخراج داده طراحی شد که پیش از آغاز فرآیند، به صورت آزمایشی بر روی چند مطالعه منتخب ارزیابی و پس از اعمال اصلاحات لازم نهایی گردید (جدول شماره ۱). فرم نهایی با استفاده از نرم افزار Word تهیه شد و برای جمع‌آوری سیستماتیک اطلاعات از تمامی مطالعات وارد شده به کار رفت. استخراج داده‌ها به طور مستقل توسط دو نویسنده با تجربه در روش‌های توانبخشی و مرور سیستماتیک انجام شد. اطلاعات استخراج شده شامل اسامی نویسندگان، سال انتشار، مجله، اهداف و طراحی مطالعه، ویژگی‌های جمعیت و نمونه (اندازه، جنسیت و سن)، مدت مداخله، تجهیزات مورد استفاده، یافته‌های کلیدی، نقد روش‌شناسی و نتیجه‌گیری هر مقاله بود.

جدول شماره ۱: جزئیات مقالات ارزیابی شده

اسامی نویسندگان / سال / مجله	اهداف مطالعه	طراحی تحقیق	جمعیت نمونه / اندازه / جنسیت / سن	مدت مطالعه	تجهیزات	نقد مقاله	نتیجه گیری
Achenbach, L., et al. / 2024 / British Journal of Sports Medicine(22)	شناسایی مکتیزم‌ها و الگوهای آسیب ACL در فوتبال زنان با تحلیل ویدئویی مسابقات	CS(Case Series)	۳۷ فوتبالیست زن حرفه‌ای آلمان، ۲۳،۴ سال	A/N	آنالیز ویدئویی مسابقات با فرم استاندارد	بسیار معتبر؛ تمرین باید فراتر از اصلاح تک‌تک‌بندی باشد.	شناسایی چهار الگوی متمایز آسیب؛ مکتیزم‌ها چندبعدی و فراتر از والگوس ساده هستند.
Buckthorpe, M., et al. / 2024 / BMJ Open Sport & Exercise Medicine(16)	توصیف مکتیزم، موقعیت، یومکتیک و خطاهای عصبی-شناختی آسیب ACL در فوتبال مردان اسپانیا.	CS	۱۱۵ آسیب ACL در فوتبالیست‌های مرد لالیگا	A/N	Wyscout Kinovea	بسیار معتبر؛ عوامل موقعیتی مقدم بر تکنیک هستند.	آسیب‌ها عمدتاً حین پرس دفاعی رخ داده و خطاهای شناختی مقدم بر نارسایی مکانیکی بودند.
Della Villa, F., et al. / 2025 / The American Journal of Sports Medicine(9)	توصیف مکتیزم، موقعیت و کینماتیک آسیب ACL در لیگ برتر فوتبال انگلستان.	CS L4	در فوتبالیست‌های مرد انگلیس	A/N	Panini, Wyscout GPEM Kinovea	استاندارد طلایی؛ مبتنی تعریف مکتیزم آسیب.	والگوس دینامیک همواره وجود نداشت؛ چرخش ته و کینماتیک ساجیتال نقش کلیدی داشتند.
Lucamo, S., et al. / 2021 / The American Journal of Sports Medicine(22)	توصیف جامع مکتیزم، موقعیت و یومکتیک آسیب ACL در فوتبال زنان	CS	۳۵ ویدئوی آسیب در فوتبالیست‌های زن حرفه‌ای	A/N	Wyscout Kinovea	بسیار معتبر؛ تفاوت‌های جنسیتی مکتیزم آسیب.	برخورد غیرمستقیم و زوای نزدیک به اکشن، مکتیزم‌های غالب در زنان بودند.
Montgomery, C., et al. / 2016 / British Journal of Sports Medicine(23)	توصیف مکتیزم آسیب ACL در راگی مردان با آنالیز ویدئویی سیستماتیک.	Semi-quant Cohort (Video)	۳۶ ویدئوی آسیب ACL در راگی حرفه‌ای مردان	A/N	Sportscode QuickTime	معتبر؛ مکتیزم وابسته به نوع ورزش است.	تغییر جهت در راگی بیونین.
Petway, A.J., et al. / 2023 / Journal of Applied Biomechanics(11)	شناسایی عوامل آسیب ACL و کمی‌سازی کینماتیک اندام تحتانی در بسکتبال NBA	Retro Video	ویدئوی آسیب در بسکتبالیست‌های NBA حدود ۲۵ سال	A/N	۳۶۰ MyDartFish	بسیار معتبر؛ DVJ دوا نماینده مکتیزم واقعی نیست.	فرد تک‌پا همواره با انحراف جلویی ته، مکتیزم غالب آسیب بود.
Straub, R.K. & Powers, C.M. / 2025 / British Journal of Sports Medicine(3)	بررسی پیشینی آسیب قوطه ACL با آنالیز زوای ویدئویی در ورزشکاران زن پس‌وزن‌سوزی	Retro Case-Control	۸۰ ورزشکار زن پس از ACLR ۱۷ سال	A/N	H2۰۰ Imager Kinovea	مشروط؛ بلین ویدئو و غربالگری، دقت کمتر از DR۳	پیشینی آسیب‌سبب در زنان مشابه مردان، اما والگوس شدیدتر بودند.
