Iranian Journal of Rehabilitation Research in Nursing Original Article

Summer 2026, Volume 12, Issue 4

Biomechanical Effects of Advanced Footwear Technologies with Carbon-Fiber Plates in Runners: A Systematic Review

Mohsen Barghamadi[1*], Ladan Barzegarfar[2], Ebrahim Piri[3]

1- Associate Professor in Sport Biomechanics, Department of Sport Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2- M.SC in Sport Biomechanics, Department of Sport Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3- PhD in Sports Biomechanics, Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

***Corresponding author:** Mohsen Barghamadi, Associate Professor in Sport Biomechanics, Department of Sport Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
E-mail: barghamadi@uma.ac.ir

Received: 2026/6/9 Accepted: 2026/09/18

Abstract

Introduction: Running is one of the most popular forms of physical activity, during which the lower extremities are repeatedly exposed to ground reaction forces. The structural characteristics of running footwear can influence lower-limb joint kinematics and muscle activation by altering force absorption and transmission. In recent years, footwear equipped with carbon-fiber plates and advanced midsole foams has attracted considerable research interest because of its potential to improve running economy and athletic performance. Therefore, this systematic review aimed to evaluate the biomechanical effects of advanced footwear technologies incorporating carbon-fiber plates on performance variables and injury-related biomechanical indicators in runners.

Methods: A systematic search was conducted for English- and Persian-language articles published between 2010 and June 2026 in Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SID, Magiran, ISC, and Google Scholar. The methodological quality of the included studies was assessed using the Downs and Black checklist. In total, 10 eligible articles were included in the final review and synthesis.

Results: Five studies indicated that the geometric design of carbon-fiber plates and their interaction with advanced midsole foams play an important role in biomechanical performance, forefoot load distribution, and injury risk during prolonged running. Three studies reported that load-modulating technologies, including advanced running footwear and polyurethane nanocomposite insoles, may have potential for injury prevention. Two studies further indicated that although standard control shoes may reduce peak external ground reaction forces (GRF), advanced footwear technologies in trail runners may produce undesirable kinematic changes despite modifying specific biomechanical parameters.

Conclusions: Advanced footwear technologies may improve mechanical loading and running performance when appropriately matched to runners' biomechanical characteristics and performance levels. Shoe selection should therefore be individualized based on runner characteristics, foot-strike pattern, and running objectives to optimize potential performance benefits while minimizing injury-related risks.

Keywords: Biomechanics; Kinematics; Kinetics; Ground reaction force; Electromyography.

نشریه پژوهش توانبخشی در پرستاری
مقاله پژوهشی

تابستان ۱۴۰۵، دوره ۱۲، شماره ٤

بررسی بیومکانیکی کفش های با تکنولوژی پیشرفته و صفحات فیبر کربن در دوندگان: یک مرور سیستماتیک

محسن برغمدی[1*]، لادن برزگرفر[2]، ابراهیم پیری[3]

۱- دانشیار بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲- کارشناس ارشد بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳- دکتری بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

***نویسنده مسئول:** محسن برغمدی، دانشیار بیومکانیک ورزشی، گروه بیومکانیک ورزشی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
ایمیل: Barghamadi@uma.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۹/ ۱۴۰۵/۳ پذیرش مقاله: ۲۷/ ۱۴۰۵/۶

چکیده

مقدمه: دویدن یکی از رایج‌ترین فعالیت‌های ورزشی است که در آن اندام تحتانی مداوم در معرض نیروهای عکس‌العمل زمین قرار می‌گیرد. ویژگی‌های ساختاری کفش می‌توانند با تغییر نحوه جذب و انتقال نیرو، الگوی حرکتی مفاصل و فعالیت عضلات اندام تحتانی را تحت تأثیر قرار دهند. در سال‌های اخیر استفاده از کفش‌های مجهز به صفحات فیبر کربن و فوم‌های پیشرفته به دلیل احتمال بهبود عملکرد و کاهش هزینه انرژی دویدن مورد توجه محققان قرار گرفته است. لذا هدف از مطالعه حاضر، بررسی تاثیر بیومکانیکی کفش‌های دارای فناوری پیشرفته و صفحات فیبر کربن بر متغیرهای عملکردی و شاخص‌های مرتبط با آسیب در دوندگان بود.

