

فصلنامه طب در ورزش
شماره ۴۲
تابستان ۱۴۰۵
ویژنامه پیشرفت‌های نوین در
پیشگیری از آسیب ورزشی

طب در ورزش

فصلنامه علمی فدراسیون پزشکی ورزشی جمهوری اسلامی ایران

✓ توسعه سیستم‌های هوشمند غربالگری آسیب در ورزش: از داده‌های پوشیدنی تا دوقلو دیجیتال همکاری بین علوم داده و بیومکانیک:

از حرکت انسان تا پیش‌بینی هوشمند

✓ میکروبیوم روده: مرز نوین در پیشگیری از آسیب‌های ورزشی: یک مقاله مروری با نگاهی به شواهد بالینی و مکانیسم‌های مولکولی

✓ مانیپولیشن خستگی در ورزش: یک مطالعه مروری



۱۰۰۰ برابر

هزینه درمان آسیب‌های ورزشی دریافت نمایید

عضویت در کمیته خدمات درمانی فدراسیون پزشکی ورزشی www.ifsm.ir

استعلام عضویت: ارسال کد ملی به شماره ۵۰۰۰۴۳۰۳



فدراسیون پزشکی ورزشی

پشتیبان ورزش قهرمانانی سلامت همگانی





فصلنامه طب در ورزش
شماره ۴۲
تابستان ۱۴۰۵
ویژه‌نامه پیشرفت‌های نوین در پیشگیری
از آسیب ورزشی



فهرست مطالب

عنوان

نویسنده/مترجم صفحه

• سخن مدیر مسئول • دکتر غلامرضا نوروزی ۴

• سخن سردبیر • دکتر بهنام ثبوتی ۵

مقالات آموزشی

• نقش حس عمقی و کنترل عصبی عضلانی در بازگشت به ورزش • دکتر فرزانه ساکی ۶

• قابلیت استفاده از داده های فشار کف پا در افراد بدنبال آسیب رباط • دکتر سهیل منصور سوهانی ۱۸
صلیبی قدامی زانو

• اپیدمیولوژی و تحلیل ریسک آسیب های ورزشی • امیرحسین مهماندوست ۲۰

• توسعه سیستم های هوشمند غربالگری آسیب در ورزش: از داده های پوشیدنی تا دوقلوی دیجیتال همکاری بین علوم داده و بیومکانیک: از حرکت انسان تا پیش بینی هوشمند • دکتر احمد نظری ۲۳

• مقایسه الگوریتم های Random Forest و Support Vector Machine در پیش بینی آسیب های ورزشی • دکتر مرتضیبرزگر بفرویی ۲۹
دکتر رضاصابری ثانی

• یادگیری ماشین در خدمت پیش بینی آسیب رباط صلیبی قدامی: از چالش های بالینی تا راهکارهای هوشمند • دکتر مرتضیبرزگر بفرویی ۳۱
دکتر امیرحسین براتی

• کاربرد ارتعاش کل بدن (Whole Body Vibration) در ریکاوری • دکتر مریم عامری ۴۳
فعال ورزشکاران، مکانیزم ها، کاربردها و پروتکل های بهینه

• اصول نواربندی • دکتر مرتضی احمدی ۵۲

مقالات پژوهشی

• مانیتورینگ خستگی در ورزش: یک مطالعه مروری • دکتر فرشاد غزالیان ۵۶

• میکروبیوم روده؛ مرز نوین در پیشگیری از آسیب های ورزشی: یک مقاله مروری با نگاهی به شواهد بالینی و مکانیسم های مولکولی • دکتر عطیه دربندی ۶۶

• بررسی مهارت های تصویرسازی و کنترل ترس در بروز آسیب های ورزشی • دکتر هادی میری ۷۲
دکتر غلامرضا نوروزی
علی دروکی

• صاحب امتیاز: فدراسیون پزشکی ورزشی

جمهوری اسلامی ایران

• مدیر مسئول: دکتر غلامرضا نوروزی

• سردبیر: دکتر بهنام ثبوتی

• مدیر داخلی: دکتر سید اشکان اردیبهشت

• ویراستار علمی: دکتر لاله حاکمی برآبادی

• همکاران این شماره (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر مرتضی احمدی، دکتر مرتضیبرزگر بفرویی
دکتر عطیه دربندی، علی دروکی، دکتر فرزانه ساکی
دکتر رضا صابری ثانی، دکتر مریم عامری، دکتر فرشاد
غزالیان، امیرحسین مهماندوست، دکتر سهیل منصور سوهانی
دکتر هادی میری، دکتر احمد نظری، دکتر غلامرضا نوروزی.

• مدیر اجرایی: رقیه قدیمی

• طراح و صفحه آرا: سعیده بهارلو

* علاقه مندان به همکاری می توانند مطالب خود را در صورتی که قبلاً در سایر مجلات داخلی به چاپ نرسیده باشد به دفتر فصل نامه طب در ورزش ارسال نمایند.

* مسئولیت صحت مطالب به عهده نویسندگان است.

* نشریه طب در ورزش در انتخاب، اصلاح و حک و خلاصه کردن مطالب آزاد است.

* مقالات باید به صورت تایپ شده در یک طرف کاغذ و حداکثر در ۵ صفحه A4 همراه با لوح فشرده فایل word باشد.

* مطالب ارسالی باید حتماً با ذکر منابع و مأخذ بوده و مطالب ترجمه شده همراه با اصل مقاله باشد.

* مطالب ارسال شده عودت داده نمی شود.

نشانی: تهران، خیابان مفتاح جنوبی، خیابان ورزشده

ضلع جنوبی ورزشگاه شهید شیروودی، فدراسیون

پزشکی ورزشی. صندوق پستی ۱۵۸۷۵ / ۹۶۵۹

تلفن: ۸۸۳۲۶۲۲۶ و ۸۳۸۲۶ داخلی ۶۹۸

تارنما (وبسایت): www.IFSM.ir

پست الکترونیک: tebdarvarzesh@IFSM.ir

سخن مدیر مسئول

دکتر غلامرضا نوروزی

رئیس فدراسیون پزشکی ورزشی
دبیر کل ستاد ملی مبارزه با دوپینگ

پیشگیری؛ اصل جدایی‌ناپذیر موفقیت و تداوم در ورزش هدف هر ورزشکاری، درخشش در لحظه‌نهایی است؛ لحظه‌ای که تمام تلاش‌ها و سخت‌کوشی‌ها در قالب یک مدال یا رکورد تجلی می‌یابد. اما در مسیر این هدف، «آسیب ورزشی» یکی از بزرگ‌ترین موانع است.

در دنیای امروز، پیشگیری از آسیب در ورزش تلفیقی پیچیده از علم تمرین، علوم فیزیولوژیک، بیومکانیک، پزشکی، تغذیه و روان‌شناسی است. در این مسیر، دستیابی به «پیک عملکرد» (Peak Performance) تنها زمانی ممکن است که ورزشکار در بهینه‌ترین سطح سلامت جسمانی باشد. با پیشرفت‌های نوین در علوم پزشکی ورزشی، رویکرد ما از «مدیریت آسیب» به سمت «پیش‌بینی و پیشگیری از آسیب» تغییر مسیر داده است. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین پایش، تحلیل‌های بیومکانیکی و پروتکل‌های ریکاوری شخصی‌سازی شده، ما را قادر ساخته تا پیش از وقوع آسیب، نقاط ضعف ورزشکار را شناسایی و اصلاح کنیم.

در این میان، نقش «فدراسیون پزشکی ورزشی» به عنوان حامی اصلی جامعه ورزشکاران سراسر کشور، در سال‌های متعددی پررنگ بوده است. این مجموعه با اتخاذ استراتژی‌های جامع، نه تنها در سطح اجرایی و تسهیل دسترسی به مراکز درمانی پیشرفته، بلکه از نظر حمایتی و مالی، گامی بلند برای اعتبارسازی جایگاه ورزشکاران برداشته است. اعزام بهترین متخصصین و در اختیار قرار دادن مراکز درمانی سطح اول، این اطمینان را به ورزشکار می‌دهد که در سخت‌ترین لحظات آسیب، تکیه‌گاهی متخصص برای درمان بهینه و بازگشت سریع به میدان رقابت دارد.

با این حال، باید به صراحت اذعان داشت که «پیشگیری قطعاً مقدم بر درمان است». هرچه درمان‌های نوین پیشرفته‌تر شوند، ما بیشتر می‌فهمیم که هزینه یک آسیب، تنها هزینه مالی یا پزشکی نیست؛ بلکه هزینه واقعی، «زمان از دست رفته»، «درد‌های جسمی»، «اضطراب‌های روانی» و «غیبت از مسابقات حیاتی» است. توقف تمرینات برای یک ورزشکار، تنها یک وقفه در فعالیت نیست، بلکه چالشی جدی در مسیر اهداف بزرگ اوست.

بنابراین، هدف ما در این فصلنامه، ترویج فرهنگ «پیشگیری هوشمند» است تا ورزشکاران با بهره‌گیری از دانش نوین و حمایت‌های گسترده فدراسیون، بدون ترس از آسیب و در کمال سلامت، مسیر پیروزی را طی کنند.

سخن سردبیر

دکتر بهنام ثبوتی

رئیس کمیته آموزش و پژوهش فدراسیون پزشکی ورزشی
استاد دانشگاه علوم پزشکی ایران

آسیب‌های ورزشی یکی از چالش‌های مهم در ورزش حرفه‌ای است که در بسیاری از موارد با برنامه‌ریزی علمی و دقیق و آموزش صحیح می‌توان از بروز آن‌ها پیشگیری نمود. در دنیای ورزش بویژه ورزش حرفه‌ای، آسیب‌های حاد یا مزمن از عوامل اصلی موثر بر عملکرد ورزشکاران محسوب می‌شوند که علاوه بر کاهش توانائی جسمانی، باعث دوری طولانی مدت از میادین ورزشی خواهند شد.

به همین دلیل در سال‌های اخیر در حوزه پژوهش‌های پزشکی ورزشی، به اهمیت پیشگیری از آسیب ورزشی با تاکید بر روش‌های نوین تاکید زیادی شده است و با توجه به اهمیت موضوع، مقالات این شماره فصل نامه طب در ورزش به مرور مطالب ارائه شده در سمینار پیشرفت‌های نوین در پیشگیری از آسیب ورزشی که اردیبهشت ماه ۱۴۰۵ توسط فدراسیون پزشکی ورزشی با مشارکت سازمان نظام پزشکی برگزار گردید، پرداخته است.

موضوعات مورد بحث شامل اپیدمیولوژی و ریسک فاکتورهای آسیب ورزشی، فناوری‌های نوین در پیش‌بینی و پیشگیری از آسیب ورزشی، جایگاه هوش مصنوعی و آینده پژوهی، بازگشت به ورزش، نقش میکروبیوم در پیشگیری از آسیب ورزشی و افزایش عملکرد ورزشکاران در این سمینار دو روزه برای گروه‌های هدف مورد بحث و تبادل نظر قرار گرفت.

نقش حس عمقی و کنترل عصبی عضلانی در بازگشت به ورزش

دکتر فرزانه ساکی
دکترای حرکات اصلاحی و آسیب شناسی ورزشی
عضو هیات علمی دانشگاه بوعلی سینای همدان

چکیده

حس عمقی یکی از مهم ترین اجزای سیستم عصبی-عضلانی است که نقش اساسی در دریافت، پردازش و پاسخ‌دهی به اطلاعات مربوط به وضعیت بدن، حرکت مفاصل و میزان نیروی تولیدشده توسط عضلات دارد. این سیستم از طریق تعامل پیچیده میان گیرنده‌های مکانیکی موجود در عضلات، تاندون‌ها، رباط‌ها و مفاصل، مسیرهای عصبی محیطی و مراکز پردازش عصبی در نخاع، مخچه و قشر مغز، امکان کنترل دقیق حرکات، حفظ تعادل، ایجاد ثبات مفاصل و اجرای صحیح مهارت‌های ورزشی را فراهم می‌کند. عملکرد مناسب حس عمقی به ورزشکار اجازه می‌دهد در شرایط پویا و غیرقابل پیش‌بینی مانند تغییر مسیر، پرش، فرود و حرکات سریع، پاسخ‌های حرکتی مناسب و هماهنگ ایجاد کند. آسیب‌های ورزشی علاوه بر ایجاد آسیب‌های ساختاری در بافت‌های عضلانی، رباطی و مفصلی، می‌توانند موجب اختلال در بازخوردهای حسی و کاهش کیفیت کنترل عصبی-عضلانی شوند. کاهش ورودی‌های حس عمقی پس از آسیب ممکن است باعث تأخیر در فعال‌سازی عضلات، کاهش ثبات مفصل، تغییر

الگوهای حرکتی، ایجاد حرکات جبرانی و افزایش فشار مکانیکی بر بافت‌های مختلف بدن شود. این اختلالات به‌ویژه در آسیب‌هایی مانند پارگی رباط صلیبی قدامی، آسیب‌های مچ پا و ناپایداری‌های شانه اهمیت زیادی دارند، زیرا حتی پس از بهبود ظاهری بافت آسیب‌دیده ممکن است نقص‌های حس حرکتی باقی مانده و خطر آسیب مجدد را افزایش دهند.

بازگشت موفق ورزشکار به فعالیت ورزشی تنها وابسته به ترمیم بافت و افزایش قدرت عضلانی نیست، بلکه نیازمند بازیابی کامل هماهنگی بین سیستم عصبی و عضلانی است. کنترل عصبی-عضلانی به توانایی سیستم عصبی در فعال‌سازی عضلات مناسب، در زمان مناسب و با شدت مناسب اشاره دارد و یکی از عوامل تعیین‌کننده در اجرای ایمن مهارت‌های ورزشی محسوب می‌شود. بنابراین ارزیابی حس عمقی و کنترل حرکتی باید به عنوان بخشی از فرآیند تصمیم‌گیری برای بازگشت به ورزش مورد توجه قرار گیرد. هدف از این مقاله بررسی نقش حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی در فرآیند بازگشت ورزشکاران به فعالیت ورزشی، تأثیر آسیب‌ها بر عملکرد این سیستم، روش‌های ارزیابی حس

عمقی و اهمیت تمرینات بازآموزی عصبی-عضلانی است. شواهد موجود نشان می‌دهد که استفاده از برنامه‌های توانبخشی مبتنی بر تمرینات حس عمقی، تعادلی، واکنشی و فعالیت‌های اختصاصی رشته ورزشی می‌تواند موجب بهبود کنترل حرکتی، افزایش ثبات مفاصل و کاهش احتمال آسیب مجدد شود. بر این اساس، توجه به حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی باید به عنوان یکی از ارکان اصلی برنامه‌های بازگشت به ورزش در نظر گرفته شود.

کلیدواژه‌ها: حس عمقی، کنترل عصبی-عضلانی، بازگشت به ورزش، توانبخشی ورزشی، آسیب ورزشی، پیشگیری از آسیب، کنترل حرکتی.

۱- تعریف حس عمقی

حس عمقی یا به توانایی بدن برای درک موقعیت، حرکت و میزان نیروی وارد شده به اندام‌ها و مفاصل بدون نیاز به استفاده از بینایی گفته می‌شود. این حس به فرد اجازه می‌دهد وضعیت قسمت‌های مختلف بدن خود را در فضا تشخیص دهد و بداند هر مفصل در چه زاویه‌ای قرار دارد، یک اندام با چه سرعتی حرکت می‌کند و چه مقدار نیرو توسط عضلات تولید یا دریافت می‌شود. حس عمقی حاصل عملکرد هماهنگ گیرنده‌های مکانیکی موجود در عضلات، تاندون‌ها، رباط‌ها و مفاصل، مسیرهای عصبی محیطی و مراکز پردازش عصبی در مغز است. اطلاعات دریافت‌شده از این گیرنده‌ها از طریق سیستم عصبی به نخاع، مخچه و قشر حسی-حرکتی منتقل می‌شود و مغز با پردازش آن‌ها، کنترل و تنظیم دقیق حرکات را امکان‌پذیر می‌سازد (۱). به همین دلیل، حس عمقی یکی از پایه‌های اصلی کنترل حرکتی، حفظ تعادل، هماهنگی عصبی-عضلانی و اجرای صحیح فعالیت‌های حرکتی و ورزشی محسوب می‌شود.

۲- نقش‌های حس عمقی

حس عمقی به عنوان یکی از اجزای اصلی سیستم عصبی-

عضلانی، نقش مهمی در تنظیم حرکات، حفظ وضعیت بدن و ایجاد هماهنگی بین سیستم عصبی و عضلات دارد. عملکرد مناسب این سیستم باعث می‌شود بدن بتواند اطلاعات دقیق و مداومی از وضعیت اندام‌ها دریافت کرده و بر اساس آن حرکات هدفمند و کنترل‌شده ایجاد کند. در واقع، حس عمقی مانند یک سیستم کنترل داخلی عمل می‌کند که در تمام لحظات فعالیت‌های حرکتی، وضعیت بدن را بررسی کرده و اطلاعات لازم برای اصلاح حرکت را در اختیار مغز قرار می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین نقش‌های حس عمقی، حفظ ثبات مفاصل است. مفاصل بدن برای عملکرد صحیح نیازمند تعادل بین تحرک و پایداری هستند. حس عمقی از طریق دریافت اطلاعات مربوط به زاویه مفصل، سرعت حرکت و میزان فشار وارد شده، به سیستم عصبی کمک می‌کند تا فعالیت عضلات اطراف مفصل را تنظیم کند. هنگامی که یک مفصل در حال حرکت است، اطلاعات حس عمقی باعث می‌شود عضلات مناسب در زمان مناسب فعال شوند و از حرکات اضافی یا کنترل‌نشده جلوگیری شود. نقش مهم دیگر حس عمقی، هماهنگی حرکتی است. اجرای یک حرکت ساده مانند برداشتن یک جسم یا یک حرکت پیچیده ورزشی مانند پرش و تغییر مسیر، نیازمند همکاری تعداد زیادی عضله است. مغز باید بداند هر عضله چه مقدار نیرو تولید کند و چه زمانی فعال یا غیرفعال شود. حس عمقی با فراهم کردن اطلاعات دقیق از وضعیت بدن، باعث هماهنگی بهتر بین گروه‌های عضلانی مختلف می‌شود (۲).

حس عمقی همچنین در کنترل وضعیت بدن و تعادل نقش اساسی دارد. حفظ تعادل نتیجه تعامل سه سیستم اصلی شامل بینایی، سیستم دهلیزی گوش داخلی و سیستم حس عمقی است. زمانی که اطلاعات بینایی کاهش می‌یابد، مانند راه رفتن در تاریکی یا اجرای حرکات ورزشی با تمرکز محدود، بدن بیشتر به اطلاعات



این فرآیند باعث می‌شود بدن بتواند به سرعت حرکت را کنترل کرده و در صورت نیاز آن را اصلاح کند.

۳-۳. حس نیرو

توانایی درک مقدار نیرو یا فشار واردشده به بدن یکی دیگر از بخش‌های مهم حس عمقی است. بدن باید بتواند میزان نیروی تولیدشده توسط عضلات را تخمین بزند تا حرکات دقیق انجام شوند. این توانایی در فعالیت‌هایی مانند پرتاب کردن، گرفتن، پریدن و تولید قدرت اهمیت دارد. اگر سیستم عصبی نتواند مقدار نیرو را به درستی تخمین بزند، ممکن است حرکت بیش از حد شدید یا ضعیف انجام شود.

۴-۳. هماهنگی عصبی-عضلانی

یکی دیگر از توانایی‌های وابسته به حس عمقی، هماهنگی بین سیستم عصبی و عضلات است. اطلاعات حس عمقی باعث می‌شود مغز بتواند عضلات را با زمان‌بندی مناسب فعال کند. این هماهنگی برای اجرای حرکات سریع و پیچیده ضروری است.

۴-۴. گیرنده‌های حس عمقی

گیرنده‌های حس عمقی ساختارهای تخصصی هستند که تغییرات مکانیکی بدن را دریافت کرده و اطلاعات آن را به سیستم عصبی منتقل می‌کنند. این گیرنده‌ها در عضلات، تاندون‌ها، مفاصل و بافت‌های اطراف آن‌ها قرار دارند و نقش اصلی در ایجاد آگاهی حرکتی بدن دارند (۳).

۱-۴. دوک عضلانی

دوک عضلانی مهم‌ترین گیرنده حس عمقی موجود در عضلات است. این گیرنده تغییرات طول عضله و سرعت کشیده شدن آن را تشخیص می‌دهد. هنگامی که عضله کشیده می‌شود، دوک عضلانی فعال شده و اطلاعات مربوط به این تغییر را به سیستم عصبی ارسال می‌کند. نقش اصلی دوک عضلانی تنظیم طول عضله و کمک به حفظ کنترل حرکتی است. این گیرنده در واکنش‌های سریع عضلانی و حفظ وضعیت بدن اهمیت زیادی دارد (۳).

۲-۴. اندام گلژی تاندون

اندام گلژی تاندون در محل اتصال عضله به تاندون قرار دارد و میزان کشش ایجادشده در تاندون را اندازه‌گیری می‌کند. این گیرنده اطلاعات مربوط به نیروی تولیدشده توسط عضله را ارسال می‌کند. عملکرد این گیرنده برای تنظیم قدرت انقباض عضلات ضروری است و باعث می‌شود بدن بتواند نیرو را متناسب با نیاز فعالیت تنظیم کند (۳).

حس عمقی وابسته می‌شود. این سیستم با اطلاع‌رسانی مداوم درباره موقعیت بدن، به حفظ وضعیت مناسب کمک می‌کند. یکی دیگر از نقش‌های مهم حس عمقی، یادگیری و تثبیت حرکات است (۱). هنگام یادگیری یک مهارت حرکتی، مغز از اطلاعات حس عمقی برای اصلاح الگوهای حرکتی استفاده می‌کند. با تکرار یک حرکت، ارتباط بین سیستم عصبی و عضلات تقویت شده و حرکت به شکل دقیق‌تر و با مصرف انرژی کمتر انجام می‌شود. به همین دلیل، حس عمقی در توسعه مهارت‌های ورزشی و حرکات پیچیده اهمیت زیادی دارد.

همچنین حس عمقی در تنظیم نیرو و کنترل شدت انقباض عضلات نقش دارد. بدن باید بتواند مقدار نیروی مورد نیاز برای هر فعالیت را تخمین بزند. برای مثال، نیروی لازم برای گرفتن یک جسم سبک با نیروی لازم برای بلند کردن یک جسم سنگین متفاوت است. این تنظیم نیرو به کمک اطلاعاتی که از گیرنده‌های حس عمقی دریافت می‌شود انجام می‌گیرد.

۳- توانایی‌های حس عمقی

توانایی‌های حس عمقی مجموعه‌ای از قابلیت‌های حسی هستند که به فرد اجازه می‌دهند وضعیت و حرکت بدن خود را درک و کنترل کند. این توانایی‌ها شامل چند بخش اصلی هستند که هر کدام نقش خاصی در عملکرد حرکتی دارند.

۱-۳. حس وضعیت مفصل

یکی از مهم‌ترین توانایی‌های حس عمقی، توانایی تشخیص وضعیت و زاویه مفاصل است. این قابلیت به فرد اجازه می‌دهد بدون نگاه کردن به اندام خود، موقعیت دقیق آن را تشخیص دهد. برای مثال، فرد می‌تواند با چشمان بسته تشخیص دهد که زانوی او خم شده یا صاف است. حس وضعیت مفصل برای انجام حرکات دقیق اهمیت زیادی دارد، زیرا مغز باید دائماً اطلاعات مربوط به موقعیت مفاصل را دریافت کند تا بتواند مسیر حرکت را اصلاح نماید. این توانایی در حرکاتی که نیازمند دقت بالا هستند مانند حرکات ورزشی، مهارت‌های دستی و فعالیت‌های هماهنگ اهمیت ویژه‌ای دارد.

۲-۳. حس حرکت مفصل

حس حرکت یا کینستزی به توانایی تشخیص شروع، جهت و سرعت حرکت مفصل گفته می‌شود. این توانایی باعث می‌شود فرد بتواند کوچک‌ترین تغییرات حرکتی را احساس کند. برای مثال، زمانی که یک مفصل شروع به حرکت می‌کند، گیرنده‌های حسی فعال شده و اطلاعات حرکت را به سیستم عصبی ارسال می‌کنند.



۳-۴. گیرنده‌های مفصلی

گیرنده‌های مفصلی در کپسول مفصل، رباط‌ها و بافت‌های اطراف مفصل قرار دارند. این گیرنده‌ها تغییرات مربوط به فشار، کشش، زاویه و حرکت مفصل را تشخیص می‌دهند. این گیرنده‌ها اطلاعات مهمی درباره وضعیت مفصل فراهم می‌کنند و نقش مهمی در ایجاد ثبات و کنترل حرکتی دارند (۳).

۴-۴. گیرنده‌های پوستی

اگرچه گیرنده‌های پوستی به طور مستقیم گیرنده اختصاصی حس عمقی محسوب نمی‌شوند، اما اطلاعات حاصل از فشار پوست و تماس با سطح زمین می‌تواند به درک بهتر وضعیت بدن کمک کند. این اطلاعات به خصوص در کنترل تعادل و موقعیت اندام‌ها اهمیت دارد.

۵- نقش حس عمقی در پیشگیری از آسیب‌های ورزشی

حس عمقی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در حفظ ایمنی حرکات ورزشی و کاهش احتمال بروز آسیب‌های اسکلتی-عضلانی است. فعالیت‌های ورزشی معمولاً با حرکات سریع، تغییرات ناگهانی جهت، شتاب‌گیری، کاهش سرعت، پرش، فرود و تحمل نیروهای خارجی همراه هستند. در چنین شرایطی، بدن باید بتواند وضعیت مفاصل و اندام‌ها را به صورت لحظه‌ای تشخیص داده و پاسخ حرکتی مناسب ایجاد کند. حس عمقی با فراهم کردن اطلاعات دقیق درباره وضعیت بدن، نقش مهمی در کنترل حرکات و پیشگیری از قرار گرفتن مفاصل در موقعیت‌های پرخطر دارد. یکی از اصلی‌ترین نقش‌های حس عمقی در پیشگیری از آسیب، حفظ ثبات عملکردی مفاصل است. ثبات مفصل تنها به ساختارهای مکانیکی مانند استخوان‌ها، رباط‌ها و کپسول مفصلی وابسته نیست، بلکه عملکرد سیستم عصبی-عضلانی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. هنگامی که یک مفصل در معرض حرکت ناگهانی یا نیروی غیرمنتظره قرار می‌گیرد، گیرنده‌های حس عمقی تغییرات ایجادشده را شناسایی کرده و اطلاعات را به سیستم عصبی منتقل می‌کنند. سپس سیستم عصبی با فعال‌سازی مناسب عضلات اطراف مفصل، باعث کنترل بهتر حرکت و جلوگیری از جابجایی‌های غیرطبیعی می‌شود (۴).

در بسیاری از موقعیت‌های ورزشی، آسیب زمانی رخ می‌دهد که بدن فرصت کافی برای واکنش ندارد. برای مثال، هنگام فرود پس از پرش یا تغییر مسیر سریع، عضلات باید در مدت بسیار کوتاهی فعال شوند تا بتوانند نیروهای واردشده را کنترل کنند. حس عمقی با افزایش سرعت انتقال اطلاعات حسی و بهبود هماهنگی

عصبی-عضلانی، باعث می‌شود عضلات تثبیت‌کننده در زمان مناسب وارد عمل شوند. این پاسخ‌های سریع می‌توانند میزان فشار واردشده بر ساختارهای حساس مانند رباط‌ها، تاندون‌ها و غضروف‌ها را کاهش دهند (۵، ۶).

نقش دیگر حس عمقی در پیشگیری از آسیب، اصلاح الگوهای حرکتی و کنترل کیفیت حرکت است. اجرای صحیح حرکات ورزشی نیازمند هماهنگی دقیق بین گروه‌های مختلف عضلانی است. سیستم حس عمقی به مغز کمک می‌کند مسیر حرکت، زاویه مفاصل و میزان نیروی تولیدشده توسط عضلات را کنترل کند. زمانی که این سیستم عملکرد مناسبی داشته باشد، بدن می‌تواند حرکات را با کارایی بیشتر و فشار مکانیکی کمتر انجام دهد. در مقابل، ضعف کنترل حرکتی می‌تواند باعث ایجاد حرکات جبرانی و افزایش بار روی برخی بافت‌ها شود (۴). یکی از مهم‌ترین کاربردهای حس عمقی در پیشگیری از آسیب، کنترل وضعیت بدن و حفظ تعادل است. تعادل بدن حاصل همکاری سیستم بینایی، سیستم دهلیزی و سیستم حس عمقی است. در بسیاری از شرایط ورزشی، ورزشکار نمی‌تواند تنها به بینایی خود متکی باشد؛ زیرا سرعت حرکات و شرایط مسابقه اجازه تمرکز دائمی روی وضعیت اندام‌ها را نمی‌دهد. حس عمقی با ارائه اطلاعات مداوم از موقعیت بدن، به حفظ تعادل در هنگام فعالیت کمک می‌کند و احتمال زمین خوردن، پیچ‌خوردگی یا از دست دادن کنترل حرکتی را کاهش می‌دهد.

حس عمقی همچنین در پیشگیری از آسیب‌های ناشی از خستگی اهمیت دارد. با افزایش خستگی، توانایی سیستم عصبی برای کنترل دقیق حرکات کاهش پیدا می‌کند و ممکن است زمان واکنش عضلات افزایش یابد. ورزشکاری که دارای سیستم حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی مناسب‌تری است، توانایی بیشتری در حفظ الگوی صحیح حرکت حتی در شرایط خستگی دارد. این موضوع به‌خصوص در ورزش‌هایی که نیازمند تکرار حرکات شدید و طولانی هستند اهمیت زیادی دارد.

تمرینات مبتنی بر تقویت حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی به عنوان یکی از روش‌های مؤثر پیشگیری از آسیب شناخته می‌شوند. این تمرینات با هدف بهبود ارتباط بین سیستم عصبی و عضلات، افزایش سرعت واکنش‌های حرکتی و بهبود کنترل مفاصل طراحی می‌شوند (۷). فعالیت‌هایی مانند تمرینات تعادل، ایستادن روی یک پا، حرکات روی سطوح ناپایدار، تمرینات کنترل فرود، تغییر جهت و تمرینات واکنشی می‌توانند باعث افزایش توانایی بدن در مدیریت نیروهای واردشده هنگام ورزش شوند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که برنامه‌های تمرینی عصبی-عضلانی که شامل تمرینات حس عمقی هستند، می‌توانند الگوهای حرکتی نامناسب را اصلاح کرده و خطر برخی آسیب‌های ورزشی، به‌خصوص آسیب‌های اندام تحتانی، را کاهش دهند. برای نمونه، تمرینات پیشگیری از آسیب رباط صلیبی قدامی (ACL) با تمرکز بر کنترل فرود، هماهنگی عضلات و تعادل توانسته‌اند میزان وقوع آسیب را در ورزشکاران کاهش دهند (۷، ۸).

در مجموع، حس عمقی با ایجاد آگاهی دقیق از وضعیت بدن، تنظیم فعالیت عضلات، حفظ ثبات مفاصل و بهبود کنترل حرکتی، یکی از عوامل اساسی در پیشگیری از آسیب‌های ورزشی محسوب می‌شود. بنابراین، تقویت این سیستم باید به عنوان بخشی از برنامه آماده‌سازی ورزشکاران در نظر گرفته شود تا بدن بتواند در شرایط مختلف ورزشی پاسخ‌های سریع، هماهنگ و ایمن ایجاد کند.

۶- تأثیر آسیب‌های ورزشی بر اختلال حس عمقی

آسیب‌های ورزشی علاوه بر ایجاد تغییرات ساختاری در عضلات، تاندون‌ها، رباط‌ها و مفاصل، می‌توانند عملکرد سیستم حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی را نیز تحت تأثیر قرار دهند. سیستم حس عمقی برای عملکرد طبیعی حرکت به دریافت مداوم اطلاعات از گیرنده‌های مکانیکی بدن نیاز دارد. هنگامی که یک آسیب ورزشی رخ می‌دهد، ممکن است این مسیرهای

حسی دچار اختلال شوند و کیفیت اطلاعات ارسال شده از اندام آسیب‌دیده به سیستم عصبی مرکزی کاهش یابد. در نتیجه، هماهنگی بین مغز، عضلات و مفاصل تحت تأثیر قرار گرفته و توانایی بدن برای کنترل دقیق حرکات کاهش پیدا می‌کند (۹). آسیب مستقیم به ساختارهای مفصلی یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد اختلال در حس عمقی است. رباط‌ها، کپسول مفاصل و بافت‌های اطراف مفصل دارای گیرنده‌های مکانیکی هستند که اطلاعات مربوط به وضعیت مفصل و حرکت آن را منتقل می‌کنند. زمانی که این ساختارها در اثر آسیب دچار کشیدگی، پارگی یا تغییرات بافتی می‌شوند، تعداد یا عملکرد این گیرنده‌ها ممکن است کاهش یابد. در نتیجه، اطلاعات کمتری درباره وضعیت مفصل به سیستم عصبی ارسال می‌شود و دقت کنترل حرکتی کاهش می‌یابد.

علاوه بر آسیب مکانیکی، فرآیندهای همراه با آسیب مانند درد و التهاب نیز می‌توانند عملکرد حس عمقی را مختل کنند. درد باعث تغییر در فعالیت طبیعی سیستم عصبی و عضلات می‌شود و ممکن است الگوی فعال‌سازی عضلات اطراف مفصل را تغییر دهد. التهاب نیز با افزایش حساسیت بافت‌ها و تغییر شرایط محیط مفصل، می‌تواند دریافت طبیعی اطلاعات حسی را تحت تأثیر قرار دهد. این عوامل باعث می‌شوند سیستم عصبی نتواند اطلاعات دقیقی از وضعیت مفصل دریافت کند.

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر کاهش حس عمقی پس از آسیب، کاهش فعالیت و بی‌حرکتی است. پس از بسیاری از آسیب‌های ورزشی، ورزشکار برای مدتی فعالیت خود را محدود می‌کند یا اندام آسیب‌دیده کمتر مورد استفاده



قرار می‌گیرد. کاهش تحریکات حسی ناشی از کم‌حرکی می‌تواند باعث کاهش سازگاری سیستم عصبی با اطلاعات حرکتی شود. همچنین بی‌حرکتی طولانی ممکن است موجب تغییر در عملکرد گیرنده‌های عضلانی و کاهش هماهنگی عصبی-عضلانی شود. آسیب‌های ورزشی می‌توانند باعث تغییر در ارتباط بین سیستم عصبی مرکزی و عضلات شوند. پس از آسیب، بدن گاهی برای محافظت از ناحیه آسیب‌دیده، الگوهای حرکتی متفاوتی ایجاد می‌کند. این تغییرات ممکن است باعث کاهش فعال‌سازی برخی عضلات، افزایش فعالیت عضلات دیگر و ایجاد یک الگوی حرکتی غیرطبیعی شود. در چنین شرایطی، حتی اگر بافت آسیب‌دیده از نظر ساختاری بهبود پیدا کند، ممکن است سیستم کنترل حرکتی هنوز به الگوی طبیعی بازنگشته باشد.

در آسیب‌های مفصلی، کاهش حس عمقی معمولاً اهمیت بیشتری دارد، زیرا مفاصل نقش مهمی در انتقال اطلاعات حرکتی دارند. برای مثال، در آسیب‌های زانو مانند صدمات رباطی، اختلال در دریافت اطلاعات مربوط به وضعیت مفصل می‌تواند باعث کاهش توانایی بدن برای تنظیم حرکات زانو شود. در آسیب‌های مچ پا نیز کاهش اطلاعات حس عمقی می‌تواند توانایی فرد برای تشخیص موقعیت مچ نسبت به سطح زمین را کاهش دهد. همچنین در آسیب‌های شانه، تغییر اطلاعات حسی مفصل گلهومرال می‌تواند کنترل حرکات پیچیده دست را تحت تأثیر قرار دهد (۱۰).

از دیدگاه عصبی، آسیب می‌تواند باعث ایجاد تغییر در نحوه پردازش اطلاعات حرکتی در مغز شود. سیستم عصبی مرکزی برای کنترل حرکت، اطلاعات حاصل از حس عمقی، بینایی و

سیستم دهلیزی را با یکدیگر ترکیب می‌کند. هنگامی که ورودی حس عمقی از یک ناحیه کاهش پیدا کند، مغز ممکن است برای حفظ کنترل حرکت بیشتر به سایر سیستم‌ها وابسته شود. این تغییر در پردازش اطلاعات می‌تواند کیفیت حرکت و هماهنگی را کاهش دهد.

به طور کلی، آسیب ورزشی تنها یک مشکل ساختاری نیست، بلکه می‌تواند باعث اختلال در سیستم ارتباطی بین گیرنده‌های حسی، سیستم عصبی و عضلات شود. کاهش حس عمقی پس از آسیب باعث می‌شود کنترل حرکتی دقیق بدن کاهش یابد و توانایی ایجاد پاسخ‌های سریع و هماهنگ کمتر شود. بنابراین، بررسی و بازآموزی حس عمقی یکی از بخش‌های مهم در فرآیند توانبخشی ورزشکاران پس از آسیب محسوب می‌شود.

۷- عوارض اختلال حس عمقی پس از آسیب‌های ورزشی
اختلال حس عمقی پس از آسیب‌های ورزشی می‌تواند باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در عملکرد سیستم عصبی-عضلانی، کنترل حرکتی و کیفیت اجرای فعالیت‌های ورزشی شود. از آنجا که حس عمقی مسئول انتقال اطلاعات مربوط به وضعیت مفاصل، حرکت اندام‌ها و میزان نیروی عضلات به سیستم عصبی مرکزی است، کاهش عملکرد آن باعث اختلال در ارتباط بین مغز، عضلات و مفاصل می‌شود. این عوارض بسته به شدت آسیب و مدت باقی ماندن اختلال می‌توانند به صورت کوتاه‌مدت یا بلندمدت ظاهر شوند. نکته مهم این است که در بسیاری از موارد، با بازگرداندن عملکرد حس عمقی از طریق تمرینات مناسب، بخش زیادی از این مشکلات قابل اصلاح است.

۱۰-۷ عوارض کوتاه‌مدت اختلال حس عمقی

در مراحل اولیه پس از آسیب، کاهش حس عمقی معمولاً باعث کاهش کنترل حرکتی و کاهش دقت در تشخیص وضعیت مفصل می‌شود. به دلیل اختلال در عملکرد گیرنده‌های مکانیکی موجود در عضلات، تاندون‌ها و مفاصل، اطلاعات کمتری درباره موقعیت اندام به مغز ارسال می‌شود. در نتیجه، فرد ممکن است نتواند به‌درستی وضعیت مفصل خود را درک کند و کنترل کافی روی حرکات داشته باشد (۲).

یکی از شایع‌ترین پیامدهای کوتاه‌مدت، اختلال تعادل و کاهش ثبات بدن است. کاهش اطلاعات حس عمقی باعث می‌شود هماهنگی بین سیستم‌های کنترل تعادل کاهش یابد و فرد در حفظ وضعیت بدن، به‌خصوص هنگام حرکات پویا یا فعالیت روی سطوح ناپایدار، دچار مشکل شود. همچنین اختلال حس عمقی



می تواند باعث کاهش سرعت واکنش عضلات شود. در فعالیت های ورزشی، عضلات باید در زمان مناسب فعال شوند تا از مفاصل محافظت کنند. کاهش کیفیت بازخورد حسی ممکن است باعث تأخیر در فعال شدن عضلات تثبیت کننده و کاهش توانایی کنترل حرکات ناگهانی شود. از دیگر عوارض کوتاه مدت می توان به کاهش هماهنگی عصبی-عضلانی و کاهش اعتماد به حرکت اشاره کرد. ورزشکار ممکن است احساس کند کنترل کافی روی اندام آسیب دیده ندارد و در اجرای برخی حرکات ورزشی دچار تردید شود. با بازگشت عملکرد حس عمقی از طریق تمرینات تعادلی و عصبی-عضلانی، این مشکلات معمولاً کاهش پیدا می کنند (۲).