Temell, K.H., et al. / 2025 / The American Journal of Sports Medicine(24)	توصیف مکتیزم، موقعیت و یومکتیک آسیب ACL در بسکتبال زنان حرفه‌ای.	CS L4	۴۱ ویدئوی آسیب در بسکتبالیست‌های زن اروپا حدود ۱۵ سال	A/N	Petway GPEM	بسیار معتبر؛ تأیید یافته‌های Petway در زنان.	جمع آسیب‌ها در دقایق پایانی بازی، نقش خشکی جسمی-شناختی را نشان داد.
Tosarelli, F., et al. / 2024 / The Orthopaedic Journal of Sports Medicine(10)	توصیف یومکتیک، موقعیت و توزیع آسیب ACL در بسکتبال مردان حرفه‌ای.	CS L4	۳۶ ویدئوی آسیب در بسکتبالیست‌های حرفه‌ای اروپا، حدود ۱۶،۲ سال	A/N	Synergy Dartfish Kinovea	بسیار معتبر؛ نقش خشکی تأیید شد.	جمع آسیب‌ها در دقایق پایانی بازی، نقش خشکی جسمی-شناختی را نشان داد.
Celebrini, R.G., et al. / 2014 / Clinical Journal of Sport Medicine(6)	بررسی اثر استراتژی PAC-Core در گرم کردن فوتبال بر فاکتورهای خطر یومکتیکی ACL.	Single-blind RCT	۲۰ بازیکن نیمه زن فوتبال نوجوان، حدود ۱۵ سال	۶ هفته	Bertec و Optotrak	معتبر؛ آزمایشگاهی؛ اقبال به زمین رادر شرایط آزمایشگاهی کاهش داد.	کینماتیک آزمایشگاهی با میدان مغناطیسی است و ممکن است خطر را کمتر برآورد کند.
Di Paolo, S., et al. / 2023 / European Journal of Sport Science(18)	مقایسه کینماتیک اندام تحتانی زنان در حرکات چلبکی آزمایشگاهی و میدانی.	CS	۲۸ بازیکن زن با استعداد فوتبال، ۱۴،۹ سال.	یک جلسه جمع آوری داده	Xsens Link و Vicon (آزمایشگاهی)	سنسورهای اینرسی پوشیدنی و موشن کپچر (آزمایشگاهی)	تغییر پارادایم رد اعتبار مطلق تست‌های آزمایشگاهی.
Di Paolo, S., et al. / 2023 / Sensors(8)	بررسی تطبیق فاکتورهای خطر آزمایشگاهی ACL با الگوهای برخط میدانی با داده کاوی.	CS	۲۴ بازیکن زن فوتبالیست. سن: ۱۴،۹ تا ۰،۹ سال.	۲۴ بازیکن زن فوتبالیست.	Vicon (آزمایشگاهی) و Xsens (زمین)	بسیار معتبر؛ ضرورت فناوری برخط در شرایط واقعی زمین معتبر بودند.	سنسورها برای شناسایی الگوهای خطر در شرایط واقعی زمین معتبر بودند.
Dix, C., et al. / 2021 / International Journal of Sports Physical Therapy(25)	ارزیابی اثر برنامه ۱۱+ بر گشتاور ابلانکشن زانو و والگوس در برش ۹۰ درجه.	PC(Prospective Cohort)	۴۶ بازیکن زن فوتبال دانشگاهی	۱۲ هفته.	Bertec و Vicon	معتبر؛ تمرینات استاندارد مکانیک پایه را بهبود می‌دهند.	برنامه ۱۱+ موجب کاهش گشتاور ابلانکشن زانو حین برش شد.
Johnson, J.L., et al. / 2020 / Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy (IOSPT)(26)	بررسی اثر تمرینات اغتشاشی بر کاهش آسیب مجدد ACL در زنان.	Single-blind RCT	۳۹ زن پس از ACLR (SAPP اغتشاشی)	۵ هفته، ۲ جلسه در هفته	تجهیزات تعادلی I Division Kinect ۲۷ و Physimax AMTI و Qualisys	بسیار معتبر؛ تمرین باید شامل LESS با آسیب مرتبط بود، اما برای غربالگری فردی محدودیت داشت.	افزودن اغتشاش تمرینی، آسیب مجدد را کاهش داد (در برش ۹۰ درجه).
Lisman, P., et al. / 2021 / International Journal of Sports Physical Therapy (IOSPT)(5)	بررسی ارتباط نمره LESS بدون مارکر با وقوع آسیب اندام تحتانی.	PC	۱۱۰ ورزشکار زن دانشگاهی	یک جلسه.	I Division Kinect ۲۷ و Physimax AMTI و Qualisys	بسیار معتبر؛ ضرورت فناوری برخط در شرایط واقعی زمین معتبر بودند.	بسیار معتبر؛ ضرورت فناوری برخط در شرایط واقعی زمین معتبر بودند.
Mausehund, L. & Krosshaug, T. / 2024 / The American Journal of Sports Medicine(7)	مقایسه یومکتیک زانو در برش میان زنان با و بدون سابقه ACL و ارتباط آن با آسیب ثانویه.	PC	۷۵۶ ورزشکار زن نیمه هندبال و فوتبال	مشاهده با پیگیری ۸ ساله.	AMTI و Qualisys	رد فرضیه سنی؛ کینماتیک به‌تأیید پیش‌بین نیست.	یومکتیک پایه برش ثوابت آسیب ACL آینده را پیش‌بینی کند.