روش کار: مطالعه حاضر از نوع مروری سیستماتیک بود، جستجوی مقالات به زبان فارسی و لاتین از سال ۲۰۱۰ تا ژوئن سال ۲۰۲۶ بود که در پایگاه‌های تخصصی Science Direct ،JCR ،ISC ،Magiran ،SID ،Scopus ،WOS و Google Scholar انجام گرفت. کیفیت سنجی مقالات توسط پرسشنامه Dawn and black انجام شد و در نهایت ۱۰ مقاله مرتبط مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

یافته ها: پنج مطالعه نشان داد که طراحی هندسی صفحات فیبر کربن و تعامل آن‌ها با فوم‌های پیشرفته لایه میانی، نقش مهمی در بهبود عملکرد بیومکانیکی، توزیع بار و کاهش خطر آسیب‌های ناشی از دویدن‌های طولانی‌مدت دارد. همچنین سه تحقیق نشان داد که استفاده از فناوری‌های تعدیل‌کننده بارگذاری مانند تکنولوژی پیشرفته کفش‌های دویدنی و کفی‌های نانوکامپوزیت پلی یورتان پتانسیل بالایی در پیشگیری از آسیب دارند. یافته‌های دو مقاله نشان داد استفاده از کفش‌های کنترل استاندارد با کاهش نیروی اوج خارجی عکس‌العمل زمین به کاهش خطر آسیب کمک می‌کند، اما فناوری‌های پیشرفته کفش در دوندگان کوهستان با وجود تغییر پارامترهای بیومکانیکی، ممکن است تغییرات حرکتی نامطلوبی ایجاد کنند.

نتیجه‌گیری: کفش‌های دارای فناوری پیشرفته می‌توانند در صورت انتخاب متناسب با ویژگی‌های بیومکانیکی و سطح عملکرد دوندگان، به بهبود عملکرد و مدیریت بارهای مکانیکی کمک کنند. بنابراین، تجویز این کفش‌ها باید به‌صورت فردمحور و با در نظر گرفتن نوع دونده، الگوی فرود پا و هدف از دویدن انجام شود تا بیشترین سود عملکردی و کمترین خطر آسیب حاصل شود.

کلیدواژه ها: بیومکانیک، کینماتیک، کینتیک، نیروی عکس‌العمل زمین، الکترومایوگرافی.