۲-۷. عوارض بلندمدت اختلال حس عمقی

اگر اختلال حس عمقی برای مدت طولانی باقی بماند، می تواند باعث ایجاد تغییرات پایدار در سیستم حرکتی شود. یکی از مهم ترین پیامدهای بلندمدت، کاهش فعال سازی عضلات و آتروفی عضلانی است. کاهش دریافت اطلاعات حسی و کاهش تحریک عصبی عضلات می تواند موجب مهار عصبی عضلات و کاهش حجم و قدرت آن ها شود. این موضوع به خصوص در عضلات اطراف مفاصل آسیب دیده اهمیت دارد و می تواند توانایی تولید نیرو و عملکرد ورزشی را کاهش دهد. از دیگر عوارض مزمن، تغییر الگوهای حرکتی و ایجاد جبران های حرکتی است. زمانی که بدن اطلاعات دقیق حس عمقی دریافت نمی کند، ممکن است برای انجام فعالیت ها از روش های جایگزین استفاده کند. ادامه این وضعیت می تواند باعث افزایش فشار روی بخش های دیگر بدن و ایجاد مشکلات ثانویه شود. اختلال طولانی مدت حس عمقی همچنین می تواند موجب کاهش کنترل عصبی-عضلانی و افت عملکرد ورزشی شود. حرکات پیچیده مانند پرش، فرود، تغییر مسیر و حرکات انفجاری نیازمند هماهنگی دقیق بین سیستم عصبی و عضلات هستند و ضعف حس عمقی می تواند کیفیت این حرکات را کاهش دهد. یکی دیگر از پیامدهای مهم بلندمدت، تغییرات تخریبی مفاصل مانند استئوآرتریت (آرتروز) است. کاهش کنترل طبیعی مفصل می تواند باعث توزیع نامناسب نیرو، افزایش فشار روی غضروف و ایجاد تغییرات فرسایشی تدریجی در مفصل شود (۲).

با این حال، بسیاری از این پیامدها با بازتوانی مناسب قابل پیشگیری یا کاهش هستند. تمرینات حس عمقی، تعادلی و کنترل عصبی-عضلانی باعث تقویت ارتباط بین گیرنده های حسی، سیستم عصبی مرکزی و عضلات می شوند و می توانند به

بازگشت کنترل حرکتی طبیعی کمک کنند. بنابراین، بازیابی حس عمقی یکی از بخش های ضروری فرآیند بازگشت ورزشکار به فعالیت ورزشی محسوب می شود.

۸- روش های ارزیابی حس عمقی

ارزیابی حس عمقی یکی از مراحل مهم در بررسی عملکرد سیستم عصبی-عضلانی ورزشکاران پس از آسیب و قبل از بازگشت به فعالیت ورزشی است. از آنجا که حس عمقی شامل چند مؤلفه مانند حس وضعیت مفصل، حس حرکت، تشخیص مسیر حرکت و حس نیرو است، پژوهشگران از روش های مختلف آزمایشگاهی و بالینی برای اندازه گیری آن استفاده کرده اند. رایج ترین روش های ارزیابی حس عمقی بصورت زیر است (۱۱).

۸-۱. آزمون بازسازی وضعیت مفصل

آزمون بازتولید وضعیت مفصل یکی از پرکاربردترین روش های ارزیابی حس عمقی است که در بسیاری از مطالعات مربوط به زانو، مچ پا و شانه استفاده شده است. در این روش، فرد ابتدا یک وضعیت یا زاویه مشخص از مفصل را تجربه می کند و سپس بدون استفاده از بینایی باید همان وضعیت را دوباره بازسازی کند. اختلاف بین زاویه واقعی و زاویه ای که فرد بازتولید می کند به عنوان خطای حس عمقی ثبت می شود (۱۱).

۸-۲. آزمون آستانه تشخیص حرکت غیرفعال

این روش برای بررسی حس حرکت مفصل استفاده می شود. در این آزمون، مفصل فرد با سرعت بسیار کم و به صورت غیرفعال حرکت داده می شود و فرد باید کوچک ترین لحظه ای که حرکت را احساس می کند اعلام کند. برای مثال، در ارزیابی مفصل زانو یا مچ پا، دستگاه مفصل را به آرامی حرکت می دهد و فرد زمانی که متوجه شروع حرکت شد، علامت می دهد. فاصله بین شروع واقعی حرکت و زمان تشخیص فرد به عنوان خطای حس حرکتی ثبت می شود. مزیت این آزمون آن است که بیشتر اطلاعات مربوط به گیرنده های حسی مانند دوک عضلانی و گیرنده های مفصلی را بررسی می کند و وابستگی کمتری به قدرت عضلانی دارد. این روش یکی از روش های استاندارد در مطالعات حس عمقی محسوب می شود (۱۱).

۹- تمرینات حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی پس از آسیب های ورزشی

تمرینات حس عمقی یکی از بخش های اساسی بازتوانی پس از آسیب های ورزشی و آماده سازی ورزشکار برای بازگشت ایمن به فعالیت محسوب می شوند. هدف اصلی این تمرینات فقط افزایش



قدرت عضلات نیست، بلکه بهبود ارتباط بین گیرنده‌های حسی، سیستم عصبی مرکزی و عضلات است تا بدن بتواند در شرایط مختلف، پاسخ‌های حرکتی سریع، هماهنگ و مناسب ایجاد کند. پس از آسیب، ممکن است حتی با وجود ترمیم ساختاری بافت، عملکرد سیستم عصبی-عضلانی هنوز دچار اختلال باشد؛ بنابراین بازآموزی حس عمقی برای بازیابی کنترل حرکتی ضروری است (۶).

تمرینات حس عمقی با تحریک گیرنده‌های مکانیکی موجود در عضلات، تاندون‌ها، رباط‌ها و مفاصل باعث افزایش کیفیت اطلاعات ورودی به مغز می‌شوند. در نتیجه، سیستم عصبی توانایی بیشتری برای تنظیم

فعالیت عضلات، حفظ ثبات مفاصل و اصلاح حرکات پیدا می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که تمرینات عصبی-عضلانی می‌توانند تعادل، کنترل وضعیت بدن، زمان واکنش عضلات و عملکرد حرکتی ورزشکاران را بهبود دهند.

۱-۱۰ اصول مهم در طراحی و اجرای تمرینات حس عمقی

تمرینات حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی برای اینکه باعث بهبود عملکرد سیستم حسی-حرکتی شوند، باید بر اساس اصول علمی و متناسب با وضعیت ورزشکار طراحی شوند. اجرای تمرینات بدون توجه به مرحله آسیب، توانایی فرد و هدف تمرین ممکن است باعث کاهش اثربخشی برنامه یا ایجاد الگوهای حرکتی نامناسب شود. مهم‌ترین اصول طراحی تمرینات حس عمقی شامل موارد زیر است (۱۲):

فردی‌سازی تمرینات: تمرینات حس عمقی باید بر اساس شرایط هر ورزشکار طراحی شوند. نوع آسیب، مفصل درگیر، شدت آسیب، سن، سطح آمادگی، سابقه آسیب و نوع رشته ورزشی باید در انتخاب تمرینات در نظر گرفته شود. برای مثال، نیازهای یک ورزشکار پس از آسیب رباط صلیبی زانو با ورزشکاری که آسیب میچ پا داشته است متفاوت است. همچنین ورزشکار حرفه‌ای نسبت به فردی که فعالیت تفریحی دارد، به تمرینات پیچیده‌تر و اختصاصی‌تر نیاز دارد. بنابراین برنامه تمرینی باید بر اساس ارزیابی عملکردی و نیازهای فرد تنظیم شود.

پیشرفت تدریجی تمرینات: سیستم عصبی برای سازگاری و یادگیری کنترل حرکتی مناسب نیازمند افزایش تدریجی چالش

است. تمرینات باید از حرکات ساده به حرکات پیچیده، از شرایط پایدار به شرایط ناپایدار و از سرعت‌های پایین به شرایط مشابه ورزش پیشرفت کنند. افزایش مدت زمان حفظ وضعیت، تعداد تکرار، کاهش سطح حمایت، افزایش سرعت حرکت، اضافه کردن مقاومت و افزایش پیچیدگی حرکات از روش‌های پیشرفت تمرین هستند. پیشرفت بیش از حد سریع ممکن است باعث ایجاد حرکات جبرانی و کاهش کیفیت کنترل حرکتی شود.

اصل اختصاصی بودن تمرین: سیستم عصبی بر اساس نوع محرک‌هایی که دریافت می‌کند سازگار می‌شود؛ بنابراین تمرینات باید تا حد امکان مشابه شرایط واقعی ورزش باشند. برای مثال، ورزشکار رشته فوتبال باید تمریناتی شامل تغییر مسیر، شتاب‌گیری، توقف و حرکات چندجهتی انجام دهد، در حالی که ورزشکار رشته پرتابی نیاز بیشتری به تمرینات کنترل شانه و اندام فوقانی دارد. هرچه تمرین به نیازهای واقعی ورزش نزدیک‌تر باشد، انتقال اثر تمرین به عملکرد مسابقه بیشتر خواهد بود.

تمرکز بر کیفیت حرکت: در تمرینات حس عمقی، نحوه انجام حرکت اهمیت بیشتری از تعداد تکرار دارد. هدف اصلی این تمرینات اصلاح ارتباط بین سیستم عصبی و عضلات و ایجاد الگوی حرکتی صحیح است. حفظ راستای مناسب مفصل، کنترل تنه، هماهنگی عضلات و جلوگیری از حرکات جبرانی باید در تمام تمرینات مورد توجه قرار گیرد. انجام تمرین با الگوی اشتباه می‌تواند باعث تثبیت الگوهای حرکتی نامناسب شود.

استفاده از بازخورد حسی: بازخورد نقش مهمی در یادگیری

حرکتی دارد. در مراحل ابتدایی، ورزشکار برای اصلاح حرکت نیازمند اطلاعاتی از مربی یا درمانگر است. این بازخورد می‌تواند به صورت کلامی، دیداری یا استفاده از فیلم و آینه باشد. با پیشرفت ورزشکار، بهتر است وابستگی به بازخورد خارجی کاهش پیدا کند تا کنترل داخلی بدن و حس عمقی تقویت شود.

کاهش وابستگی به بینایی: حس عمقی نقش مهمی در آگاهی بدن از وضعیت خود دارد، بنابراین تمرینات باید به تدریج توانایی فرد را برای کنترل حرکت بدون اتکا به بینایی افزایش دهند. انجام برخی تمرینات با کاهش توجه به بینایی یا در شرایط کنترل شده با چشم بسته می‌تواند باعث افزایش استفاده از اطلاعات گیرنده‌های حسی شود. البته این کار باید فقط زمانی انجام شود که فرد توانایی کنترل پایه را به دست آورده باشد.

تنوع محرک‌های حسی: سیستم عصبی باید توانایی پاسخ به شرایط مختلف را داشته باشد. به همین دلیل تمرینات باید شامل تغییر در سطح تمرین، سرعت حرکت، جهت حرکت و شرایط محیطی باشند. این تنوع باعث می‌شود سیستم عصبی انعطاف‌پذیری بیشتری در پردازش اطلاعات حسی پیدا کند.

ایجاد بی‌ثباتی کنترل شده: استفاده از شرایط ناپایدار می‌تواند باعث تحریک بیشتر گیرنده‌های حس عمقی شود. ابزارهایی مانند سطوح ناپایدار، تخته تعادل یا تمرینات انتقال وزن می‌توانند چالش مناسبی ایجاد کنند. با این حال، بی‌ثباتی نباید به اندازه‌ای

باشد که فرد کنترل حرکت را از دست بدهد؛ هدف افزایش توانایی کنترل بدن است، نه ایجاد عدم تعادل شدید.

تمرینات چندجهتی: بسیاری از آسیب‌های ورزشی هنگام حرکات چندجهتی مانند تغییر مسیر، چرخش و توقف رخ می‌دهند. بنابراین تمرینات حس عمقی نباید فقط در یک مسیر انجام شوند و باید شامل حرکات جلو، عقب، جانبی و چرخشی باشند تا کنترل مفصل در شرایط واقعی افزایش یابد.

تمرینات واکنشی: در فعالیت‌های ورزشی بسیاری از حرکات غیرقابل پیش‌بینی هستند. به همین دلیل در مراحل پیشرفته باید تمریناتی استفاده شود که فرد را مجبور به واکنش سریع کند. تغییر مسیر با فرمان مربی، پاسخ به محرک‌های دیداری یا صوتی و تمرینات تصمیم‌گیری حرکتی باعث بهبود سرعت پاسخ عصبی-عضلانی می‌شوند.

مدیریت خستگی: خستگی می‌تواند دقت کنترل عصبی-عضلانی را کاهش دهد. در مراحل اولیه تمرین باید زمانی انجام شود که فرد توانایی حفظ الگوی صحیح حرکت را دارد. در مراحل پایانی بازتوانی می‌توان تمرینات را تحت شرایط خستگی مشابه مسابقه انجام داد تا توانایی حفظ کنترل بدن افزایش یابد.

تکرار و تداوم تمرین: یادگیری حرکتی و تغییرات عصبی نیازمند تکرار منظم هستند. تمرینات حس عمقی باید به صورت مداوم انجام شوند تا مسیرهای عصبی تقویت شده و الگوهای صحیح





آسیب‌دیده و ایجاد دوباره کنترل اولیه مفصل است. تمرینات معمولاً ساده، آهسته و با تمرکز بر کیفیت حرکت انجام می‌شوند. در این مرحله از ایجاد فشار زیاد روی مفصل جلوگیری می‌شود و ورزشکار یاد می‌گیرد موقعیت بدن و مفصل خود را بهتر درک کند. هدف این مرحله افزایش ورودی‌های حسی و بهبود ارتباط عصبی-عضلانی است.

تمرینات این مرحله شامل:

- انتقال وزن بدن در وضعیت ایستاده
- حفظ تعادل با دو پا و سپس یک پا
- حرکات کنترل‌شده مفصل در دامنه مناسب
- تمرینات فعال‌سازی عضلات تثبیت‌کننده
- تمرینات تعادل ساده روی سطح ثابت

۲-۲-۹. فاز دوم

افزایش تعادل پویا و کنترل مفصل در حرکت: پس از بهبود کنترل پایه، تمرینات از حالت ثابت خارج شده و نیاز به هماهنگی بیشتر ایجاد می‌شود. در این مرحله فرد باید بتواند هنگام حرکت، تغییر وضعیت بدن و انتقال نیرو، کنترل مفصل را حفظ کند. هدف اصلی این مرحله افزایش توانایی سیستم عصبی برای ایجاد پاسخ‌های سریع‌تر و هماهنگ‌تر است.

تمرینات این مرحله شامل:

- تعادل تک‌پا همراه با حرکات اندام‌ها
- اسکوات و لانچ با کنترل مناسب
- تمرین روی سطوح ناپایدار
- حرکت در جهات مختلف
- تمرینات کنترل زانو، لگن یا مچ هنگام حرکت

۲-۲-۳. فاز سوم

تمرینات پیشرفته عصبی-عضلانی و عملکردی: در این مرحله تمرینات به شرایط واقعی ورزش نزدیک‌تر می‌شوند. ورزشکار باید بتواند حرکات سریع‌تر، پیچیده‌تر و چندجهتی را با کنترل مناسب

حرکتی تثبیت شوند. قطع زودهنگام تمرین ممکن است باعث باقی ماندن ضعف کنترل حرکتی شود.

مرحله‌بندی تمرینات: برنامه حس عمقی باید بر اساس مراحل بازتوانی پیش برود. در مرحله اول تمرکز بر بازگرداندن کنترل پایه، فعال‌سازی عضلات و افزایش آگاهی مفصل است. در مرحله دوم تمرینات تعادل پویا و کنترل مفصل افزایش پیدا می‌کنند. در مرحله سوم حرکات عملکردی، پرش، تغییر جهت و فعالیت‌های نزدیک به ورزش اضافه می‌شوند. در مرحله چهارم تمرینات شبیه شرایط مسابقه طراحی می‌شوند تا ورزشکار برای بازگشت کامل آماده شود.

ارزیابی و اصلاح مداوم برنامه: برنامه تمرینی باید بر اساس پیشرفت ورزشکار تغییر کند. ارزیابی تعادل، کنترل حرکتی، حس وضعیت مفصل و عملکرد ورزشی باید به صورت دوره‌ای انجام شود تا مشخص شود فرد در چه بخش‌هایی نیاز به تمرکز بیشتری دارد. به طور کلی، تمرینات حس عمقی زمانی بیشترین اثر را دارند که به صورت اختصاصی، مرحله‌ای و بر اساس اصول کنترل عصبی-عضلانی طراحی شوند. هدف نهایی این تمرینات فقط بهبود حس مفصل نیست، بلکه بازگرداندن توانایی بدن برای ایجاد حرکات سریع، دقیق و ایمن در شرایط ورزشی است.

۲-۲-۹. فازبندی تمرینات حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی

تمرینات حس عمقی پس از آسیب ورزشی باید به صورت مرحله‌ای و بر اساس میزان بهبود کنترل حرکتی، وضعیت بافت آسیب‌دیده و توانایی ورزشکار پیشرفت کند. هدف این فازبندی، بازگرداندن تدریجی ارتباط بین گیرنده‌های حسی، سیستم عصبی مرکزی و عضلات است تا فرد بتواند ابتدا حرکات ساده را کنترل کند و سپس به شرایط پیچیده و مشابه مسابقه بازگردد (۱۳).

۲-۲-۱. فاز اول

بازگرداندن کنترل پایه و فعال‌سازی عصبی-عضلانی: در این مرحله هدف اصلی افزایش آگاهی فرد نسبت به وضعیت اندام

انجام دهد. تمرکز این مرحله بر کنترل بدن در شرایطی است که نیاز به تولید نیرو، جذب نیرو و واکنش سریع وجود دارد. در این مرحله، کیفیت فرود، راستای مفاصل و توانایی حفظ کنترل بدن اهمیت زیادی دارد.

تمرینات این مرحله شامل:

- پرش و فرود کنترل شده
- پرش تک پا
- تغییر مسیر
- تمرینات چابکی
- حرکات ترکیبی قدرت و تعادل
- تمرینات واکنشی با محرک دیداری یا صوتی

۹-۴. فاز چهارم

بازگشت به ورزش: هدف مرحله نهایی، آماده سازی ورزشکار برای نیازهای واقعی تمرین و مسابقه است. در این مرحله تمرینات باید بیشترین شباهت را به حرکات رشته ورزشی فرد داشته باشند. ورزشکار باید بتواند در شرایط سرعت بالا، خستگی و فشار رقابتی، کنترل عصبی-عضلانی مناسب را حفظ کند. در این مرحله تنها ترمیم آسیب کافی نیست، بلکه ورزشکار باید توانایی کنترل حرکات پیچیده را نیز به دست آورده باشد.

تمرینات این مرحله شامل:

- شبیه سازی حرکات مسابقه
- تغییر مسیر با سرعت بالا
- تمرینات واکنشی و تصمیم گیری
- حرکات انفجاری کنترل شده
- تمرینات اختصاصی رشته ورزشی

به طور کلی، پیشرفت از یک فاز به فاز بعدی باید بر اساس معیارهای عملکردی انجام شود و صرفاً بر اساس زمان تعیین نشود. ورزشکار زمانی باید وارد مرحله بعد شود که بتواند تمرینات مرحله قبل را با کنترل مناسب، بدون درد و بدون الگوی حرکتی جبرانی انجام دهد. این رویکرد باعث می شود بازگشت به ورزش ایمن تر باشد و احتمال باقی ماندن اختلالات حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی کاهش پیدا کند.

۱۰- نتیجه گیری

حس عمقی یکی از اجزای اساسی سیستم عصبی-عضلانی است که نقش مهمی در کنترل حرکات، حفظ ثبات مفاصل و اجرای صحیح مهارت های ورزشی دارد. آسیب های ورزشی می توانند با



مورد توجه قرار گیرد. ارزیابی دقیق حس عمقی و استفاده از تمرینات مرحله‌ای، اختصاصی و پیش‌رونده می‌تواند موجب بهبود عملکرد، کاهش عوارض طولانی‌مدت و بازگشت ایمن‌تر ورزشکار به فعالیت ورزشی شود.

اختلال در گیرنده‌های حسی و مسیرهای عصبی، باعث کاهش کنترل حرکتی و افزایش خطر مشکلات عملکردی شوند. بنابراین، بازگشت کامل ورزشکار تنها با ترمیم ساختار آسیب‌دیده امکان‌پذیر نیست و باید ارزیابی حس عمقی و کنترل عصبی-عضلانی نیز

References

1. Apostolopoulos NC. Proprioception—The Sixth Sense: Understanding Our Relationship with the Internal and External Environment. *Fundamentals of Recovery, Regeneration, and Adaptation to Exercise Stress: An Integrated Approach*: Springer; 2025. p. 75-104.
2. Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system, part II: the role of proprioception in motor control and functional joint stability. *Journal of athletic training*. 2002;37(1):80.
3. Valdes K, Manalang KC, Leach C. Proprioception: An evidence-based review. *Journal of Hand Therapy*. 2024;37(2):269-72.
4. Rojas-Valverde D, Nikolaidis PT, Fallas-Campos A. Proprioception in sports and health. *Frontiers Media SA*; 2025. p. 1646186.
5. Lee CH, Chen CC. Role of proprioceptors in chronic musculoskeletal pain. *Experimental Physiology*. 2024;109(1):45-54.
6. Yilmaz O, Soyly Y, Erkmen N, Kaplan T, Batalik L. Effects of proprioceptive training on sports performance: a systematic review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*. 2024;16(1):149.
7. Ma J, Zhang D, Zhao T, Liu X, Wang J, Zheng H, et al. The effects of proprioceptive training on anterior cruciate ligament reconstruction rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Rehabilitation*. 2021;35(4):506-21.
8. Rhodes D, Leather M, Birdsall D, Alexander J. The effect of proprioceptive training on directional dynamic stabilization. *Journal of sport rehabilitation*. 2020;30(2):248-54.
9. Zhao Y, Chen Z, Li L, Wu X, Li W. Changes in proprioception at different time points following anterior cruciate ligament injury or reconstruction. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2023;18(1):547.
10. Fleming JD, Ritzmann R, Centner C. Effect of an anterior cruciate ligament rupture on knee proprioception within 2 years after conservative and operative treatment: a systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine*. 2022;52(5):1091-102.
11. Han J, Waddington G, Adams R, Anson J, Liu Y. Assessing proprioception: A critical review of methods. *J Sport Health Sci*. 2016;5(1):80-90.
12. Winter L, Huang Q, Sertic JVL, Konczak J. The Effectiveness of Proprioceptive Training for Improving Motor Performance and Motor Dysfunction: A Systematic Review. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*. 2022;Volume 3 - 2022.
13. Lazarou L, Kofotolis N, Pafis G, Kellis E. Effects of two proprioceptive training programs on ankle range of motion, pain, functional and balance performance in individuals with ankle sprain. *Journal of back and musculoskeletal rehabilitation*. 2018;31(3):437-46.

قابلیت استفاده از داده‌های فشار کف پا در افراد به دنبال آسیب رباط صلیبی قدامی زانو

دکتر سهیل منصور سوهانی
عضو گروه فیزیوتراپی و هیات علمی دانشگاه علوم پزشکی ایران

مفصلی، ثبات عملکردی و قدرت عضلانی صورت می‌گیرد. عبارت دیگر، این روش‌های سنجش قادر به کمی نمودن وضعیت عملکردی زانو حین فعالیت‌های پویا همراه با تحمل وزن یا در اثر یادگیری حرکتی نیستند. اندازه‌گیری‌های پویای توزیع فشار کف پا را می‌توان بدلیل سهولت انجام و حساسیت جهت کمی نمودن خصوصیات بارگذاری بیومکانیکی کینماتیک اندام تحتانی مثل پروناسیون کف پا مورد استفاده قرار داد. گذشته از این، اندازه‌گیری‌های فشار کف پا در ارزیابی پارامترهای فضائی زمانی جزئی طی مراحل راه رفتن دقیق هستند. مطالعات انجام شده روی قابلیت استفاده از اندازه‌گیری‌های فشار کف پا در افراد بدنبال آسیب رباط صلیبی قدامی زانو، کاهش

آسیب رباط صلیبی قدامی (ACL) یک صدمه ناتوان‌کننده ورزشی است که سبب تغییر بارگذاری زانو شده، روی عملکرد روزمره اثر گذاشته و احتمال ایجاد استئوآرتریت زودرس را افزایش می‌دهد. از لحاظ بالینی، عملکرد زانو در افراد فاقد رباط صلیبی قدامی (ACLD) اغلب با استفاده از ترکیبی از پرسشنامه‌ها برای ارزیابی سطح عملکرد و معاینات بالینی برای سنجش میزان شلی



غیرقرینگی توزیع فشار کف پائی بدنبال اعمال جراحی بازسازی این رباط را نشان داد.

در حین بارگذاری پا، افزایش چرخش داخلی درشت نی بدلیل الگوهای کینماتیک تشریحی همراه سبب افزایش اورسیون استخوان پاشنه می شود.

بدلیل بی ثباتی قابل ملاحظه وضعیتی در افراد فاقد رباط صلیبی قدامی، بیماران ممکن است بخواهند بارگذاری زانو را کنترل نمایند که یک روش آن تنظیم زمان بندی رول آف پا است.

پیامد مطالعه حاضر، تغییرات توزیع فشار کف پای پویا حین راه رفتن با پای برهنه در افراد فاقد رباط صلیبی قدامی را تا حد زیادی وابسته به تغییرات الگوی رول آف بدلیل کاهش نیروهای برشی

قدامی زانو آشکار ساخت. اندازه گیری های فشار کف پای پویا راه عملی و عینی ارزیابی خصوصیات بارگذاری عملکردی اندام همراه با آسیب رباط صلیبی قدامی است که ممکن است در ارزیابی و برنامه های توانبخشی و روش های جراحی یاری دهنده باشد.

Reference

Hongshi Huang No"el Keijzers Herwin Horemans Guo Qinwei Yuanyuan Yu Henk Stam Stephan Praet Yingfang Ao. Anterior cruciate ligament rupture is associated with abnormal and asymmetrical lower limb loading during walking. Journal of Science and Medicine in Sport 2016



اپیدمیولوژی و تحلیل ریسک آسیب‌های ورزشی

امیرحسین مهباندوست
دانشجوی دکترای علوم ورزشی

چکیده

آسیب‌های ورزشی یکی از مهم‌ترین چالش‌های ورزش حرفه‌ای و قهرمانی محسوب می‌شوند و سالانه موجب از دست رفتن حجم قابل توجهی از زمان تمرین و مسابقه ورزشکاران می‌گردند. در سال‌های اخیر، رویکردهای پیشگیری از آسیب از مدل‌های سنتی مبتنی بر شمارش آسیب‌ها فاصله گرفته و به سمت مدل‌های داده‌محور، چندعاملی و پیش‌بینانه حرکت کرده‌اند. مفاهیمی نظیر بار آسیب، مدیریت هوشمند بار تمرینی، تحلیل سیستم‌های پیچیده و استفاده از هوش مصنوعی، افق‌های جدیدی را در حوزه پیشگیری از آسیب‌های ورزشی ایجاد کرده‌اند. هدف این مقاله بررسی مهم‌ترین پیشرفت‌های نوین در اپیدمیولوژی آسیب‌های ورزشی و معرفی راهکارهای علمی پیشگیری از آسیب در ورزشکاران است.

مقدمه

اپیدمیولوژی آسیب‌های ورزشی به مطالعه توزیع، فراوانی، الگوها و عوامل مؤثر بر بروز آسیب در ورزشکاران می‌پردازد. این حوزه تلاش می‌کند مشخص نماید چه نوع آسیبی، در چه رشته‌ای، با





پیشگیری از آسیب را بیش از پیش نمایان ساخته است.

آسیب‌های ورزشی و نظریه سیستم‌های پیچیده

در گذشته آسیب‌های ورزشی غالباً بر اساس مدل‌های خطی و تک‌عاملی تحلیل می‌شدند. با این حال شواهد علمی جدید نشان می‌دهد که آسیب نتیجه تعامل مجموعه‌ای از عوامل بیولوژیکی، عصبی، روانی، محیطی و تمرینی است.

بر اساس نظریه سیستم‌های پیچیده، آسیب یک پدیده نوظهور است که از تعامل هم‌زمان ده‌ها عامل کوچک ایجاد می‌شود. از این رو شناسایی یک عامل منفرد به عنوان علت اصلی آسیب معمولاً امکان‌پذیر نیست و باید ارتباط میان عوامل مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

نقش عوامل روان‌شناختی در بروز آسیب

تحقیقات جدید نشان داده‌اند که استرس‌های روانی، اضطراب رقابتی و فشارهای ذهنی می‌توانند احتمال بروز آسیب را افزایش دهند.

مدل استرس - آسیب ویلیامز و اندرسن بیان می‌کند که استرس روانی از طریق افزایش تنش عضلانی، کاهش تمرکز، اختلال در پردازش اطلاعات و کاهش کنترل حرکتی، زمینه بروز آسیب را فراهم می‌کند. به همین دلیل امروزه آمادگی روانی به عنوان یکی از اجزای اصلی برنامه‌های پیشگیری از آسیب شناخته می‌شود.

مدیریت بار تمرینی؛ سنگ بنای پیشگیری مدرن

مدیریت بار تمرینی یکی از مؤثرترین راهکارهای پیشگیری از آسیب در ورزش حرفه‌ای است. بار تمرینی به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود:

چه فراوانی و تحت چه شرایطی رخ می‌دهد و چگونه می‌توان از وقوع آن جلوگیری کرد. در گذشته تمرکز اصلی پژوهشگران بر نرخ بروز آسیب بود، اما امروزه توجه به پیامدهای ناشی از آسیب و تأثیر آن بر عملکرد ورزشکاران باعث شکل‌گیری مفاهیم جدیدی در این حوزه شده است.

گذار از نرخ بروز به بار آسیب

یکی از مهم‌ترین تحولات سال‌های اخیر، تغییر نگرش از «نرخ بروز آسیب» به «بار آسیب» است. نرخ بروز تنها تعداد آسیب‌ها را در واحد زمان یا میزان مواجهه گزارش می‌کند، در حالی که بار آسیب علاوه بر تعداد، شدت آسیب و میزان روزهای از دست‌رفته ناشی از آن را نیز در نظر می‌گیرد.

بر این اساس، آسیب‌هایی نظیر پارگی رباط صلیبی قدامی (ACL)، آسیب‌های همسترینگ و برخی آسیب‌های مفصلی اگرچه ممکن است شیوع کمتری نسبت به سایر آسیب‌ها داشته باشند، اما به دلیل ایجاد غیبت طولانی‌مدت از تمرین و مسابقه، بار بسیار بالاتری بر ورزشکار و تیم تحمیل می‌کنند.

روندهای نوین اپیدمیولوژیک در ورزش حرفه‌ای

مطالعات طولی انجام‌شده در ورزش حرفه‌ای نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت دانش پزشکی و علوم ورزشی، برخی آسیب‌ها همچنان روند افزایشی دارند. افزایش سرعت بازی، شدت بالاتر رقابت‌ها، فشردگی تقویم مسابقات و حجم بالای تمرینات از جمله عوامل مؤثر در این روند هستند.

همچنین شیوع آسیب‌های ناشی از استفاده بیش از حد (Overuse Injuries) در بسیاری از رشته‌های ورزشی رو به افزایش است. این موضوع ضرورت بازنگری در روش‌های سنتی

بار خارجی

شامل:

* مسافت طی شده

* سرعت حرکت

* تعداد شتاب‌ها و کاهش شتاب‌ها

* حجم تمرین

بار داخلی

شامل:

* ضربان قلب

* غلظت لاکتات

* شاخص درک فشار (RPE)

* پاسخ‌های فیزیولوژیک ورزشکار

پایش هم‌زمان این دو نوع بار به مربیان و متخصصان علوم ورزشی کمک می‌کند تا از ایجاد خستگی تجمعی و افزایش ریسک آسیب جلوگیری کنند.

مدل EWMA و پایش هوشمند بار تمرینی

یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در پایش بار تمرینی استفاده از مدل میانگین متحرک موزون نمایی (EWMA) است.

برخلاف میانگین‌های ساده که به تمام روزهای گذشته وزن یکسانی می‌دهند، مدل EWMA برای داده‌های جدید وزن بیشتری در نظر می‌گیرد. این ویژگی باعث می‌شود تغییرات واقعی وضعیت ورزشکار با دقت بیشتری شناسایی شود.

مزایای این مدل عبارت‌اند از:

* شناسایی زودهنگام افزایش ریسک آسیب

* پایش دقیق خستگی تجمعی

* کاهش خطاهای ناشی از میانگین‌گیری ساده

* بهبود تصمیم‌گیری کادر فنی و پزشکی

هوش مصنوعی و آینده پیشگیری از آسیب

هوش مصنوعی به سرعت در حال تبدیل شدن به یکی از ارکان اصلی پیشگیری از آسیب‌های ورزشی است. الگوریتم‌های

یادگیری ماشین قادرند حجم عظیمی از داده‌های تمرینی، پزشکی و عملکردی را تحلیل کرده و الگوهای مرتبط با آسیب را شناسایی کنند.

از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در این حوزه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

* پیش‌بینی احتمال آسیب قبل از وقوع

* طراحی سیستم‌های هشدار زودهنگام

* تحلیل داده‌های GPS و پایش بار تمرینی

* شناسایی الگوهای حرکتی پرخطر

* شخصی‌سازی برنامه‌های پیشگیری

امروزه استفاده از درخت تصمیم، جنگل تصادفی (Random Forest) و شبکه‌های عصبی مصنوعی در بسیاری از تیم‌های حرفه‌ای جهان رایج شده است.

چشم‌انداز آینده

توسعه پایگاه‌های داده ملی آسیب‌های ورزشی، استانداردسازی ثبت آسیب‌ها، یکپارچه‌سازی اطلاعات بین فدراسیون‌ها و مراکز درمانی و بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند پیش‌بینی آسیب، از مهم‌ترین اقدامات آینده در این حوزه محسوب می‌شود.

استفاده از این فناوری‌ها می‌تواند موجب کاهش روزهای از دست‌رفته ورزشکاران، افزایش طول عمر ورزشی و ارتقای عملکرد قهرمانی شود.

نتیجه‌گیری

رویکردهای نوین پیشگیری از آسیب‌های ورزشی از مدل‌های سنتی و واکنشی فاصله گرفته و به سمت سیستم‌های هوشمند، چندعاملی و پیش‌بینانه حرکت کرده‌اند. توجه به مفهوم بار آسیب، مدیریت علمی بار تمرینی، تحلیل عوامل روانی و بیومکانیکی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین به ویژه هوش مصنوعی، آینده پیشگیری از آسیب‌های ورزشی را شکل خواهند داد. هدف نهایی در ورزش مدرن تنها درمان آسیب نیست، بلکه جلوگیری از وقوع آن پیش از بروز است.



توسعه سیستم‌های هوشمند غربالگری آسیب در ورزش: از داده‌های پوشیدنی تا دوقلوی دیجیتال همکاری بین علوم داده و بیومکانیک: از حرکت انسان تا پیش‌بینی هوشمند

دکتر احمد نظری
متخصص پزشکی ورزشی
عضو هیات علمی دانشگاه علوم پزشکی ایران

چکیده

آسیب‌های ورزشی از مهم‌ترین چالش‌های پزشکی ورزشی هستند و می‌توانند به کاهش عملکرد، افزایش غیبت از تمرین و مسابقه، طولانی شدن بازتوانی و بالا رفتن خطر آسیب مجدد منجر شوند. در سال‌های اخیر، هم‌زمان با رشد حسگرهای پوشیدنی، تحلیل حرکت بدون مارکر، یادگیری ماشین، بینایی کامپیوتر و مدل‌های دوقلوی دیجیتال، غربالگری آسیب از یک رویکرد واکنشی به سمت سامانه‌ای پیش‌کنشی و شخصی‌سازی‌شده حرکت کرده است. مرورهای جدید نشان می‌دهند که هوش مصنوعی در بیومکانیک ورزشی عمدتاً در سه محور پوشیدنی‌ها، تحلیل حرکت و پیشگیری از آسیب به کار می‌رود.

هدف این مقاله ارائه نسخه کامل و استاندارد از مقاله شما برای چاپ در فصلنامه طب ورزش است. در این نوشتار، مبانی نظری، روش مرور، معماری سامانه، انواع داده، فناوری‌های کلیدی، شواهد پژوهشی، کاربردهای بالینی، چالش‌ها، ملاحظات اخلاقی و چشم‌انداز آینده به صورت منسجم بررسی می‌شود. شواهد جدید نشان می‌دهد که **markerless motion capture** و **IMU** ها برای بسیاری از شاخص‌های حرکتی، اعتبار و پایایی قابل قبولی

دارند، اما تعمیم‌پذیری آن‌ها به نوع حرکت، پلتفرم و جمعیت وابسته است.

واژگان کلیدی: غربالگری آسیب، هوش مصنوعی، بیومکانیک ورزشی، سنسور پوشیدنی، تحلیل حرکت بدون مارکر، دوقلوی دیجیتال، پزشکی ورزشی

مقدمه

آسیب‌های ورزشی طیفی از اختلالات حاد و مزمن را شامل می‌شوند؛ از جمله پارگی رباط صلیبی قدامی، پیچ‌خوردگی مچ پا، آسیب همسترینگ، تاندینوپاتی، دردهای ناشی از بار تکراری و شکستگی‌های استرسی. این آسیب‌ها نه تنها عملکرد ورزشکار را مختل می‌کنند، بلکه موجب غیبت از تمرین و رقابت، افزایش هزینه‌های درمان، کاهش طول عمر ورزشی و بالا رفتن احتمال عود می‌شوند. در ورزش‌های حرفه‌ای و آماتور، بار آسیب فقط یک مسئله درمانی نیست، بلکه یک مسئله عملکردی، اقتصادی و حتی سازمانی است.

در رویکردهای سنتی، ارزیابی آسیب و ریسک عمدتاً مبتنی بر معاینه بالینی، شرح حال، آزمون‌های عملکردی، تصویربرداری و قضاوت متخصص است. این روش‌ها همچنان ضروری‌اند، اما



که آسیب ورزشی حاصل تعامل چند عامل است: بار تمرینی، ویژگی‌های بیومکانیکی، خستگی، سابقه آسیب، ویژگی‌های فردی و شرایط محیطی. در این چارچوب، هوش مصنوعی می‌تواند الگوهایی را کشف کند که با مشاهده بالینی ساده قابل تشخیص نیستند. این الگوریتم‌ها قادرند روابط غیر خطی میان داده‌ها را تحلیل کنند و به جای یک شاخص منفرد، نمایه‌ای چندبعدی از خطر تولید نمایند.

در بیومکانیک ورزشی، حرکت انسان نه فقط نتیجه یک الگوی مکانیکی، بلکه حاصل تعامل سیستم عصبی، عضلانی، اسکلتی و بارهای بیرونی است. بنابراین، استفاده از AI زمانی ارزشمند است که داده‌های حرکتی، فیزیولوژیک و بالینی را در یک مدل یکپارچه ترکیب کند. همین منطق، پایه توسعه سامانه‌های دوقلوی دیجیتالی و مدل‌های پیش‌بینی شخصی‌سازی شده را تشکیل می‌دهد.

معماری سامانه سامانه هوشمند غربالگری آسیب معمولاً در چهار لایه طراحی می‌شود. لایه اول، جمع‌آوری داده است که شامل حسگرهای پوشیدنی، دوربین‌ها، داده‌های GPS، علائم فیزیولوژیک و اطلاعات بالینی می‌شود. لایه دوم، پیش‌پردازش داده است که در آن نویز حذف می‌شود، سیگنال‌ها هم‌زمان می‌شوند و ویژگی‌های معنادار استخراج می‌گردد. لایه سوم، تحلیل هوشمند است که در آن مدل‌های یادگیری

در شناسایی تغییرات ظریف پیش‌آسیب، پایش پیوسته و ادغام داده‌های چندمنبعی محدودیت دارند. به همین دلیل، ادغام هوش مصنوعی با بیومکانیک ورزشی و داده‌های پوشیدنی، افق تازه‌ای برای پیشگیری و تصمیم‌گیری باز کرده است.