Mausehund, L., et al. / 2025 / Frontiers in Sports and Active Living(17)	شناسایی خوشه‌های حرکتی برش و ارتباط آن‌ها با خطر آسیب ACL با آنالیز کلاستر.	Original Research (Cluster Analysis)	۷۵۶ ورزشکار زن نیمه	A/N	K-Link و Qualisys means	تغییر پارادایم؛ ارتباط خطی تکنیک-آسیب وجود ندارد.	خطر آسیب به یک تکنیک خاص محدود نیست و ماهیتی چندعاملی دارد.
Peel, S.A., et al. / 2018 / Journal of Applied Biomechanics(14)	مقایسه متغیرهای خطر ACL بین تکالیف پیش‌بینی‌نشده برش و کاهش شتاب.	CS-Lab	۱۱ زن فعال تفریحی، حدود ۲۲ سال	۱۱ زن فعال تفریحی، حدود ۲۲ سال	Analysis Motion Bertec و	معتبر؛ تفاوت بار مکانیکی بین قدامی زانو را پیش از کاهش شتاب افزایش دادند.	برش‌های پیش‌بینی‌نشده نیروی برشی قدامی زانو را پیش از کاهش شتاب افزایش دادند.
Smith, H.C., et al. / 2012 / The American Journal of Sports Medicine(4)	ارزیابی آیتسنگر LESS به‌عنوان ابزار غربالگری آسیب ACL غیربرخوردی.	PC	۵۰۳۷ ورزشکار نوجوان و دانشگاهی	A/N	Wyscout Kinovea	محدوده غربالگری اثبوت کارایی ندارد.	پایینی برای غربالگری اثبوت دارد.
Thieschäfer, L., et al. / 2023 / Sports (27)	توسعه و ارزیابی برنامه اصلاح تکنیک برش بر کیفیت حرکت و عملکرد نوجوانان فوتبال آمریکایی.	Non-RCT Intervention	۲۲ نوجوان پسر فوتبال آمریکایی، حدود ۱۶ سال	۶ هفته.	Witty	محدوده خطر ترجیح سرعت بر ایمنی.	اصلاح تکنیک کیفیت حرکت را بهبود داد، اما سرعت را کمی کاهش داد.
Almonroeder, T.G., et al. / 2015 / Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy (IOSPT)(12)	بررسی اثر تقاضاهای شناختی اضافی بر مکانیک اندام تحتانی در برش-فردود عمودی.	CS-Lab	۲۰ زن فعال بسکتبالیست، ۲۱/۵ سال	A/N	موشن کپچر، نیروپلیت، محرک تصمیم	بسیار معتبر؛ متغیرات عصبی تغییرات یومکتیکی.	افزودن تقاضای شناختی، مکانیک فردود را تغییر داده و والگوس را افزایش داد.
Grooms, D.R., et al. / 2022 / PLoS ONE(28)	بررسی ارتباط فعالیت مغزی کنترل حرکتی با یومکتیک برخط ACL در افراد با ریسک متفاوت.	CS	۳۰ فوتبالیست دختر دبیرستانی، ۱۵/۸ سال	یک جلسه یومکتیک + یک جلسه fMRI	fMRI و موشن کپچر	بسیار معتبر؛ آینده پیشگیری، تمرین مغز است.	تغییر فعالیت نواحی حسی-حرکتی مغز با یومکتیک برخط همبستگی داشت.
Kipp, K., et al. / 2013 / Journal of Applied Biomechanics(13)	بررسی تأثیر سطح تجربه بر کینماتیک و کینتیک زانو در فرد و برش پیش‌بینی‌نشده و پیش‌بینی‌شده.	CS	۳۰ زن (تفریحی و NCAA)	A/N	موشن کپچر، نیروپلیت، تکلیف پیش‌بینی‌نشده	بسیار معتبر؛ نقش تجربه و ادراک، تکلیف پیش‌بینی‌نشده.	تصمیم‌گیری حین حرکت بار زانو را افزایش داد، به‌ویژه در ورزشکاران کم‌تجربه.
Monfort, S.M., et al. / 2019 / The American Journal of Sports Medicine(15)	بررسی ارتباط توأبی شناختی با تغییرات مکانیک اندام تحتانی در برش با و بدون دریل.	Descriptive Lab	۱۵ فوتبالیست مرد دانشگاهی، ۲۰/۷ سال	A/N	Bertec, Vicon	بسیار معتبر؛ ارتباط شناخت و خطر آسیب.	حافظه دیداری-قضایی پایین‌تر با افزایش والگوس زانو مرتبط بود.
Ricuputo, R., et al. / 2025 / International Journal of Sports Physical Therapy (IOSPT)(29)	تحلیل اثر تکلیف دوگانه بر عملکرد تست برش سه گانه پس از بازسازی ACL.	CS	۱۷ بیمار پس از ACLR، ۳۳/۲ سال	A/N	ImPACT و Kinovea	معتبر؛ تست‌های بازگشت به ورزش باید شامل تکلیف شناختی باشند.	تکلیف دوگانه سفت برش و کینت عملکرد را به‌طور معناداری کاهش داد.
Wohl, T.R., et al. / 2024 / International Journal of Sports Physical Therapy (IOSPT)(30)	بررسی اثر تمرین عصبی-عضلانی با اغتشاش بیانی بر تقاضای شناختی، مکانیک فردود و فعالیت عصبی کنترل زانو.	Controlled Lab	۸ ورزشکار زن سالم، ۲۰/۴ تا ۲۰/۶ سال	۲ هفته، ۴ جلسه	عینک استروئوسکوپیک، fMRI و LESS	بسیار معتبر؛ ترکیب تمرین فیزیکی و شناختی.	تمرین با اغتشاش بیانی موجب بهبود مکانیک فردود و سازگاری عصبی شد.