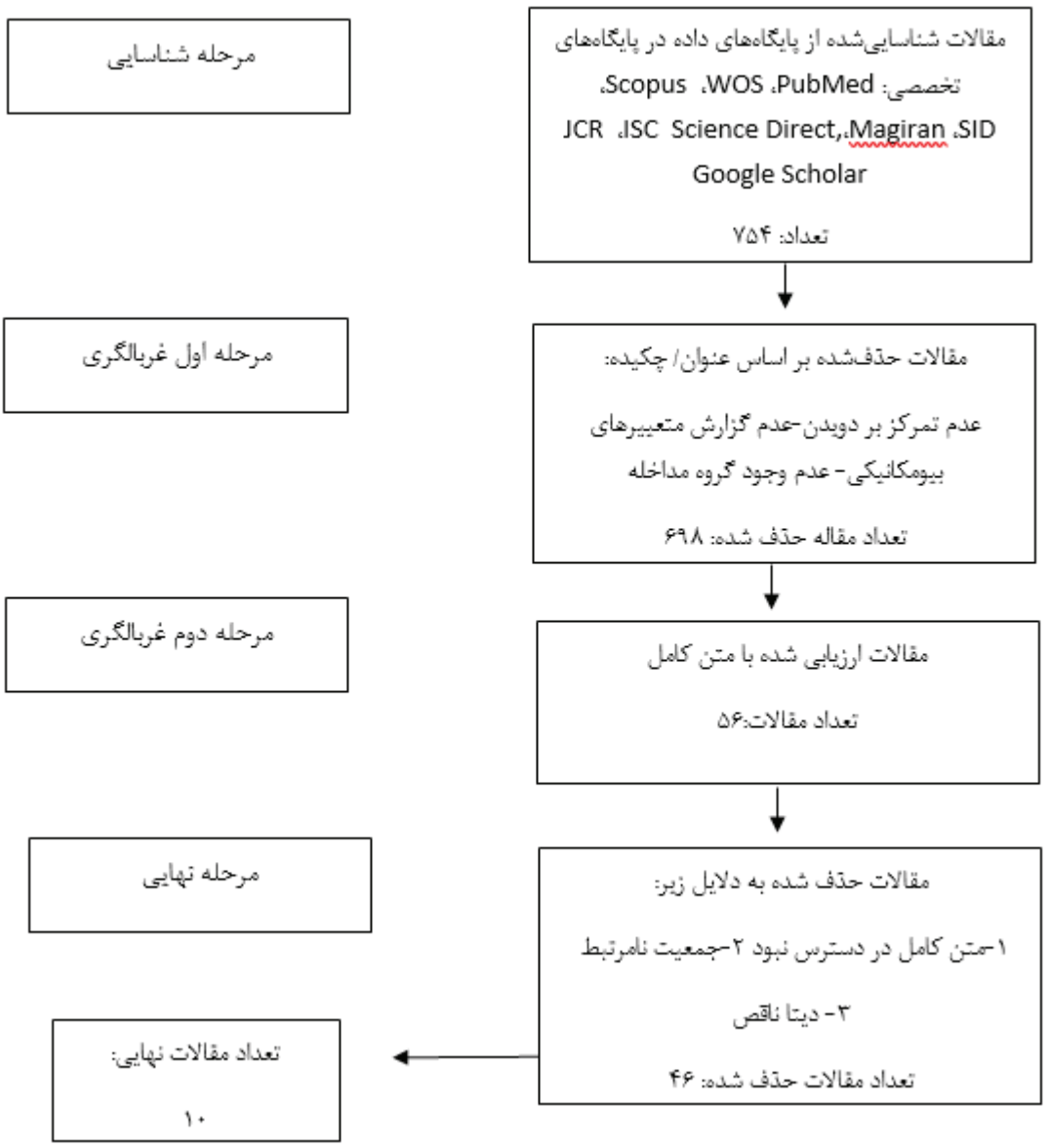
مقدمه

علیرغم محبوبیت مسابقات ماراتن و دوهای مسافت طولانی در سراسر جهان؛ در دوندگان آسیب‌های اسکلتی‌عضلانی به‌ویژه در اندام تحتانی، از شایع‌ترین مشکلات دوندگان سرعت محسوب می‌شوند. گزارش شده است که ۶۴ درصد از ورزشکاران دو ومیدانی حداقل یک آسیب را تجربه می‌کنند و بیش از نیمی از آسیب‌های ثبت‌شده (۵۲ درصد) در اندام تحتانی رخ می‌دهد (۱). همچنین، در بررسی مسابقات قهرمانی جهان در مواد ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ متر، ۶۰/۱ درصد از آسیب‌های حین مسابقه مربوط به آسیب‌های عضلانی اندام تحتانی و ۳۰ درصد مربوط به عضلات همسترینگ بوده است (۲). همگام با این مسائل، صنعت کفش‌های ورزشی نیز وارد رقابت تنگاتنگی برای معرفی فناوری‌های نوین شد تا به عنوان اصلی‌ترین رابط میان بدن و زمین، عملکرد ورزشکاران را بهینه‌سازی کند (۳). نقطه عطف این مطالعات، معرفی نسل جدید کفش‌های دو جاده‌ای موسوم به کفش‌های با تکنولوژی پیشرفته (AFT) یا ابرکفش‌ها بود که با مدل پیشگامانه نایکی وپرفلای ۴ درصد به بازارهای جهانی معرفی شدند (۴). این کفش‌ها از ترکیب سه جزء کلیدی ۱) یک فوم زیره میانی (فوق‌العاده سبک، ضخیم و بسیار ارتجاعی با بازگشت انرژی بالا ۲) یک صفحه فیبر کربنی (CFP) ادغام‌شده در داخل آن ۳) یک هندسه گهواره‌ای‌شکل ویژه در صفحه ساجیتال (سهمی) ساخته شده‌اند (۵). ادغام صفحه کربنی در کفش‌های دویدن با افزایش سختی خمشی طولی و بهبود بازگشت انرژی مکانیکی همراه بوده است که در نتیجه، هزینه متابولیکی دویدن را به طور متوسط حدود ۴ درصد کاهش داده (۶–۸) و به عنوان یک عامل نیروزا در بهبود عملکرد بیومکانیکی و فیزیولوژیکی دوندگان عمل می‌کند (۴, ۹). از منظر بیومکانیکی، پا را نمی‌توان یک بخش صلب و یکپارچه فرض کرد (۱۰, ۱۱)، بلکه حرکت قطعات مختلف پا