از منظر مفهومی، غربالگری هوشمند آسیب به جای تمرکز صرف بر وقوع آسیب، بر تغییرات پیش‌هشداردهنده تمرکز دارد. این تغییر پارادایم برای طب ورزش اهمیت زیادی دارد، زیرا می‌تواند به جای توصیه‌های عمومی، به سمت ارزیابی اختصاصی، هشدار زود هنگام و مداخله هدفمند حرکت کند.

روش این مقاله به صورت یک مرور روایی توسعه یافته تدوین شده و بر منابع کلیدی و مرورهای جدید درباره هوش مصنوعی در بیومکانیک ورزشی، تحلیل حرکت بدون مارکر، فناوری‌های پوشیدنی و پیشگیری از آسیب تکیه دارد. منابع انتخاب شده شامل مرورهای جستاری، مرورهای نظام‌مند، و مطالعات اعتبارسنجی جدید هستند که برای تکمیل جنبه‌های نظری و کاربردی متن استفاده شده‌اند.

برای نسخه نهایی چاپ، توصیه می‌شود در فایل نهایی مجله، دامنه جست‌وجو، پایگاه‌های اطلاعاتی، کلیدواژه‌ها، معیارهای ورود و خروج و روش انتخاب منابع به صورت شفاف گزارش شود تا مقاله از نظر ساختاری به استانداردهای مرور علمی نزدیک‌تر شود. مبانی نظری مبنای نظری این مقاله بر این فرض استوار است

معمولاً حاصل یک متغیر واحد نیست، بلکه از تعامل متغیرها شکل می‌گیرد.

فناوری‌های کلیدی سنسورهای پوشیدنی ستون اصلی پایش در محیط‌های تمرینی و مسابقه‌ای هستند. این ابزارها امکان ثبت پیوسته بار تمرینی، پاسخ فیزیولوژیک و الگوهای حرکتی را فراهم می‌کنند. مرورهای جدید نشان می‌دهند که اگر داده‌های پوشیدنی با مدل‌های تحلیلی مناسب همراه شوند، می‌توانند در پیشگیری از میکروآسیب‌ها، پایش خستگی و بهینه‌سازی تمرین مفید باشند.

تحلیل حرکت بدون مارکر یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌های اخیر است. شواهد جدید نشان می‌دهند که سیستم‌های markerless برای بسیاری از متغیرهای کینماتیکی، پایایی متوسط تا خوب دارند، اما در حرکات پیچیده، صفحات چرخشی و برخی مفاصل، خطای بیشتری مشاهده می‌شود. در بخش تحلیل داده، Random Forest و XGBoost برای داده‌های ساختاریافته مناسب‌اند، در حالی که CNN و

ماشین، یادگیری عمیق و بینایی کامپیوتر برای شناسایی الگوهای خطر به کار می‌روند. لایه چهارم، تصمیم‌یار بالینی است که خروجی مدل را به زبان قابل استفاده برای پزشک، فیزیوتراپیست و مربی ترجمه می‌کند. این ترجمه اگر انجام نشود، حتی بهترین مدل نیز در عمل بالینی ارزش محدودی خواهد داشت.

انواع داده‌های مورد استفاده در این حوزه به چند دسته اصلی تقسیم می‌شوند. داده‌های حرکتی شامل زاویه مفصل، شتاب، الگوی فرود، تغییر جهت، زمان تماس با زمین و عدم تقارن هستند. داده‌های بار تمرینی شامل مسافت، شدت، تعداد تغییر جهت، بار تجمعی و شاخص‌های خستگی‌اند. داده‌های فیزیولوژیک نیز شامل ضربان قلب، HRV، دمای پوست و شاخص‌های ریکاوری می‌شوند.

داده‌های بالینی شامل سابقه آسیب، درد، دامنه حرکتی، قدرت، آزمون‌های عملکردی و یافته‌های تصویربرداری‌اند. ارزش علمی این رویکرد زمانی بیشتر می‌شود که داده‌ها از منابع مختلف تلفیق شوند، زیرا خطر آسیب



جدول ۱. مقایسه فناوری‌های اصلی در غربالگری هوشمند

کاربرد اصلی	محدودیت‌ها	مزایا	فناوری
بار تمرینی، خستگی	نویز، وابستگی به پروتکل	پایش پیوسته، امکان استفاده در محیط واقعی	پوشیدنی‌ها
ارزیابی حرکت، الگوی فرود	خطا در حرکات پیچیده	دسترسی میدانی، عدم نیاز به آزمایشگاه	تحلیل حرکت بدون مارکر
پیش‌بینی ریسک آسیب	نیاز به داده زیاد	کشف الگوهای غیرخطی	یادگیری ماشین
تصمیم‌گیری شخصی‌سازی شده	پیچیدگی مدل‌سازی	شبیه‌سازی فردی	دوقلوی دیجیتال

چالش‌ها و محدودیت‌ها مهم‌ترین چالش، نبود استاندارد یکپارچه برای جمع‌آوری، پردازش و گزارش داده‌هاست. بدون استانداردسازی، مقایسه مطالعات و انتقال نتایج به عمل بالینی دشوار می‌شود. چالش دوم، اعتبارسنجی بیرونی است؛ مدلهایی که در یک جمعیت یا یک رشته ورزشی عملکرد مطلوب دارند، ممکن است در جمعیت دیگر مشابه نباشند.

تفسیرپذیری نیز حیاتی است، زیرا پزشک ورزشی باید بداند چرا مدل یک ورزشکار را پرخطر تشخیص داده است. به همین دلیل، استفاده از روش‌های XAI مانند SHAP و LIME اهمیت دارد. علاوه بر این، سوگیری داده‌ای، تفاوت‌های جنسیتی و سنی، و تفاوت سطح مهارت ورزشی می‌توانند عملکرد مدل را دگرگون کنند.

ملاحظات اخلاقی به‌کارگیری هوش مصنوعی در پزشکی ورزشی بدون توجه به اخلاق داده ناقص است. رضایت آگاهانه، حریم خصوصی، امنیت داده و شفافیت در کاربرد خروجی الگوریتم باید به‌صورت جدی رعایت شوند. ورزشکار باید بداند چه داده‌ای جمع‌آوری می‌شود، چه کسی به آن دسترسی دارد و داده‌ها چگونه در تصمیم‌گیری استفاده می‌شوند.

همچنین باید روشن شود که هوش مصنوعی ابزار کمک‌تصمیم است، نه جایگزین قضاوت بالینی. اگر این مرز حفظ نشود، خطر وابستگی بیش از حد به الگوریتم و کاهش استقلال حرفه‌ای وجود دارد. از منظر عدالت نیز لازم است داده‌های آموزشی متنوع باشند تا مدل برای گروه‌های مختلف به‌طور ناهم‌راستا عمل نکند.

چشم‌انداز آینده آینده این حوزه به سمت سامانه‌های بلادرنگ، چندوجهی و شخصی‌سازی شده حرکت می‌کند. ادغام داده‌های پوشیدنی، ویدئویی، بالینی و حتی زیستی می‌تواند تصویر دقیق‌تری از ریسک فردی ارائه دهد. در این مسیر، edge computing، مدل‌های سبک‌تر و ابزارهای مبتنی بر موبایل، ورود این فناوری‌ها

LSTM برای داده‌های ویدئویی و سری‌زمانی کاربرد بیشتری دارند. دوقلوی دیجیتال نیز امکان آزمون سناریوهای مختلف تمرین و بازتوانی را فراهم می‌کند.

شواهد پژوهشی مرور Bioengineering نشان می‌دهد که کاربرد AI در بیومکانیک ورزشی بیشتر بر سه محور استوار است: پوشیدنی‌ها، تحلیل حرکت و پیشگیری از آسیب. این مرور همچنین بر آن تأکید می‌کند که فناوری‌های هوشمند باید از سطح تحلیل داده به سطح تصمیم‌سازی بالینی منتقل شوند. مرورهای جدیدتر نیز نشان می‌دهند که AI در ورزش می‌تواند عملکرد، تشخیص، پایش سلامت و بازتوانی را هم‌زمان پوشش دهد.

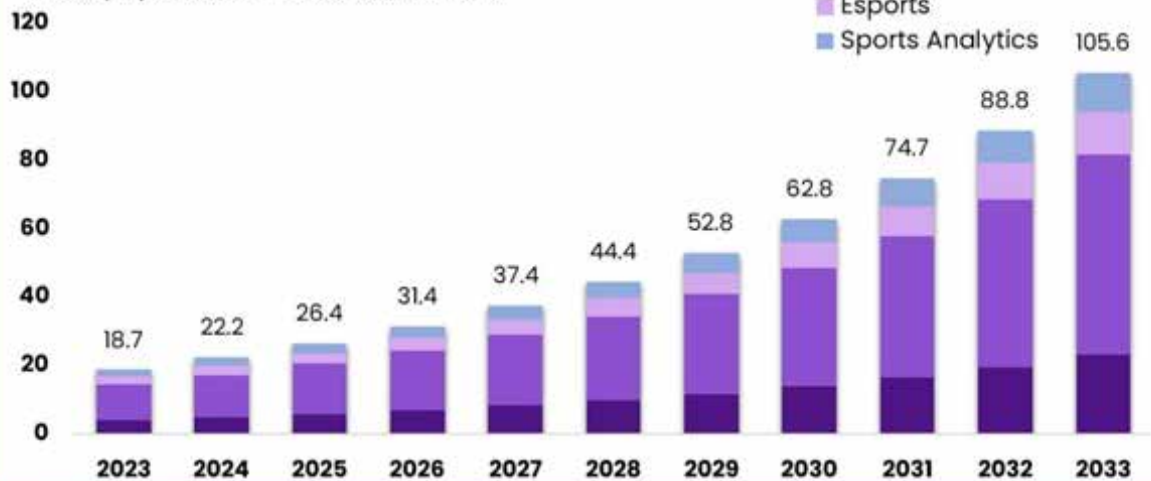
در حوزه markerless motion capture، مرورهای نظام‌مند اخیر گزارش کرده‌اند که این سامانه‌ها برای اکثر متغیرهای کینماتیکی قابل اعتمادند، اما هنوز برای جایگزینی کامل سیستم‌های مارکربندی شده کافی نیستند. بنابراین، این ابزارها در حال حاضر بیشتر نقش تصمیم‌یار دارند تا ابزار مرجع نهایی.

کاربردهای بالینی در کلینیک پزشکی ورزشی، ارزش اصلی این فناوری‌ها در شناسایی زود هنگام افراد پرخطر است. برای مثال، ورزشکاری که در داده‌های ویدئویی او کاهش کنترل تنه، افزایش والگوس زانو و الگوی فرود نامناسب دیده می‌شود، ممکن است به مداخله پیشگیرانه نیاز داشته باشد. اگر این یافته‌ها با افزایش بار تمرینی یا نشانه‌های خستگی همراه شوند، احتمال خطر بیشتر می‌شود.

در بازتوانی، این سامانه‌ها می‌توانند برای پایش کیفیت حرکت، سنجش پیشرفت و تعیین آمادگی برای بازگشت به تمرین یا رقابت استفاده شوند. فیزیوتراپیست با اتکا به داده‌های عینی می‌تواند تمرینات اصلاحی را دقیق‌تر تنظیم کند و پاسخ بیمار را به‌صورت طولی بسنجد. در سطح تیمی نیز مربی و پزشک می‌توانند برنامه بار تمرینی را بر اساس نمایه ریسک فردی تنظیم کنند.

Global Sports Technology Market

Size, By Sports, 2024-2033 (USD Billion)



The Market will Grow
At the CAGR of:

18.9%

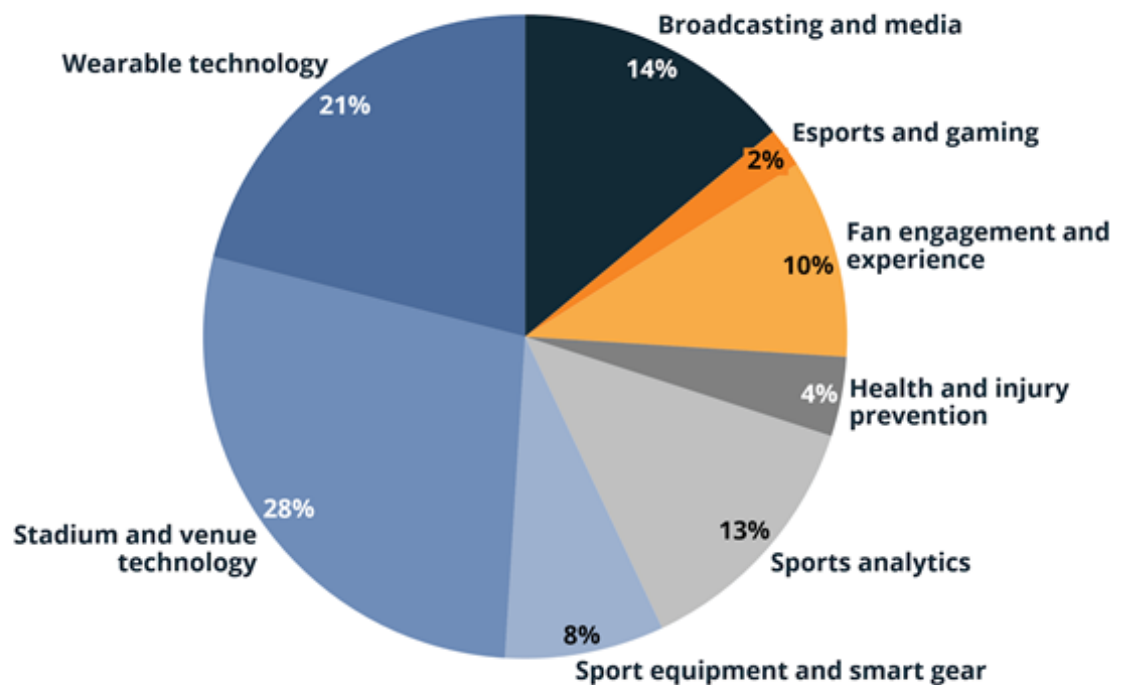
The Forecasted Market
Size for 2033 in USD:

\$105.6 B

market.us

Sports150

Sports technology market share by subsector



Source: Grand View Research. Lincoln International intelligence.

شکل ۱ - بلوغ فناوری‌های هوشمند در غربالگری آسیب (۲۰۲۵-۲۰۲۶) به‌عنوان تصویر پیشنهادی برای مقاله، یک نمودار ستونی مقایسه‌ای از چهار فناوری اصلی می‌تواند درج شود: پوشیدنی‌ها، markerless motion capture، یادگیری ماشین و دوقلوی دیجیتال.

Abstract

Artificial intelligence in sport: A narrative review of applications, challenges and future trends.

The accuracy, validity and reliability of Theia3D markerless motion capture for studying the biomechanics of human movement: A systematic review.

Reliability and validity of lower extremity and trunk kinematics measured with markerless motion capture during sports-related and functional tasks: A systematic review.

Validity and reliability of single camera markerless motion capture systems with RGB-D sensor for shoulder ROM.

Artificial Intelligence in Biomechanics: A Narrative Review of Current Applications and Future Directions.

The multiple uses of artificial intelligence in exercise programs.

Promises and perils of generative artificial intelligence: ethical and practical applications in clinical exercise physiology.

را به محیط‌های تمرینی آسان‌تر خواهند کرد.

در افق بلندمدت، دوقلوی دیجیتال و پزشکی دقیق ورزشی می‌توانند به ارکان اصلی پایش و پیشگیری از آسیب تبدیل شوند. تحقق این هدف مستلزم همکاری نزدیک میان پزشکان ورزشی، فیزیوتراپیست‌ها، مهندسان، متخصصان داده و مربیان است.

نتیجه‌گیری

هوش مصنوعی در حال دگرگون کردن روش‌های غربالگری آسیب، پایش حرکت و تصمیم‌گیری در طب ورزش است. شواهد جدید نشان می‌دهد که فناوری‌های پوشیدنی، تحلیل حرکت بدون مارکر و مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند به شناسایی زود هنگام خطر، پایش بازتوانی و شخصی‌سازی مداخله کمک کنند. با این حال، استانداردهای اعتبارسنجی، تفسیرپذیری و اخلاق داده هنوز پیش‌نیازهای اصلی برای کاربرد پایدار و ایمن این فناوری‌ها هستند.

Reference

Artificial Intelligence in Sports Biomechanics: A Scoping Review on Wearable Technology, Motion Analysis, and Injury Prevention. *Bioengineering*. 2025;12(8):887.



مقایسه الگوریتم‌های Support Vector Machine و Random Forest در پیش‌بینی آسیب‌های ورزشی

دکتر مرتضی برزگر بفرویی
دکترای حرکات اصلاحی دانشگاه شهید بهشتی
دکتر رضا صابری‌ثانی
دکترای حرکات اصلاحی دانشگاه شهید بهشتی

از نظر توانایی مدل‌سازی روابط پیچیده، SVM در حالت پایه یک مدل خطی است؛ اما با استفاده از کرنل‌هایی مانند RBF، Polynomial و Sigmoid می‌تواند روابط غیرخطی را نیز شناسایی کند. با این حال، عملکرد آن به انتخاب صحیح کرنل و تنظیم پارامترهای مرتبط وابستگی زیادی دارد. در مقابل، Random Forest ذاتاً یک مدل غیرخطی محسوب می‌شود و بدون نیاز به تبدیل فضای ویژگی‌ها قادر است تعاملات پیچیده میان متغیرها را مدل‌سازی کند. به همین دلیل در بسیاری از داده‌های واقعی که روابط میان متغیرها ناشناخته و غیرخطی هستند، عملکرد مطلوبی ارائه می‌دهد.

کارایی این دو الگوریتم به ساختار داده نیز وابسته است. زمانی که تعداد ویژگی‌ها بسیار بیشتر از تعداد نمونه‌ها باشد، مانند مطالعات ژنومی یا برخی تحقیقات بیومکانیکی، SVM به‌ویژه با کرنل خطی عملکرد بسیار خوبی دارد و خطر بیش‌برازش در آن کمتر است. در مقابل، زمانی که حجم داده‌ها بزرگ باشد و تعداد نمونه‌ها به ده‌ها یا صدها هزار مورد برسد، Random Forest مقیاس‌پذیری بهتری دارد و فرآیند آموزش آن نسبت به SVM

الگوریتم‌های Support Vector Machine (SVM) و Random Forest (RF) از پرکاربردترین روش‌های یادگیری ماشین در مسائل طبقه‌بندی و پیش‌بینی محسوب می‌شوند. هر دو مدل قادر به دستیابی به دقت بالا هستند، اما از نظر سازوکار تصمیم‌گیری، نوع داده‌های مناسب، حساسیت به نویز و قابلیت تفسیر نتایج تفاوت‌های اساسی دارند.

الگوریتم SVM بر پایه یافتن یک مرز تصمیم (Decision Boundary) بهینه میان کلاس‌های مختلف عمل می‌کند. هدف اصلی این مدل، ایجاد بیشترین فاصله ممکن بین نمونه‌های متعلق به کلاس‌های مختلف است. در این روش تنها نمونه‌هایی که در نزدیکی مرز تصمیم قرار دارند، موسوم به «بردارهای پشتیبان» (Support Vectors)، در تعیین مدل نهایی نقش دارند. در مقابل، Random Forest یک روش مبتنی بر مجموعه‌ای از درختان تصمیم است که در آن تعداد زیادی درخت به‌صورت مستقل و بر اساس نمونه‌ها و ویژگی‌های تصادفی ساخته می‌شوند و خروجی نهایی از طریق رأی‌گیری اکثریت یا میانگین‌گیری حاصل می‌شود.



سریع تر و عملی تر خواهد بود.

یکی دیگر از تفاوت های مهم این دو روش،

حساسیت به نویز و داده های پرت است. SVM نسبت به نمونه های پرت، به ویژه زمانی که در نزدیکی مرز تصمیم قرار گیرند، حساسیت قابل توجهی دارد و ممکن است مرز تصمیم را تغییر دهد. اگرچه تنظیم پارامتر C می تواند تا حدی این مشکل را کنترل کند، اما همچنان نیاز به پیش پردازش دقیق داده ها وجود دارد. در مقابل، Random Forest به دلیل استفاده از نمونه گیری تصادفی و ترکیب نتایج تعداد زیادی درخت، مقاومت بالایی در برابر نویز و داده های پرت دارد و معمولاً عملکرد پایدارتری ارائه می دهد.

از منظر تفسیرپذیری نتایج، Random Forest برتری محسوسی دارد. این مدل می تواند میزان اهمیت هر متغیر را در تصمیم گیری نهایی مشخص کند و به پژوهشگران کمک کند تا عوامل تأثیرگذار را شناسایی نمایند. در مقابل، تفسیر تصمیمات SVM، به ویژه در مدل های مبتنی بر کرنل های غیر خطی، دشوارتر است و معمولاً مشخص نیست که کدام ویژگی ها بیشترین نقش را در طبقه بندی داشته اند.

از نظر محاسباتی نیز تفاوت هایی وجود دارد. آموزش SVM با افزایش تعداد نمونه ها به سرعت پیچیده و زمان بر می شود، در حالی که Random Forest تقریباً به صورت خطی با حجم داده

مقیاس می یابد و قابلیت اجرای موازی

روی چندین هسته پردازنده را دارد. با این حال،

مدل نهایی Random Forest معمولاً حافظه بیشتری نسبت به SVM اشغال می کند.

در کاربردهایی مانند پیش بینی آسیب رباط صلیبی قدامی (ACL)، انتخاب مدل به ماهیت داده ها بستگی دارد. زمانی که تعداد نمونه ها محدود، تعداد ویژگی ها زیاد، داده ها استاندارد و مرز بین گروه ها نسبتاً مشخص باشد، SVM می تواند انتخاب مناسبی باشد. در مقابل، هنگامی که داده ها شامل متغیرهای متنوع بیومکانیکی، فیزیولوژیکی، دموگرافیکی و آناتومیکی بوده، روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرها وجود داشته باشد و همچنین شناسایی اهمیت متغیرها مدنظر باشد، Random Forest معمولاً گزینه مناسب تری محسوب می شود.

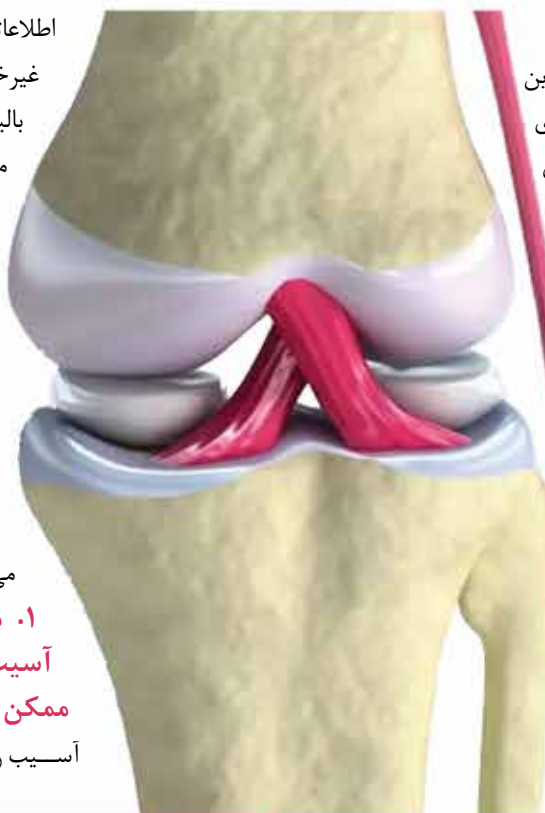
در مجموع، هیچ الگوریتمی به طور مطلق بر دیگری برتری ندارد. انتخاب بین SVM و Random Forest باید بر اساس حجم داده ها، تعداد ویژگی ها، میزان نویز، پیچیدگی روابط میان متغیرها و هدف پژوهش انجام گیرد. با این حال، در بسیاری از مسائل کاربردی علوم ورزشی و پیش بینی آسیب ها، Random Forest به دلیل انعطاف پذیری بالا، مقاومت در برابر نویز و قابلیت تفسیر نتایج، مزیت قابل توجهی نسبت به SVM دارد.

یادگیری ماشین در خدمت پیش‌بینی آسیب رباط صلیبی قدامی: از چالش‌های بالینی تا راهکارهای هوشمند

دکتر مرتضی برزگر بفرونی
دکترای حرکات اصلاحی دانشگاه شهید بهشتی
دکتر امیرحسین براتی
متخصص پزشکی ورزشی و عضو هیات علمی دانشگاه شهید بهشتی

چکیده

آسیب رباط متقاطع قدامی یکی از شایع‌ترین و درعین‌حال پیچیده‌ترین مصدومیت‌های ورزشی است که به دلیل سرعت بالای وقوع (کمتر از ۵۰ میلی‌ثانیه) و ماهیت چندعاملی و غیرخطی آن، پیش‌بینی با روش‌های سنتی را با ناکارآمدی جدی مواجه ساخته است. این متن، ضمن تبیین علل ناتوانی رویکردهای کلینیکی مرسوم، به معرفی نظام‌مند چهار رویکرد اصلی یادگیری ماشین در این حوزه می‌پردازد: مدل‌های چندحالتی، یادگیری انتقالی، یادگیری عمیق و هوش مصنوعی قابل توضیح. هر یک از این رویکردها باهدف رفع یکی از چالش‌های بنیادین، همچون کمبود داده، نیاز به پردازش هم‌زمان منابع



اطلاعاتی ناهمگن، مدل‌سازی روابط غیرخطی و ایجاد شفافیت برای کاربران بالینی طراحی شده‌اند. در پایان، با مرور دستاوردهای فعلی (دقت‌های بالای ۹۰٪ و AUC نزدیک به ۰/۹۸) و نیز شکاف‌های موجود فقدان اعتبارسنجی خارجی، استانداردسازی ناکافی و پذیرش محدود XAI، مسیر آینده برای دستیابی به سامانه‌های هشدار زودهنگام، غیرتهاجمی و شخصی‌سازی‌شده ترسیم می‌شود.

۱. مقدمه: چرا پیش‌بینی آسیب ACL با روش‌های سنتی ممکن نیست؟

آسیب رباط متقاطع قدامی تنها یک

مصدومیت ساده ورزشی به شمار نمی‌رود، بلکه رویدادی سرنوشت‌ساز و تغییردهنده مسیر حرفه‌ای هر ورزشکار محسوب می‌شود. آنچه این آسیب را از بسیاری از مصدومیت‌های دیگر متمایز می‌سازد، سرعت شگفت‌انگیز وقوع آن است؛ به گونه‌ای که پارگی ACL در کمتر از پنجاه میلی ثانیه (۰/۰۵ ثانیه) رخ می‌دهد و در این پنجره زمانی فوق‌العاده محدود، حتی چشم آموزش‌دیده یک مربی مجرب یا فیزیوتراپیست کارکشته نیز قادر به شناسایی هم‌زمان همه عوامل مؤثر نیست. این واقعیت، ناتوانی روش‌های سنتی مبتنی بر مشاهده حرکت، تست‌های کلینیکی مجزا یا پرسش‌نامه‌های عمومی را به‌خوبی آشکار می‌سازد و نشان می‌دهد که رویکردهای مرسوم در تشخیص به‌موقع ورزشکاران در معرض خطر، معمولاً با شکست مواجه می‌شوند.

با این حال، سرعت بالای وقوع تنها دلیل این ناکارآمدی نیست، بلکه ریشه اصلی دشواری پیش‌بینی، به ماهیت چندعاملی و غیرخطی این آسیب بازمی‌گردد. در شکل‌گیری این حادثه، عواملی همچون متغیرهای بیومکانیکی (همچون زاویه مفاصل زانو و لگن و میزان نیروهای وارده)، متغیرهای عصبی - عضلانی (زمان‌بندی و توالی فعال‌سازی عضلات همسترینگ و چهارسر ران)، عوامل هورمونی (مانند تأثیر استروژن بر شلی لیگامان‌ها در ورزشکاران زن)، ویژگی‌های آناتومیکی (شلی ذاتی لیگامان^۲ یا زاویه Q زانو)، شرایط محیطی (نوع زمین و کفش) و همچنین سابقه آسیب قبلی، که خود یکی از قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌هاست، همگی در یک تعامل پیچیده و هم‌زمان، در کمتر از پنجاه میلی ثانیه به وقوع می‌پیوندند.

چنین پیچیدگی و سرعتی، پردازش هم‌زمان این داده‌ها را برای ذهن انسان ناممکن می‌سازد و به‌وضوح نشان می‌دهد که آسیب ACL یک شکست سیستمی هم‌زمان است. از این‌رو، به جای تکیه بر قضاوت انسانی، به ابزاری نیاز داریم که قادر به پردازش ده‌ها عامل در کسری از ثانیه و استخراج الگوهای پنهان باشد و این ابزار، چیزی جز یادگیری ماشین^۳ نیست.

۲. تبدیل مسئله بالینی به زبانی برای الگوریتم‌های یادگیری ماشین

برای بهره‌گیری از یادگیری ماشین، نخستین و مهم‌ترین گام، ترجمه مسئله بالینی پیش‌بینی آسیب به قالبی است که برای الگوریتم‌ها قابل درک باشد. در عمل، این مسئله به‌صورت یک مسئله طبقه‌بندی نظارت‌شده^۴ تعریف می‌شود؛ به این معنا که

مدل با استفاده از مثال‌های برچسب‌خورده (شامل داده‌های ورزشکاران آسیب‌دیده و سالم) آموزش می‌بیند و خروجی آن به یکی از دو دسته آسیب‌دیده یا سالم تعلق می‌گیرد.

در این چارچوب، دو مؤلفه اصلی وجود دارد: ورودی‌ها یا ویژگی‌ها (Features) که با X نشان داده می‌شوند و خروجی‌ها یا برچسب‌ها (Labels) که با Y نمایش داده می‌شوند. ویژگی‌های ورودی، طیف وسیعی از اطلاعات را شامل می‌شوند: داده‌های کینماتیک که به توصیف حرکت بدون در نظر گرفتن نیروها می‌پردازند (مانند زوایای مفاصل زانو، لگن و مچ پا در لحظه فرود یا تغییر جهت)، داده‌های کینتیک که به بررسی نیروها و گشتاورهای وارد بر بدن می‌پردازند (نیروی عکس‌العمل زمین در سه جهت)، داده‌های الکترومایوگرافی که فعالیت الکتریکی عضلات، به‌ویژه همسترینگ و چهارسر ران، را اندازه‌گیری می‌کنند، داده‌های آنترپومتری و دموگرافیک (قد، وزن، شاخص توده بدنی، زاویه Q، شلی لیگامان، سن و جنس) و در نهایت، سابقه آسیب قبلی که به‌ویژه سابقه پارگی در همان زانو یا زانوی مقابل، از قوی‌ترین عوامل خطر به شمار می‌رود.

در مقابل، خروجی مدل، که همان برچسب نهایی است، وضعیت نهایی ورزشکار را از حیث وقوع یا عدم وقوع آسیب مشخص می‌سازد.

2. Ligamentous Laxity
3. Machine Learning
4. Supervised Classification



۳. کاربردهای عملی یادگیری ماشین در پیش‌بینی و پیشگیری از آسیب ACL

امروزه یادگیری ماشین از مرحله تحقیقات دانشگاهی فراتر رفته و به ابزاری کارآمد در عرصه بالینی و میدان ورزش تبدیل شده است که کاربردهای عملی متعددی را در بر می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین این کاربردها، غربالگری پیش‌فصل در تیم‌های ورزشی است. در ابتدای هر فصل، از ورزشکاران تست فرود از پرش گرفته شده و داده‌های حرکتی آن‌ها ثبت می‌شود؛ سپس مدل یادگیری ماشین، خروجی را به صورت عدد یا کد رنگی به مربی نشان می‌دهد. گزارش‌های منتشرشده از کاهش چشمگیر ۳۰ تا ۴۰ درصدی آسیب ACL در نخستین فصل پس از پیاده‌سازی این سیستم حکایت دارند.

افزون بر این، یکی دیگر از کاربردهای حیاتی، طراحی برنامه‌های تمرینی شخصی‌سازی شده است؛ چراکه نقطه قوت مدل‌ها تنها در شناسایی ورزشکار پرخطر خلاصه نمی‌شود، بلکه تا حد زیادی دلیل این خطرپذیری را نیز توضیح می‌دهند. با شناسایی نقص خاص در پروفایل بیومکانیکی و عصبی - عضلانی هر فرد، مربی و فیزیوتراپیست می‌توانند برنامه اصلاحی متناسب با همان نقص طراحی کنند. آمارها نشان می‌دهد که پس از یک فصل، نرخ آسیب در این گروه تا بیش از پنجاه درصد کاهش یافته است.

در کنار این موارد، ظهور سیستم‌های آنالیز ویدئویی بدون نشانگر، با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی عمیق و الگوریتم‌هایی نظیر OpenPose و MediaPipe، امکان محاسبه موقعیت و زوایای مفاصل را تنها با استفاده از یک فیلم معمولی و دوربین ساده فراهم کرده است تا مربی بتواند در حین تمرین، بازخورد لحظه‌ای از وضعیت زانو، لگن و مچ پا دریافت کند.

همچنین، یکپارچه‌سازی با فناوری‌های پوشیدنی تحول عظیمی ایجاد کرده است؛ به گونه‌ای که سنسور IMU (شتاب‌سنج وژیروسکوپ سه‌محوره)، با اندازه‌ای در حد یک سکه، وزن کمتر از ده گرم و قیمتی کمتر از پنجاه دلار، روی کفش، ساق، ران یا کمربند لگن نصب می‌شود و داده‌های مستمری را در اختیار مدل قرار می‌دهد.

در نهایت، این ابزارها در توان بخشی پس از جراحی نیز نقش کلیدی ایفا می‌کنند؛ به طوری که در ماه‌های سوم، ششم، نهم و دوازدهم پس از جراحی بازسازی ACL، داده‌هایی شامل تست‌های عملکردی، داده‌های بیومکانیکی، تصاویر MRI و گزارش ذهنی ورزشکار جمع‌آوری می‌شود و مدل با دریافت این داده‌ها، منحنی پیش‌بینی شده خطر پارگی مجدد را در طول زمان ترسیم می‌کند تا امکان مداخله به موقع فراهم شود.

۴. چرا ده سال پیش از یادگیری ماشین در این حوزه استفاده نمی‌شد؟

این پرسش به‌جا مطرح می‌شود که اگر یادگیری ماشین چنین ابزار قدرتمندی است، چرا تا همین اواخر به کار گرفته نمی‌شد و نقطه عطف فعلی چگونه رقم خورده است؟ پاسخ در همگرایی سه عامل کلیدی نهفته است که هر یک، به نوبه خود، زمینه‌ساز تحولی عظیم در این حوزه شده‌اند.

نخستین عامل، دسترسی به داده‌های باکیفیت و در مقیاس بزرگ است. ده سال پیش، هر مرکز تحقیقاتی به صورت ایزوله با دیتاست‌های کوچک (شامل ۵۰ تا ۱۰۰ ورزشکار) و بدون استانداردسازی کار می‌کرد که مقایسه نتایج را غیرممکن می‌ساخت؛ اما اکنون دیتاست‌های بزرگی نظیر ACL Dataset (با ۵۰۰ ورزشکار) و KONRAD Dataset (با بیش از ۱۰۰۰ ورزشکار) در دسترس پژوهشگران قرار گرفته‌اند.

دومین عامل، پیشرفت حسگرها و کاهش چشمگیر هزینه است. ابزارهای اندازه‌گیری حرکت که پیش‌تر گران‌قیمت، حجیم و محدود به کاربردهای نظامی و فضایی بودند، امروزه به شکل پلتفرم‌های نیروی قابل حمل با قیمت پنج تا ده هزار دلار



هیچ مدل تک‌حالت‌ای میسر نیست. به همین دلیل، مدل‌های چندحالت‌ه توانسته‌اند به دقتی بیش از ۹۰ درصد دست یابند. برای ترکیب این منابع داده‌ای ناهمگن، سه راهبرد اصلی بر اساس زمان ادغام^۵ تعریف شده‌اند که در ادامه به ترتیب توضیح داده می‌شوند.

۵-۱-۱. ادغام زودهنگام (Early Fusion)

در این راهبرد، تمام ویژگی‌های استخراج‌شده از همه مودالیتی‌ها، پیش از ورود به مدل، در کنار یکدیگر قرار گرفته و یک بردار ویژگی واحد و بلند تشکیل می‌دهند. به عبارت دیگر، داده‌های عددی حاصل از منابع مختلف به یکدیگر متصل شده و این بردار واحد به عنوان ورودی به یک مدل یادگیری ماشین، مانند شبکه عصبی ساده، XGBoost یا SVM، داده می‌شود.

این روش مزایایی همچون سادگی، سرعت اجرا، توانایی یادگیری هم‌بستگی‌های بین مودالیتی و کارایی محاسباتی مناسب دارد. با این حال، به دلیل ناهمگن بودن داده‌ها، با محدودیت‌هایی نظیر تفاوت مقیاس ویژگی‌ها (برای مثال، اختلاف بین مقدار سن و

5. Fusion

درآمده‌اند. این کاهش هزینه، فناوری را دموکراتیک کرده است؛ به گونه‌ای که نه تنها باشگاه‌های فوق ثروتمند، بلکه یک کلینیک کوچک فیزیوتراپی یا تیم جوانان سطح متوسط نیز می‌توانند تجهیزات لازم را تهیه کنند.

سومین و شاید مهم‌ترین عامل، افزایش قدرت محاسباتی و بلوغ الگوریتم‌های جدید است. ده سال پیش، تنها روش‌های خطی ساده‌ای مانند رگرسیون لجستیک در دسترس بودند که توان مدل‌سازی روابط غیرخطی و تعاملات پیچیده متغیرها را نداشتند؛ اما امروزه روش‌های جمعی مانند جنگل تصادفی (Random Forest) و XGBoost به بلوغ رسیده‌اند. با این حال، انقلاب واقعی با شبکه‌های عصبی عمیق توالی‌محور، مانند LSTM و Transformer، رخ داده است؛ زیرا آسیب ACL به تاربخچه حرکت در چندصد میلی‌ثانیه پیش از حادثه وابسته است و این شبکه‌ها دقیقاً برای مدل‌سازی همین وابستگی‌های بلندمدت زمانی طراحی شده‌اند.

۵. رویکردهای اصلی یادگیری ماشین در پیش‌بینی آسیب ACL

برای مواجهه نظام‌مند با چالش چندبعدی پیش‌بینی آسیب، چهار رویکرد اصلی و مکمل توسعه یافته‌اند که در کنار یکدیگر، چارچوبی جامع، قدرتمند و کاربردی را شکل می‌دهند. در ادامه، هر یک از این رویکردها به تفصیل بررسی می‌شوند.

۵-۱. رویکرد اول: مدل‌های چندحالت‌ه (Multimodal Models)

ایده محوری در این مدل‌ها بر این اصل استوار است که آسیب ACL پدیده‌ای چندعاملی است و هیچ منبع داده‌ای به تنهایی توان پیش‌بینی کافی ندارد. از این رو، این مدل‌ها به صورت هم‌زمان از منابع مختلفی همچون تصاویر MRI (که ساختار آناتومیکی لیگامان را نشان می‌دهند)، داده‌های بیومکانیکی (شامل زوایای مفاصل و نیروی عکس‌العمل زمین)، داده‌های عصبی - عضلانی سیگنال‌های EMG از عضلات همسترینگ و چهارسر ران، داده‌های پوشیدنی یا سنسورهای IMU نصب‌شده روی کفش یا کمربند، داده‌های بالینی و دموگرافیک (سن، جنس، شاخص توده بدنی و سابقه آسیب) و داده‌های محیطی و تمرینی (نوع زمین، کفش و سطح خستگی) استفاده می‌کنند. هر یک از این مودالیتی‌ها به تنهایی تنها بخشی از عوامل مؤثر را نمایش می‌دهند، اما ترکیب هم‌زمان آن‌ها در یک مدل چندحالت‌ه، امکان شناسایی الگوهای تعاملی و غیرخطی را فراهم می‌سازد؛ قابلیت‌هایی که برای



زاویه والگوس)، حساسیت زیاد به داده‌های ازدست‌رفته و ناتوانی در بهره‌گیری از معماری‌های تخصصی برای هر نوع داده مواجه است. از این‌رو، این راهبرد زمانی کارآمد و بهینه است که تمامی مودالیتی‌ها برای همه نمونه‌ها در دسترس باشند، ساختار داده‌ها مشابه باشد و حجم داده‌ها محدود باشد.