N/A: گزارش نشده

ارزیابی کیفیت روش شناختی

کیفیت روش شناختی مطالعات با استفاده از نسخه تعدیل شده چک لیست Downs and Black ارزیابی شد (جدول شماره ۲). این ابزار به دلیل توانایی در ارزیابی همزمان مطالعات تصادفی و غیرتصادفی انتخاب گردید (۲۱). برای مطالعات ویدئو آنالیز، معیارهای کیفیت با تمرکز بر شفافیت تعاریف و گزارش پایایی بین ارزیاب‌ها (Inter-rater reliability/Kappa) تطبیق داده شد، زیرا تفسیر چشمی الگوهای آسیب نیازمند دقت بالایی است (۲۲). همچنین مطالعاتی که از تکنولوژی‌های نوین بدون مارکر استفاده کرده بودند، از نظر اعتبارسنجی با استانداردهای طلایی بررسی شدند.

ترکیب و تحلیل داده‌ها

جدول شماره ۲: نتایج ارزیابی کیفیت مقالات براساس پرسشنامه Downs & Black

مطالعه (نویسنده، سال)	گزارش دهی (۱۰)	روایی بیرونی (۳)	روایی درونی (۱۳)	توان آماری (۱)	نمره تعدیل شده (درصد)	سطح کیفیت
مطالعات آنالیز ویدئویی						
Achenbach et al. (۲۵) ۲۰۲۴	۹	۳	۴	۰	۲۰/۱۶ (۸۰)	عالی
Buckthorpe et al. (۱۶) ۲۰۲۴	۱۰	۳	۴	۰	۲۰/۱۷ (۸۵)	عالی
Villa Della et al. (۹) ۲۰۲۵	۱۰	۳	۵	۰	۲۰/۱۸ (۹۰)	عالی
Lucarno et al. (۲) ۲۰۲۱	۱۰	۳	۴	۰	۲۰/۱۷ (۸۵)	عالی
Montgomery et al. (۲۶) ۲۰۱۶	۸	۳	۴	۰	۲۰/۱۵ (۷۵)	خوب
Petway et al. (۱۱) ۲۰۲۳	۱۰	۳	۳	۰	۲۰/۱۶ (۸۰)	عالی
Powers & Straub (۳) ۲۰۲۵	۱۰	۳	۶	۰	۲۱/۱۹ (۹۰)	عالی
Ternell et al. (۲۷) ۲۰۲۵	۱۰	۳	۴	۰	۲۰/۱۷ (۸۵)	عالی
Tosarelli et al. (۱۰) ۲۰۲۴	۱۰	۳	۵	۰	۲۰/۱۸ (۹۰)	عالی
مطالعات آزمایشگاهی و کینماتیک						
Celebrini et al. (۶) ۲۰۱۴	۱۰	۳	۱۰	۱	۲۷/۲۴ (۸۹)	عالی
Paolo Di et al. (۱۸) ۲۰۲۲	۱۰	۲	۷	۰	۲۲/۱۹ (۸۶)	عالی
Paolo Di et al. (۸) ۲۰۲۳	۱۰	۲	۶	۰	۲۲/۱۸ (۸۳)	عالی
Dix et al. (۲۸) ۲۰۲۱	۹	۳	۸	۰	۲۷/۲۰ (۷۴)	خوب
Johnson et al. (۲۹) ۲۰۲۰	۱۰	۳	۱۰	۰	۲۷/۲۳ (۸۵)	عالی
Lisman et al. (۵) ۲۰۲۱	۱۰	۳	۷	۱	۲۷/۲۱ (۷۸)	خوب
Mausehund et al. (۷) ۲۰۲۴	۱۰	۳	۸	۱	۲۷/۲۲ (۸۱)	عالی
Mausehund et al. (۱۷) ۲۰۲۵	۱۰	۳	۶	۱	۲۵/۲۰ (۸۰)	عالی
Peel et al. (۱۴) ۲۰۱۸	۱۰	۱	۵	۰	۲۲/۱۶ (۷۳)	خوب
Smith et al. (۴) ۲۰۱۲	۱۰	۳	۸	۱	۲۷/۲۲ (۸۱)	عالی
Thiesch et al. (۳۰) ۲۰۲۳	۱۰	۳	۶	۰	۲۵/۱۹ (۷۶)	خوب
مطالعات شناختی و پیش‌بینی ناپذیری						
Almonroeder et al. (۳۱) ۲۰۱۸	۱۰	۱	۶	۰	۲۲/۱۷ (۷۷)	خوب
sGroom et al. (۳۲) ۲۰۲۲	۱۰	۱	۵	۰	۲۲/۱۶ (۷۳)	خوب
Kipp et al. (۱۳) ۲۰۱۳	۱۰	۲	۵	۰	۲۲/۱۷ (۷۷)	خوب
Monfort et al. (۱۵) ۲۰۱۹	۱۰	۱	۵	۰	۲۲/۱۶ (۷۳)	خوب
Ricupito et al. (۲۳) ۲۰۲۵	۱۰	۲	۴	۰	۲۲/۱۶ (۷۳)	خوب
Wohl et al. (۳۴) ۲۰۲۴	۱۰	۱	۷	۰	۲۷/۱۸ (۶۷)	متوسط

یافته ها

جستجوی سیستماتیک در مطالعه حاضر ابتدا ۳۵۶۰ مقاله بالقوه مرتبط را شناسایی کرد. پس از حذف موارد تکراری و غربالگری عنوان/چکیده، متن کامل ۱۲۳ مقاله ارزیابی شد. در نهایت، ۲۶ مطالعه که معیارهای ورود کامل را داشتند (شامل آنالیزهای ویدئویی جدید و مطالعات کینماتیک مقایسه‌ای) در این بررسی گنجانده شدند. روند انتخاب در نمودار PRISMA (تصویر شماره ۱) ترسیم شده است.