۲-۱-۵. ادغام میانی (Intermediate Fusion)

در این روش، که رویکردی انعطاف‌پذیرتر محسوب می‌شود، هر مودالیتی ابتدا توسط یک رمزگذار اختصاصی پردازش می‌شود. برای مثال، از CNN برای تصاویر MRI، از LSTM برای داده‌های سری زمانی EMG و از یک شبکه Feedforward برای داده‌های جدولی دموگرافیک استفاده می‌شود. هر رمزگذار، داده خام را به یک نمایش سطح بالا (ویژگی‌های انتزاعی) تبدیل می‌کند و سپس این ویژگی‌های استخراج‌شده در یک لایه میانی با یکدیگر ادغام می‌شوند.

نمونه‌ای شاخص از این راهبرد، معماری MRNet است که در 6. Encoder



سال ۲۰۱۹ توسط پژوهشگران دانشگاه استنفورد معرفی شد و به سرعت به یکی از استانداردهای طلایی در تشخیص آسیب ACL از روی تصاویر MRI تبدیل شد. در این معماری، سه نمای مختلف تصویر MRI (سازیتال، کرونال و آکسیال) به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شوند و هر یک توسط یک نسخه مجزا از یک معماری CNN پردازش می‌شوند. سپس ویژگی‌های استخراج‌شده از این سه نما، در یک لایه ادغام (معمولاً با جمع یا میانگین‌گیری) ترکیب شده و در نهایت به یک طبقه‌بند نهایی برای تشخیص سالم یا پاره بودن رباط ارسال می‌شوند.

عملکرد این مدل بر روی دیتاست مربوطه بسیار چشمگیر بود و به مقدار AUC برابر با ۹۷/۹ درصد، حساسیت ۸۶ درصد و ویژگی ۹۵ درصد در آستانه بهینه دست یافت.

ادغام میانی از مزایایی همچون استفاده از معماری اختصاصی برای هر مودالیتی، توانایی یادگیری تعاملات پیچیده و انعطاف‌پذیری در عمق ادغام برخوردار است، اما در مقابل، با چالش‌هایی مانند پیچیدگی بیشتر، نیاز به تنظیم دقیق پارامترها و هزینه محاسباتی بالاتر مواجه است. این روش زمانی مناسب است که مودالیتی‌های مختلف ماهیت متفاوتی داشته باشند، حجم داده برای آموزش رمزگذارهای مجزا کافی باشد و هدف، بهره‌گیری از مزیت معماری‌های تخصصی باشد.

۳-۱-۵. ادغام دیر هنگام (Late Fusion)

در این راهبرد، که با عنوان ادغام در سطح تصمیم نیز شناخته می‌شود، هر مودالیتی دارای یک مدل کاملاً مستقل است و این مدل‌ها در فرایند آموزش و پیش‌بینی هیچ ارتباط مستقیمی با یکدیگر ندارند. هر مدل به صورت مستقل یک خروجی، معمولاً به شکل احتمال بین صفر و یک، تولید می‌کند و در مرحله نهایی، این خروجی‌ها با استفاده از روش‌هایی مانند میانگین‌گیری، رأی‌گیری اکثریت، یا روش‌های پیشرفته‌تری همچون Meta-classifier یا Weighted Averaging با یکدیگر ترکیب شده و خروجی نهایی حاصل می‌شود.

مطالعه LigaNET که در سال ۲۰۲۳ منتشر شد، نمونه‌ای کامل از این رویکرد است. در این مطالعه، سه مدل مستقل شامل یک CNN بر روی ACL قطعه‌بندی‌شده، یک CNN بر روی کل تصویر MRI و یک مدل رگرسیون لجستیک بر روی داده‌های غیرتصویری به صورت مستقل آموزش داده شدند و در پایان، خروجی آن‌ها با یکدیگر ترکیب شد.

ادغام دیر هنگام مزایایی همچون مقاومت بالا در برابر فقدان داده،

انعطاف‌پذیری زیاد، قابلیت تفسیر ذاتی و سهولت اعتبارسنجی دارد. در مقابل، توانایی کمتری در یادگیری تعاملات پیچیده بین مودالیتی‌ها دارد، مستلزم استفاده از چند مدل مجزا است و از اطلاعات یک مودالیتی برای بهبود عملکرد مودالیتی دیگر استفاده نمی‌کند.

این روش زمانی مناسب است که برخی مودالیتی‌ها همواره در دسترس نباشند، قصد استفاده از مدل‌های از پیش‌آموزش‌دیده و غیرقابل تغییر وجود داشته باشد، هزینه خطا در یک مودالیتی بالا باشد یا شفافیت تصمیم‌گیری برای کاربر اهمیت زیادی داشته باشد تا بتواند سهم هر مودالیتی را در تصمیم نهایی مشاهده کند.

۴-۱-۵. پیشرفت جدید: شبکه‌های عصبی گرافی (Graph Neural Networks – GNN)

با وجود موفقیت معماری Multi-View CNN که در MRNet به کار گرفته شده است، این روش محدودیت‌هایی نیز دارد؛ از جمله اینکه روابط فضایی میان نماهای مختلف MRI را به صورت صریح مدل‌سازی نمی‌کند.

برای رفع این محدودیت، معماری MVGNN (شبکه عصبی گرافی چندنما) در سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ معرفی شده است. ایده اصلی این روش آن است که به جای در نظر گرفتن نماهای مختلف MRI به عنوان ورودی‌های مستقل، یک گراف ساخته می‌شود که در آن هر گره نماینده یک نمای MRI یا حتی یک برش خاص از آن است و هر یال، بیانگر یک رابطه فضایی یا تشریحی میان دو گره محسوب می‌شود.

در ادامه، یک شبکه عصبی گرافی این ساختار را پردازش می‌کند و از طریق سازوکار انتقال پیام (Message Passing)، اطلاعات میان گره‌ها تبادل می‌شود؛ به گونه‌ای که نمای ساژیتال می‌تواند

اطلاعات خود را به نمای کروئال منتقل کند و بالعکس. این رویکرد با مدل‌سازی صریح روابط فضایی، توانسته است دقت پیش‌بینی را نسبت به معماری‌های پیشین به طور محسوسی افزایش دهد. با وجود این پیشرفت‌ها، مدل‌های چندحالتی همچنان با چالش‌هایی نظیر کمبود دیتاست‌های بزرگ و چندحالتی، هزینه بالای جمع‌آوری داده، نیاز به شفافیت و قابلیت تفسیر و همچنین فقدان استانداردسازی روبه‌رو هستند؛ مسائلی که هنوز مانع استفاده گسترده بالینی از این مدل‌ها شده‌اند.

۲-۵. رویکرد دوم: یادگیری انتقالی (Transfer Learning)

یادگیری انتقالی پاسخی هوشمندانه به پارادوکس داده‌ها در حوزه پیش‌بینی آسیب ACL است. از یک سو، مدل‌های یادگیری عمیق برای دستیابی به عملکرد مطلوب به حجم زیادی از داده نیاز دارند و از سوی دیگر، جمع‌آوری داده‌های مرتبط با آسیب ACL، به دلیل شیوع نسبتاً پایین این آسیب، نیاز به مطالعات طولی، هزینه بالای تجهیزات و تخصص مورد نیاز، فرایندی دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است.

بر اساس تعریف کلاسیک پان و یانگ، یادگیری انتقالی عبارت است از توانایی یک سیستم یادگیری در به کارگیری دانش آموخته‌شده از وظایف پیشین برای انجام وظایف جدید و مرتبط، حتی زمانی که توزیع داده‌ها یا خود وظایف با یکدیگر متفاوت باشند». در عمل، به جای آموزش یک مدل از ابتدا بر روی دیتاست کوچک هدف، ابتدا مدل روی یک دیتاست بزرگ و عمومی، مانند ImageNet با حدود ۱۴ میلیون تصویر، آموزش داده می‌شود و سپس دانش آموخته‌شده به دامنه هدف که داده‌های محدودی دارد، منتقل می‌شود.



از نظر دسته‌بندی، یادگیری انتقالی به سه نوع اصلی تقسیم می‌شود.

نوع نخست، یادگیری انتقالی قیاسی (Inductive Transfer Learning) است که رایج‌ترین نوع در کاربردهای عملی محسوب می‌شود. در این حالت، وظیفه مبدأ و هدف متفاوت است، اما داده‌های مبدأ دارای برچسب هستند. برای مثال، مدلی که روی ImageNet برای تشخیص اشیای عمومی آموزش دیده است، می‌تواند برای تشخیص پارگی ACL از روی تصاویر MRI مورد استفاده قرار گیرد، زیرا لایه‌های ابتدایی شبکه که مسئول تشخیص لبه‌ها و الگوهای ساده هستند، در هر دو مسئله کاربرد دارند.

نوع دوم، یادگیری انتقالی تراکنشی یا تطبیق دامنه (Transductive Transfer Learning) است. در این حالت، وظیفه در هر دو دامنه یکسان است، اما توزیع داده‌ها تفاوت دارد. برای مثال، مدلی که روی تصاویر MRI حاصل از اسکنر زمینس ۳ تسلا آموزش دیده است، باید بتواند روی تصاویر حاصل از اسکنر جی‌ای ۱/۵ تسلا نیز عملکرد مناسبی داشته باشد.

نوع سوم، یادگیری انتقالی نظارت‌نشده (Unsupervised Transfer Learning) است که در آن هیچ داده برچسب‌داری، نه در دامنه مبدأ و نه در دامنه هدف، وجود ندارد و این روش بیشتر در کاربردهای اکتشافی و کشف الگوهای پنهان به کار می‌رود. برای پیاده‌سازی عملی این رویکرد، دو روش اصلی وجود دارد: استخراج ویژگی (Feature Extraction) و تنظیم دقیق (Fine-Tuning).

در روش استخراج ویژگی، از یک مدل از پیش آموزش‌دیده به‌عنوان استخراج‌کننده ویژگی استفاده می‌شود و تنها لایه‌های انتهایی مدل، یعنی طبقه‌بند، مجدداً آموزش داده می‌شوند. این روش زمانی مناسب است که دیتاست هدف بسیار کوچک باشد یا محدودیت محاسباتی وجود داشته باشد.

در مقابل، در روش تنظیم دقیق، علاوه بر لایه‌های انتهایی، بخشی یا تمامی لایه‌های قبلی نیز با نرخ یادگیری پایین بر روی دیتاست هدف بازآموزی می‌شوند. این روش زمانی مناسب است که حجم داده‌های هدف متوسط یا زیاد باشد و توان محاسباتی کافی در اختیار باشد.

یکی از پیشرفت‌های مهم این حوزه، یادگیری انتقالی چندمرحله‌ای است که راهکاری برای کاهش خطر انتقال منفی ارائه می‌دهد. انتقال منفی زمانی رخ می‌دهد که تفاوت دامنه مبدأ و هدف

به اندازه‌ای زیاد باشد که انتقال دانش، نه تنها سودمند نباشد، بلکه موجب افت عملکرد مدل نیز شود.

در این رویکرد، دانش به‌صورت مرحله‌به‌مرحله و از طریق چند دامنه میانی منتقل می‌شود تا فاصله میان دامنه مبدأ و هدف به تدریج کاهش یابد. به جای آنکه مدل را به صورت مستقیم و یکباره از مجموعه داده عمومی ImageNet به تصاویر بسیار تخصصی MRI مربوط به رباط صلیبی قدامی ACL منتقل کنیم، رویکرد مؤثرتر آن است که فرایند انتقال یادگیری را به صورت پله پله و تدریجی طراحی کنیم تا شکاف عظیم بین دامنه‌ای به مرور پر شود. برای نمونه، به جای پرش مستقیم، می‌توان از یک مسیر دو مرحله‌ای بهره گرفت که در آن مدل نخست بر روی تصاویر پزشکی عمومی با تنوع بالا و سپس بر روی تصاویر تخصصی MRI زانو‌ی مرتبط با ACL آموزش دیده یا تنظیم شود؛ همچنین در سناریوی دقیق‌تر، یک مسیر سه مرحله‌ای قابل تعریف است که طی آن، انتقال دانش از ImageNet به تصاویر پزشکی عمومی، سپس به تصاویر معمولی MRI زانو، و در نهایت به تصاویر تخصصی ACL انجام می‌شود تا مدل به تدریج با ویژگی‌های سطح بالا، بافت‌شناسی، و جزئیات ظریف این ناحیه خاص آشنا شده و عملکرد نهایی آن به مراتب بهبود یابد. بر اساس یک مطالعه مروری جامع در سال ۲۰۲۴، این روش به‌ویژه زمانی مؤثر است که دامنه هدف بسیار کوچک (کمتر از ۱۰۰ تصویر) باشد و تفاوت قابل توجهی با دامنه مبدأ داشته باشد.



شایان ذکر است که کاربرد یادگیری انتقالی تنها به تصاویر MRI محدود نمی‌شود، بلکه در داده‌های حرکتی و سنسورهای پوشیدنی نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. به کمک این رویکرد، می‌توان هزینه پیش‌بینی آسیب را به میزان قابل توجهی کاهش داد و به جای استفاده از سیستم‌های گران‌قیمت Motion Capture، تنها با یک گوشی هوشمند خطر آسیب را برآورد کرد؛ قابلیت‌هایی که می‌تواند تحولی عملی برای باشگاه‌های کوچک و تیم‌های آماتور ایجاد کند. بالاین‌حال، این رویکرد همچنان با چالش‌هایی نظیر انتقال منفی، عدم تطابق توزیع داده‌ها (در اثر تفاوت جمعیت بیماران، پروتکل‌های تصویربرداری، تجهیزات یا شیوه برچسب‌گذاری)، انتخاب صحیح لایه‌های قابل فریز یا قابل تنظیم، نیاز به دانش تخصصی دامنه و همچنین کمبود دیتاست‌های بزرگ و استاندارد برای داده‌های حرکتی و بیومکانیکی، مشابه ImageNet در حوزه تصاویر، مواجه است. این موارد همچنان از مهم‌ترین محدودیت‌های یادگیری انتقالی در پیش‌بینی آسیب ACL به شمار می‌روند.

۳-۵. رویکرد سوم: یادگیری عمیق (Deep Learning)

یادگیری عمیق، به‌عنوان شاخه‌ای از یادگیری ماشین با استفاده از شبکه‌های عصبی چندلایه، به‌صورت خودکار و سلسله‌مراتبی ویژگی‌ها را از داده‌های خام یاد می‌گیرد و برخلاف روش‌های سنتی که نیاز به استخراج دستی ویژگی توسط متخصص دارند، مدل‌های عمیق به‌صورت سرتاسری از ورودی خام تا خروجی نهایی را بدون دخالت انسان انجام می‌دهند. این ویژگی، آن‌ها را برای مواجهه با پیچیدگی و چندعاملی بودن آسیب ACL، تنوع داده‌ها و دستیابی به عملکرد برتر، به ابزاری حیاتی تبدیل کرده است. بر اساس یک مقاله مروری که بر روی ۶۷ مطالعه بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۵ انجام شده، روش‌های یادگیری عمیق در این حوزه به ۱۰ دسته اصلی تقسیم می‌شوند که هر معماری برای نوع داده یا مسئله خاصی طراحی شده است و در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۳-۵. شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN)

اولین و مهم‌ترین خانواده از معماری‌های یادگیری عمیق، شبکه‌های عصبی کانولوشنی هستند که برای پردازش داده‌های تصویری طراحی شده‌اند. یک CNN استاندارد از سه نوع لایه اصلی تشکیل می‌شود: لایه کانولوشن که با فیلترهای کوچک (مثلاً 3×3) روی تصویر می‌لغزد و ویژگی‌های ساده‌ای مانند لبه یا گوشه را تشخیص می‌دهد، به‌گونه‌ای که لایه‌های اول الگوهای

ساده و لایه‌های عمیق‌تر ترکیب آن‌ها را به شکل‌های پیچیده‌تر (مانند رباط یا زانو) تبدیل می‌کنند؛ لایه تجمیع (Pooling) که ابعاد نقشه ویژگی را کاهش داده و محاسبات را سبک‌تر کرده و شبکه را در برابر جابجایی‌های جزئی مقاوم می‌سازد؛ و در نهایت لایه کاملاً متصل که تمام ویژگی‌های استخراج‌شده را جمع‌آوری کرده و تصمیم نهایی (تشخیص زانوی سالم یا دارای پارگی رباط) را می‌گیرد. با افزایش تعداد لایه‌ها، مشکل محو شدن گرادیان (Vanishing Gradient) رخ می‌داد که با معرفی معماری ResNet در سال ۲۰۱۵ و استفاده از اتصالات پرشی (Skip Connections) حل شد؛ به‌طوری که در این معماری، خروجی هر بلوک با ورودی همان بلوک جمع می‌شود و این کار امکان آموزش شبکه‌های بسیار عمیق را فراهم می‌سازد. پیشرفت جدیدتر، معماری Res2Net است که در هر بلوک باقیمانده، ویژگی‌ها را به چندین گروه تقسیم کرده و هر گروه را در مقیاس متفاوتی پردازش می‌کند تا بتواند به‌طور همزمان الگوهای ریز (با فیلترهای کوچک) و الگوهای درشت (با فیلترهای بزرگ) را شناسایی کند؛ این ویژگی برای تشخیص آسیب ACL در تصاویر MRI که می‌تواند از یک پارگی جزئی و ظریف تا یک پارگی کامل و واضح متغیر باشد، بسیار مفید است و دقت تشخیص را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۲-۳-۵. شبکه‌های بازگشتی و LSTM برای داده‌های سری زمانی

در نقطه مقابل، داده‌های حرکتی در پیش‌بینی آسیب ACL ذاتاً سری‌زمانی هستند؛ به‌این معنا که یک ورزشکار در حین فرود از پرش، در هر لحظه زوایای مفاصل، نیروی وارده به زمین و فعالیت عضلات (EMG) در حال تغییر هستند و ترتیب وقوع این داده‌ها (دنباله زمانی) اهمیت حیاتی دارد. از آنجایی که شبکه‌های عصبی کانولوشنی به‌تنهایی برای این نوع داده‌ها مناسب نیستند (چراکه رابطه بین پیکسل‌های مجاور را در نظر نمی‌گیرند و فرض می‌کنند که ترتیب داده‌ها مهم نیست)، خانواده شبکه‌های بازگشتی (RNN) و به‌طور خاص معماری LSTM (Long Short-Term Memory) برای تحلیل داده‌های سری‌زمانی وارد میدان می‌شوند. یک RNN ساده دارای یک حافظه کوچک است که لحظه قبل را به یاد می‌آورد، اما در دنباله‌های طولانی با مشکل فراموشی مواجه می‌شود؛ در حالی که LSTM این مشکل را با اضافه کردن یک سلول حافظه و سه دروازه حل می‌کند: دروازه فراموشی که تصمیم می‌گیرد چه اطلاعات قدیمی دور

ریخته شود، دروازه ورودی که تصمیم می‌گیرد چه اطلاعات جدیدی ذخیره گردد، و دروازه خروجی که تصمیم می‌گیرد چه چیزی به عنوان خروجی ارسال شود. این ساختار به LSTM اجازه می‌دهد اطلاعات را برای هزاران قدم زمانی نگهداری کند. در بسیاری از کاربردها، داده هم دارای ابعاد فضایی و هم دارای بعد زمانی است (مانند ویدئوی حرکت ورزشکار)؛ در چنین مواردی، معماری ترکیبی CNN-LSTM به کار می‌رود که در آن لایه‌های CNN ویژگی‌های فضایی هر فریم را استخراج می‌کنند و سپس این ویژگی‌های استخراج شده به عنوان ورودی به یک LSTM داده می‌شوند تا وابستگی‌های زمانی بین فریم‌ها را یاد بگیرد.

۳-۳-۵. شبکه‌های مبتنی بر Transformer

پیشرفت دیگری که انقلاب عظیمی در حوزه یادگیری عمیق ایجاد کرده، شبکه‌های مبتنی بر Transformer هستند. تفاوت اساسی Transformer با CNN در این است که در CNN، هر پیکسل فقط به همسایگان نزدیک خود (در یک پنجره کوچک 3×3) نگاه می‌کند و برای ارتباط بین دو نقطه دور، به لایه‌های متعدد نیاز است؛ اما در Transformer، هر پیکسل به لطف مکانیزم توجه (Attention Mechanism) می‌تواند مستقیماً به همه پیکسل‌های دیگر تصویر توجه کند و وابستگی‌های برد بلند را یک‌جا مدل‌سازی نماید. در حوزه تصاویر پزشکی، معماری ViT (Vision Transformer) که برای تصاویر MRI به کار می‌رود، مزیت نیاز به پیش‌پردازش کمتر (مثلاً عدم نیاز به انتخاب دستی برش‌های کلیدی از اسکن سه‌بعدی) را دارد، اما عیب اصلی آن نیاز به داده‌های آموزشی بسیار زیاد (معمولاً بیش از ۱۰,۰۰۰ تصویر) است و در حوزه‌ای مانند آسیب ACL که دیتاست‌ها معمولاً چندصد تصویری هستند، CNN‌های پیش‌آموزش دیده همراه با یادگیری انتقالی همچنان عملکرد بهتری ارائه می‌دهند.

۳-۴-۵. شبکه‌های مولد تخصصی (GAN) برای حل مشکل عدم تعادل کلاس‌ها

یکی از چالش‌های اساسی در دیتاست‌های مربوط به آسیب ACL، مشکل عدم تعادل کلاس‌ها (Class Imbalance) است؛ به عنوان مثال، شاید ۹۵ درصد از تصاویر MRI مربوط به زانوهای سالم باشند و فقط ۵ درصد مربوط به زانوهای با پارگی ACL. اگر مدلی بدون هیچ راهکاری روی چنین داده‌ای آموزش ببیند، تبدیل به یک طبقه‌بندی کننده تنبل می‌شود که همیشه سالم را پیش‌بینی می‌کند و به دقت ظاهری ۹۵ درصد می‌رسد، اما در عمل هیچ پارگی‌ای را تشخیص نمی‌دهد. شبکه‌های مولد تخصصی

عمل، استفاده از GAN برای افزایش داده‌های آسیب ACL، دقت مدل را از ۹۰/۱ درصد به ۹۳/۹۳ درصد (یعنی بهبود قابل توجه ۳/۸ درصدی) تنها با اضافه کردن داده‌های مصنوعی افزایش داده است.

۳-۵-۵. خودرمزگذارها (Autoencoder) برای تشخیص ناهنجاری

در کنار GAN، خودرمزگذارها نیز کاربرد ویژه‌ای در تشخیص ناهنجاری دارند. یک Autoencoder از دو بخش رمزگذار (که داده ورودی را به چند عدد کلیدی فشرده می‌کند) و رمزگشا (که سعی می‌کند داده اصلی را از آن چند عدد بازسازی کند) تشکیل شده است. اگر Autoencoder را فقط روی داده‌های سالم



(حرکات ورزشکاران بدون آسیب) آموزش دهیم، خطای بازسازی برای داده‌های سالم بسیار کم خواهد بود؛ اما اگر یک داده ناهنجار (مثلاً حرکات پرخطر) به آن بدهیم، خطای بازسازی به شدت افزایش می‌یابد و به عنوان یک هشدار خطر در نظر گرفته می‌شود. مزیت بزرگ این روش آن است که نیازی به داده برچسب خورده از آسیب ندارد و تنها با داشتن داده‌های ورزشکاران سالم (که جمع‌آوری آن‌ها آسان‌تر و ارزان‌تر است)، می‌توان یک سیستم هشدار زودهنگام ساخت؛ ویژگی که برای پیش‌بینی آسیب ACL که جمع‌آوری داده از ورزشکاران آسیب‌دیده بسیار دشوار و زمان‌بر است، بسیار ارزشمند و کاربردی به شمار می‌رود. با این وجود، با وجود توانایی فوق‌العاده یادگیری عمیق در کشف الگوهای پیچیده، موانع مهمی همچون نیاز به داده‌های حجیم، جعبه‌سیاه بودن مدل‌ها، عدم شفافیت در تصمیم‌گیری و فقدان استانداردسازی در دیتاست‌ها و معیارهای ارزیابی، چالش‌های جدی پیش روی این رویکرد قرار دارند که دقیقاً ما را به چهارمین و آخرین رویکرد هدایت می‌کنند.

۴-۵. رویکرد چهارم: هوش مصنوعی قابل توضیح (Explainable AI – XAI)

سناریوی مشکل‌ساز این است که مدل یادگیری عمیق با دقت ۹۵ درصد اعلام می‌کند ورزشکار در معرض خطر بالای پارگی ACL است، اما وقتی مربی می‌پرسد چرا؟، مدل پاسخی جز نمی‌دانم ندارد. این عدم شفافیت سه مشکل جدی ایجاد می‌کند: نخست، عدم اعتماد کاربران نهایی (مربیان و پزشکان) به تصمیمات سیستم؛ دوم، عدم امکان مداخله هدفمند، چراکه اگر مدل نگوید دقیقاً کدام عامل (مثلاً زاویه والگوس زانو) باعث این پیش‌بینی شده است، مربی نمی‌داند چه تمرین اصلاحی طراحی کند و مدل به یک ابزار هشدار بی‌فایده تبدیل می‌شود؛ و سوم، از دست رفتن فرصت کشف دانش جدید، چراکه مدل‌های جعبه‌سیاه گاهی الگوهایی را شناسایی می‌کنند که حتی متخصصان خبره نیز از آن‌ها

غافل بوده‌اند و بدون قابلیت تفسیر، این یافته‌های بالقوه ارزشمند هرگز به پیشرفت دانش علمی کمک نمی‌کنند. تحقیقات نشان داده‌اند که ارائه توضیحات قابل فهم برای تصمیمات هوش مصنوعی، پذیرش و اعتماد کاربران نهایی را تا بیش از ۵۰ درصد افزایش می‌دهد و هدف XAI دقیقاً همین است: تبدیل تصمیمات مدل‌های پیچیده به زبانی قابل فهم، شفاف و عملی برای انسان.

روش‌های XAI از جنبه‌های مختلفی دسته‌بندی می‌شوند. از نظر زمان توضیح، به دو دسته پیش‌بینی (Ante-hoc) که شامل مدل‌های ذاتاً قابل تفسیر مانند درخت تصمیم، رگرسیون لجستیک و مدل‌های خطی هستند (با مزیت توضیح‌پذیری ذاتی و عیب دقت کمتر نسبت به مدل‌های جعبه‌سیاه) و پسینی (Post-hoc) که در آن مدل ابتدا به صورت جعبه‌سیاه آموزش می‌بیند و سپس یک روش جداگانه برای توضیح تصمیمات آن به کار می‌رود، تقسیم می‌شوند. روش‌های پسینی خود به دو زیردسته گلوبال که منطق کلی مدل را توضیح می‌دهند مثلاً به طور کلی، زاویه والگوس ۴۰ درصد اهمیت دارد و لوکال که یک تصمیم خاص را توضیح می‌دهند (مثلاً برای این ورزشکار، مهم‌ترین عامل، زاویه والگوس ۱۴ درجه بود تقسیم می‌شوند که در عمل دسته لوکال کاربردی‌تر است. از نظر ورودی مدل نیز روش‌های XAI وابسته به نوع داده هستند: برای داده‌های جدولی (مانند سن، زاویه، قدرت عضلانی) از روش‌هایی مانند SHAP و LIME استفاده می‌شود؛ برای داده‌های تصویری (مانند MRI) از روش‌هایی مانند Grad-CAM و Guided Backpropagation که خروجی آن‌ها به صورت نقشه حرارتی (Heatmap) است و نشان می‌دهد مدل به کدام بخش از تصویر نگاه کرده است؛ و برای داده‌های متنی یا دنباله‌ای از مکانیزم توجه تعبیه‌شده در Transformerها و LSTMها استفاده می‌شود که نشان می‌دهد کدام لحظه زمانی در یک دنباله حرکتی بیشترین اهمیت را داشته



زمانی نشان از رشد مثبت اما کند دارد (از ۱۲ درصد در سال ۲۰۲۰ به ۳۰ درصد در سال ۲۰۲۴)، این سرعت برای یک حوزه بالینی که نیازمند جلب اعتماد پزشکان و مربیان است، کافی نیست. از بین مطالعاتی که از XAI استفاده کرده بودند، محبوب‌ترین روش‌ها به‌ترتیب عبارت بودند از: SHAP با ۶۰ درصد، اهمیت ویژگی از درون مدل (مانند Feature Importance در Random Forest) با ۲۵ درصد، LIME با ۱۰ درصد، و Grad-CAM و روش‌های تصویری با ۵ درصد (که عمدتاً در مطالعات مبتنی بر MRI به‌کار رفته بودند). این آمار نشان می‌دهد که حوزه پیش‌بینی آسیب ورزشی نیاز فوری به پذیرش گسترده‌تر XAI دارد تا بتواند تأثیر بالینی واقعی داشته باشد؛ چراکه بدون XAI، مربیان و پزشکان به مدل‌هایی که نمی‌توانند چرارا توضیح دهند، اعتماد نخواهند کرد. با وجود پتانسیل بالای XAI، این رویکرد نیز با چالش‌ها و محدودیت‌های مهمی مواجه است. چالش اول، سازگاری (Fidelity) است؛ به این معنا که بیشتر توضیحات XAI در پزشکی تأیید نشده‌اند (کمتر از ۲۰ درصد مطالعات سازگاری را بررسی کرده‌اند) و هنوز مشخص نیست که توضیح ارائه‌شده، بازنمای واقعی مدل است یا صرفاً ساخته روش تفسیرکننده، و اثبات سازگاری XAI یک مسئله باز است که استاندارد طلایی برای آن وجود ندارد. چالش دوم، پایداری (Stability) است که در آن تضمینی برای پایداری روش‌های XAI وجود ندارد؛ برای مثال، LIME ناپایدار است و تغییر جزئی در ورودی یا مدل می‌تواند توضیح را به‌شدت عوض کند، در حالی که روش‌های مبتنی بر گرادیان

است. از نظر نحوه تولید توضیح نیز این روش‌ها به چهار دسته تقسیم می‌شوند: مبتنی بر اختلال (مانند LIME که ورودی را تصادفی تغییر می‌دهد و تأثیر بر خروجی را می‌بیند)، مبتنی بر گرادیان (مانند Grad-CAM که از مشتق خروجی نسبت به ورودی استفاده می‌کند)، مبتنی بر ارزش‌گذاری شاپلی (مانند SHAP که استاندارد طلایی برای داده‌های جدولی محسوب می‌شود)، و مبتنی بر توجه که از وزن‌های توجه خود مدل بدون محاسبات اضافی استفاده می‌کند.

یک مثال واقعی و عینی از کاربرد SHAP در پیش‌بینی آسیب ورزشی در مقاله‌ای که در Scientific Reports (۲۰۲۵) منتشر شده، ارائه شده است. در این مطالعه، محققان داده‌های ۷۹۱ ورزشکار زن را که در معرض خطر آسیب ACL بودند، جمع‌آوری کردند و با استفاده از SHAP به یافته‌های جالبی دست یافتند. یکی از این یافته‌ها، کشف رابطه غیرخطی بین سن و خطر آسیب بود؛ برخلاف تصور رایج که سن پایین‌تر خطر کمتری دارد، نمودار وابستگی SHAP نشان داد که این رابطه به‌صورت U شکل است، به این معنا که هم ورزشکاران بسیار جوان (زیر ۱۶ سال) و هم ورزشکاران مسن‌تر (بالای ۲۸ سال) خطر بالاتری داشتند، در حالی که ورزشکاران ۱۸ تا ۲۴ سال کمترین خطر را نشان می‌دادند. همچنین، اثر تعاملی خستگی با نسبت قدرت همسترینگ به چهارسر ران به‌وضوح قابل مشاهده بود؛ در ورزشکاران با نسبت ضعیف، خستگی تأثیر خیلی بیشتری در افزایش خطر داشت (ارزش SHAP برابر ۰/۳ در مقابل ۰/۵ اثر تعاملی دیگری که شناسایی شد، مربوط به دو مفصل بود؛ خطر زمانی به حداکثر می‌رسید که هم والگوس زانو بالا باشد (بیش از ۱۰ درجه) و هم دورسی فلکشن مچ پا محدود باشد (کمتر از ۱۵ درجه) که نشان می‌دهد تمرینات اصلاحی باید هر دو زانو و مچ پا را هدف قرار دهند.

با این حال، یک نکته بسیار مهم و هشداردهنده در مورد وضعیت فعلی استفاده از XAI در مطالعات پیش‌بینی آسیب ورزشی وجود دارد. مقاله‌ای در BJSM Commentary (۲۰۲۵) به بررسی ۱۵۰ مطالعه منتشرشده بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ در این حوزه پرداخته و یافته‌های نگران‌کننده‌ای را گزارش کرده است: از ۱۵۰ مطالعه، تنها ۳۷ مطالعه (کمتر از ۲۵ درصد) از هرگونه روش XAI برای تفسیر مدل‌های خود استفاده کرده بودند و در ۷۵ درصد مطالعات، مدل‌ها به‌صورت جعبه‌سیاه باقی مانده بودند و هیچ توضیحی برای پیش‌بینی‌های خود ارائه نمی‌دادند. هرچند روند





در دیتاست‌ها و معیارهای ارزیابی، عدم پذیرش گسترده XAI (فقط ۲۵ درصد مطالعات)، و فاصله قابل توجه بین تحقیقات آکادمیک و کاربرد بالینی واقعی است. مسیر آینده نیازمند همکاری بین‌رشته‌ای گسترده‌تر میان دانشمندان داده، مهندسان بیومدیک، پزشکان و مربیان است؛ همچنین، ایجاد دیتاست‌های بزرگ، متنوع و استاندارد با مشارکت چندمرکزی، توسعه روش‌های XAI سریع‌تر، پایدارتر و قابل‌درک‌تر برای کاربران نهایی، طراحی مدل‌های سبک‌تر برای اجرا روی دستگاه‌های قابل‌حمل، و در نهایت انجام کارآزمایی‌های بالینی تصادفی‌شده برای اثبات کاهش واقعی نرخ آسیب، از ضروریات گام بعدی محسوب می‌شوند. هدف نهایی، ایجاد یک سیستم هشدار زودهنگام غیرتهاجمی است که به مربی و فیزیوتراپیست بگوید: این ورزشکار خاص، با این الگوی حرکتی و این پروفایل عصبی-عضلانی و این ساختار آناتومیک، در شش ماه آینده X درصد احتمال دارد دچار پارگی ACL شود و سپس بر اساس همان عواملی که مدل شناسایی کرده است، یک برنامه تمرینی شخصی‌سازی‌شده طراحی کند تا آن خطر را کاهش دهد. در نهایت، هوش مصنوعی قابل توضیح، پل مستحکمی بین قدرت پیش‌بینی ماشین و قضاوت بالینی انسان است و بدون این شفافیت، پیشرفت واقعی در پیشگیری از آسیب ACL محقق نخواهد شد؛ همان‌طور که در این مقاله مروری مشهود بود، هم‌گرایی چهار رویکرد یادشده، چشم‌اندازی روشن برای ساخت سامانه‌های هشدار زودهنگام غیرتهاجمی و شخصی‌سازی‌شده ترسیم می‌کند که می‌تواند نرخ آسیب ACL را به‌طور چشمگیری کاهش داده و مسیر حرفه‌ای ورزشکاران را برای سال‌های سال ایمن‌تر سازد.

پایدارتر هستند و پایداری کلید اعتماد محسوب می‌شود، اما همچنان یک چالش جدی به‌شمار می‌رود. چالش سوم، قابلیت درک توسط کاربر نهایی (Understandability) است؛ یک توضیح ریاضی پیچیده اگر کاربر متخصص (مثل مربی) آن را نفهمد، عملاً بی‌فایده است و یک مطالعه جالب روی مربیان بیسبال نشان داد که توضیحات ساده به زبان انسانی نسبت به نمودارهای خام SHAP، اعتماد را از ۵/۶ به ۸/۲ (در مقیاس ۱۰) و دقت تصمیم‌ها را از ۵۲ درصد به ۷۸ درصد افزایش داد. چالش چهارم، تعادل بین دقت و تفسیرپذیری است؛ مدل‌های بسیار دقیق معمولاً جعبه‌سیاه هستند و XAI تلاش می‌کند این سازش را بشکند، اما توضیح همیشه یک تقریب است، نه خود واقعیت. نهایتاً چالش پنجم، نبود معیارهای استاندارد ارزیابی است؛ برخلاف سایر مدل‌ها، برای XAI معیارهای توافق‌شده جهانی وجود ندارد و مفاهیمی مانند وفاداری، پایداری و قابلیت درک، هرکدام به‌شکلی سنجیده می‌شوند که این فقدان استاندارد، یکی از اولویت‌های مهم در این حوزه به‌شمار می‌رود.

۶. جمع‌بندی نهایی، مسیر آینده و پیامدهای عملی

در جمع‌بندی نهایی و نگاه به مسیر آینده، باید اذعان داشت که وضعیت فعلی (تا سال ۲۰۲۵) نشان می‌دهد مدل‌های چندحالتی همراه با یادگیری عمیق به دقت بالای ۹۵ درصد و AUC بالای ۰/۹۸ است یافته‌اند و یادگیری انتقالی نیز مشکل کمبود داده را تا حد زیادی حل کرده است، در حالی که XAI در حال تبدیل شدن به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است که در آن SHAP به‌عنوان استاندارد طلایی ظهور کرده است. با این حال، شکاف‌های اصلی همچنان شامل فقدان اعتبارسنجی خارجی (تعمیم‌پذیری ضعیف مدل‌ها به دیتاست‌های جدید)، کمبود استانداردسازی

کاربرد ارتعاش کل بدن (Whole Body Vibration) در ریکاوری فعال ورزشکاران مکانیزم‌ها، کاربردها و پروتکل‌های بهینه

دکتر مریم عامری
دکتری فیزیولوژی ورزشی
مدرس دانشکده علوم ورزشی دانشگاه علوم و تحقیقات

چکیده

ارتعاش کل بدن یک روش مکانیکی غیرتهاجمی است که در سال‌های اخیر به عنوان ابزاری نوین در ریکاوری فعال ورزشکاران، افزایش عملکرد، و بازتوانی اسکلتی-عضلانی مورد توجه قرار گرفته است. این روش بر پایه قرار دادن بدن یا اندام‌های خاص روی پلتفرم‌های ارتعاشی عمل می‌کند که از طریق مکانیزم‌های عصبی-عضلانی و عروقی، اثرات فیزیولوژیک قابل توجهی ایجاد می‌کنند. شواهد علمی نشان می‌دهند که WBV می‌تواند در کاهش درد عضلانی تأخیری، بهبود گردش خون محیطی، افزایش انعطاف‌پذیری، و تسریع بازگشت عملکرد پس از فعالیت‌های شدید ورزشی مؤثر باشد. با این حال، موفقیت در استفاده از WBV به شدت وابسته به تنظیم دقیق پارامترهای ارتعاشی از جمله فرکانس، دامنه، شتاب و مدت زمان است. این مقاله مروری به بررسی جامع مکانیزم‌های اثر WBV، کاربردهای آن در ریکاوری ورزشی، پارامترهای بهینه، پروتکل‌های پیشنهادی، و موارد منع مصرف می‌پردازد و چارچوبی علمی برای استفاده مؤثر و ایمن از این تکنولوژی ارائه می‌دهد.