ویژگی‌های مطالعه و کیفیت روش‌شناسی

در این مرور، ۲۶ مطالعه منتشر شده بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۵ وارد شدند که ویژگی‌های آن‌ها در جدول شماره ۱ ارائه شده است. این مطالعات با تعداد نمونه ۷۳۸۴ نفر، جمعیت‌های متنوعی از ورزشکاران نخبه و دانشگاهی را شامل می‌شدند و عمدتاً بر رشته‌های فوتبال و بسکتبال تمرکز داشتند؛ هر چند هر دو جنس بررسی شدند، اما توجه ویژه‌ای به ریسک بالاتر آسیب در زنان وجود داشت. از نظر روش‌شناسی، مطالعات در سه دسته آنالیز ویدئویی آسیب‌های واقعی (۹ مطالعه)، مطالعات آزمایشگاهی و کینماتیکی (۱۱ مطالعه) و بررسی شرایط پیش‌بینی ناپذیر و بارهای شناختی (۶ مطالعه) طبقه‌بندی شدند. نمرات تعدیل شده ابزار Downs and Black در جدول شماره ۲ گزارش شده است و میانگین کیفیت روش‌شناسی بالا بود؛ به‌طوری که ۶۱ درصد مطالعات در سطح کیفیت «عالی»، ۳۵ درصد در سطح «خوب» و تنها یک مطالعه در سطح «متوسط» قرار گرفت. اغلب مطالعات اهداف، پیامدها و ویژگی‌های شرکت‌کنندگان را به‌طور شفاف گزارش کرده بودند، اما به دلیل ماهیت مطالعات مشاهده‌ای و مداخلات ورزشی، کورسازی شرکت‌کنندگان و ارزیابان در اکثر مطالعات انجام نشده بود. همچنین، مطالعات کوهورت بزرگ از قدرت آماری مناسبی برخوردار بودند، در حالی که برخی

مطالعات آزمایشگاهی پایلوت فاقد محاسبه پیشینی حجم نمونه بودند. به‌منظور ارائه تصویری جامع از شواهد موجود، ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و روش‌شناسی ۲۶ مطالعه نهایی استخراج شد. این مطالعات طیف متنوعی از طرح‌های پژوهشی، از آنالیزهای ویدئویی سیستماتیک در لیگ‌های معتبر فوتبال و بسکتبال با هدف بررسی مکانیزم‌های واقعی آسیب، تا کارآزمایی‌های بالینی کنترل شده و مطالعات کوهورت بزرگ مقیاس برای ارزیابی ظرفیت‌های بیومکانیکی را در بر می‌گرفتند. خلاصه ویژگی‌های شرکت‌کنندگان، پروتکل‌های ارزیابی، مداخلات اعمال شده و یافته‌های کلیدی هر مطالعه به تفکیک گروه‌های پژوهشی در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

بحث

این مرور سیستماتیک با هدف بررسی تضاد میان شاخص‌های بیومکانیکی سنتی و شواهد نوین آنالیز ویدئویی و شرایط پیش‌بینی نشده در آسیب‌های ACL انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهند که عوامل خطر کلاسیک مانند ضعف عضلات هیپ و والگوس زانو در آزمایشگاه همبستگی بالایی با مکانیک پرخطر دارند، اما توانایی آن‌ها در پیش‌بینی آسیب در محیط واقعی محدود است (۱، ۳). ترکیب نتایج ۲۶ مطالعه منتخب نشان می‌دهد آسیب ACL پدیده‌ای چند عاملی است که از تعامل ظرفیت‌های بیومکانیکی و تقاضاهای شناختی محیط ناشی می‌شود. داشتن ظرفیت حرکتی مناسب شرط لازم برای پیشگیری است، اما شرط کافی نیست و باید در شرایط پیچیده مسابقه نیز حفظ شود (۳۵).

شواهد آنالیز ویدئویی نشان می‌دهند اکثریت آسیب‌های ACL در برخورد غیرمستقیم رخ می‌دهند، و همیشه با والگوس شدید همراه نیستند، بلکه اغلب با فلکشن کم زانو، چرخش تنه و بارگذاری نامتقارن رخ می‌دهند (۲، ۹، ۲۵). آسیب‌ها معمولاً در فازهای دفاعی، هنگام پرس حریف یا بازپس‌گیری توپ اتفاق می‌افتند، و

در بسکتبالست‌ها فرود یک‌پا با انحراف جانبی تنه شایع است (۱۱، ۱۶، ۲۶، ۲۷). کینماتیک آزمایشگاهی همبستگی ضعیفی با حرکات واقعی زمین دارد و ورزشکاران در میدان استراتژی‌های متفاوتی اتخاذ می‌کنند (۸، ۱۸).

تکالیف پیش‌بینی نشده و دوگانه بارهای مکانیکی زانو را افزایش می‌دهند، و نقص در حافظه دیداری-فضایی و زمان واکنش با زاویه‌های پرخطر زانو مرتبط است (۱۵-۱۳). همچنین، اضافه شدن تکالیف دوگانه (Dual-tasking) منجر به کاهش کیفیت عملکرد در تست‌های پرش و فرود گردید (۳۳). شواهد اولیه حاکی از آن است که تمرینات با آشفته‌گی بینایی (Stroboscopic) می‌توانند مکانیک فرود را بهبود بخشند و تغییرات سازگارانه در فعالیت مغزی ایجاد کنند (۳۴).

مقایسه یافته‌های آزمایشگاهی و میدانی شکاف واضحی در اعتبار اکولوژیکی نشان می‌دهد. شواهد متوسط تا قوی حاکی از همخوانی ضعیف کینماتیک آزمایشگاه با حرکات واقعی ورزشکاران در زمین فوتبال است. این با مطالعه پائولو و همکاران (۲۰۲۲) همسو است که نشان داد ورزشکاران برای حفظ عملکرد تاکتیکی، استراتژی‌های متفاوتی نسبت به محیط آزمایشگاه اتخاذ می‌کنند. در آزمایشگاه تمرکز بر کیفیت حرکت است، اما در زمین مسابقه تمرکز بر نتیجه بازی است. آنالیز کلاستر نیز نشان داد هیچ الگوی تکنیکی واحدی پیش‌بینی کننده آسیب نیست و آسیب ناشی از ناتوانی در تطبیق استراتژی حرکتی با شرایط محیطی است (۱۷، ۱۸).

این بررسی نقش عوامل پیش‌بینی ناپذیری را به عنوان مکانیسم کلیدی آسیب ACL برجسته کرد. شواهد نشان می‌دهند تکالیف برش و فرود پیش‌بینی نشده گشتاور زانو را افزایش و کیفیت حرکت را کاهش می‌دهند (۳۶). بارهای شناختی و نیاز به تصمیم‌گیری سریع باعث رقابت منابع مغزی و کاهش کنترل حرکتی دقیق، به‌ویژه در ورزشکاران کم‌تجربه می‌شوند (۱۳، ۳۷). تصویربرداری عصبی نشان می‌دهد پس

از آسیب ACL، تغییرات پلاستیسته مغز فرد را به تکیه بیش‌تر بر بینایی وادار می‌کند، که در شرایط مسابقه با پردازش اطلاعات تداخل ایجاد می‌کند (۳۲، ۳۴).

آنالیزهای ویدئویی نشان داد آسیب‌ها در فوتبال و بسکتبال حرفه‌ای اغلب در موقعیت‌های دفاعی و هنگام از دست دادن تعادل رخ می‌دهند و همیشه با الگوی کلاسیک والگوس شدید زانو مطابقت ندارند (۹، ۱۰). برخلاف آزمایشگاه که بر فرود جفت‌پا تأکید دارد، در بسکتبال فرود غالباً روی یک‌پا با انحراف جانبی تنه است (۲۷). این یافته‌ها نشان می‌دهند مدل‌های غربالگری فعلی که فقط بر والگوس زانو تمرکز دارند، ممکن است سایر مکانیزم‌های کلیدی مانند کینماتیک صفحه ساجیتال و چرخش تنه را نادیده بگیرند (۲).

بر اساس شواهد، برنامه‌های پیشگیری و توان‌بخشی باید از تمرینات فرم بسته به فرم باز و شناختی حرکت کنند. متخصصان نباید صرفاً به نمره LESS یا زاویه زانو اکتفا کنند. تمرینات باید شامل چابکی واکنشی و تکالیف دوگانه، مانند فرود یا برش در پاسخ به محرک نوری یا هم‌زمان با پردازش اطلاعات دیداری باشند. ابزارهایی مانند عینک‌های استروبو سکوپیک می‌توانند سیستم عصبی را برای شرایط پیچیده مسابقه آماده کنند (۳۴). این تمرینات بهتر است به صورت پیش‌رونده و کوتاه (۱۵-۱۰ دقیقه در انتهای گرم کردن) اجرا شوند. تمرینات قدرتی عضلات هیپ فقط به عنوان پیش‌نیاز، نه راه‌حل نهایی ضروری‌اند (۳). مطالعات موجود از نظر طراحی و روش‌شناسی متنوع بودند. ترکیب داده‌های کینماتیک با ویدئوهای دوبعدی مقایسه کمی را دشوار می‌کند و کیفیت تصاویر گذشته‌نگر می‌تواند تخمین زوایای مفصلی را تحت تأثیر قرار دهد، هر چند پروتکل‌های اعتبارسنجی جدید خطا را کاهش داده‌اند. یک شکاف مهم، کمبود داده‌های جنسیتی تفکیک شده در مطالعات شناختی است؛ بیش‌تر مطالعات روی نمونه‌های ترکیبی یا مردان انجام شده، در حالی که نرخ آسیب در زنان بالاتر است. همچنین، تنوع پروتکل‌های خستگی ممکن است سوگیری ایجاد کند.

آینده باید با فناوری‌های نوین بدون مارکر و طراحی‌های آینده‌نگر، شکاف بین ظرفیت بیومکانیکی و عملکرد واقعی ورزشکاران را پر کنند.

سپاسگزاری

از همکاری و مشارکت همه افرادی که در انجام و پیاده‌سازی این پژوهش نقش داشتند، صمیمانه قدردانی می‌نمایم. این تحقیق هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است. لازم به ذکر است که نویسندگان هیچ گونه تضاد منافع را اعلام نمی‌کنند.