مقدمه

در دنیای ورزش حرفه‌ای و رقابتی امروز، ورزشکاران با فشارهای

فیزیولوژیک شدیدی مواجه هستند که ناشی از تراکم بالای مسابقات، تمرینات طاقت‌فرسا، و نیاز به حفظ عملکرد بهینه در بازه‌های زمانی کوتاه است. یکی از چالش‌های اساسی در این زمینه، مدیریت خستگی و تسریع ریکاوری بین جلسات تمرینی و مسابقات می‌باشد. خستگی عضلانی، درد عضلانی تأخیری، کاهش دامنه حرکتی مفاصل، و کاهش عملکرد عصبی-عضلانی از جمله پیامدهای رایج فعالیت‌های ورزشی شدید هستند که می‌توانند بر عملکرد ورزشکار در روزهای بعد تأثیر منفی بگذارند. استراتژی‌های ریکاوری سنتی شامل استراحت کامل، ماساژ ورزشی، کرایوتراپی، استرچینگ، و هیدراتاسیون مناسب هستند که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. در سال‌های اخیر، به دنبال توسعه تکنولوژی و فهم عمیق‌تر از فیزیولوژی ریکاوری، روش‌های نوینی مانند ارتعاش کل بدن به عنوان ابزارهای کمکی برای تسریع فرآیند ریکاوری مطرح شده‌اند. ارتعاش کل بدن یک مداخله مکانیکی است که در آن بدن یا بخش‌هایی از آن در معرض ارتعاشات با فرکانس و دامنه کنترل شده قرار می‌گیرند. این ارتعاشات از طریق پلتفرم‌های مخصوص که می‌توانند حرکات عمودی، افقی یا چندبعدی تولید کنند، به بدن منتقل می‌شوند.

تعریف و انواع ارتعاش کل بدن

ارتعاش کل بدن به روشی اطلاق می‌شود که در آن فرد روی یک پلتفرم ارتعاشی قرار می‌گیرد و ارتعاشات مکانیکی از طریق نقاط تماس بدن با پلتفرم به کل بدن یا بخش‌های خاصی از آن منتقل می‌شود. این ارتعاشات معمولاً با فرکانس‌های مشخص و دامنه‌های کنترل شده تولید می‌شوند و می‌توانند در جهات مختلف اعمال شوند. پلتفرم‌های WBV معمولاً به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. نوع اول پلتفرم‌های عمودی هستند که حرکات ارتعاشی را به صورت عمودی تولید می‌کنند و تمام سطح پلتفرم به طور همزمان بالا و پایین می‌رود. این نوع برای تحریک یکنواخت کل بدن مناسب است. نوع دوم پلتفرم‌های نوسانی هستند که در آن‌ها دو طرف پلتفرم به صورت متناوب و متقابل حرکت می‌کنند و شبیه به حرکت راه رفتن یا دویدن است. این نوع معمولاً برای تحریک بیشتر ماهیچه‌های اندام تحتانی استفاده می‌شود. علاوه بر نوع حرکت پلتفرم، پارامترهای دیگری نیز در مشخصات WBV نقش دارند که شامل فرکانس، دامنه و شتاب هستند.

اهمیت WBV در ریکاوری ورزشی به دلیل توانایی آن در تحریک همزمان چندین سیستم فیزیولوژیک است. از یک سو، ارتعاشات می‌توانند سیستم عصبی-عضلانی را تحریک کرده و از طریق مکانیزم‌هایی مانند رفلکس تونیک ارتعاشی باعث فعال‌سازی عضلانی شوند. از سوی دیگر، این ارتعاشات می‌توانند گردش خون محیطی را بهبود بخشیده و به دفع متابولیت‌های خستگی‌زا کمک کنند. علاوه بر این، WBV به صورت مستقیم یا غیرمستقیم می‌تواند بر دامنه حرکتی مفاصل، انعطاف‌پذیری، و حتی درک درد تأثیر بگذارد.

با این حال، استفاده از WBV نیازمند دانش دقیق از اصول فیزیولوژیک و پارامترهای فنی است. انتخاب نادرست فرکانس، دامنه، مدت زمان یا وضعیت بدنی نه تنها می‌تواند بی‌اثر باشد، بلکه در برخی موارد می‌تواند خود به منبع خستگی اضافی تبدیل شود یا حتی خطرات بالینی ایجاد کند. بنابراین، درک عمیق از مکانیزم‌های اثر، پارامترهای بهینه، و موارد منع مصرف برای استفاده مؤثر و ایمن از این تکنولوژی ضروری است.

مقایسه WBV با سایر روش‌های ریکاوری

روش ریکاوری	مزایا	معایب	زمان اثر بخشی	هزینه	نقش در پروتکل ترکیبی
WBV	غیرتهاجمی، سریع، چندبعدی، افزایش گردش خون و دفع متابولیت‌ها	نیاز به دستگاه، موارد منع مصرف متعدد، نیاز به تنظیم دقیق	۵-۱۵ دقیقه	بالا (خرید دستگاه)	مکمل اصلی در ریکاوری فعال
کرایوتراپی	کاهش سریع التهاب و درد	عدم دسترسی آسان، احتمال آسیب سرمایی	۱۰-۲۰ دقیقه	متوسط تا بالا	ترکیب با WBV برای اثر هم افزایی
ماساژ	کاهش تنش عضلانی، بهبود روانی	نیاز به مهارت، زمان‌بر، وابسته به فرد	۳۰-۶۰ دقیقه	متوسط (هزینه درمانگر)	مکمل مناسب قبل یا بعد از WBV
فشردن پنوماتیک	کاهش ادم، بهبود جریان لنف	نیاز به دستگاه، محدودیت در حرکت حین استفاده	۲۰-۳۰ دقیقه	متوسط	ترکیب با WBV برای دفع بهتر متابولیت‌ها
استرچینگ فعال	افزایش انعطاف‌پذیری، بدون نیاز به تجهیزات	زمان‌بر، نیاز به تکنیک صحیح	۱۵-۳۰ دقیقه	بسیار پایین	قبل یا بعد از WBV
هیدراتاسیون و تغذیه	ضروری برای ترمیم بافت، کم‌هزینه	اثر آهسته‌تر	چندین ساعت	پایین	پایه اصلی همه روش‌ها
خواب کافی	ضروری برای بازسازی، طبیعی	زمان‌بر، اختلالات خواب رایج	۷-۹ ساعت	رایگان	پایه اصلی همه روش‌ها

فرکانس به تعداد نوسانات در ثانیه اطلاق می‌شود و بر حسب هرترز اندازه‌گیری می‌شود. دامنه به بزرگی حرکت پلتفرم از موقعیت میانی اشاره دارد و معمولاً بر حسب میلی‌متر بیان می‌شود. شتاب نیز که معمولاً بر حسب نیروی ثقل یا متر بر مجذور ثانیه بیان می‌شود، از ترکیب فرکانس و دامنه به دست می‌آید و شدت محرک مکانیکی وارده را نشان می‌دهد.

تنوع در نوع دستگاه‌ها و پارامترهای قابل تنظیم، امکان سفارشی‌سازی مداخله بر اساس هدف خاص را فراهم می‌کند. برای مثال، برای اهداف ریکآوری معمولاً از فرکانس‌های متوسط با دامنه پایین استفاده می‌شود، در حالی که برای اهداف افزایش قدرت عضلانی، فرکانس‌ها و دامنه‌های بالاتر انتخاب می‌شوند. علاوه بر این، وضعیت بدنی فرد روی پلتفرم نیز می‌تواند متغیر باشد و شامل ایستادن با زانوهای صاف، نیمه خمیده، حرکات پویا، یا حتی استفاده از اندام فوقانی روی پلتفرم باشد.

مکانیزم‌های فیزیولوژیک اثر

درک دقیق از مکانیزم‌های فیزیولوژیک که از طریق آن‌ها WBV اثرات خود را اعمال می‌کند، برای طراحی پروتکل‌های مؤثر و ایمن ضروری است. این مکانیزم‌ها را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد که شامل مکانیزم‌های عصبی-عضلانی و مکانیزم‌های عروقی هستند.

مکانیزم‌های عصبی-عضلانی

یکی از اصلی‌ترین مکانیزم‌های اثر WBV، فعال‌سازی رفلکس تونیک ارتعاشی است که به آن TVR نیز گفته می‌شود. این رفلکس یک پاسخ عصبی-عضلانی است که در آن ارتعاشات مکانیکی وارد بر عضله باعث تحریک دوک‌های عضلانی می‌شود. دوک‌های عضلانی گیرنده‌های حسی حساس به کشیدگی هستند که در داخل بافت عضلانی قرار دارند و تغییرات طول عضله را رصد می‌کنند. هنگامی که ارتعاشات به عضله اعمال می‌شود، این دوک‌ها به طور مکرر و سریع تحریک می‌شوند و سیگنال‌های عصبی را از طریق الیاف حسی به نخاع منتقل می‌کنند. در نخاع، این سیگنال‌ها باعث فعال‌سازی نورون‌های حرکتی آلفا می‌شوند که به نوبه خود سیگنال‌های حرکتی را به عضله برمی‌گردانند و منجر به انقباض رفلکسی عضله می‌شوند.

این رفلکس تونیک ارتعاشی می‌تواند اثرات متعددی داشته باشد. اولاً، فعال‌سازی مکرر و سریع واحدهای حرکتی می‌تواند به بهبود هماهنگی عصبی-عضلانی و افزایش کارایی الگوهای فعال‌سازی عضلانی کمک کند. ثانیاً، این فعال‌سازی می‌تواند اثری پمپ‌مانند

روی عضله داشته و به گردش مایعات درون عضلانی کمک کند. ثالثاً، تحریک مداوم سیستم عصبی می‌تواند به حفظ یا بهبود پاسخ‌دهی عصبی-عضلانی پس از فعالیت‌های خسته‌کننده کمک کند. علاوه بر TVR، سایر مکانیزم‌های عصبی-عضلانی نیز در اثرات WBV نقش دارند. تحریک گیرنده‌های مکانیکی دیگر در پوست، مفاصل و بافت همبند می‌تواند اطلاعات حسی غنی را به سیستم عصبی مرکزی ارسال کرده و بر کنترل حرکتی و تعادل تأثیر بگذارد. همچنین، فعال‌سازی گسترده سیستم عصبی می‌تواند منجر به تغییرات در سطوح هورمونی، ترشح نوروترانسمیترها، و حتی تأثیر بر درک درد شود.

مکانیزم‌های عروقی

مکانیزم عمده دیگر اثر WBV مربوط به سیستم عروقی است. ارتعاشات مکانیکی اعمال شده به بدن می‌توانند تنش برشی را در دیواره عروق خونی افزایش دهند. تنش برشی به نیروی اصطکاکی اطلاق می‌شود که جریان خون بر سطح داخلی دیواره عروق اعمال می‌کند. افزایش این تنش برشی می‌تواند به عنوان یک محرک برای سلول‌های اندوتلیال عمل کند. این سلول‌ها که لایه داخلی عروق را تشکیل می‌دهند، در پاسخ به افزایش تنش برشی مولکول‌های وازودیلاتور مانند نیتریک اکساید آزاد می‌کنند. نیتریک اکساید یک مولکول سیگنالینگ قدرتمند است که باعث شل شدن عضلات صاف دیواره عروق و در نتیجه گشاد شدن عروق می‌شود.

گشاد شدن عروق منجر به افزایش جریان خون به بافت‌های هدف، به ویژه عضلات، می‌شود. این افزایش جریان خون چندین مزیت دارد. اولاً، اکسیژن و مواد مغذی بیشتری به بافت‌های در حال بازبایی می‌رسد که برای فرآیندهای ترمیم و بازسازی ضروری هستند. ثانیاً، دفع متابولیت‌های خستگی‌زا مانند لاکتات، یون‌های هیدروژن، و سایر محصولات فرعی متابولیسم تسریع می‌شود. انباشته شدن این متابولیت‌ها یکی از عوامل مهم در ایجاد خستگی و درد عضلانی تأخیری است، بنابراین دفع سریع‌تر آن‌ها می‌تواند به کاهش این علائم کمک کند. ثالثاً، بهبود گردش خون می‌تواند به کاهش تورم و التهاب موضعی کمک کند.

علاوه بر افزایش جریان خون محیطی، WBV ممکن است بر سیستم لنفاوی نیز تأثیر بگذارد. سیستم لنفاوی نقش مهمی در دفع مایعات اضافی و محصولات زائد از بافت‌ها دارد. انقباضات عضلانی ناشی از ارتعاش می‌تواند به عنوان یک پمپ برای سیستم لنفاوی عمل کرده و به حرکت لنف کمک کند.

مکانیزم‌های فیزیولوژیک WBV و اثرات آن‌ها

مکانیزم	مسیر عمل	اثرات فیزیولوژیک	نتایج بالینی
رفلکس تونیک ارتعاشی (TVR)	تحریک دوک‌های عضلانی ← فعال‌سازی نورون‌های آلفا ← انقباض عضلانی	افزایش فعالیت الکتریکی عضله، تقویت سیگنال‌های عصبی-عضلانی	افزایش قدرت، پیشگیری از آتروفی، بهبود هماهنگی عصبی-عضلانی
افزایش تنش برشی عروقی	ارتعاش ← تنش برشی ← تولید NO ← گشادشدگی عروق	افزایش جریان خون محیطی و مرکزی، بهبود عملکرد اندوتلیال	دفع سریع‌تر متابولیت‌ها، رسانش بهتر اکسیژن و مواد مغذی
تسهیل جریان لنفاوی	انقباضات ریتمیک عضلانی ← پمپاژ لنف	دفع مایعات بینابینی و محصولات زائد	کاهش ادم و التهاب موضعی
مکانیزم دروازه کنترل درد	تحریک رشته‌های عصبی ضخیم A-beta ← مسدود کردن سیگنال‌های درد	کاهش انتقال سیگنال درد به مغز	کاهش DOMS و درد عضلانی
تعدیل پاسخ التهابی	تنظیم سایتوکاین‌های التهابی	تعادل بین التهاب و ترمیم بافت	بهبود سریع‌تر بافت، کاهش آسیب ثانویه

از WBV بلافاصله پس از تمرین یا در روزهای بعد می‌تواند به کنترل بهتر این علائم کمک کند و به ورزشکار اجازه دهد تا سریع‌تر به تمرینات برگردد.

بهبود گردش خون محیطی و دفع متابولیت‌ها

یکی از مهم‌ترین کاربردهای WBV در ریکاوری، افزایش جریان خون به عضلات است. پس از فعالیت‌های ورزشی شدید، عضلات نیاز به اکسیژن و مواد مغذی بیشتری برای ترمیم و بازسازی بافت‌های آسیب‌دیده دارند. همزمان، دفع محصولات متابولیک مانند لاکتات و دی‌اکسید کربن نیز ضروری است. WBV از طریق افزایش تنش برشی و آزادسازی نیتریک اکساید، می‌تواند به گشاد شدن عروق و افزایش جریان خون کمک کند. این افزایش جریان خون نه تنها به بازیابی عضلات کمک می‌کند، بلکه می‌تواند احساس سنگینی و خستگی در اندام‌ها را نیز کاهش دهد. مطالعات نشان داده‌اند که حتی چند دقیقه WBV می‌تواند جریان خون محیطی را به طور قابل توجهی افزایش دهد و این افزایش می‌تواند تا مدتی پس از پایان ارتعاش ادامه یابد.

افزایش انعطاف‌پذیری و دامنه حرکتی مفاصل

انعطاف‌پذیری و دامنه حرکتی مفاصل از جمله عوامل مهم در عملکرد ورزشی و پیشگیری از آسیب هستند. پس از فعالیت‌های شدید، سفتی عضلانی و کاهش دامنه حرکتی معمول است. WBV به ویژه زمانی که با استرچینگ ترکیب شود، می‌تواند به بهبود انعطاف‌پذیری کمک کند. مکانیزم‌های احتمالی شامل

در مجموع، این دو دسته از مکانیزم‌ها به صورت همزمان و تعاملی عمل می‌کنند. فعال‌سازی عصبی-عضلانی می‌تواند خود به افزایش گردش خون کمک کند و بهبود گردش خون نیز می‌تواند عملکرد عصبی-عضلانی را بهینه کند. این تعامل پیچیده است که WBV را به یک ابزار چندمنظوره در ریکاوری ورزشی تبدیل می‌کند.

کاربردهای بالینی و ورزشی

بر اساس مکانیزم‌های ذکر شده، WBV می‌تواند در چندین حوزه بالینی و ورزشی کاربرد داشته باشد. در ادامه به مهم‌ترین کاربردهای آن می‌پردازیم.

کاهش درد عضلانی تأخیری

درد عضلانی تأخیری یکی از رایج‌ترین پیامدهای فعالیت‌های ورزشی شدید یا غیرمعمول است که معمولاً بین ۲۴ تا ۷۲ ساعت پس از فعالیت به اوج خود می‌رسد. این درد ناشی از آسیب‌های میکروسکوپی به الیاف عضلانی، التهاب موضعی، و انباشته شدن متابولیت‌ها است. شواهد پژوهشی نشان می‌دهند که استفاده از WBV می‌تواند به کاهش شدت و مدت این درد کمک کند. مکانیزم‌های احتمالی شامل بهبود گردش خون و دفع سریع‌تر متابولیت‌های التهابی، کاهش سفتی عضلانی از طریق فعال‌سازی رفلکسی، و احتمالاً اثرات بر سیستم درد از طریق نظریه کنترل دروازه‌ای درد هستند. در نظریه کنترل دروازه‌ای، ورودی‌های حسی غیردردناک مانند لمس یا ارتعاش می‌توانند انتقال سیگنال‌های دردناک را در نخاع مسدود کنند. استفاده

کاهش سفتی عضلانی از طریق افزایش دمای بافت، تأثیر بر خواص ویسکوالاستیک بافت‌های نرم، و تأثیر بر رفلکس‌های عصبی که ممکن است مقاومت عضله در برابر کشیدگی را کاهش دهند. استفاده از WBV قبل یا بعد از استرچینگ می‌تواند اثربخشی آن را افزایش دهد و به بازگرداندن سریع‌تر دامنه حرکتی کمک کند.

کاربردهای باز توانی

علاوه بر کاربردهای ورزشی، WBV در حوزه باز توانی نیز مورد توجه قرار گرفته است. این روش می‌تواند در باز توانی پس از آسیب‌های ورزشی، جراحی، یا در افراد با محدودیت‌های حرکتی مفید باشد. در این موارد، WBV می‌تواند به عنوان یک روش کم‌تأثیر برای فعال‌سازی عضلات، بهبود تعادل و هماهنگی، و افزایش قدرت عضلانی استفاده شود. همچنین در افراد سالمند یا افرادی که نمی‌توانند تمرینات مقاومتی سنتی انجام دهند، WBV می‌تواند جایگزین یا مکملی مناسب باشد.

پارامترهای بهینه برای ریکاوری

موفقیت در استفاده از WBV به شدت وابسته به تنظیم صحیح پارامترهای ارتعاشی است. انتخاب نادرست این پارامترها می‌تواند نه تنها اثربخشی را کاهش دهد، بلکه در برخی موارد می‌تواند خود به منبع خستگی اضافی تبدیل شود. در ادامه به تفصیل به هر یک از پارامترهای کلیدی می‌پردازیم.

فرکانس

فرکانس به تعداد سیکل‌های ارتعاشی در ثانیه اشاره دارد و بر حسب هرتز اندازه‌گیری می‌شود. فرکانس یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده در اثرات فیزیولوژیک WBV است. تحقیقات نشان داده‌اند که فرکانس‌های مختلف می‌توانند اثرات متفاوتی داشته باشند. برای اهداف ریکاوری فعال، فرکانس‌های متوسط در محدوده بیست تا سی هرتز توصیه می‌شود. این محدوده به عنوان دوز بهینه برای افزایش گردش خون بدون ایجاد خستگی بیش از حد شناخته شده است. در این فرکانس‌ها، تحریک رفلکس تونیک ارتعاشی به اندازه کافی برای فعال‌سازی عضلانی است اما شدت آن به گونه‌ای نیست که باعث خستگی شود. برای افزایش عملکرد و قدرت عضلانی، فرکانس‌های بالاتر در محدوده سی تا چهل هرتز می‌تواند مؤثر باشد، اما برای ریکاوری این فرکانس‌ها ممکن است بیش از حد محرک باشند. فرکانس‌های پایین‌تر از بیست هرتز نیز ممکن است برای تحریک کافی سیستم عصبی-عضلانی و عروقی ناکافی باشند. بنابراین، برای ریکاوری فعال، محدوده بیست و پنج تا سی هرتز به عنوان دوز بهینه در نظر گرفته می‌شود که تعادل

مناسبی بین تحریک فیزیولوژیک و جلوگیری از خستگی اضافی ایجاد می‌کند.

دامنه

دامنه به بزرگی جابجایی پلتفرم از موقعیت میانی اشاره دارد و معمولاً بر حسب میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. دامنه در ترکیب با فرکانس، شدت کلی محرک مکانیکی را تعیین می‌کند. برای اهداف ریکاوری، دامنه‌های پایین‌تر توصیه می‌شود. معمولاً دامنه یک تا سه میلی‌متر، و به طور خاص حدود دو میلی‌متر، برای ریکاوری مناسب است. دامنه‌های پایین‌تر باعث می‌شوند که ارتعاشات ملایم‌تر و کم‌تأثیرتر باشند و خطر ایجاد خستگی یا ناراحتی کاهش یابد. در مقابل، برای اهداف افزایش قدرت عضلانی، دامنه‌های بالاتر در محدوده چهار تا شش میلی‌متر استفاده می‌شود که محرک مکانیکی قوی‌تری ایجاد می‌کنند. استفاده از دامنه‌های بیش از حد بالا در ریکاوری می‌تواند باعث فعال‌سازی بیش از حد عضلانی و در نتیجه افزایش خستگی شود که با هدف ریکاوری در تضاد است.

شتاب

شتاب پارامتری است که از ترکیب فرکانس و دامنه حاصل می‌شود و معمولاً بر حسب نیروی ثقل یا متر بر مجذور ثانیه بیان می‌شود. شتاب در واقع شدت کلی محرک مکانیکی را نشان می‌دهد و هرچه شتاب بیشتر باشد، محرک قوی‌تری به بدن وارد می‌شود. برای ریکاوری، شتاب ملایم تا متوسط که معادل دو تا چهار برابر نیروی ثقل زمین است، مناسب می‌باشد. این میزان شتاب کافی است تا اثرات فیزیولوژیک مطلوب را ایجاد کند بدون اینکه استرس مکانیکی بیش از حدی به بافت‌ها وارد شود. شتاب‌های بالاتر ممکن است برای اهداف عملکردی استفاده شوند اما در ریکاوری نامناسب هستند زیرا می‌توانند خود منبعی برای تولید خستگی باشند.

مدت زمان

مدت زمان استفاده از WBV پارامتر مهم دیگری است که باید با دقت تنظیم شود. برای ریکاوری، معمولاً جلسات کوتاه‌تر و متمرکزتر توصیه می‌شود. مدت زمان پنج تا پانزده دقیقه برای یک جلسه ریکاوری مناسب است، با این توصیه که ده دقیقه پایانی جلسات ریکاوری فعال به WBV اختصاص یابد. این مدت زمان به اندازه کافی طولانی است تا اثرات فیزیولوژیک مطلوب ایجاد شود اما به قدری کوتاه است که از ایجاد خستگی بیش از حد جلوگیری می‌کند. در صورت نیاز، می‌توان استراحت‌های

کوتاه در طول جلسه در نظر گرفت، به ویژه برای افرادی که تازه شروع به استفاده از WBV کرده‌اند یا حساسیت بیشتری دارند. مدت زمان‌های بیش از حد طولانی نه تنها بی‌فایده هستند، بلکه می‌توانند اثرات معکوس داشته و باعث افزایش خستگی شوند.

وضعیت بدنی و نواحی هدف

وضعیت بدنی در حین استفاده از WBV نیز بر اثربخشی آن تأثیر می‌گذارد. برای ریکاوری اندام تحتانی که رایج‌ترین استفاده در ورزشکاران است، ایستادن روی پلتفرم با زانوهای نیمه خمیده معمولاً توصیه می‌شود. این وضعیت امکان انتقال بهتر ارتعاشات به عضلات اندام تحتانی را فراهم می‌کند و از فشار بیش از حد بر مفاصل جلوگیری می‌کند. زاویه خمش زانو می‌تواند بین پانزده تا سی درجه باشد که تعادل مناسبی بین راحتی و اثربخشی ایجاد می‌کند. برای هدف قرار دادن نواحی خاص مانند عضلات چهارسر ران، می‌توان وضعیت بدن را تنظیم کرد، برای مثال با فشار بیشتر روی جلوی پا. برای عضلات همسترینگ و ساق پا نیز می‌توان وضعیت‌های مختلفی اتخاذ کرد که تمرکز بیشتری روی آن نواحی داشته باشند. حتی برای ریکاوری اندام فوقانی مانند شانه‌ها، می‌توان از وضعیت‌هایی استفاده کرد که دست‌ها روی پلتفرم قرار گیرند. این تنوع در وضعیت‌ها امکان سفارشی‌سازی WBV بر اساس نیازهای خاص ورزشکار و نوع فعالیتی که انجام داده است را فراهم می‌کند.

نکات مهم در تنظیم پارامترها

یک نکته حیاتی این است که تنظیمات نادرست WBV می‌تواند به جای کمک به ریکاوری، خود به منبع خستگی اضافی تبدیل شود. فرکانس‌های بیش از حد بالا یا دامنه‌های زیاد می‌توانند باعث فعال‌سازی شدید عضلانی شوند که با هدف ریکاوری مغایرت دارد. همچنین، استفاده طولانی‌مدت و بدون برنامه می‌تواند اثرات منفی داشته باشد. بنابراین، رعایت دقیق پارامترهای توصیه شده و شروع با تنظیمات محافظه‌کارانه‌تر و افزایش تدریجی آن‌ها بر اساس تحمل فرد، رویکرد ایمن و مؤثری است. همچنین باید به این نکته توجه داشت که WBV به عنوان یک مکمل برای سایر روش‌های ریکاوری در نظر گرفته می‌شود نه جایگزین آن‌ها، و بهترین نتایج زمانی حاصل می‌شود که WBV در کنار سایر استراتژی‌های ریکاوری مانند تغذیه مناسب، هیدراتاسیون کافی، خواب کافی، و روش‌های دیگر مانند ماساژ و استرچینگ استفاده شود.

پروتکل‌های پیشنهادی برای ریکاوری فعال

بر اساس شواهد موجود و اصول فیزیولوژیک، پروتکل بهینه برای استفاده از WBV در ریکاوری فعال ورزشکاران باید به گونه‌ای طراحی شود که تمام جنبه‌های ذکر شده را در نظر بگیرد. پروتکل استاندارد ریکاوری باید شامل زمان‌بندی مناسب باشد که بهترین زمان ده دقیقه پایانی جلسات ریکاوری فعال است که می‌تواند بلافاصله یا دو تا چهار ساعت پس از تمرین یا مسابقه اجرا شود. فرکانس مناسب برای این پروتکل بیست و پنج تا سی هرتز است که به عنوان دوز بهینه شناخته شده است. دامنه باید بین یک تا سه میلی‌متر با ترجیح حدود دو میلی‌متر تنظیم شود تا ارتعاش ملایم اما مؤثری ایجاد شود. شتاب باید در محدوده ملایم تا متوسط و معادل دو تا چهار برابر نیروی ثقل زمین باشد. مدت زمان پنج تا ده دقیقه با امکان استراحت‌های کوتاه در صورت نیاز توصیه می‌شود. وضعیت بدنی باید ایستاده با زانوهای نیمه خمیده برای اندام تحتانی یا وضعیت‌های اختصاصی بر اساس نیاز خاص باشد. این پروتکل می‌تواند روزانه یا چند بار در هفته تکرار شود بسته به شدت تمرینات و نیازهای فردی ورزشکار.

یکی از نکات کلیدی که باید به آن توجه شود این است که WBV جایگزین روش‌های دیگر نیست بلکه یک مکمل هوشمند است. برای دستیابی به بهترین نتایج، WBV باید در کنار سایر استراتژی‌های ریکاوری به کار رود. یک پروتکل ریکاوری چندوجهی می‌تواند به این صورت طراحی شود که در پنج دقیقه اول سرد کردن فعال سبک مانند دویدن آهسته یا دوچرخه‌سواری با مقاومت کم انجام شود. از دقیقه پنجم تا پانزدهم، ماساژ ورزشی یا فوم رولینگ برای دفع متابولیت‌ها و کاهش سفتی عضلانی اجرا شود. در دقایق پانزدهم تا بیست و پنجم، در صورت نیاز کرایوتراپی یا حمام یخ برای کاهش التهاب و تورم استفاده شود. از دقیقه بیست و پنجم تا سی، استرچینگ ایستا یا پویا برای بازگرداندن دامنه حرکتی انجام شود. سپس در دقایق سی تا چهل، WBV با پارامترهای بهینه یعنی بیست و پنج تا سی هرتز فرکانس و دو میلی‌متر دامنه برای تحریک گردش خون و فعالیت عصبی-عضلانی اعمال شود. پس از پایان جلسه نیز هیدراتاسیون و تغذیه مناسب باید رعایت شود. این رویکرد یکپارچه تمام جنبه‌های ریکاوری شامل جنبه مکانیکی، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عصبی را پوشش می‌دهد و اثربخشی را به حداکثر می‌رساند.

انفرادی‌سازی پروتکل نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. باید توجه داشت که پاسخ به WBV بین افراد متفاوت است و تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله سطح آمادگی، نوع ورزش، شدت

فعالیت، و ویژگی‌های فردی قرار دارد. بنابراین انفرادی‌سازی پروتکل بر اساس پاسخ فردی و بازخورد ورزشکار ضروری است. شروع با پارامترهای محافظه‌کارانه‌تر یعنی فرکانس و دامنه کمتر و مدت زمان کوتاه‌تر و افزایش تدریجی آن‌ها بر اساس تحمل فرد رویکرد ایمن‌تری است که احتمال بروز عوارض جانبی را کاهش می‌دهد و اطمینان می‌دهد که ورزشکار به تدریج با این روش آشنا می‌شود و بدن او فرصت سازگاری پیدا می‌کند.

ارتعاشات می‌تواند بهبود زخم را مختل کرده یا به بافت‌های در حال ترمیم آسیب وارد کند. تومورهای بدخیم یکی دیگر از موارد ممنوعه است چرا که ارتعاشات ممکن است رشد تومور یا متاستاز را تحریک کند. سرعت یا اختلالات تشنجی نیز از موارد منع مصرف هستند زیرا ارتعاشات می‌تواند تشنج را تحریک کند. مشکلات حاد قلبی-عروقی از جمله نارسایی احتقانی قلب، آنژین صدری ناپایدار، و فشار خون کنترل نشده نیز در این دسته قرار می‌گیرند.

پارامترهای بهینه WBV برای اهداف مختلف

هدف کاربرد	فرکانس (Hz)	دامنه (mm)	شتاب (g)	مدت زمان	توضیحات
ریکاوری فعال	۲۵-۳۰	۱-۳ (ترجیحاً ۲)	۲-۴	۱۰ دقیقه (در پایان جلسه)	تسریع دفع لاکتات و کاهش DOMS
افزایش قدرت عضلانی	۳۰-۴۰	۲-۴	۴-۶	۱۵-۲۰ دقیقه	تحریک قوی‌تر TVR و هیپرتروفی
بهبود انعطاف‌پذیری	۲۰-۲۵	۱-۲	۱-۳	۵-۱۰ دقیقه	کاهش سفتی عضلانی
افزایش جریان خون	۲۵-۳۵	۲-۳	۳-۵	۱۰-۱۵ دقیقه	افزایش تنش برشی و گشادشدگی عروق
درمان درد مزمن	۲۰-۳۰	۱-۲	۲-۴	۵-۱۵ دقیقه (چند بار در هفته)	فعال‌سازی مکانیزم دروازه کنترل درد

موارد منع مصرف و محدودیت‌ها

با وجود مزایای بالقوه WBV، این روش برای همه افراد مناسب نیست و در برخی شرایط می‌تواند خطرات جدی به همراه داشته باشد. آگاهی از موارد منع مصرف برای استفاده ایمن از WBV ضروری است و هر متخصصی که قصد استفاده از این روش را دارد باید این موارد را به دقت بررسی کند.

در شرایطی که به عنوان موارد منع مصرف نسبی شناخته می‌شوند، استفاده از WBV باید تحت نظارت پزشکی و با احتیاط فراوان انجام شود. مشکلات ستون فقرات مانند دیسک کمر یا هرنی دیسک، اسپوندیلولیس‌تریس، استنوز کانال نخاعی، یا هرگونه ناپایداری ستون فقرات در این دسته قرار می‌گیرند زیرا ارتعاشات می‌تواند فشار اضافی به ستون فقرات وارد کند و وضعیت را بدتر کند. پوکی استخوان شدید نیز از موارد منع مصرف نسبی است چرا که خطر شکستگی استرسی در این افراد افزایش می‌یابد. آرتروز پیشرفته مفاصل ممکن است با استفاده از WBV درد و التهاب تشدید شود. مشکلات چشمی مانند کاتاراکت، جدا شدگی شبکیه، و گلوکوم نیز نیازمند مشاوره پزشکی قبل از استفاده هستند. میگرن حاد یا سردردهای شدید می‌تواند با ارتعاشات تشدید شود. دیابت همراه با عوارض عصبی محیطی نیز نیاز به توجه خاص دارد زیرا کاهش حس ممکن است خطر آسیب را افزایش دهد. آسیب‌های حاد اسکلتی-عضلانی مانند پارگی عضلانی، شکستگی، یا آسیب لیگامانی حاد نیز باید قبل از استفاده از WBV کاملاً بهبود یابند.

در شرایطی که به عنوان موارد منع مصرف مطلق شناخته می‌شوند، استفاده از WBV قطعاً ممنوع است. بارداری یکی از این موارد است زیرا ارتعاشات می‌تواند برای جنین خطرناک باشد و احتمال سقط جنین یا آسیب به رشد جنین را افزایش دهد. افراد دارای ضربان‌ساز قلب یا دیفیبریلاتور کاشته شده نیز نباید از WBV استفاده کنند زیرا ارتعاشات ممکن است با عملکرد این دستگاه‌های الکترونیکی کاشته شده تداخل ایجاد کند و عواقب خطرناکی داشته باشد. ترومبوز عروق عمقی یا آمبولی ریوی موارد دیگری هستند که استفاده از WBV در آن‌ها کاملاً ممنوع است چرا که ارتعاشات می‌تواند لخته‌های خونی را جدا کرده و باعث آمبولی خطرناک و احتمالاً کشنده شود. جراحی اخیر به ویژه در نواحی اندام تحتانی، شکم یا ستون فقرات نیز از موارد منع مصرف مطلق است زیرا

علاوه بر موارد منع مصرف، نکات ایمنی کلی نیز باید رعایت

شوند. قبل از شروع هر برنامه WBV، ارزیابی پزشکی و اسکلتی-عضلانی دقیق باید انجام شود تا مطمئن شود که فرد واجد شرایط استفاده است. در صورت بروز هرگونه درد، سرگیجه، حالت تهوع، یا ناراحتی غیرعادی، استفاده باید فوراً متوقف شود و فرد باید مورد ارزیابی قرار گیرد. استفاده از کفش مناسب با کف نرم و جذب ضربه خوب می‌تواند به کاهش استرس مکانیکی وارد بر مفاصل کمک کند. از قفل کردن کامل مفاصل به ویژه زانو در حین استفاده باید خودداری شود زیرا این کار فشار زیادی بر مفصل وارد می‌کند و احتمال آسیب را افزایش می‌دهد. از استفاده طولانی‌مدت و بیش از حد پرهیز شود زیرا در مورد WBV اصل بیشتر همیشه بهتر است صدق نمی‌کند و استفاده بیش از حد می‌تواند اثرات معکوس داشته باشد.

مکانیزم‌های فیزیولوژیک متعدد این روش شامل تحریک رفلکس تونیک ارتعاشی، افزایش گردش خون محیطی و مرکزی از طریق افزایش تنش برشی و گشادشدگی عروق، بهبود جریان لنفاوی و دفع متابولیت‌ها، کاهش درد از طریق مکانیزم دروازه کنترل، و تعدیل پاسخ التهابی، همگی به کاهش خستگی، تسریع بازپایی عملکرد، و بهبود آمادگی برای فعالیت‌های بعدی کمک می‌کنند. این اثرات چندگانه باعث می‌شود که WBV ابزاری جامع و چندبعدی برای ریکاوری باشد که می‌تواند به طور همزمان بر جنبه‌های مختلف خستگی تأثیر بگذارد. شواهد موجود نشان می‌دهند که WBV می‌تواند به طور مؤثری درد عضلانی تأخیری را کاهش دهد، گردش خون را بهبود بخشد، انعطاف‌پذیری و دامنه حرکتی را افزایش دهد، و زمان بازگشت

موارد منع مصرف و احتیاط در استفاده از WBV

دسته	شرایط	سطح خطر	توصیه
منع مصرف مطلق	بارداری	بسیار بالا	عدم استفاده قطعی
	ضربان‌ساز قلب یا ایمپلنت‌های الکترونیکی	بسیار بالا	عدم استفاده قطعی (خطر اختلال در عملکرد دستگاه)
	ترومبوز وریدی عمقی (DVT)	بسیار بالا	عدم استفاده قطعی (خطر آمبولی)
	جراحی اخیر یا ایمپلنت‌های ارتوپدی تازه	بسیار بالا	عدم استفاده قطعی (خطر آسیب به محل جراحی)
	تومورهای بدخیم	بسیار بالا	عدم استفاده قطعی (خطر گسترش سلول‌های سرطانی)
	صرع یا اختلالات تشنجی	بسیار بالا	عدم استفاده قطعی (خطر تحریک تشنج)
منع مصرف نسبی (نیاز به احتیاط)	هرنی دیسک یا مشکلات جدی ستون فقرات	متوسط تا بالا	نیاز به ارزیابی پزشکی و نظارت متخصص
	پوکی استخوان شدید	متوسط تا بالا	استفاده با شدت پایین و نظارت دقیق
	آرتروز پیشرفته مفاصل	متوسط	شروع با پارامترهای ملایم، نظارت بر درد
	مشکلات قلبی-عروقی	متوسط	مشاوره با متخصص قلب قبل از شروع
	اختلالات تعادلی یا سرگیجه	متوسط	استفاده با نظارت و احتیاط
	عفونت حاد یا التهاب شدید	پایین تا متوسط	تعویق تا زمان بهبودی

نتیجه‌گیری

ارتعاش کل بدن به عنوان یک روش نوآورانه و کم‌تهاجمی در حوزه ریکاوری فعال ورزشکاران جایگاه روزافزونی پیدا کرده است.

عملکرد را کوتاه کند. این مزایا به ویژه برای ورزشکاران حرفه‌ای که تحت فشار تمرینات فشرده و مسابقات مکرر قرار دارند و نیاز به روش‌های سریع و مؤثر برای بهبود دارند، بسیار ارزشمند است.

tioning Research, 25(11), 3113–3121.

3. Perraton, L., Machotka, Z., & Kumar, S. (2011). Whole-body vibration to treat delayed-onset muscle soreness in healthy adults: A systematic review. *Journal of Clinical Medicine Research*, 2(3), 112–121.

4. Prisby, R. D., Lafage-Proust, M. H., Malaval, L., Belli, A., & Vico, L. (2008). Effects of whole body vibration on the skeleton and other organ systems: A review. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 8(3), 234–246.

5. Rhea, M. R., Kenn, J. G., & Marin, P. J. (2009). The effect of acute applications of whole-body vibration on strength and power performance: A meta-analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(5), 1523–1530.

6. Rittweger, J. (2010). Vibration as an exercise modality: How it may work, and what its potential might be. *European Journal of Applied Physiology*, 108(5), 877–904.



با این حال، اثربخشی این روش به شدت به انتخاب صحیح و دقیق پارامترهای ارتعاش بستگی دارد و تنظیمات نادرست می‌تواند نه تنها بی‌فایده بلکه مضر باشد.

برای کاربرد بهینه در ریکاوری، پارامترهای توصیه شده شامل فرکانس بیست و پنج تا سی هرتز، دامنه یک تا سه میلی‌متر با ترجیح حدود دو میلی‌متر، شتاب ملایم تا متوسط معادل دو تا چهار برابر نیروی ثقل زمین، و مدت زمان پنج تا پانزده دقیقه با توصیه اختصاص ده دقیقه پایانی جلسات ریکاوری فعال به این روش است. رعایت این محدوده‌های پارامتری تعادلی مناسب بین تحریک فیزیولوژیک کافی و جلوگیری از خستگی اضافی ایجاد می‌کند و احتمال دستیابی به نتایج مطلوب را افزایش می‌دهد.