شواهد نشان می‌دهند شاخص‌های بیومکانیکی سنتی در آزمایشگاه معتبرند، اما در پیش‌بینی آسیب ACL در شرایط واقعی محدود هستند. عملکرد ورزشکاران تحت شرایط پیش‌بینی نشده و بارهای شناختی تغییر می‌کند و تست‌های استاندارد قادر به بازتاب این پیچیدگی‌ها نیستند. مکانیزم‌های آسیب در میدان بیش‌تر تحت تأثیر تصمیم‌گیری آنی و موقعیت‌های تاکتیکی قرار دارند و با الگوهای آزمایشگاهی متفاوتند. بنابراین، پیشگیری باید به رویکردی یکپارچه حرکت کند که تمرینات فیزیکی با چالش‌های عصبی-شناختی ترکیب شود. تحقیقات

References

- 1- Bahr R. Why screening tests to predict injury do not work-and probably never will...: a critical review. *Br J Sports Med* 2016;50(13):776-780 PMID: 27095747.
- 2- Lucarno S, Zago M, Buckthorpe M, Grassi A, Tosarelli F, Smith R, et al. Systematic Video Analysis of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Professional Female Soccer Players. *Am J Sports Med* 2021;49(7):1794-1802 PMID: 33989090.
- 3- Straub RK, Powers CM. Prediction of secondary ACL injury in female athletes using 2D video-based measurements obtained during dynamic tasks: a retrospective case-control study. *Br J Sports Med* 2025; 59(20): 1418-1425 PMID: 40889818.
- 4- Smith HC, Johnson RJ, Shultz SJ, Tourville T, Holterman LA, Slauterbeck J, et al. A prospective evaluation of the Landing Error Scoring System (LESS) as a screening tool for anterior cruciate ligament injury risk. *Am J Sports Med* 2012;40(3):521-526 PMID: 22116669.
- 5- Lisman P, Wilder JN, Berenbach J, Jiao E, Hansberger B. The Relationship between Landing Error Scoring System Performance and Injury in Female Collegiate Athletes. *Int J Sports Phys Ther* 2021;16(6):1415-1425.
- 6- Celebrini RG, Eng JJ, Miller WC, Ekegren CL, Johnston JD, Depew TA, et al. Effect of a novel movement strategy in decreasing ACL risk factors in female adolescent soccer players: a randomized controlled trial. *Clin J Sport Med* 2014;24(2):134-141 PMID: 24184850.
- 7- Mausehund L, Krosshaug T. Knee Biomechanics During Cutting Maneuvers and Secondary ACL Injury Risk: Response. *Am J Sports Med* 2025;53(1):Np1-Np2.
- 8- Di Paolo S, Nijmeijer EM, Bragonzoni L, Gokeler A, Benjaminse A. Definition of High-Risk Motion Patterns for Female ACL Injury Based on Football-Specific Field Data: A Wearable Sensors Plus Data Mining Approach. *Sensors (Basel)*. 2023;23(4).
- 9- Della Villa F, Stride M, Bortolami A, Williams A, Davison M, Buckthorpe M. Systematic Video Analysis of ACL Injuries in Male Professional English Soccer

- Players: A Study of 124 Cases. *Orthop J Sports Med* 2025; 13(2): 23259671251314642 PMID: 39991648.
- 10- Tosarelli F, Buckthorpe M, Di Paolo S, Grassi A, Zaffagnini S, et al. Video Analysis of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Male Professional Basketball Players: Injury Mechanisms, Situational Patterns, and Biomechanics. *Orthop J Sports Med* 2024; 12(3): 23259671241234880 PMID: 38524890.
 - 11- Petway AJ, Jordan MJ, Epsley S, Anloague P, Rimer E. Mechanisms of Anterior Cruciate Ligament Tears in Professional National Basketball Association Players: A Video Analysis. *J Appl Biomech*. 2023;39(3):143-50.
 - 12- Almonroeder TG, Garcia E, Kurt M. THE EFFECTS OF ANTICIPATION ON THE MECHANICS OF THE KNEE DURING SINGLE-LEG CUTTING TASKS: A SYSTEMATIC REVIEW. *Int J Sports Phys Ther*. 2015;10(7):918-28.
 - 13- Kipp K, Brown TN, McLean SG, Palmieri-Smith RM. Decision making and experience level influence frontal plane knee joint biomechanics during a cutting maneuver. *J Appl Biomech* 2013;29(6):756-762 PMID: 23434635.
 - 14- Peel SA, Schroeder LE, Sievert ZA, Weinhandl JT. Comparing Anterior Cruciate Ligament Injury Risk Variables Between Unanticipated Cutting and Decelerating Tasks. *J Appl Biomech* 2019;35(2):101-106 PMID: 30300057.
 - 15- Monfort SM, Pradarelli JJ, Grooms DR, Hutchison KA, Onate JA, Chaudhari AMW. Visual-Spatial Memory Deficits Are Related to Increased Knee Valgus Angle During a Sport-Specific Sidestep Cut. *Am J Sports Med* 2019;47(6):1488-1495 PMID: 30986095.
 - 16- Buckthorpe M, Pirli Capitani L, Olivares-Jabalera J, Olmo J, et al. Systematic video analysis of ACL injuries in professional Spanish male football (soccer): injury mechanisms, situational patterns, biomechanics and neurocognitive errors - a study on 115 consecutive cases. *BMJ Open Sport Exerc Med* 2024;10(3):e002149 PMID: 39351123.
 - 17- Mausehund L, Patron A, Äyrämö S, Krosshaug T. Cluster analysis of cutting technique-a valuable approach for assessing anterior cruciate ligament injury risk? *Front Sports Act Living* 2025;7:1463272.
 - 18- Di Paolo S, Nijmeijer E, Bragonzoni L, Dingshoff E, Gokeler A, Benjaminse A. Comparing lab and field agility kinematics in young talented female football players: Implications for ACL injury prevention. *Eur J Sport Sci* 2023;23(5):859-868 PMID: 35400311.
 - 19- Selçuk AA. A guide for systematic reviews: PRISMA. *Turk Arch Otorhinolaryngol* 2019;57(1):57-58 PMID: 31049257.
 - 20- Haddaway NR, Collins AM, Coughlin D, Kirk S. The Role of Google Scholar in Evidence Reviews and Its Applicability to Grey Literature Searching. *PLoS One*. 2015;10(9):e0138237.
 - 21- Benjaminse A, Gokeler A, Dowling AV, Faigenbaum A, Ford KR, Hewett TE, et al. Optimization of the anterior cruciate ligament injury prevention paradigm: novel feedback techniques to enhance motor learning and reduce injury risk. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2015;45(3):170-82.
 - 22- Achenbach L, Bloch H, Klein C, Damm T, Obinger M, Rudert M, et al. Four distinct patterns of anterior cruciate ligament injury