با این حال، نباید از موارد منع مصرف و محدودیت‌های این روش غافل شد. شرایطی مانند بارداری، وجود ضربان ساز قلب، ترومبوز عروق عمقی، جراحی اخیر، تومورهای بدخیم، و صرع به طور مطلق مانع استفاده از WBV هستند، در حالی که شرایطی مانند مشکلات ستون فقرات، پوکی استخوان شدید، و آرتروز پیشرفته نیازمند احتیاط و نظارت پزشکی دقیق هستند. ارزیابی دقیق پیش از مداخله برای اطمینان از ایمنی بسیار حیاتی است و نباید نادیده گرفته شود.

یک نکته بسیار مهم این است که WBV جایگزین روش‌های سنتی ریکاوری نیست بلکه به عنوان یک مکمل در کنار سایر استراتژی‌های مانند تغذیه مناسب، هیدراتاسیون کافی، خواب کیفی، ماساژ، استرچینگ، و کرایوتراپی عمل می‌کند. رویکرد یکپارچه و چندوجهی که همه این عناصر را در نظر می‌گیرد احتمالاً مؤثرترین راه برای بهینه‌سازی ریکاوری است. ترکیب هوشمندانه WBV با سایر روش‌ها می‌تواند اثرات هم افزایی ایجاد کند که از مجموع اثرات جداگانه فراتر می‌رود.

References

1. Aminian-Far, A., Bakhtiary, A. H., Amiri, H., & Hadian, M. R. (2011). Whole-body vibration and the prevention and treatment of delayed-onset muscle soreness. *Journal of Athletic Training*, 46(1), 43–49.
2. Cochrane, D. J. (2011). Whole-body vibration training and testing: Potential adverse effects and benefits. *Journal of Strength and Condi-*

اصول نوآر بندی

دکتر مرتضی احمدی
دکترای فیزیوتراپی
عضو کمیته توانبخشی فدراسیون پزشکی ورزشی

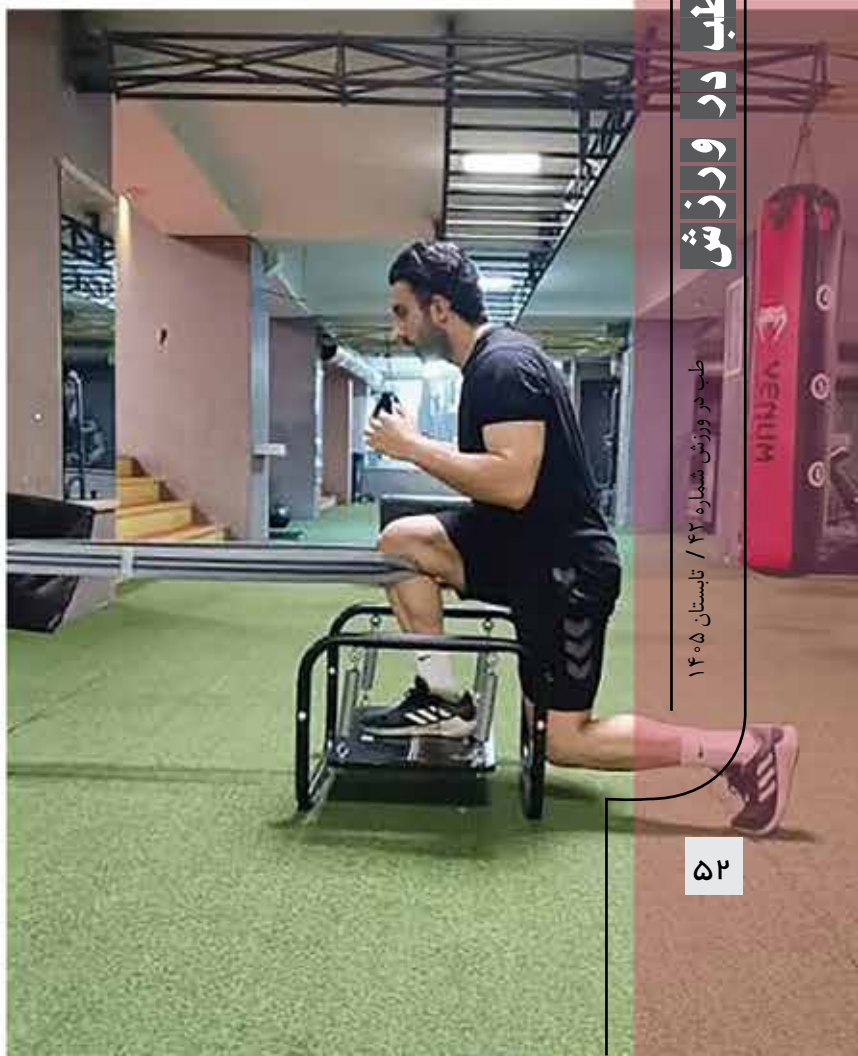
مقدمه

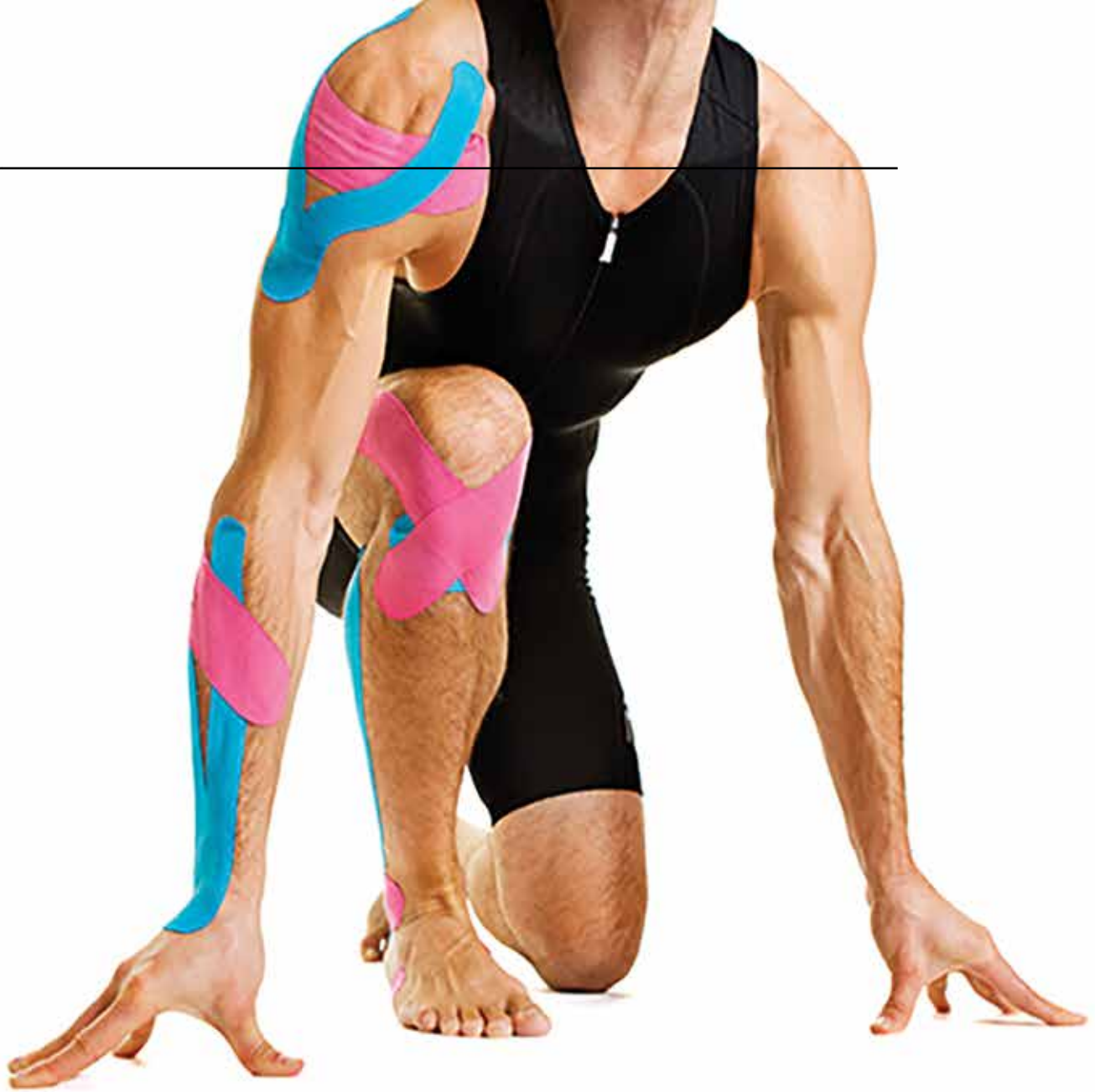
آسیب، جزء جدا نشدنی ورزش به ویژه ورزش حرفه ای است. با توجه به اهمیت ورزش حرفه ای در سطح باشگاهی و ملی و همینطور در سطوح بین المللی، پیشگیری از آسیب و بازگشت سریعتر ورزشکار به میادین بسیار حائز اهمیت است.

از جمله مواردی که هم برای پیشگیری از آسیب و هم برای بازگشت سریعتر ورزشکار به میادین و به عنوان حمایت (Support) در ورزش به کار می روند بريس، تپینگ و بانداژ است. البته وسایل حمایتی مختلف در افراد عادی که دچار عارضه می شوند هم به کار می رود.

ارتز و پروتز (Orthosis & Prosthesis) از جمله این وسایل است که در ساخته شدن آنها فلز به کار رفته است. اگر اندام به صورت آناتومیکی وجود داشته باشد اما دچار نقصان یا کاهش عملکرد شده باشد از ارتز، اسپلینت یا بريس استفاده می شود اما اگر اندام به صورت آناتومیکی وجود نداشته باشد مثلاً در قطع عضو، از پروتز استفاده می شود.

لازم به ذکر است در ورزشکاران سالم گاهی از اسپلینت یا بريس و در





نرم به کار می رفت و از جمله موارد پر استفاده آن در مشکلات مفصل کشککی - رانی (پاتلوفمورال) بود.

۳- کینزیوتیپ که نسبتاً جدیدتر است و توسط دکتر کنزو مطرح شد و عمدتاً برای تسهیل و اصلاح بیومکانیک و کاهش درد به کار می رود.

تیپ سفید

این تیپ فقط خاصیت چسبندگی دارد و خاصیت کشسانی ندارد. معمولاً برای استفاده نیاز به فوم نازکی به نام (under wrap tape) دارد.

عمده ترین هدف استفاده از این نوع نواربندی حمایت مفصل و تحریک حس عمقی (Proprioception) است. استفاده از این نوع تیپ نیاز به مهارت دارد و اگر به اشتباه بسته شود ممکن است آسیب رسان باشد.

ورزشکاران معلول ممکن است هم از ارتز و هم از پروتز استفاده شود. در انواع تیپ و بانداز فلز به کار نمی رود بلکه جنس آنها پارچه، پشم، پنبه و... است و دارای خاصیت کشسانی یا چسبندگی یا هر دوی آنها هستند و همانطور که اشاره شد عمدتاً در آسیبهای عضلانی - اسکلتی در ورزشکاران به کار می روند.

انواع تیپ

موارد مختلف و متنوعی از نواربندی و تیپینگ وجود دارد شامل: ۱- تیپ ورزشی یا تیپ سفید (Athletic Tape) که برای حمایت از عضو آسیب دیده در بازگشت به ورزش یا پیشگیری از آسیب به کار می رود.

۲- تیپ مک کانل (Mc Connell) که شامل تیپ سفیدی که روی آن با تیپ قهوه ای پوشانده شده است و قبل از ظهور کینزیوتیپ برای اصلاح بیومکانیک اندام و وضعیت دادن به بافت

به عنوان مثال در پیچ خوردگی مچ پا می توان از تیپ سفید هم برای پیشگیری و هم برای بازگشت به ورزش استفاده کرد. روش ۶ را روش سبد بافته شده یا closed basket weave technique می گویند.

این تکنیک شامل روش های پایه ای مثل لنگر (Anchor)، رکاب (Stirrup) و نعل اسبی (Horse shoe) و همینطور روش های تکمیلی مثل شکل ۶ و ۸ انگلیسی (figure 8 & 6) و روش قفل پاشنه (Heel Lock) می باشد.

کینزیو تیپ

این نوع تیپ دارای الیاف پلیمری کتان است که ضخامتی به اندازه اپیدرم پوست دارد و دارای خاصیت چسبندگی و کشسانی است. مهم ترین اثرات آن شامل اثر روی سیستم عصبی - عضلانی، سیستم لنفی، بهبود بیومکانیک حرکت و کاهش درد می باشد. پر مصرف ترین اندازه کینزیو تیپ رول ۵ متر با عرض ۵ سانتی متر است.

نوار کینزیو معمولاً در یکی از اشکال Web، Y، I، X، Fan به کار می رود. بهتر است نوار کینزیو ۲۰ تا ۳۰ دقیقه قبل از مسابقه یا تمرین روی بدن ورزشکار چسبانده شود و برخلاف تیپ سفید که بلافاصله بعد از تمرین یا مسابقه باید باز شود، کینزیو تیپ می تواند ۳-۵ روز روی بدن ورزشکار باقی بماند.

برای انجام کینزیو تیپ ابتدا ارزیابی دقیق از ورزشکار (بیمار) باید انجام شود سپس با توجه به آناتومی اندام شکل مناسب تیپ و میزان کشش باید تعیین گردد. بهتر است حین اجرای تیپ اندام هم در وضعیت کشیده شده قرار داشته باشد و بعد

از اعمال تیپ روی آن دست کشیده شود تا چسب کینزیو به پوست بچسبد.

نحوه اعمال کینزیو تیپ به دو شکل عمده سنتی و اصلاحی است. در روش سنتی در مواردیکه درد و اسپاسم عضلانی وجود دارد نوار کینزیو از محل اتصال عضله (Insertion) به سمت مبدا عضله (Origin) با میزان کشش ۱۵-۲۵٪ کشیده می شود و در مواردیکه ضعف عضله وجود دارد نوار کینزیو از مبدا به محل اتصال با میزان کشش ۲۵-۵۰٪ کشیده و چسبانده می شود.

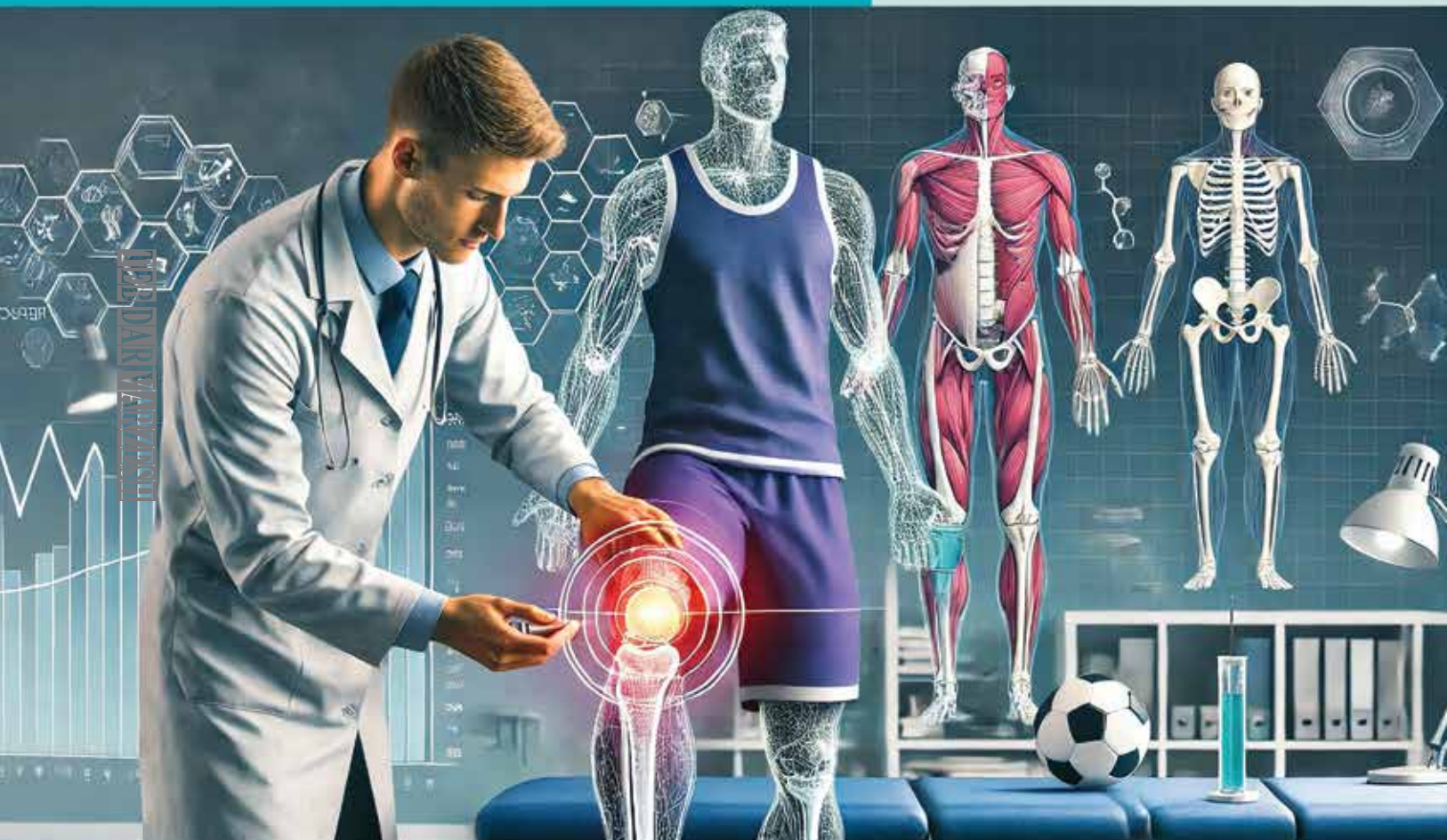
در روش اصلاحی ۶ روش اصلاحی شامل اصلاح مکانیکال، اصلاح فاشیا، اصلاح لیگامان-تاندون، اصلاح فانکشنال، اصلاح ایجاد فضا (در محل آسیب) و اصلاح لنفاتیک (برای کاهش تورم) می باشد. با وجود اینکه تیپ روش ایمنی محسوب می شود اما برای کینزیو تیپ موارد احتیاط و عدم استفاده هم ذکر شده است. به عنوان مثال روی نواحی دچار بدخیمی، روی شریان کاروتید گردن، محل های عفونی و زخم های باز، استفاده از کینزیو تیپ ممنوع است. روی پوست های شکننده با احتیاط استفاده شود و بر مبنای طب سنتی شرقی، در بانوان باردار استفاده از کینزیو تیپ روی نواحی طب سوزنی مثل عضله تراپزیوس فوقانی و ناحیه کشاله ران می تواند سبب وضع حمل زودرس شود.

در خاتمه یادآور می شود غیر از اطلاع از دانش تیپ و اثرات آن، طبیعی است که انجام تیپ نیاز به کار عملی و مهارت دارد تا بتوان با کیفیت بهتری به ورزشکاران و بیماران کمک کرد.

* عمده مطالب این نوشتار از کتاب تیپ ورزشی Perrin و کتاب کینزیو تیپ دکتر کنزو و همکاران برداشت شده است.



مقالات پژوهشی



مانیتورینگ خستگی در ورزش: یک مطالعه مروری

دکتر فرشاد غزالیان
دکترای فیزیولوژی ورزشی
عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی

چکیده

غیرتهاجمی نظیر تغییرپذیری ضربان قلب (HRV) و مدل‌های پیش‌بینی بار مانند نسبت بار حاد به مزمن (ACWR)، دقت پایش را به حداکثر می‌رساند. همچنین، پایش نوسانات هورمونی به ویژه نسبت تستوسترون به کورتیزول (T/C Ratio) به عنوان شاخص حساس استرس اندوکراین در پیشگیری از بیش‌تمرینی نقشی حیاتی دارد.

نتیجه‌گیری: مانیتورینگ موفق خستگی نیازمند یک رویکرد چندبعدی و یکپارچه است. مربیان باید با ترکیب شاخص‌های بار خارجی (مانند GPS و شتاب‌سنجی) و بار داخلی (مانند HRV، مقیاس‌های ذهنی و فاکتورهای هورمونی) پروتکل‌های ریکاوری را به صورت انفرادی تنظیم کنند.

کلیدواژه‌ها: خستگی ورزشی، مانیتورینگ، بار تمرینی، بیومارکر، ادراک تلاش، ریکاوری

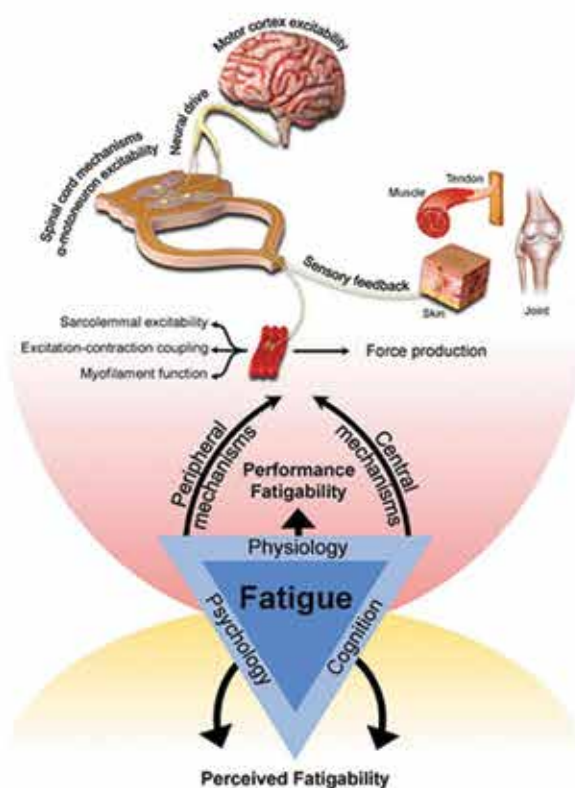
مقدمه

توسعه عملکرد ورزشی در سطوح نخبگی نیازمند اعمال بار تمرینی منظم، فزاینده و چالش‌برانگیز است تا سیستم‌های فیزیولوژیکی بدن ورزشکار وادار به سازگاری (Adaptation) و بیش‌جبرانی

هدف: پایش و مانیتورینگ دقیق خستگی در ورزشکاران، کلید اصلی بهینه‌سازی عملکرد و پیشگیری از آسیب‌های ورزشی و سندرم بیش‌تمرینی است. هدف از این مطالعه مروری، بررسی روش‌های نوین ارزیابی خستگی و ارائه یک چارچوب کاربردی برای مانیتورینگ بار داخلی و خارجی در ورزشکاران است.

روش‌شناسی: در این پژوهش با جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر، ابزارها و شاخص‌های پایش خستگی در چهار حوزه شاخص‌های ذهنی (پرسشنامه‌ها و RPE)، شاخص‌های عملکردی فیزیکی، پایش عصبی-قلبی (HRV) و نشانگرهای بیوشیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

یافته‌ها: خستگی یک پدیده تک‌عاملی نیست، بلکه کاهش موقتی در توانایی تولید نیرو یا توان است که ناشی از تعامل پیچیده‌ی دو مؤلفه مرکزی (در سیستم عصبی مرکزی) و محیطی (در عضلات درگیر) بوده و به شکل کاهش تدریجی عملکرد بهینه نمود می‌یابد. نتایج نشان داد که استفاده از روش‌های ذهنی مانند شاخص درک سختی تمرین جلسه (S-RPE) همراه با ابزارهای عینی



در سال‌های اخیر، مفهوم خستگی در ورزش از یک پدیده صرفاً عضلانی و محیطی، به یک سازه چندبعدی با مؤلفه‌های عصبی، شناختی و روانی گسترش یافته است. خستگی ذهنی و شناختی که در اثر فعالیت‌های طولانی مدت توجهی و تصمیم‌گیری ایجاد می‌شود، نه تنها عملکرد شناختی را کاهش می‌دهد، بلکه باعث افت تعادل پویا، حس عمقی و عملکرد اندام‌های تحتانی می‌گردد و در نهایت ریسک آسیب‌دیدگی را افزایش می‌دهد. این شواهد نشان می‌دهد که پایش خستگی در ورزشکاران نخبه باید هم‌زمان شامل شاخص‌های عضلانی، عصبی و شناختی باشد و نگاه صرفاً مکانیکی به خستگی دیگر پاسخگوی پیچیدگی‌های عملکرد ورزشی نیست.

با توجه به این برهم‌کنش پیچیده بین مغز و عضله، ارزیابی خستگی با استفاده از یک ابزار تک‌بعدی غیرممکن است. مربیان برای مانیتورینگ دقیق به ابزارهایی نیاز دارند که هم بار خارجی (حرکت تمرینی اعمال شده مانند مسافت، سرعت و توان خروجی) و هم بار داخلی (پاسخ فیزیولوژیک و روانی ورزشکار به بار خارجی) را پایش کنند. ابزارهای مختلفی از پرسشنامه‌های ذهنی ساده تا فناوری‌های پیشرفته نظیر ردیاب‌های جی‌پی‌اس (GPS)، سیستم‌های پایش

(Supercompensation) شوند. با این حال، اعمال بارهای تمرینی شدید بدون در نظر گرفتن زمان ریکاوری کافی، تعادل هموستاز بدن را مختل کرده و منجر به بروز خستگی تجمعی، افت عملکرد و در نهایت سندرم بیش‌تمرینی یا آسیب‌دیدگی‌های شدید عضلانی-اسکلتی می‌گردد. از این رو، پایش مستمر و دقیق وضعیت خستگی و ریکاوری ورزشکاران به یکی از حیاتی‌ترین وظایف کادر فنی و دانشمندان علوم ورزشی تبدیل شده است تا بتوانند مرز ظریف میان بار تمرینی بهینه و بار مخرب را شناسایی کنند.

در طول دهه‌های گذشته، دیدگاه غالب در متون علوم ورزشی، خستگی را صرفاً به عنوان یک پدیده محیطی و ناتوانی موضعی عضلانی در تولید یا حفظ توان خروجی و نیرو تعریف می‌کرد. این رویکرد سنتی که بیشتر بر تجمع متابولیت‌هایی مانند یون هیدروژن، فسفات غیرآلی، لاکتات و تخلیه ذخایر گلیکوژن متمرکز بود، نقش سیستم تنظیم‌کننده مرکزی را نادیده می‌گرفت. اما تحقیقات نوین فیزیولوژی ورزشی نشان می‌دهند که خستگی پدیده‌ای به مراتب پیچیده‌تر، پویا و چندوجهی است. امروزه، خستگی به عنوان کاهش موقتی در توانایی تولید نیرو یا توان تعریف می‌شود که ناشی از تعامل پیچیده‌ای دو مؤلفه مرکزی (در سیستم عصبی مرکزی و مسیرهای حرکتی فوق نخاعی) و محیطی (در خود بافت عضلانی و فرآیندهای انقباضی محیطی) است؛ این پدیده لزوماً به معنای ناتوانی کامل ورزشکار در ادامه فعالیت نیست، بلکه به شکل کاهش تدریجی عملکرد بهینه نمود می‌یابد.

مؤلفه مرکزی خستگی (Central Fatigue) با کاهش درایو حرکتی داوطلبانه از سوی قشر حرکتی مغز مشخص می‌شود. در این حالت، با وجود اینکه توانایی انقباضی عضله در پاسخ به تحریک الکتریکی مستقیم ممکن است حفظ شده باشد، سیستم عصبی مرکزی به دلیل تغییر در غلظت انتقال‌دهنده‌های عصبی (نظیر سروتونین، دوپامین و استیل‌کولین) و همچنین فیدبک‌های منفی از گیرنده‌های حسی محیطی (آوران‌های گروه III و IV)، فرکانس شلیک نورون‌های حرکتی را کاهش می‌دهد تا از آسیب‌های بافتی شدید جلوگیری کند. در مقابل، خستگی محیطی (Peripheral Fatigue) مستقیماً با اختلال در زنجیره انقباض عضلانی، از جمله کاهش آزادسازی کلسیم از شبکه سارکوپلاسمیک، کاهش حساسیت تروپونین به کلسیم و ممانعت از تشکیل پل‌های متقاطع اکتین-میوزین به دلیل تجمع متابولیت‌های اسیدی، ارتباط دارد.

ضربان قلب، سنجش متغیرهای خونی و هورمونی توسعه یافته‌اند. با این حال، چالش اصلی مربیان، نحوه ادغام و تفسیر همزمان این داده‌ها در قالب یک سیستم کاربردی است.

بنابراین، این مطالعه مروری با هدف ارائه یک تحلیل جامع و به‌روز از روش‌های پایش خستگی، تبیین مکانیسم‌های فیزیولوژیک پشت هر شاخص، و معرفی رویکردهای نوین پایش مانند پایش هورمونی استرس، تغییرپذیری ضربان قلب (HRV) و مدل‌های پیش‌بینی بار تمرینی تدوین شده است تا راهنمایی عملی و علمی برای بهینه‌سازی عملکرد ورزشکاران ارائه دهد.

بار تمرینی: تفکیک خارجی و داخلی

یکی از مفاهیم بنیادین در مانیتورینگ خستگی، درک تفاوت بین بار تمرینی خارجی و بار تمرینی داخلی است. این تفکیک نه تنها از نظر مفهومی اهمیت دارد، بلکه تأثیر مستقیمی بر نحوه اندازه‌گیری و تفسیر داده‌های تمرینی دارد.

بار تمرینی خارجی به مجموع محرک‌ها و روش‌های تمرینی که به ورزشکار تحمیل می‌شود اشاره دارد. این بار را می‌توان به‌صورت عینی و مستقل از پاسخ فرد اندازه‌گیری کرد. در سال‌های اخیر، فناوری‌های پیشرفته‌ای برای ثبت دقیق بار خارجی توسعه یافته‌اند. سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی به مربیان امکان می‌دهند تا مسافت طی شده، سرعت، شتاب و حتی الگوهای حرکتی ورزشکاران را با دقت بالا ثبت کنند. پاورمترها و ارگومترها نیز توان خروجی را به‌صورت لحظه‌ای اندازه می‌گیرند و داده‌های دقیقی از شدت تمرین فراهم می‌کنند. علاوه بر این ابزارهای پیشرفته، شاخص‌های سنتی مانند تعداد ست‌ها و تکرارها، مدت زمان تمرین و فاصله طی شده همچنان جایگاه خود را حفظ کرده‌اند.

اما بار خارجی تنها یک بخش از معادله است. بار تمرینی داخلی زمانی شکل می‌گیرد که بار خارجی با ویژگی‌ها و شرایط فردی ورزشکار تلاقی می‌کند. دو ورزشکار ممکن است دقیقاً همان بار خارجی را تجربه کنند، اما پاسخ‌های کاملاً متفاوتی به آن نشان دهند. این تفاوت‌ها ناشی از عوامل متعددی است که بر ظرفیت بدن در مقابله با استرس تمرینی تأثیر می‌گذارند. کیفیت و کمیت خواب یکی از مهم‌ترین این عوامل است. تحقیقات نشان داده‌اند که حتی یک شب بی‌خوابی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد فیزیکی و توانایی بازیابی داشته باشد. وضعیت تغذیه نیز نقش حیاتی ایفا می‌کند، زیرا در دسترس بودن سوخت‌های انرژی‌زا و مواد مغذی مورد نیاز برای ترمیم بافت‌ها را تعیین می‌کند.

سطح استرس روانی عامل دیگری است که به‌طور قابل توجهی

بر بار داخلی تأثیر می‌گذارد. استرس‌های غیرورزشی، چه ناشی از مسائل شخصی، تحصیلی یا حرفه‌ای، می‌توانند ظرفیت بدن برای تحمل استرس تمرینی را کاهش دهند. این پدیده که گاهی به‌عنوان مدل استرس کلی توصیف می‌شود، تأکید می‌کند که بدن انسان بین انواع مختلف استرس تمایز قاطعی قائل نمی‌شود و همه آن‌ها بر ظرفیت کلی بازیابی تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این‌ها، عوامل دیگری مانند انگیزش، اضطراب، خلق و خوی عمومی و حتی شرایط محیطی نیز بر بار داخلی تأثیرگذار هستند.

درک این تفکیک به مربیان کمک می‌کند تا بفهمند چرا یک برنامه تمرینی یکسان ممکن است برای ورزشکاران مختلف نتایج متفاوتی داشته باشد. همچنین این تفکیک توضیح می‌دهد که چرا یک ورزشکار در روزهای مختلف پاسخ‌های متفاوتی به یک بار تمرینی مشابه نشان می‌دهد. بنابراین، مانیتورینگ مؤثر خستگی نیازمند توجه همزمان به هر دو بعد خارجی و داخلی بار تمرینی است.

روش‌های ارزیابی خستگی

ارزیابی خستگی در ورزش نیازمند ابزارها و روش‌های متنوعی است که بتوانند ابعاد مختلف این پدیده پیچیده را اندازه‌گیری کنند. این روش‌ها از شاخص‌های ساده ذهنی تا فرمول‌های محاسباتی پیچیده و جداول مقایسه‌ای را شامل می‌شوند که هر کدام نقش خاصی در پایش جامع وضعیت ورزشکار دارند.

مقیاس ادراک تلاش (RPE)

یکی از پرکاربردترین ابزارهای ارزیابی خستگی، مقیاس ادراک تلاش یا RPE است. این روش بر پایه درک ذهنی ورزشکار از شدت فعالیت بنا شده و انواع مختلفی از آن توسعه یافته است. جدول مقایسه انواع RPE نشان می‌دهد که این مقیاس‌ها می‌توانند از فرم‌های ساده عددی گرفته تا نسخه‌های تخصصی‌تر برای رشته‌های ورزشی خاص متغیر باشند.

در این میان، شاخص درک سختی تمرین جلسه (Session-RPE یا S-RPE) که از ضرب نمره RPE (مقیاس ۰ تا ۱۰ کرونگ) در مدت زمان جلسه تمرینی (به دقیقه) به دست می‌آید، ابزاری استاندارد و بسیار کارآمد برای محاسبه بار تمرینی روزانه است. مربیان با جمع زدن بار تمرینی روزانه در طول یک هفته، بار هفتگی (Weekly Load) را محاسبه می‌کنند. پایش نوسانات بار هفتگی و بررسی تغییرات ناگهانی آن، به مربیان اجازه می‌دهد تا خستگی تجمعی را پایش کرده و از اعمال بار اضافی ناگهانی جلوگیری نمایند. این ویژگی باعث می‌شود S-RPE ابزاری حساس برای شناسایی زودهنگام عدم تعادل بین تمرین و بازیابی باشد.

مقایسه انواع RPE

کاربردها	مزایا	ویژگی اصلی	محدوده عددی	نوع RPE
مناسب تست‌های هوازی	ارتباط با HR	اعداد $\approx 10 \times$ ضربان قلب	۶-۲۰	Borg Scale
ورزشکاران تیمی، مقاومتی	فهم آسان و کاربرد روزانه	ساده‌تر و کوتاه‌تر	۰-۱۰	CR10 Borg
همه رشته‌ها	محاسبه بار هفتگی کم‌هزینه، بدون تجهیزات	زمان $\times$ RPE (min)	—	Session RPE
بدنسازی، پاورلیفتینگ، کراسفیت	کنترل خستگی، ایمن‌تر	بر اساس تکرار باقی‌مانده	۱-۱۰	RIR-based RPE
کودکان، افراد مبتدی، سالمندان، آموزش مدارس	مقیاس تصویری + متن	همراه با تصویر	۰-۱۰	OMNI Scale

محاسبه حجم تمرین و بار تمرینی

برای ارزیابی کمی خستگی، فرمول‌های مختلفی برای محاسبه حجم و بار تمرین وجود دارد. یکی از رایج‌ترین روش‌ها استفاده از فرمول مدت زمان $\times$ تعداد برای محاسبه حجم تمرین است. این فرمول ساده اما مؤثر می‌تواند در رشته‌های مختلف به کار رود و امکان مقایسه بار تمرینی بین جلسات و ورزشکاران مختلف را فراهم می‌کند. روش دیگر استفاده از فرمول جلسات $\times$ فاصله یا وزن است که به‌ویژه در رشته‌های استقامتی و قدرتی کاربرد دارد. این فرمول‌ها زمانی که با شاخص RPE ترکیب شوند، می‌توانند شاخص بار تمرینی جامع‌تری ایجاد کنند. به‌عنوان مثال، ضرب مدت جلسه تمرین در نمره RPE گزارش‌شده توسط ورزشکار، عددی تولید می‌کند که هم حجم و هم شدت ادراک‌شده را در نظر می‌گیرد. این رویکرد ترکیبی به مربیان کمک می‌کند تا نه‌تنها میزان کار انجام‌شده بلکه تأثیر آن بر ورزشکار را نیز در نظر بگیرند.

فرمول‌های محاسبه بار تمرینی و شاخص‌های مانیتورینگ

کاربرد در رشته‌ها	واحد	فرمول/روش محاسبه	شاخص
همه رشته‌ها	واحد حجمی	مدت زمان $\times$ تعداد جلسات	حجم تمرین
دو میدانی، شنا، وزنه‌برداری، دوچرخه‌سواری	Km, m, Kg, W, h/Km	کیلومتر (Km)، متر (m)، کیلوگرم (Kg)، وات (W)، کیلومتر/ساعت (Km/h)	بار بر اساس فاصله / وزن
همه رشته‌ها	Km/h, 1RM%	سرعت، توان یا 1RM%	شدت تمرین
همه رشته‌ها	واحد نسبی	حجم $\times$ شدت	بار تمرین (Training Load)
فوتبال، بسکتبال، دو میدانی (کنترل آسیب)	عدد بدون واحد	بار هفته جاری $\div$ میانگین بار ۴ هفته قبل	نسبت بار حاد به مزمن (ACWR)
فوتبال، هاکی، دو میدانی	m یا Km	مجموع مسافت طی‌شده	مسافت کل (Total Distance)
فوتبال، راگی، هاکی	Km یا m	مسافت در سرعت بالای آستانه مشخص (مثلاً > 19 متر بر دقیقه)	دویدن با سرعت بالا (High Speed Running)

تعداد/مسافت اسپرینت	تعداد یا طول اسپرینت‌های ثبت شده	تعداد/مسافت	فوتبال، ورزش‌های سرعتی، ورزش‌های تیمی
بار تمرین جلسه (Session Training Load)	مدت جلسه $\times$ RPE	واحد نسبی	همه رشته‌ها
بار تمرین مقاومتی (Resistance Training Load)	وزن $\times$ تکرار $\times$ ست	Kg	بدنسازي، وزنه‌برداری، کراس فیت

شاخص‌های بار داخلی تمرین

جلسات در روز، هفته یا ماه، زمان (به ثانیه، دقیقه یا ساعت)، شدت (به صورت مطلق و نسبی)، نوع فعالیت، حداکثر عملکرد (مانند توان متوسط حداکثر و پرش عمودی)، و تکرار تلاش (تعداد و کیفیت) هستند.

بخش مهم دیگر این جداول، شاخص‌های ذهنی مانند ادراک خستگی و ریکاوری است که به صورت مستقیم از ورزشکار پرسیده می‌شود. پرسشنامه‌هایی مانند REST-Q (پرسشنامه استرس و بازیابی) و VAS (مقیاس آنالوگ بصری) ابزارهای استاندارد شده‌ای هستند که می‌توانند وضعیت روان‌شناختی و ادراک ریکاوری را به صورت کمی ارزیابی کنند.