- in women's professional football (soccer): a systematic video analysis of 37 match injuries. *British journal of sports medicine*. 2024;58(13):709-16.
- 23- Montgomery C, Blackburn J, Withers D, Tierney G, Moran C, Simms C. Mechanisms of ACL injury in professional rugby union: a systematic video analysis of 36 cases. *Br J Sports Med*. 2018;52(15):994-1001.
 - 24- Heder Ternell K, Tosarelli F, Buckthorpe M, Samuelsson K, Hamrin Senorski E, Della Villa F. A Systematic Video Analysis of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Professional Female Basketball Players. *Am J Sports Med*. 2025;53(6):1368-80.
 - 25- Dix C, Arundale A, Silvers-Granelli H, Marmon A, Zarzycki R, Snyder-Mackler L. Biomechanical changes during a 90° cut in collegiate female soccer players with participation in The 11+. *International Journal of Sports Physical Therapy*. 2021;16(3):671.
 - 26- Johnson JL, Capin JJ, Arundale AJH, Zarzycki R, Smith AH, Snyder-Mackler L. A Secondary Injury Prevention Program May Decrease Contralateral Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes: 2-Year Injury Rates in the ACL-SPORTS Randomized Controlled Trial. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2020;50(9):523-30.
 - 27- Thieschäfer L, Klütz J, Weig J, Dos' Santos T, Büsch D. Development of a cutting technique modification training program and evaluation of its effects on movement quality and cutting performance in male adolescent American Football players. *Sports*. 2023;11(9):184.
 - 28- Grooms DR, Diekfuss JA, Criss CR, Anand M, Slutsky-Ganesh AB, DiCesare CA, et al. Preliminary brain-behavioral neural correlates of anterior cruciate ligament injury risk landing biomechanics using a novel bilateral leg press neuroimaging paradigm. *PLoS One*. 2022;17(8):e0272578.
 - 29- Ricupito R, Grassi A, Zanuso M, Torneri P. The Influence of Cognitive Dual Tasking on the Outcomes of the Triple Hop Test Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *International Journal of Sports Physical Therapy*. 2025;20(1):40.
 - 30- Wohl TR, Criss CR, Haggerty AL, Rush JL, Simon JE, Grooms DR. The Impact of Visual Perturbation Neuromuscular Training on Landing Mechanics and Neural Activity: A Pilot Study. *Int J Sports Phys Ther*. 2024;19(11):1333-47.
 - 31- Downs SH, Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. *Journal of epidemiology & community health*. 1998;52(6):377-84.
 - 32- Chow R, Chiu N, Bruera E, Krishnan M, Chiu L, Lam H, et al. Inter-rater reliability in performance status assessment among health care professionals: a systematic review. *Annals of palliative medicine*. 2016;5(2):832-92.
 - 33- Meserole JS, Moore JW, editors. What is system wide information management (SWIM)? 2006 *ieee/aiaa 25TH Digital Avionics Systems Conference*; 2006: IEEE.
 - 34- Popay J, Roberts H, Sowden A, Petticrew M, Arai L, Rodgers M, et al. Guidance on the conduct of narrative synthesis in systematic reviews. A product from the ESRC methods programme Version. 2006;1(1):b92.

- 35- Almonroeder TG, Kernozek T, Cobb S, Slavens B, Wang J, Huddleston W. Cognitive demands influence lower extremity mechanics during a drop vertical jump task in female athletes. *journal of orthopaedic & sports physical therapy*. 2018;48(5):381-7.
- 36- Reyes MA, Probasco MO, Worby TN, Loertscher DE, Soderbeck LK, Huddleston WE. Lower Kinetic Chain, Meet the Thinking Brain: A Scoping Review of Cognitive Function and Lower Extremity Injury Risk. *Int J Sports Phys Ther*. 2022;17(5):787-815.
- 37- Ebner C, Granacher U, Gehring D. Effects of Anticipation and Dual-Tasking on Lower Limb Biomechanics While Performing Change-of-Direction Tasks in Physically Active Individuals: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine*. 2025:1-20.
- 38- Chaaban CR, Turner JA, Padua DA. Think outside the box: Incorporating secondary cognitive tasks into return to sport testing after ACL reconstruction. *Front Sports Act Living*. 2022;4:1089882.