شاخص‌های مانیتورینگ بار داخلی تمرین مجموعه جامعی از معیارها را ارائه می‌دهند که می‌توانند برای پایش پاسخ فیزیولوژیک به تمرین استفاده شوند. یکی از اصلی‌ترین این شاخص‌ها ضربان قلب است که به صورت ضربه در دقیقه اندازه‌گیری می‌شود. ضربان قلب به عنوان یک شاخص فیزیولوژیک مستقیم، می‌تواند شدت واقعی کار انجام شده توسط سیستم قلبی-عروقی را نشان دهد. علاوه بر ضربان قلب، این جداول شامل طیف وسیعی از متغیرهای دیگر هستند که هر کدام پنجره‌ای به جنبه خاصی از پاسخ بدن به تمرین باز می‌کنند. این متغیرها شامل فرکانس تمرین (تعداد

شاخص‌های مانیتورینگ بار داخلی تمرین

شاخص	واحد	ابزار روش اندازه‌گیری	توضیحات
ضربان قلب استراحت (Resting HR)	ضربه در دقیقه	مانیتور ضربان قلب	افزایش غیرمعمول نشانه خستگی یا استرس
حداکثر ضربان قلب ثبت شده (Max HR)		مانیتور قلب	بیشترین ضربان ثبت شده در تمرین
بازیابی ضربان قلب (HRR)	کاهش در دقیقه بعد تمرین	مانیتور قلب	شاخص ریکاوری سیستم قلبی-عروقی
تنوع ضربان قلب (HRV)	زمان بین ضربان‌ها	اپلیکیشن یا دستگاه	وضعیت سیستم عصبی خودکار
ادراک تلاش (RPE)	مقیاس بورگ یا	پرسشنامه	ادراک فرد از شدت تمرین
بار ادراکی جلسه (S-RPE / Session RPE)	واحد نسبی	پرسشنامه	مدت تمرین $\times$ کلی، شاخص رایج بار داخلی
لاکتات خون (Blood Lactate)	mmol/L	لاکتات آنالیزور	نشانه بار متابولیک تمرین
هورمون‌ها (کورتیزول، تستوسترون)	$\mu\text{g/dL}$, ng/dL	خون، بزاق، آزمایش	تغییرات نشانه استرس یا ریکاوری ضعیف
خواب	ساعت / امتیاز کیفیت	پرسشنامه	کمبود خواب افزایش ریسک بیش تمرینی

درک ذهنی از خستگی	پرسشنامه	مقیاس	خستگی ادراکی
نشانه‌های ذهنی از بار داخلی	پرسشنامه	—	سوالات سلامت روزانه (Daily Wellness)
نسبت تستوسترون به کورتیزول کمتر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده فاز کاتابولیک و ریسک بیش‌تر تمرینی است	خون، بزاق، آزمایش	ng/dL	هورمون‌ها و نسبت

متغیرهای وضعیت سلامت و ترکیب بدن

ارزیابی خستگی همچنین بر اهمیت پایش بیماری (وقوع و مدت) و آسیب (نوع و مدت) تأکید دارند. این متغیرها نشانگرهای مهمی از عدم تعادل بین استرس تمرینی و ظرفیت بازیابی هستند. افزایش فراوانی یا مدت بیماری‌های جزئی مانند عفونت‌های تنفسی فوقانی می‌تواند علامت اولیه سرکوب سیستم ایمنی ناشی از بیش‌تر تمرینی باشد.

ترکیب بدنی نیز بخشی از ارزیابی جامع است و شامل پایش وزن کل بدن، توده چربی و توده بدون چربی می‌شود. تغییرات ناخواسته در ترکیب بدن، به‌ویژه کاهش توده عضلانی یا کاهش وزن سریع، می‌تواند نشانه‌ای از بازیابی ناکافی یا عدم تعادل انرژی باشد.

نقش خواب و وضعیت روان‌شناختی

شاخص‌های مربوط به خواب از جمله کیفیت، کمیت و وضعیت روزانه، نقش حیاتی در ارزیابی خستگی دارند. خواب محیط اصلی بازیابی فیزیولوژیک و روان‌شناختی است و اختلال در الگوی خواب می‌تواند هم علت و هم نتیجه خستگی مزمن باشد. پایش منظم کیفیت خواب می‌تواند به شناسایی زود هنگام مشکلات بازیابی کمک کند.

متغیرهای روان‌شناختی مانند استرس، اضطراب و انگیزه نیز جزء لاینفک ارزیابی خستگی هستند. وضعیت روان‌شناختی می‌تواند هم بر ادراک خستگی و هم بر توانایی واقعی عملکرد تأثیر بگذارد. احساسات ورزشکار را می‌توان در طیفی از امیدواری تا خنثی و ناامیدی ارزیابی کرد، که وضعیت روحیه کلی و آمادگی ذهنی برای تمرین را منعکس می‌کند.

تحلیل‌های بیوشیمیایی و هورمونی

در سطح پیشرفته‌تر، تحلیل‌های بیوشیمیایی و هورمونی اطلاعات عمیقی درباره پاسخ داخلی بدن به تمرین فراهم می‌کنند. این تحلیل‌ها پاسخ خط پایه (baseline) به تمرین را نشان می‌دهند و می‌توانند تغییرات ظریفی را که هنوز به‌صورت عملکردی یا ذهنی آشکار نشده‌اند، شناسایی کنند. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، نشانگرهای التهابی مانند IL-6 و TNF- α ، شاخص‌های استرس اکسیداتیو مانند TBARS و ایزوپروستان‌ها، و معیارهای ظرفیت آنتی‌اکسیدانی مانند GSH و کاتالاز، همگی می‌توانند بخشی از این ارزیابی جامع باشند.

علاوه بر شاخص‌های التهابی و اکسیداتیو، پایش نوسانات هورمونی نقش حیاتی در ارزیابی وضعیت سازگاری غدد درون‌ریز به استرس تمرین ایفا می‌کند. هورمون کورتیزول به عنوان شاخص فعالیت کاتابولیک و استرس فیزیولوژیک، و تستوسترون به عنوان هورمون آنابولیک مسئول بازسازی بافتی عمل



می‌کنند. نسبت تستوسترون به کورتیزول (T/C Ratio) یک شاخص کلیدی برای ارزیابی تعادل آنابولیک/کاتابولیک است. افت مستمر یا کاهش بیش از ۳۰ درصدی این نسبت در چرخه‌های تمرینی، نشان‌دهنده نقص در ریکاوری و غلبه فرآیندهای تخریبی است و به عنوان یک نشانگر هشداردهنده زودهنگام و بسیار حساس برای پیشگیری از بروز سندرم بیش‌تمرینی (Overtraining Syndrome) استفاده می‌شود.

نشانگرهای بیوشیمیایی برای تشخیص خستگی عضلانی

دسته‌بندی	نشانگرها	توضیحات
نشانگرهای التهابی	TNF- α ، IL-6 ، لوکوسیت‌ها	IL-6 یک سیتوکین پیش‌التهابی اصلی و همچنین میوکین آزادشده در پاسخ به انقباض عضله TNF- α توسط ماکروفاژها تولید و در نتیجه خستگی عضلانی افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری در سرم و IL-6 در بزاق نیز امکان‌پذیر است.
استرس اکسیداتیو / پراکسیداسیون لیپید	TBARS، ایزوپروستان‌ها	نشانگر آسیب اکسیداتیو به چربی‌های غشای سلولی
اکسیداسیون پروتئین	کربونیل پروتئین‌ها (PC)	نشانگر آسیب اکسیداتیو به پروتئین‌ها
ظرفیت آنتی‌اکسیدانی	گلوتاتیون (GSH) ، پراکسیداز گلوتاتیون (GPX) ، کاتالاز، ظرفیت کلی آنتی‌اکسیدان (TAC)	سیستم دفاعی بدن در برابر استرس اکسیداتیو

و افزایش خطاهای حرکتی و تاکتیکی همراه است. بنابراین، ادغام شاخص‌های شناختی در پروتکل‌های مانیتورینگ خستگی می‌تواند دقت پیش‌بینی آسیب و افت عملکرد را افزایش دهد.

رویکرد یکپارچه در مانیتورینگ خستگی

با توجه به پیچیدگی پدیده خستگی و تنوع شاخص‌های موجود برای ارزیابی آن، مشخص است که هیچ معیار منفردی نمی‌تواند تصویر کاملی از وضعیت ورزشکار ارائه دهد. هر کدام از شاخص‌های ذکرشده، پنجره‌ای به جنبه خاصی از پاسخ بدن به تمرین باز می‌کنند، اما تنها در کنار یکدیگر است که می‌توانند درک جامعی از وضعیت خستگی و بازیابی فراهم کنند.

در یک رویکرد یکپارچه و مدرن، پایش غیرتهاجمی سیستم عصبی خودکار (ANS) از طریق تغییرپذیری ضربان قلب (HRV) اهمیت بسزایی دارد. کاهش در شاخص‌های زمان‌محور HRV (مانند RMSSD) نشان‌دهنده غلبه سیستم سمپاتیک و عدم بازیابی

تحلیل انحرافات حرکتی و عملکرد حداکثری

خستگی می‌تواند منجر به تغییرات ظریف در الگوهای حرکتی شود که ممکن است خطر آسیب را افزایش دهند. ارزیابی منظم کیفیت حرکت می‌تواند این انحرافات را پیش از آنکه به آسیب منجر شوند، شناسایی کند.

شاخص‌های حداکثر عملکرد مانند توان متوسط حداکثر و ارتفاع پرش عمودی، ابزارهای عملکردی ساده‌ای هستند که می‌توانند وضعیت عصبی-عضلانی را به سرعت ارزیابی کنند. کاهش در این معیارها می‌تواند نشانه‌ای از خستگی تجمعی یا بازیابی ناکافی باشد.

پایش خستگی ذهنی و شناختی

علاوه بر شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکردی، خستگی ذهنی و شناختی به عنوان جزء مهمی از خستگی کلی ورزشکار مورد توجه پژوهش‌های اخیر قرار گرفته است. خستگی ذهنی معمولاً در پی فعالیت‌های مداوم توجهی، تصمیم‌گیری و پردازش اطلاعات رخ

ممکن است شاخص‌های مختلف سیگنال‌های متناقضی ارسال کنند، به‌عنوان مثال ورزشکاری که از نظر ذهنی احساس آمادگی می‌کند اما شاخص‌های بیوشیمیایی او نشانگر التهاب بالا هستند. در چنین مواقعی، درک فیزیولوژی پایه و تجربه بالینی برای تفسیر صحیح داده‌ها ضروری است. به‌طور کلی، همگرایی چندین شاخص به سمت یک جهت، اعتماد بیشتری نسبت به تفسیر ایجاد می‌کند.

استفاده از فناوری‌های مدرن مانند سیستم‌های جی‌پی‌اس و آزمایش بیومارکرها، امکان جمع‌آوری داده‌های دقیق و منظم را فراهم کرده است. این داده‌ها زمانی به اطلاعات کاربردی تبدیل می‌شوند که در قالب یک سیستم بازخورد علمی مورد تحلیل قرار گیرند. مدل‌های پیش‌بینی آسیب‌دیدگی که بر پایه داده‌های مانیتورینگ استوار هستند، نمونه‌ای از کاربرد این رویکرد داده‌محور هستند. این مدل‌ها می‌توانند با شناسایی الگوهای خطرناک در داده‌های تمرینی، به مربیان در پیشگیری از آسیب کمک کنند.

پایش منظم و سیستماتیک نه تنها به مربیان بلکه به خود ورزشکاران نیز کمک می‌کند تا خودآگاهی بیشتری نسبت به بدن خود پیدا کنند. ورزشکارانی که به‌طور مستمر داده‌های مربوط به عملکرد و بازیابی خود را مشاهده می‌کنند، یاد می‌گیرند که سیگنال‌های ظریف خستگی را زودتر تشخیص دهند و بهتر با نیازهای بدنشان ارتباط برقرار کنند. این خودآگاهی افزایش یافته می‌تواند به کاهش ریسک بیش‌تمرینی و بیماری‌های مرتبط منجر شود.

مناسب است. در بخش تمرینات مقاومتی نیز، متدولوژی تکرار باقی‌مانده (RIR) به ورزشکاران و مربیان اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به تست‌های خسته‌کننده یک تکرار بیشینه (1RM)، خستگی عصبی-عضلانی درون جلسه‌ای را مدیریت کنند. علاوه بر این، خستگی نه تنها ظرفیت‌های جسمانی، بلکه کیفیت تصمیم‌گیری و عملکردهای شناختی ورزشکاران را نیز به شدت کاهش می‌دهد که این امر ریسک خطاهای تاکتیکی و آسیب‌دیدگی را در شرایط مسابقه افزایش می‌دهد.

جهت پیشگیری از آسیب‌های ناشی از تغییرات ناگهانی بار تمرینی، استفاده از مدل نسبت بار حاد به مزمن (ACWR) توصیه می‌شود. این مدل با تقسیم بار تمرینی هفته جاری (بار حاد) بر میانگین بار تمرینی ۴ هفته گذشته (بار مزمن) محاسبه می‌شود. قرارگیری این نسبت در محدوده ایمن (بین ۰.۸ تا ۱.۳) خطر آسیب‌دیدگی را به حداقل می‌رساند، در حالی که تجاوز از نسبت ۱.۵ (محدوده خطر) نشان‌دهنده افزایش شدید بار تمرینی و احتمال بالای بروز خستگی مفرط و آسیب‌دیدگی است.

یک رویکرد یکپارچه برای مانیتورینگ خستگی باید ترکیبی از شاخص‌های ساده و قابل دسترس با معیارهای پیشرفته‌تر باشد. در این رویکرد، شاخص‌های ذهنی مانند آرپی‌ای و پرسشنامه‌های ریکآوری می‌توانند به‌عنوان ابزارهای روزانه مورد استفاده قرار گیرند. این معیارها به‌دلیل سادگی، هزینه پایین و عدم نیاز به تجهیزات خاص، برای استفاده مکرر ایده‌آل هستند و می‌توانند روندهای کلی را نشان دهند. شاخص‌های عملکردی ساده مانند پرش عمودی نیز می‌توانند چند بار در هفته مورد ارزیابی قرار گیرند تا وضعیت عصبی-عضلانی ورزشکار را بررسی کنند.

در سطح بعدی، ارزیابی‌های پیشرفته‌تر مانند تحلیل‌های بیوشیمیایی می‌توانند در فواصل زمانی منظم‌تری، مثلاً هفتگی یا در نقاط کلیدی فصل تمرینی، انجام شوند. این ارزیابی‌ها

اطلاعات عمیق‌تری درباره پاسخ‌های فیزیولوژیک داخلی

فراهم می‌کنند و می‌توانند تغییراتی را که هنوز

به‌صورت ذهنی یا عملکردی آشکار نشده‌اند،

شناسایی کنند. انتخاب بیومارکرها خاص

باید بر اساس نوع ورزش، اهداف تمرینی و

منابع موجود صورت گیرد.

یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از

چندین شاخص، تفسیر یکپارچه داده‌های

حاصل از منابع مختلف است. گاهی



یکی از اهداف کلیدی مانیتورینگ جامع، شناسایی نقاط قوت و ضعف فردی ورزشکار است. هر ورزشکار الگوی منحصربه‌فردی از پاسخ به تمرین و بازیابی دارد. برخی ممکن است از نظر بیوشیمیایی سریع بهبود یابند اما از نظر عصبی-عضلانی دیرتر، در حالی که برخی دیگر الگوی معکوسی دارند. درک این تفاوت‌های فردی به مربیان اجازه می‌دهد برنامه‌های تمرینی را شخصی‌سازی کنند و به جای رویکرد یک‌اندازه برای همه، برنامه‌هایی متناسب با ویژگی‌های هر ورزشکار طراحی کنند.

پایش هورمون‌ها به‌ویژه تستوسترون و کورتیزول در طول دوره تمرینی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت نورواندوکرین ورزشکار فراهم کند. تغییرات در نسبت تستوسترون به کورتیزول گاهی به‌عنوان شاخصی از تعادل بین سازگاری و استرس تمرینی تفسیر می‌شود. کاتکولامین‌ها نیز نشان داده‌اند که به استرس‌های تمرینی واکنش بسیار حساسی دارند و می‌توانند معیارهای مفیدی برای ارزیابی پاسخ سیستم عصبی سمپاتیک باشند.

نتیجه‌گیری

مانیتورینگ مؤثر خستگی در ورزش نیازمند رویکردی جامع، چندبعدی و مبتنی بر شواهد است. خستگی پدیده‌ای پیچیده است که از تعامل عوامل فیزیولوژیک، بیوشیمیایی، عصبی-عضلانی و روانی ناشی می‌شود و بنابراین نمی‌توان آن را با یک معیار واحد به‌طور کامل ارزیابی کرد. یافته‌های این مطالعه مروری نشان می‌دهند که ترکیب شاخص‌های مختلف شامل معیارهای ذهنی مانند ادراک تلاش، شاخص‌های عملکردی مانند توان حداکثر و پرش عمودی، و بیومارکرهای زیستی از جمله نشانگرهای التهابی و استرس اکسیداتیو، می‌تواند تصویری جامع‌تر از وضعیت ورزشکار ارائه دهد.

درک تفاوت بین بار تمرینی خارجی و داخلی نقطه شروع اساسی برای مانیتورینگ موفق است. بار خارجی تنها بخشی از معادله است

و تأثیر آن به شدت تحت تأثیر عوامل فردی قرار می‌گیرد. استفاده از فناوری‌های مدرن مانند جی‌پی‌اس و پاورمتر برای ثبت دقیق بار خارجی و ترکیب آن با شاخص‌های بار داخلی، به مربیان امکان می‌دهد تصمیمات آگاهانه‌تری درباره برنامه‌ریزی تمرینی بگیرند.

یکی از نتایج مهم این بررسی این است که شاخص‌های ساده و قابل دسترس مانند آرپی‌ای و پرسشنامه‌های ریکاوری می‌توانند به اندازه معیارهای پیشرفته‌تر مفید باشند، به‌ویژه زمانی که به‌صورت منظم و سیستماتیک استفاده شوند. این یافته برای تیم‌ها و ورزشکارانی که منابع محدودی برای آزمایش‌های پیچیده دارند، بسیار مهم است و نشان می‌دهد که مانیتورینگ مؤثر لزوماً نیازمند تجهیزات گران‌قیمت نیست.

بیومارکرهای بیوشیمیایی، اگرچه اطلاعات عمیق‌تری فراهم می‌کنند، باید به‌عنوان مکمل شاخص‌های ساده‌تر مورد استفاده قرار گیرند، نه جایگزین آن‌ها. تفسیر صحیح این بیومارکرها نیازمند دانش تخصصی است و باید در بستر کلی وضعیت ورزشکار مورد تحلیل قرار گیرند. پایش طولانی‌مدت و ایجاد پروفایل فردی برای هر ورزشکار می‌تواند به تفسیر بهتر تغییرات این معیارها کمک کند. پیشرفت‌های اخیر در فناوری و علوم داده فرصت‌های جدیدی برای مانیتورینگ خستگی ایجاد کرده‌اند. مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده می‌توانند با تحلیل الگوهای پیچیده در داده‌های مانیتورینگ، به شناسایی زود هنگام خطر بیش‌تمرینی یا آسیب کمک کنند. با این حال، این ابزارها باید به‌عنوان کمک به تصمیم‌گیری مربی استفاده شوند، نه جایگزین قضاوت حرفه‌ای و تجربه بالینی.

در نهایت، مانیتورینگ خستگی نه تنها ابزاری برای پیشگیری از بیش‌تمرینی و آسیب است، بلکه بخشی از فرآیند بهینه‌سازی عملکرد نیز محسوب می‌شود. با شناخت دقیق‌تر از وضعیت ورزشکار، مربیان می‌توانند به‌طور مؤثرتری تعادل بین استرس تمرینی و بازیابی را مدیریت کنند و شرایط را برای سازگاری‌های



مختلف، شناسایی حساس‌ترین شاخص‌ها برای هر نوع خستگی، و طراحی سیستم‌های یکپارچه که بتوانند داده‌های متنوع را به صورت خودکار تحلیل و تفسیر کنند. همچنین نیاز به مطالعات بیشتری برای درک تفاوت‌های فردی در پاسخ به تمرین و بازیابی وجود دارد تا بتوان رویکردهای شخصی‌سازی‌شده‌تری را توسعه داد.

بهینه فراهم آورند. پایش منظم همچنین به ارتقای خودآگاهی ورزشکاران کمک می‌کند و آن‌ها را در مسیر مدیریت بهتر بدن خود یاری می‌رساند.

تحقیقات آینده باید بر چند حوزه کلیدی تمرکز کنند: توسعه پروتکل‌های استانداردشده برای مانیتورینگ در رشته‌های ورزشی

References

1. Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., Doleshal, P., & Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(1), 109–115.
2. Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., Raglin, J., et al. (2013). Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 45(1), 186–205.
3. Halson, S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine*, 44(Suppl 2), S139–S147.
4. Bourdon, P. C., Cardinale, M., Murray, A., Gustin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., Gabbett, T. J., Coutts, A. J., Burgess, D. J., Gregson, W., & Cable, N. T. (2017). Monitoring athlete training loads: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(Suppl 2), S2-161–S2-170.
5. Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: Do all roads lead to Rome? *Frontiers in Physiology*, 5, 73.
6. Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., & Buckley, J. D. (2016). Monitoring athletic training status through autonomic heart rate regulation: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 46(10), 1461–1486.
7. Gabbett, T. J., & Tierney, R. (2017). The acute:chronic workload ratio and injury risk in elite athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(1), 1–10.
8. Hulin, B. T., Gabbett, T. J., Lawson, D. W., Caputi, P., & Sampson, J. A. (2016). The acute:chronic workload ratio predicts injury: High chronic workload may decrease injury risk in elite rugby league players. *British Journal of Sports Medicine*, 50(4), 231–236.
9. Pageaux, B., & Lepers, R. (2016). The effects of mental fatigue on sport-related performance. *Progress in Brain Research*, 229, 289–315.
10. Claudino, J. G., Mezêncio, B., Soncin, R., Ferreira, J. C., Couto, B. P., Szmuchowski, L. A., & McMaster, D. T. (2017). The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(4), 397–402.
11. Gustin, P. B. (2014). Quantification of training load and fatigue in team sport athletes. *Sports Medicine*, 44(Suppl 2), S1–S16.
12. Taylor, L. W., & Inness, M. (2017). Monitoring mental fatigue in athletes: Practical implications and future directions. *Sports Medicine*, 47(Suppl 2), 1–12.
13. Lam, C. K., et al. (2019). Cognitive fatigue and physical performance in athletes. *Journal of Sports Sciences*, 37(1), 1–10.

میکروبیوم روده؛ مرز نوین در پیشگیری از آسیب‌های ورزشی: یک مقاله مروری با نگاهی به شواهد بالینی و مکانیسم‌های مولکولی

دکتر عطیه دربندی
استادیار میکروبی‌شناسی پزشکی
مرکز تحقیقات میکروبی‌شناسی مولکولی، دانشگاه شاهد

چکیده

میکروبیوم انسانی، شامل اجتماع عظیمی از میکروارگانیسم‌ها، نقشی محوری در تنظیم سلامت و بیماری ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، شواهد قانع‌کننده‌ای نشان داده‌اند که میکروبیوم روده نه تنها بر عملکرد ورزشی، بلکه بر میزان آسیب‌پذیری و روند ترمیم بافت‌های اسکلتی-عضلانی تأثیر عمیقی دارد. این مقاله مروری به بررسی مکانیسم‌های مولکولی و بالینی ارتباط بین میکروبیوم روده و پیشگیری از آسیب‌های ورزشی می‌پردازد. نقش میکروبیوم در تنظیم التهاب سیستمیک، بازسازی استخوان، سلامت تاندون و لیگامان، و نیز سندرم بیش‌تمرینی (OTS) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، کاربرد پروبیوتیک‌ها، پری‌بیوتیک‌ها و پست‌بیوتیک‌ها به عنوان ابزارهای نوین در کاهش خطر آسیب و تسریع بازتوانی معرفی می‌شوند. یافته‌ها نشان می‌دهند که حفظ تنوع و تعادل میکروبی از طریق مداخلات تغذیه‌ای هدفمند، می‌تواند به عنوان یک استراتژی غیرتهاجمی و مؤثر در پزشکی ورزشی آینده مطرح باشد.

کلیدواژه‌ها: میکروبیوم روده، آسیب ورزشی، التهاب، پروبیوتیک، اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر



۱- مقدمه

بدن انسان میزبان اجتماع پیچیده‌ای از میکروارگانیسم‌هاست که جمعاً میکروبیوم نامیده می‌شوند. این موجودات ریز، که تعداد آنها از سلول‌های خود بدن بیشتر است، نه تنها هم‌نشینی بی‌اثر، بلکه همکاری فعال در تنظیم فیزیولوژی میزبان به‌شمار می‌روند. از هضم غذا و سنتز ویتامین‌ها گرفته تا بلوغ سیستم ایمنی و حتی تنظیم خلق‌وخو، همه تحت تأثیر ترکیب و عملکرد میکروبیوم قرار دارند (۱، ۲).

در حوزه پزشکی ورزشی، نگاه به میکروبیوم تا چند سال پیش

۲- ترکیب میکروبیوم و عملکردهای آن

۱-۲- تنوع میکروبی و پراکندگی در بدن

میکروبیوم انسانی شامل باکتری‌ها، ویروس‌ها (به‌ویژه باکتریوفاژها)، قارچ‌ها و باستانی‌هاست. هر ناحیه تشریحی، جمعیت میکروبی اختصاصی خود را دارد، اما روده بزرگ، متراکم‌ترین و متنوع‌ترین اکوسیستم میکروبی را در خود جای داده است (۳). ورزشکاران حرفه‌ای معمولاً تنوع میکروبی بالاتری دارند و این تنوع با شاخص‌های عملکردی مانند حداکثر اکسیژن مصرفی (VO₂max) همبستگی مثبت نشان می‌دهد (۱).

باکتری‌های غالب در روده شامل چهار شاخه اصلی هستند:

نقش عملکردی	جنس‌های مهم	شاخه
تجزیه کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌های پیچیده	Bacteroides	Bacteroidetes
تولید اسیدهای چرب کوتاه زنجیر از فیبرها	Ruminococcus، Clostridium، Lactobacillus	Firmicutes
تولید ویتامین K، اما در شرایط عدم تعادل، فرصت‌طلب	Escherichia coli	Proteobacteria
خواص پروبیوتیکی، کمک به هضم و عملکرد ایمنی	Bifidobacterium	Actinobacteria

۳- التهاب سیستمیک؛ پل ارتباطی میکروبیوم و آسیب ورزشی

التهاب، پاسخ محافظتی بدن در برابر عوامل بیماری‌زا، ضربه و سموم است. باین حال، التهاب مزمن می‌تواند تأثیر چشمگیری بر سلامت و عملکرد ورزشکاران داشته باشد (۲). ورزشکاران استقامتی ممکن است سطوح بالاتری از نشانگرهای التهابی را تجربه کنند که گاهی تا ۶۰ برابر بیشتر از افراد غیرورزشکار گزارش شده است.

میکروبیوم روده از طریق چندین مکانیسم کلیدی التهاب را تنظیم می‌کند:

۱- تولید اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر (SCFA):

باکتری‌های مفید با تخمیر فیبرهای غذایی، اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر مانند بوتیرات، پروپیونات و استات تولید می‌کنند. این متابولیت‌ها نقش مهمی در تنظیم پاسخ‌های ایمنی دارند (۴).

بوتیرات: مهار مسیر التهابی NF-κB در سلول‌های تاندون و لیگامان → کاهش خطر تاندینوپاتی مزمن. همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که غلظت‌های پایین بوتیرات سدیم می‌تواند با

بیشتر معطوف به تأثیر تمرین بر ترکیب میکروبی بود. اما امروز، درک معکوس این رابطه، یعنی تأثیر میکروبیوم بر عملکرد ایمنی ورزشکار، انقلابی در رویکردهای پیشگیرانه ایجاد کرده است. آسیب‌های ورزشی، چه از نوع حاد و چه ناشی از استفاده مکرر، اغلب ریشه در التهاب مزمن، پاسخ ایمنی نابسامان و اختلال در ترمیم بافت دارند. جالب اینجاست که میکروبیوم روده، به‌عنوان «تنظیم‌گر بزرگ التهاب و ایمنی»، می‌تواند نقش کلیدی در تعدیل این فرایندها ایفا کند (۲).

شیوع آسیب‌های اسکلتی-عضلانی در جمعیت جهانی قابل توجه است و تخمین زده می‌شود که نزدیک به یک‌سوم افراد در طول زندگی خود حداقل یک آسیب از این نوع را تجربه کنند (۳). این آسیب‌ها نه تنها بر ورزشکاران حرفه‌ای، بلکه بر افراد عادی، کارگران و سالمندان نیز تأثیر می‌گذارد. بنابراین، یافتن راه کارهای نوین برای پیشگیری و بهبود روند ترمیم این آسیب‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (۱).

هدف این مقاله مروری، گردآوری و تحلیل شواهد موجود درباره نقش میکروبیوم در پیشگیری از آسیب‌های ورزشی و ارائه دیدگاهی جامع برای کاربرد بالینی آن است.

افزایش رگزایی (آنژیوژنز) به ترمیم آسیب‌های تاندون-استخوان کمک کند.

پروپیونات: تنظیم بازسازی استخوان از طریق افزایش فاکتور رشد شبه‌انسولین-۱ (IGF-1) → تسريع ترميم ريزشكستگی‌ها. استات: تأمین انرژی برای سلول‌های عضلانی → کاهش خستگی و آسیب ناشی از خستگی.

۲- حفظ یکپارچگی سد روده:

ورزش‌های شدید و طولانی‌مدت می‌توانند با کاهش جریان خون اسپلانکتیک، به سد روده آسیب زده و باعث افزایش نفوذپذیری روده (نشت روده) شوند. این وضعیت به لیپوپلی ساکاریدها (LPS) و سایر اندوتوکسین‌ها اجازه ورود به جریان خون را داده و پاسخ التهابی سیستمیک را تحریک می‌کند (۲).

۳- تعدیل سیتوکین‌ها:

برخی سویه‌های باکتریایی مانند *Lactobacillus* و *Bifidobacterium* دارای اثرات ضدالتهابی هستند و با بهبود یکپارچگی سد روده و مهار رشد باکتری‌های مضر، به کاهش التهاب کمک می‌کنند (۳). مکمل یاری با پروبیوتیک‌ها در ورزشکاران با کاهش زمان خستگی و کاهش سطح آنزیم کراتین کیناز (نشانه‌گر

آسیب عضلانی) همراه بوده است (۳، ۵). همچنین، یک مرور سیستماتیک و متاآنالیز نشان داد که مصرف پروبیوتیک‌ها به‌طور معنی‌داری سطح سیتوکین ضدالتهابی اینترلوکین-۱۰ (IL-10) را پس از ورزش افزایش می‌دهد.

۴- میکروبیوم و سلامت اسکلتی-عضلانی

ارتباط غیرمنتظره‌ای بین میکروبیوم روده و سیستم اسکلتی-عضلانی در سال‌های اخیر آشکار شده است (۶). میکروبیوم از چندین مسیر بر سلامت استخوان، تاندون و عضله تأثیر می‌گذارد:

تأثیر بر ترمیم استخوان:

میکروبیوم با تأثیر بر متابولیسم کلسیم، فعالیت سلول‌های استخوان‌ساز (استئوبلاست‌ها) و تنظیم التهاب، بر فرایند ترمیم شکستگی‌ها تأثیر می‌گذارد. پروپیونات با افزایش IGF-1 به بازسازی استخوان کمک می‌کند (۷).

تأثیر بر سلامت تاندون و لیگامان:

التهاب مزمن، یکی از عوامل اصلی تاندینوپاتی، توسط میکروبیوم و متابولیت‌های آن تعدیل می‌شود. بوتیرات با مهار NF- κ B از التهاب تاندون جلوگیری کرده و به ترمیم آسیب‌های تاندون-استخوان کمک می‌کند (۵).

تأثیر اسیدهای چرب اشباع شده:

مطالعات نشان داده‌اند که اسیدهای چرب اشباع شده (مانند پالمیتات) تأثیر منفی بر بافت‌های همبند دارند. در مدل‌های حیوانی، رژیم غذایی پرچرب با کاهش کلژن تاندون و استخوان و تضعیف خواص مکانیکی آن‌ها همراه بوده است. این یافته اهمیت رژیم غذایی در حفظ سلامت اسکلتی-عضلانی را برجسته می‌کند. (۴، ۶، ۸)

۵- سندرم بیش‌تمرینی (Overtraining Syndrome) و میکروبیوم

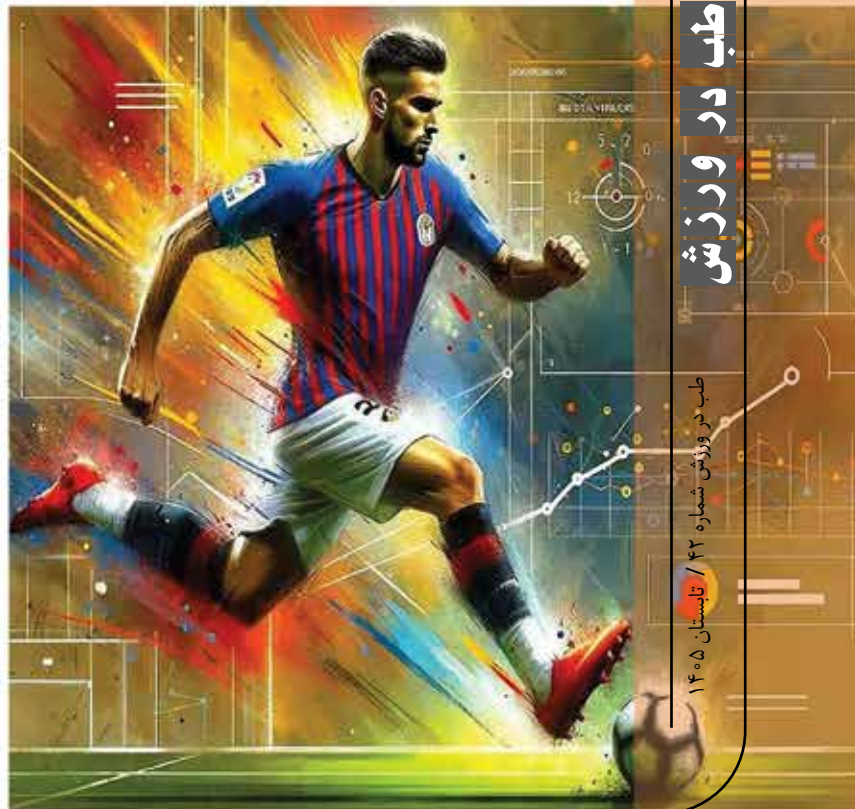
سندرم بیش‌تمرینی (OTS) یکی از چالش‌های جدی در ورزش حرفه‌ای است که با خستگی مزمن، کاهش عملکرد، افزایش آسیب‌پذیری و تضعیف سیستم ایمنی مشخص می‌شود (۸).

نقش میکروبیوم در: OTS

تمرینات افراطی و بدون ریکاوری کافی باعث کاهش تنوع میکروبی، افزایش نفوذپذیری روده، ورود اندوتوکسین‌ها به جریان خون، التهاب مزمن سیستمیک و در نهایت تضعیف تاندون و عضله می‌شود (۹).

اثر U شکل ورزش بر میکروبیوم:

اثر U شکل (U-Shaped Effect) به این معناست که رابطه



بین شدت ورزش و سلامت میکروبیوم روده به صورت یک منحنی U شکل است (۳)؛ یعنی:

در شدت‌های پایین (بی تحرکی یا ورزش بسیار کم) ← میکروبیوم ضعیف و تنوع پایین

در شدت‌های متوسط تا بالا (ورزش منظم و اصولی) ← میکروبیوم قوی و متنوع (نقطه اوج)

در شدت‌های بسیار بالا (بیش تمرینی) ← (Overtraining) میکروبیوم دوباره تضعیف می شود

ورزش با شدت متوسط تا بالا باعث افزایش تنوع میکروبی و تقویت محافظت می شود، در حالی که ورزش بیش از حد (بیش تمرینی) باعث کاهش جمعیت باکتری‌های مفید مانند Bifidobacterium و Ruminococcus و افزایش نفوذپذیری روده می گردد (۱۰).

علائم هشداردهنده OTS مرتبط با میکروبیوم:

• مشکلات گوارشی (نفخ، اسهال)

• خستگی مزمن

• عفونت‌های مکرر تنفسی

• درد عضلانی طولانی تر از حد معمول

۶- شواهد بالینی؛ پروبیوتیک‌ها و کاهش آسیب

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که مصرف پروبیوتیک‌ها می تواند خطر آسیب را کاهش داده و روند بازتوانی را تسریع کند (۱۱):

شواهد انسانی:

• مکملیاری با پروبیوتیک (حداقل ۱۵ میلیارد CFU روزانه به مدت

۲۸ روز) می تواند به کاهش خستگی کمک کند .

• در یک مطالعه دوسوکور تصادفی شده روی ورزشکاران ویلچری، مصرف پروبیوتیک باعث کاهش ۲۵ نشانگر التهابی (از ۳۰ نشانگر اندازه گیری شده) در مقایسه با پری بیوتیک شد .

• پروبیوتیک‌ها با افزایش سطح اینترلوکین-۱۰ (IL-10) پس از ورزش، پاسخ ضدالتهابی را تقویت می کنند .

• سویه‌های خاص مانند Lactobacillus plantarum و Bifidobacterium longum در کاهش نشانگرهای التهابی

پس از تمرین شدید مؤثر بوده اند .

شواهد حیوانی:

• مکملیاری با Lactiplantibacillus plantarum در مدل موش، با افزایش بیان IGF-1 و کاهش بیان ژن‌های آتروفی عضلانی Atrogin-1 و MuRF1، به افزایش قدرت و استقامت عضلانی منجر شده است (۳) .

• Bifidobacterium animalis با مهار مسیر NF- K B به کاهش التهاب کمک کرده است (۷) .

• Limosilactobacillus fermentum با کاهش سیتوکین‌های TNF-α ، IL-6 و Hsp60، از تحلیل عضلانی جلوگیری کرده است (۴) .

۷- نقش پری بیوتیک‌ها و فیبر

پری بیوتیک‌ها، ترکیبات غیرقابل هضمی هستند که به عنوان سوبسترای باکتری‌های مفید عمل کرده و رشد آن‌ها را تقویت می کنند . فیبر غذایی مهم ترین منبع پری بیوتیک است (۱۲) .

مکانیسم اثر:

مرحله	فرآیند	جزئیات مکانیسمی
۱	فیبر رژیمی	منابع: جو دوسر، تخم کتان، سیب زمینی شیرین، پیاز، سیر، کنگر فرنگی
۲	تخمیر توسط میکروبیوم روده	افزایش جمعیت باکتری‌های مفید: <i>Rumino- .Lactobacillus .Bifidobacterium coccus</i>
۳	تولید اسیدهای چرب کوتاه زنجیر (SCFA)	• بوتیرات ← مهار NF-κB ← کاهش التهاب تاندون • پروپیونات ← افزایش IGF-1 ← تسریع بازسازی استخوان • استات ← تأمین انرژی سلول‌های عضلانی ← کاهش خستگی
۴	کاهش التهاب سیستمیک	↓ TNF-α، ↓ IL-6، ↑ IL-10، مهار مسیر التهابی NF-κB
۵	محافظت از تاندون و لیگامان	کاهش خطر تاندینوپاتی مزمن، تسریع ترمیم بافت آسیب دیده، کاهش آسیب پذیری ورزشی

شواهد:

- پری بیوتیک‌ها مانند لاکتولوز و اینولین با افزایش باکتری‌های مفید و کاهش سطح $TNF-\alpha$ و افزایش IL-10، اثر ضدالتهابی دارند (۹).
- منابع غنی از فیبر پری بیوتیک شامل جو دوسر، تخم‌کتان، سیب‌زمینی شیرین، پیاز، سیر و کنگر فرنگی هستند که رشد باکتری‌های تولیدکننده بوتیرات را تقویت می‌کنند.

۸- پست بیوتیک‌ها؛ نسل بعدی مداخلات

پست بیوتیک‌ها، متابولیت‌های تولیدشده توسط باکتری‌های مفید هستند، مانند بوتیرات، پروپیونات و استات (۱۲).

مزایا نسبت به پروبیوتیک‌ها:

- نیاز به باکتری زنده ندارند.
- اثر مستقیم و سریع‌تر دارند.
- خطر عفونت در افراد دارای نقص ایمنی را ندارند.

شواهد:

- بوتیرات با مهار NF- κ B، التهاب تاندون و لیگامان را کاهش می‌دهد.
- پروپیونات با افزایش IGF-1، ترمیم عضله پس از آسیب را تسریع می‌کند.

۹- تفاوت‌های جنسیتی؛ نکته مهم

پاسخ به مداخلات میکروبیوم‌محور در مردان و زنان متفاوت است. هورمون‌های جنسی، ترکیب میکروبیوم را تحت تأثیر قرار می‌دهند و تفاوت در متابولیسم فیبر و پاسخ التهابی میان دو جنس مشاهده شده است. بنابراین، تجویز پروبیوتیک یا پری بیوتیک باید با در نظر گرفتن جنسیت شخصی‌سازی شود (۲).

۱۰- چک‌لیست عملی برای ورزشکاران و مربیان

۱. مصرف روزانه منابع فیبر پری بیوتیک (سبزیجات، میوه‌ها، غلات کامل).
۲. گنجاندن غذاهای تخمیری حاوی پروبیوتیک طبیعی (ماست،

کفیر، ترکی).

۳. توجه به علائم گوارشی و خستگی مزمن به‌عنوان نشانه‌های اولیه دیس‌بیوزیس.

۴. در نظر گرفتن مکملیاری با پروبیوتیک‌های سویه‌دار در دوره‌های فشار تمرینی بالا (حداقل ۱۵ میلیارد CFU روزانه به‌مدت ۴ هفته).

۵. پایش دوره‌ای ترکیب میکروبیوم در صورت دسترسی، به‌ویژه در ورزشکاران مستعد آسیب (۱۱).

۱۱- سه پیام اصلی برای پیشگیری از آسیب

✓ میکروبیوم سالم = التهاب کمتر = بافت همبند قوی‌تر
اسیدهای چرب کوتاه‌زنجیر حاصل از فیبر، پاسخ التهابی را تنظیم می‌کنند.

✓ پروبیوتیک‌ها می‌توانند خطر آسیب را کاهش دهند
از طریق کاهش $TNF-\alpha$ ، حفظ توده عضلانی و بهبود ترمیم استخوان.

✓ پایش میکروبیوم = ابزاری نوین برای پیشگیری از OTS
تغییرات میکروبی می‌تواند نشانه هشداردهنده زودهنگام بیش‌تمرینی باشد.

نتیجه‌گیری

میکروبیوم روده به‌عنوان یک عضو مجازی و تأثیرگذار، جایگاه خود را در پزشکی ورزشی تثبیت کرده است. شواهد نشان می‌دهد که ترکیب و عملکرد میکروبیوم نه‌تنها بر عملکرد ورزشی، بلکه بر میزان آسیب‌پذیری و سرعت بازتوانی تأثیر مستقیم دارد. رویکردهای مبتنی بر تعدیل میکروبیوم از طریق تغذیه، پروبیوتیک‌ها، پری بیوتیک‌ها و حتی پست بیوتیک‌ها، افق جدیدی در پیشگیری از آسیب‌های ورزشی گشوده‌اند. بااین حال، نیاز به کارآزمایی‌های بالینی گسترده‌تر با جمعیت‌های مختلف ورزشی و در نظر گرفتن تفاوت‌های فردی، جنسیتی و گونه‌های ورزشی، همچنان به‌قوت باقی است.



References

1. Zhang Xe, Li Y, Zhang F, Zhou G. Exercise and Diet Reshape Athletes' Gut Microbiota: Countering Health Challenges in Athletes. *Life*. 2025;15(12):1812.
2. Dinetz E, Bocharova N. Inflammation in elite athletes: a review of novel factors, the role of microbiome, and treatments for performance longevity. *Cureus*. 2024;16(10).
3. La Placa G, Covino M, Candelli M, Gasbarini A, Franceschi F, Merra G. The impact of microbiota on musculoskeletal injuries. *Cells*. 2025;14(7):554.
4. Lin RT, Osipov B, Steffen D, Chamberlin M, Pathak SJ, Christiansen BA, et al. Saturated fatty acids negatively affect musculoskeletal tissues in vitro and in vivo. *Matrix Biology Plus*. 2024;23:100153.
5. Liu D, Andrade SP, Castro PR, Treacy J, Ashworth J, Slevin M. Low concentration of sodium butyrate from ultrabraid+ NaBu suture, promotes angiogenesis and tissue remodeling in tendon-bones injury. *Scientific reports*. 2016;6(1):34649.
6. Kearns R, Dooley J, Matthews M, McNeilly A. Do probiotics mitigate GI-induced inflammation and perceived fatigue in athletes? A systematic review. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2024;21(1):2388085.
7. Aparicio-Pascual D, Clemente-Suárez VJ, Tornero-Aguilera JF, Rubio-Zarapuz A. The effect of probiotic supplementation on cytokine modulation in athletes after a bout of exercise: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine-Open*. 2025;11(1):58.
8. Błaszczyński G, Nowotarska A, Nojek P, Pawlik W, Zimoniczyk M, Zawół M. Examining the Effects of Probiotics on Athletes: A Review. *Journal of Education, Health and Sport*. 2024;75:56190-.
9. Zhao Z, Zhao S, Li W, Lai Z, Zhou Y, Guan F, et al. Gut Microbiota and Exercise-Induced Fatigue: A Narrative Review of Mechanisms, Nutritional Interventions, and Future Directions. *Nutrients*. 2026;18(3):502.
10. Pane M, Amoroso A, Deidda F, Graziano T, Allesina S, Mogna L. Gut microbiota, probiotics, and sport: From clinical evidence to agonistic performance. *Journal of clinical gastroenterology*. 2018;52:S46-S9.
11. Valido E, Capossela S, Glisic M, Hertig-Godeschalk A, Bertolo A, Stucki G, et al. Gut microbiome and inflammation among athletes in wheelchair in a crossover randomized pilot trial of probiotic and prebiotic interventions. *Scientific Reports*. 2024;14(1):12838.
12. Şahin-Demirci K, Dal N, Gönen-Çolak B, Akman O, Raposa B, Ağagündüz D. The role of biotics and bioactive compounds in sports injuries: a narrative review. *Frontiers in Nutrition*. 2026;13:1813030.



بررسی مهارت‌های تصویرسازی و کنترل ترس در بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای

دکترهادی میری

استادیار گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر غلامرضا نوروزی

دکترای حرفه‌ای پزشکی، دکترای آسیب‌شناسی ورزشی و حرکات اصلاحی و رئیس فدراسیون پزشکی ورزشی

علی دروکی

کارشناس ارشد آسیب‌شناسی ورزشی و حرکات اصلاحی دانشگاه رجاء قزوین

چکیده

هدف: هدف از این پژوهش بررسی مهارت‌های تصویرسازی و کنترل ترس در بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای بود. **روش‌شناسی تحقیق:** پژوهش حاضر به لحاظ هدف کاربردی و به لحاظ روش از نوع توصیفی-همبستگی می‌باشد. روش جمع‌آوری اطلاعات پیمایشی است. جامعه آماری پژوهش شامل کلیه بازیکنان حرفه‌ای فوتبال ایران بود. به‌منظور تعیین نمونه آماری تحقیق ۶۰ نفر به‌صورت تصادفی از کل بازیکنان حرفه‌ای فوتبال ایران انتخاب شدند. جهت گردآوری

داده‌ها از پرسشنامه مهارت‌های ذهنی واعظ موسوی (۱۳۷۹) و پرسشنامه آسیب‌شناسی طب ورزشی استرالیا استفاده شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از آمار توصیفی جهت تحلیل ویژگی‌های جمعیت شناختی استفاده شد در بخش استنباطی

از آزمون ضریب همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای با استفاده از نرم‌افزار spss نسخه ۲۶ استفاده شد. **یافته‌ها:** نتایج ضریب همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای نشان داد بین کنترل ترس ($p=0/685$)، تصویرسازی ($p=0/740$) و بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای رابطه معنی‌داری وجود ندارد. **نتیجه‌گیری:** در این مطالعه اگرچه نشان داده شد که تصویرسازی و کنترل ترس در بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای تأثیر معناداری ندارد ولی مدیریت و بهبود عوامل روانشناختی می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد پیشگیرانه در کاهش بروز آسیب‌های

ورزشی مؤثر باشد.

واژگان کلیدی: تصویرسازی،

فوتبالیست‌های حرفه‌ای،

آسیب‌های ورزشی، کنترل

ترس

۰۱ مقدمه

بررسی رابطه بین متغیرهای

روانشناختی و آسیب‌ها اهمیت



آمادگی روان‌شناختی را برای سلامت روحی و جسمی ورزشکار، ارائه درک جامعی از مداخله روان‌شناختی و مراقبت از آسیب‌ها در ورزش با رویکرد زیست‌روانی-اجتماعی نشان داده است. تحقیقات متعددی شواهدی مبنی بر وابستگی آسیب‌ها به حالات هیجانی منفی مانند اضطراب و ترس در مواجهه با استرس‌های فعالیت ورزشی به دست آورده‌اند [۱].

اکنون این‌یک واقعیت غیرقابل‌انکار است که صدمات ورزشی ماهیت پیچیده و چند علتی دارند و همچنین پیامدهای منفی آن بر سلامت و عملکرد ورزشی افرادی که از آن رنج می‌برند، می‌باشد. ارتباط عوامل فیزیکی و فنی با آسیب‌ها اگرچه از اولین مطالعات تا به امروز یک حوزه تحقیقاتی گسترده است، اما در رابطه با عوامل روانی به شکل مشابهی اتفاق نیفتاده است، زیرا از آغاز تحقیقات در دهه ۷۰ قرن گذشته، واگرا بوده است [۲].

روانشناسی با وجود اینکه «مدل استرس و آسیب» اندرسن (۱۹۸۸) تحقیق را هدایت می‌کند، به روش‌های مختلف به مطالعه آسیب‌های ورزشی می‌پردازد. اگرچه توسط جامعه علمی تشخیص داده‌شده است که برخی عوامل روانی با آسیب‌ها مرتبط هستند، اما این رابطه می‌تواند به شکل خاصی نیز رخ دهد، زیرا همان عامل در جمعیت‌های مختلف نتایج متفاوتی را نشان داده است، بسته به رشته ورزشی، میزان تخصص ورزشکاران، سیستم‌های تمرینی و مسابقه‌ای، ابزارهای روان‌تشخیصی، رویه‌های تحلیلی و بسیاری عوامل دیگر که در اثربخشی ویژگی‌های روانی بر آسیب‌های احتمالی اثرگذارند [۳].

با این حال، توسعه سریع تحقیقات علمی در مورد این موضوع منجر به ایجاد خطوط تحقیقاتی بسیار خاصی شده است که توسط یافته‌های مرتبط متعدد پشتیبانی می‌شود که به گروهی از کارشناسان کمیته بین‌المللی المپیک اجازه داده است تا به یک اجماع کلی در مورد عوامل خطر دست یابند؛ که در آن نقش فرآیندهای روانی در پیکربندی آسیب‌پذیری در برابر آسیب‌ها به رسمیت شناخته‌شده است [۴].

مهارت‌های تصویرسازی و کنترل ترس در بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای، یکی از موضوعات مهم و پربحث در حوزه ورزش است. ورزشکاران حرفه‌ای، با شرایط سخت و نامطلوبی روبرو هستند که ممکن است باعث بروز آسیب‌های جدی در آنان شود. برای جلوگیری از بروز آسیب‌های ورزشی، مهارت‌های تصویرسازی و کنترل ترس در ورزشکاران حائز اهمیت است [۵].

تصویرسازی استفاده از تصورات در اجرا و پیشرفت مهارت‌های ورزشی مبحث جدیدی است که برنامه‌های تمرینی مربیان رشته‌های مختلف ورزشی را به خود اختصاص داده است و از این برنامه عمده در سطوح مختلف یادگیری (مقدماتی، متوسطه و پیشرفته) استفاده می‌شود و به‌طور کلی یک عامل مهم در جنبه‌های مختلف روان‌شناسی ورزشی محسوب می‌شود. روان‌شناسان ورزشی اخیراً ثابت کرده‌اند که تصویرسازی ذهنی، می‌تواند در توسعه و ظرفیت مهارت‌های روانی و کاهش آسیب‌های ورزشی مؤثر باشد، به‌طور مثال تصویرسازی ذهنی می‌تواند تمرکز را بهبود بخشد، اضطراب را کاهش دهد و موجب بالا رفتن اطمینان شود، همچنین در اثرگذاری بر روی کلیه مهارت‌های روانی مؤثر در اجرا مفید بوده و وسیله‌ای برای تمرین و یادگیری مهارت‌های روانی متنوع می‌باشد [۶].



تحقیقات اورلیک و پارتینگتون^۱ (۱۹۸۸) نشان داده است که ۹۹٪ از ۲۳۵ بازیکن المپیک از تصویرسازی ذهنی به عنوان یک راهبرد آماده سازی استفاده کرده اند، این بازیکنان حداقل روزی یکبار و چهار روز در هفته و حدود ۱۲ دقیقه در هر مرتبه، تصویرسازی منظم از بازی را، از پیش برنامه ریزی کرده اند [۷]. امروزه استفاده از تصویرسازی ذهنی در بسیاری از موارد کاربرد دارد. هر شخص در هر موقعیت شغلی و سنی که قرار دارد به روش های مختلف از آن استفاده می کند. شواهد قابل توجهی در دسترس است که نقش تصویرسازی را در تسهیل یادگیری به طور اعم و یادگیری مهارت های بدنی به طور اخص تأکید می کند. به طوری که روان شناسان یکی از عوامل مؤثر بر یادگیری را داشتن تصویر ذهنی واضح می دانند [۸]. تصویرسازی اجرای ورزشی را در گروه وسیعی از ورزش ها مثل بسکتبال فوتبال هاکی شیرجه و گلف بهبود می بخشد. تمرینات تصویرسازی به تنهایی یا به صورت مکمل تمرین بدنی برای هر دو گروه ورزشکاران نخبه و مبتدی مؤثر است. تصویرسازی به دلایل متعددی مورد استفاده قرار گرفته است که بهبود اجرا را می توان رایج ترین و موجه ترین انگیزه برای کاربرد آن دانست [۹].

بنابراین تصویرسازی، یک روش روانشناسی است که برای کمک به ورزشکاران در بهبود عملکرد و کاهش ترس و استرس، استفاده می شود. با استفاده از تصویرسازی، ورزشکاران می توانند به بهترین شکل ممکن برای اجرای حرکات خود آماده شوند و از بروز آسیب های ورزشی جلوگیری کنند [۱۰].

عامل روانی دیگری که بر کاهش آسیب های ورزشی اثرگذار است کنترل ترس است، کنترل ترس، توانایی مدیریت و کنترل

1. Orlik & Partigton

واکنش ترس در یک روش سالم و مفید است. ترس یک احساس طبیعی است که برای بقا ضروری است، زیرا به ما هشدار می دهد که خطری وجود دارد و به ما کمک می کند که با پاسخ مناسب به آن واکنش نشان دهیم. با این حال، وقتی ترس بیش از حد یا بی ربط می شود، می تواند با زندگی روزمره ما تداخل کند و به اختلالات اضطراب منجر شود. چندین تکنیک و روش برای کنترل ترس وجود دارد. این شامل: ۱. بازسازی شناختی: این شامل شناسایی و تغییر الگوهای منفی فکری است که به ترس و اضطراب کمک می کنند. به عنوان مثال، به جای فکر کردن «من نمی توانم با این شرایط روبرو شوم»، ممکن است فکر کنید «من مهارت ها و منابع لازم برای مقابله با این شرایط را دارم». ۲. درمان نمایشی: این شامل تدریجی مواجه شدن با شرایط یا محرک های ترسناک در یک محیط کنترل شده است که به فرد اجازه می دهد تا در طول زمان به واکنش ترس عادت کند. ۳. تکنیک های آرامش: این شامل تنفس عمیق، آرامش عضلانی تدریجی و مدیتیشن ذهنی است که می تواند به کاهش علائم فیزیکی ترس مانند تپش قلب و عرق سرد کمک کند. ۴. جستجوی حمایت: صحبت با یک دوست، خانواده یا متخصص روانشناسی می تواند حمایت عاطفی و راهنمایی در مدیریت ترس فراهم کند [۱۱].

مهم است که به یاد داشته باشید که کنترل ترس به معنای حذف ترس به طور کامل نیست. بلکه، شامل توسعه مهارت ها و منابع لازم برای مدیریت ترس به روش سالم و مفید است. با تمرین و پشتکار، افراد می توانند به کنترل واکنش ترس خود بپردازند و زندگی پرمحتوایی را داشته باشند از نظر آثار فیزیولوژیکی، ترس و اضطراب باهم تفاوتی ندارند اما ترس یک تهدید فیزیکی و اختصاصی است در حالی که اضطراب واکنشی است عمومی در برابر



تهدیدهایی که جنبه شخصی دارند، اموری که برای آدمی جنبه خصوصی دارند و به همین دلیل اضطراب آورند [۱۲].

به اعتقاد آلن راس^۲، اضطراب ترس نیست، عکس العمل‌های فیزیولوژیکی بدن نسبت به اضطراب و ترس یکسان و یا خیلی شبیه هم هستند. نخستین اختلاف ترس و اضطراب این است که ترس یک عامل مشخص و عینی دارد، فرد می‌داند که از چیزی می‌ترسد. این عامل ممکن است چیزی باشد که در زمان اضطراب یک عامل مشخص و عینی ندارد. اضطراب یک حالت مبهم و نامعلوم است، یک احساس تعمیم‌یافته از رنج و ناراحتی و یا ترس و هراس است که فرد اغلب قادر به توضیح و تفسیر آن نیست [۱۳]. بنابراین ترس، یکی از عوامل مهم در بروز آسیب‌های ورزشی است. ورزشکاران باتجربه ترس، ممکن است در عملکرد خود محدود شوند و در نتیجه، باعث بروز آسیب‌های ورزشی شوند. برای کنترل ترس، ورزشکاران می‌توانند از روش‌های مختلفی مانند تکنیک‌های تنفسی، تکنیک‌های تصویرسازی و روش‌های مختلف دیگر استفاده کنند. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از تصویرسازی و کنترل ترس، می‌تواند به بهبود عملکرد ورزشکاران و کاهش بروز آسیب‌های ورزشی کمک کند. در یکی از مطالعات، نتایج نشان داد که تصویرسازی می‌تواند به بهبود عملکرد ورزشکاران در حین بازی کمک کند و در نتیجه، بروز آسیب‌های ورزشی را کاهش دهد [۱۴]. با توجه به مطالب بیان‌شده محقق در این پژوهش در پی پاسخ به این سؤال است که آیا مهارت‌های تصویرسازی و کنترل ترس در بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای تأثیر دارد؟

۲. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نوع توصیفی و همبستگی از لحاظ هدف کاربردی بود. شرکت‌کنندگان در پژوهش شامل کل بازیکنان حرفه‌ای فوتبال ایران بودند که از بین آن‌ها تعداد ۶۰ نفر به صورت تصادفی از کل بازیکنان حرفه‌ای فوتبال ایران انتخاب شدند و در فرایند پژوهش شرکت کردند و به منظور گردآوری داده‌ها، از پرسشنامه مهارت‌های ذهنی استفاده شد، این آزمون از جامع‌ترین آزمون‌های آمادگی روانی ورزشکاران است که دوازده مهارت روانی را در سه دسته مهارت‌های روانی پایه (هدف‌گزینی، تعهد و اعتماد به نفس)، مهارت‌های روان‌تنی (واکنش به استرس، کنترل ترس، آرمیدگی و نیرو بخشی) و مهارت‌های شناختی (تمرکز، بازیافت تمرکز، تصویرسازی، تمرین ذهنی و طرح مسابقه) اندازه‌گیری می‌کند.

2. Allen Russ

این پرسشنامه شامل ۴۸ سؤال است که به صورت مقیاس لیکرت ۷ سطحی است. در مقابل هر جمله گزینه‌های کاملاً مخالف، مخالف تا حدی مخالف، موافق، موافق تا حدی موافق، کاملاً موافق قرار دارد که به ترتیب امتیازات ۱ تا ۷ تعلق می‌گیرد. آزمودنی‌ها بر اساس وضعیت فعلی یا گذشته خود در رقابت‌ها و تمرینات به یکی از این هفت گزینه پاسخ می‌دهند. سؤالات مربوط به واکنش به استرس، کنترل ترس، تمرکز و بازیافت تمرکز به صورت معکوس نمره‌گذاری می‌شوند. همچنین از پرسشنامه آسیب‌شناسی طب ورزشی استرالیا که سوابق آسیب ورزشکاران از طریق آن شد.

پس از جمع‌آوری داده‌های خام برای تعیین طبیعی بودن توزیع داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها در بخش‌های آمار توصیفی یعنی فراوانی، درصد، میانگین و انحراف استاندارد و آمار استنباطی یعنی همبستگی دو رشته‌ای دو نقطه‌ای با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS₂₆ انجام شد.

۳. یافته‌ها

ابتدا اطلاعات توصیفی به دست آمده از تحقیق مانند سطح آزمودنی‌ها، عوامل روانشناختی و بروز آسیب ورزشی و در بخش دوم فرضیه‌های تحقیق با استفاده از آزمون‌های آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

اطلاعات مربوط به سطح آزمودنی‌ها

جداول ۱ اطلاعات مربوط به سطح آزمودنی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱ - اطلاعات مربوط به سطح آزمودنی‌ها

سطح	تعداد	درصد
ملی	۷۱	۶۴/۵
لیگ برتر	۳۹	۳۵/۵
مجموع	۱۱۰	۱۰۰

اطلاعات مربوط به بروز آسیب‌های ورزشی آزمودنی‌ها
جداول ۲ اطلاعات مربوط به بروز آسیب‌های ورزشی آزمودنی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲ - اطلاعات مربوط به بروز آسیب‌های ورزشی آزمودنی‌ها

آسیب‌های ورزشی	تعداد	درصد
دارد	۱۰۰	۹۰/۹۰
ندارد	۱۰	۹/۰۹
مجموع	۱۱۰	۱۰۰

جداول ۳ اطلاعات مربوط به نوع آسیب‌های ورزشی آزمودنی‌های دارای آسیب را نشان می‌دهد.

جدول ۳- اطلاعات مربوط به نوع آسیب‌های ورزشی آزمودنی‌ها دارای آسیب

نوع آسیب	تعداد	درصد
مینیسک	۹	۸/۲
التهاب / ورم	۱۵	۱۳/۶
کشیدگی عضله	۳۰	۲۷/۳
کوفتگی	۹	۸/۲
شکستگی استخوان	۱۰	۹/۱
در رفتگی	۱۳	۱۱/۸
پارگی رباط	۱۴	۱۲/۷
مجموع	۱۰۰	۱۰۰

جداول ۴ اطلاعات مربوط به شدت آسیب‌های ورزشی آزمودنی‌های دارای آسیب را نشان می‌دهد.

جدول ۴- اطلاعات مربوط به شدت آسیب‌های ورزشی آزمودنی‌ها دارای آسیب

شدت آسیب	تعداد	درصد
شدید	۳۲	۲۹/۱
متوسط	۴۴	۴۰
خفیف	۲۴	۲۱/۸
مجموع	۱۰۰	۱۰۰

جداول ۵ اطلاعات مربوط به ناحیه آسیب‌های ورزشی آزمودنی‌های دارای آسیب را نشان می‌دهد.

جدول ۵- اطلاعات مربوط به ناحیه آسیب‌های ورزشی آزمودنی‌ها دارای آسیب

نوع آسیب	تعداد	درصد
زانو	۲۲	۲۰
ساق پا	۶	۵/۵

ران	۱۸	۱۶/۴
مچ پا	۳۳	۳۰
مچ دست	۵	۴/۵
لگن	۶	۵/۵
انگشت دست	۷	۶/۴
شانه	۳	۲/۷
مجموع	۱۰۰	۱۰۰

اطلاعات مربوط به عوامل روانشناختی آزمودنی‌ها

جداول ۶ اطلاعات مربوط به عوامل روانشناختی آزمودنی‌ها شامل کنترل ترس و تصویرسازی را نشان می‌دهد.

جدول ۶- اطلاعات مربوط به عوامل روانشناختی آزمودنی‌ها

عوامل روانشناختی	میانگین	انحراف معیار
کنترل ترس	۱۴/۰۸	۵/۸۲
تصویرسازی	۳۲/۶۱	۳/۷۸

بین کنترل ترس و بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای رابطه معنی‌داری وجود دارد.

با توجه به اینکه متغیر کنترل ترس کمی و متغیر بروز آسیب‌های ورزشی اسمی دو ارزشی است، جهت بررسی ارتباط بین این دو متغیر از آزمون ضریب همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای استفاده می‌کنیم.

بنابراین با توجه نتیجه آزمون ضریب همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای ارائه‌شده در جدول ۷ مشاهده می‌شود که بین کنترل ترس و بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای رابطه معنی‌داری وجود ندارد. پس فرض صفر مبنی بر عدم ارتباط معنی‌دار بین کنترل ترس و بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای تأیید می‌شود.

جدول ۷- ارتباط کنترل ترس و بروز آسیب‌های ورزشی

متغیرها	تعداد	ضریب همبستگی	p
کنترل ترس-بروز آسیب	۱۱۰	۰/۰۳۹	۰/۶۸۵

بین تصویرسازی و بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای رابطه معنی‌داری وجود دارد.

با توجه به اینکه متغیر تصویرسازی کمی و متغیر بروز آسیب‌های ورزشی اسمی دو ارزشی است، جهت بررسی ارتباط بین این دو متغیر از آزمون ضریب همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای استفاده می‌کنیم.

بنابراین با توجه نتیجه آزمون ضریب همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای ارائه شده در جدول ۸ مشاهده می‌شود که بین تصویرسازی و بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای رابطه معنی‌داری وجود ندارد. پس فرض صفر مبنی بر عدم ارتباط معنی‌دار بین تصویرسازی و بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای تأیید می‌شود.

جدول ۸- ارتباط تصویرسازی و بروز آسیب‌های ورزشی

متغیرها	تعداد	ضریب همبستگی	p
تصویرسازی-بروز آسیب	۱۱۰	۰/۰۳۲	۰/۷۴۰

۴. بحث و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی عوامل روانشناختی (تصویرسازی و کنترل ترس) در بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای بود. به جهت اینکه بتوان نتایج پژوهش را بر اساس مفاهیم علمی منطبق نمود بایستی ضمن تحلیل داده‌ها به همخوانی آن‌ها با نتایج تحقیقات دیگران پرداخته و مورد بحث و بررسی قرار داد. در این قسمت به تحلیل داده‌ها و انطباق و یا عدم انطباق آن‌ها با توجه به مبانی نظری و پیشینه تحقیقات که با موضوع پژوهش ارتباط دارند، پرداخته شده است.

نتایج آزمون ضریب همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای نشان داد که بین کنترل ترس و بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای رابطه معنی‌داری وجود ندارد ($p=0/685$).

نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های موجود همخوانی ندارد از جمله کوپست و سیلبرناگل (۲۰۲۲) در پژوهشی دریافتند ترس از آسیب مجدد همراه با ترس از عدم توانایی بازگشت به ورزش در بالاترین سطح عملکرد خود موجب آسیب‌های ورزشی می‌شود [۱۵]. همچنین دی پرو و همکاران (۲۰۱۳) دریافتند ترس از آسیب و خودکارآمدی به ترتیب ۴۳٪ و ۶۸٪ از واریانس اضطراب ورزشکار را تبیین کردند. یافته‌های حاضر نشان می‌دهد که خودکارآمدی سطح اضطراب ورزشکاران را کاهش می‌دهد و تأثیرات ترس از آسیب را بر اضطراب قبل از مسابقه آن‌ها واسطه می‌کند، با ورزشکارانی که ترس کمتری از آسیب‌دیدگی را تجربه

می‌کنند و به توانایی‌های فنی خود اطمینان بیشتری دارند و بنابراین درجه کمتری از اضطراب قبل از رقابت نشان می‌دهند [۱۶]. این تفاوت‌ها و تناقضات ممکن است به نوع ورزش، جامعه هدف (آزمودنی‌های حرفه‌ای و مبتدی همچنین جنسیت آنان) و همچنین ابزار مورد سنجش نسبت داده شود.

کنترل ترس یکی از جنبه‌های ضروری پیشگیری از آسیب‌های ورزشی و توان بخشی است. ورزشکارانی که از آسیب دیدن می‌ترسند ممکن است بیش از حد محتاط شوند که می‌تواند بر عملکرد آن‌ها تأثیر منفی بگذارد. برعکس، ورزشکارانی که ترس‌های خود را نادیده می‌گیرند و بیش از حد به خود فشار می‌آورند، ممکن است بیشتر در معرض آسیب باشند [۱۷]. ترس همچنین می‌تواند بر بهبودی ورزشکار پس از آسیب تأثیر بگذارد. ترس از آسیب‌دیدگی مجدد یا ترس از بازگشت عملکرد در همان سطح قبل از آسیب می‌تواند باعث شود ورزشکار در طول توان بخشی عقب بماند و منجر به پیشرفت کندتر یا حتی آسیب مجدد شود [۱۸، ۱۹].

همچنین نتایج آزمون ضریب همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای نشان داد که بین تصویرسازی و بروز آسیب‌های ورزشی در فوتبالیست‌های حرفه‌ای رابطه معنی‌داری وجود ندارد ($p=0/740$). نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های موجود همخوانی ندارد از جمله یک مطالعه توسط هلمز و کالینز (۲۰۰۱) نقش تصویرسازی ذهنی را در بروز آسیب‌های ورزشی در بین ورزشکاران نخبه بررسی کرد. آن‌ها دریافتند که ورزشکارانی که سطوح بالاتری از تصاویر منفی را گزارش می‌کنند، مانند تصور مجروح شدن یا تجربه درد، احتمال بیشتری دارد که آسیب‌های ورزشی را تحمل کنند. این نشان می‌دهد که تصورات ذهنی منفی ممکن است به افزایش خطر آسیب کمک کند [۲۰]. مطالعه دیگری توسط آروین بارو و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی استفاده از تصویرسازی ذهنی در توان بخشی آسیب در بین ورزشکاران آسیب‌دیده پرداخت. آن‌ها دریافتند که ورزشکارانی که از تصویرسازی ذهنی به عنوان بخشی از فرآیند توان بخشی خود استفاده می‌کردند، در مقایسه با کسانی که از تصویرسازی ذهنی استفاده نمی‌کردند، سطوح پایین‌تری از درد و سطح اعتماد به نفس بالاتری را گزارش کردند. این نشان می‌دهد که تصویرسازی ذهنی می‌تواند ابزار مفیدی برای ورزشکارانی باشد که از آسیب‌ها بهبود می‌یابند. به طور کلی، این مطالعات نشان می‌دهد که تصویرسازی ذهنی می‌تواند در بروز و پیشگیری از آسیب‌های ورزشی نقش داشته باشد [۲۱]. این تفاوت‌ها و تناقضات ممکن است به نوع ورزش، جامعه هدف (آزمودنی‌های حرفه‌ای و مبتدی همچنین جنسیت آنان) و همچنین ابزار مورد سنجش نسبت داده شود.

References

- 1- Garit, J. R., Surita, Y. P., de Armas Paredes, M. M., & Méndez, L. R. (2021). Relationship between psychological variables and sports injuries in baseball pitchers. *Revista PODIUM*, 16(1), 168-186.
- 2- Andreu, J. M. P., Palmeira, A. L., & Zafra, A. O. (2015). Ansiedad competitiva, competitividad y vulnerabilidad a la lesión deportiva: perfiles de riesgo. *Revista iberoamericana de psicología del ejercicio y el deporte*, 10(2), 293-300.
- 3- Andersen, M. B., & Williams, J. M. (1988). A Model of Stress and Athletic Injury: Prediction and Prevention. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 10(3), 294-306.
- 4- García, R. F., Ortega, F. Z., Girela, D. L., Sandoval, J. A., Fuente, F. P. de la, & Manrique, M. L. (2014). Relación entre la ansiedad estado/ rasgo, posición en el terreno de juego y ocurrencia de lesiones deportivas. *Universitas psychologica*, 13(2), 433-441.
- 5- Hatzigeorgiadis, A., Zourbanos, N., Galanis, E., & Theodorakis, Y. (2011). Self-talk and sports performance: A meta-analysis. *Perspectives on Psychological Science*, 6(4), 348-356.
- 6- Martin, K. A., & Hall, C. R. (1995). Using mental imagery to enhance intrinsic motivation. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 17(1), 54-69
- 7- Nordin-Bates, S. M., Cumming, J., Agergaard, S., & MacNamara, Á. (2019). Imagery in sport: Theory, research and practice. Routledge.
- 8- Williams, J. M., & Andersen, M. B. (1998). Psychosocial antecedents of sport injury: Review and critique of the stress and injury model. *Journal of Applied Sport Psychology*, 10(1), 5-25
- 9- Putukian, M. (2016). The psychological response to injury in student athletes: a narrative review with a focus on mental health. *British Journal of Sports Medicine*, 50(3), 145-148.
- 10- Reardon, C. L., Hainline, B., Aron, C. M., Baron, D., Baum, A. L., Bindra, A., ... & Engebretsen, L. (2019). Mental health in elite athletes: International Olympic Committee consensus statement (2019). *British journal of sports medicine*, 53(11), 667-699.
- 11- Adhikari, A., Lerner, T. N., Finkelstein, J., Pak, S., Jennings, J. H., Davidson, T. J., ... & Deisseroth, K. (2015). Basomedial amygdala mediates top-down control of anxiety and fear. *Nature*, 527(7577), 179-185.
- 12- Penzo, M. A., Robert, V., Tucciarone, J., De Bundel, D., Wang, M., Van Aelst, L., ... & Li, B. (2015). The paraventricular thalamus controls a central amygdala fear circuit. *Nature*, 519(7544), 455-459.
- 13- Hill, J. L., & Martinowich, K. (2016). Activity-dependent signaling: influence on plasticity in circuits controlling fear-related behavior. *Current opinion in neurobiology*, 36, 59-65.
- 14- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., & Webster, K. E. (2012). Fear of re-injury in people who have returned to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15(6), 488-495.
- 15- Kvist, J., & Silbernagel, K. G. (2022). Fear of movement and reinjury in sports medicine: relevance for rehabilitation and return to sport. *Physical Therapy*, 102(2), pzab272.
- 16- De Pero, R., Minganti, C., Pesce, C., Capranica, L., & Piacentini, M. F. (2013). The relationships between pre-competition anxiety, self-efficacy, and fear of injury in elite teamgym athletes. *Kinesiology*, 45(1.), 63-72.
- 17- Kolt GS, Andersen MB.(2010). Psychological factors in sport injury rehabilitation: predicting response to rehabilitation. *J Sports Rehabil*.19(3):215-32.
- 18- Covassin T, Weiss L, Powell J, Womack C.(2007). Effects of a cognitive-behavioral intervention on the rehabilitation of college athletes with acute orthopaedic injury. *J Sport Rehabil*.;16(4):316-31.
- 19- Herring SA, Kibler WB, Putukian M.(2013). Team physician consensus statement: 2013 update. *Med Sci Sports Exerc*.;45(10):2004-15.
- 20- Holmes, P. S., & Collins, D. J. (2001). The PETTLEP approach to motor imagery: A functional equivalence model for sport psychologists. *Journal of Applied Sport Psychology*, 13(1), 60-83.
- 21- Arvinen-Barrow, M., Massey, W. V., & Hemmings, B. (2014). Role of sport medicine professionals in addressing psychosocial aspects of sport-injury rehabilitation: Professional athletes' views. *Journal of Athletic Training*, 49(6), 764-772.



Tebb-Dar-Varzesh
(Medicine in Sports)

No: 42

Summer 2026



- **Propertier:** Sports Medicine Federation of I.R.Iran
- **Managing Director:** Gholamreza Noroozi M.D.
- **Editor in Chief/ Executive Editor:** Behnam Sobouti M.D.
- **Internal Manager:** Seyed Ashkan Ordibehesht M.D.
- **Reviewer and scientific editor:** Laleh Hakemi Barabadi M.D.
- **Authors of this issue (in alphabetical order) :** M. Ahmadi Ph.D, A. Barati M.D, M. Barzegar Bofruee Ph.D
A. Darbandi Ph.D, A. Darooki MSc, F. Ghazalian Ph.D, A. Mehmandoost Ph.D student, H. miri Ph.D, A. Nazari M.D
Gh. Noroozi M.D, R. Saberi Sani Ph.D, F. Saki Ph.D, S. Mansoor Sohani Ph.D, M. Ameri Ph.D
- **Executive Manager:** Roghieh Ghadimi B.A.
- **Design and Graphics:** Saeedeh Baharloo B.A.

Title	Author/ Translator	Page
Educational Articles		
The Role of Proprioception and Neural Control in Return to Sport	F. Saki	6
Usability of Plantar Pressure Data in Individuals Following Anterior Cruciate Ligament Knee Injury	S. Mansoor Sohani	18
Epidemiology and Risk Analysis of Sports Injuries	A. Mehmandoost	20
Development of Intelligent Sports Injury Screening Systems: From Wearable Data to Digital Twins; Collaboration Between Data Science and Biomechanics: From Human Movement to Intelligent Prediction	A. Nazari	23
Comparison of Random Forest vs Support Vector Machine in Prediction of Sports Injuries	M. Barzegar Bofruee, R. Saberi Sani	29
Machine Learning for Predicting Anterior Cruciate Ligament Injury: From Clinical Challenges to Smart Solutions	M. Barzegar Bofruee, A. Barati	31
Application of Whole-Body Vibration in Active Recovery in Athletes, Mechanisms, Applications, and Optimal Protocols	M. Ameri	43
Principles of Taping	M. Ahmadi	52
Research Articles		
Monitoring of Fatigue in Sports: A Review Study	F. Ghazalian	56
The Gut Microbiome: A New Frontier in Sports Injury Prevention—A Review Article Examining Clinical Evidence and Molecular Mechanisms	A. Darbandi	66
Investigating Imagery skills and fear control in the occurrence of sports injuries in professional football players	H. miri, Gh. Noroozi, A. Darooki	72

Address: Sports Medicine Federation of I. R. Iran, Varzandeh St. Mofatteh Ave. Tehran, Iran
Tel: +98 21 88326226 **Website:** www.IFSM.ir **Email Address:** tebdarvarzesh@IFSM.ir

بخش صدور آنلاین

در صورت داشتن سابقه عضویت

نیاز به تغییر باشگاه یا رشته



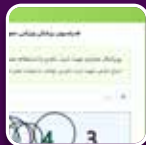
کلیک روی گزینه عضویت جدید



تکمیل کادرهای فدراسیون، استان، رشته، شهر و باشگاه

- فعال کردن تیک پذیرش شرایط عضویت
- پرداخت از طریق درگاه بانکی
- دریافت نسخه چاپی کارت خدمات درمانی
- پس از دریافت پیامک تایید عضویت

تکرار کامل اطلاعات سابق



ورود بـ اکـد ملی



وارد کردن کد امنیتی



وارد کردن رمز عبور



کلیک روی تمدید عضویت

در صورت نداشتن سابقه عضویت



ثبت کد ملی و کد امنیتی



کلیک روی ثبت نام و تکمیل کادرهای مشخصات



وارد کردن کد اعتبار سنجی



ساخت رمز عبور



کلیک روی گزینه عضویت جدید

چنانچه به رمز عبور خود دسترسی ندارید
با کلیک روی گزینه فراموشی رمز عبور،
فرآیند ایجاد رمز جدید را انجام دهید

برای ویرایشش شماره همراه از
قسمت فراموشی رمز اقدام کنید



TEB DAR VARZESH

I. R. Iran Sports Medicine Federation Scientific Journal

Quarterly, No 42
Summer 2026

- ✓ Development of Intelligent Sports Injury Screening Systems: From Wearable Data to Digital Twins
Collaboration Between Data Science and Biomechanics: From Human Movement to Intelligent Prediction
- ✓ The Gut Microbiome: A New Frontier in Sports Injury Prevention—A Review Article Examining
Clinical Evidence and Molecular Mechanisms
- ✓ Monitoring of Fatigue in Sports: A Review Study