نسبت به یکدیگر (حرکت بین‌بخشی) نقش تعیین‌کننده‌ای در جذب ضربه و انتقال نیرو دارد (۱۲, ۱۳). صفحات فیبر کربنی با کاهش تغییر شکل قوس طولی پا و محدود کردن دورسی‌فلکشن مفاصل متاتارسوفالانژیال (MTP)، اتلاف انرژی در مفاصل پنجه را کاهش داده و کار مثبت مچ پا را بهبود می‌بخشند (۶, ۱۴). با این حال، این اثرات به شدت تحت تأثیر سرعت دویدن و الگوی فرود پا قرار دارد؛ دوندگان پاشنه‌رو در سرعت‌های بالا برای تولید نیروی پیشران به شدت به LBS وابسته هستند، در حالی که دوندگان میان‌پارو حرکت جدا شدن پا از زمین را به طور مستقل از طریق مفاصل MTP انجام می‌دهند (۱۵). علاوه بر این، هندسه و محل قرارگیری صفحه فیبر کربنی (CFP) متغیرهای بیومکانیکی را دستخوش تغییر می‌کند. صفحات با انحنای رو به بالا با تسهیل حرکت دورسی‌فلکشن انگشتان، فشار جلوی پا را تا ۱۲/۶ درصد کاهش می‌دهند. در مقابل، صفحات با انحنای رو به پایین به عنوان یک رویکرد نوین، پتانسیل بالایی در ذخیره و بازگشت انرژی با استفاده از ماده کربنی کمتر دارند (۱۶, ۱۷). از منظر محل قرارگیری، تعبیه صفحه کربنی در بالای زیره خارجی می‌تواند اوج فشار کف‌پایی را در فرود روی پنجه تا ۳۱/۹ درصد کاهش دهد (۱۷). با این حال، تفاوت میان طراحی‌های آزمایشگاهی (قرار دادن صفحه بین کفی و زیره میانی) با مدل‌های تجاری بازار (تعبیه صفحه در داخل فوم زیره میانی)، تعمیم مستقیم یافته‌های پژوهشی به محصولات تجاری را با چالش جدی مواجه کرده است (۱۸, ۱۹). با وجود توسعه سریع فناوری‌های کفش‌های پیشرفته و کربن‌دار، هنوز ابهامات و تناقضات گسترده‌ای در ادبیات پژوهشی وجود دارد. از یک سو، نتایج متناقضی درباره میزان بهبود اقتصاد دویدن و توزیع بار بین مفاصل پروگزیمال (ران و زانو) و دیستال (مچ پا و پنجه) گزارش شده است (۲۰, ۲۱)؛ از سوی دیگر، اکثر مطالعات بر روی دوندگان تفریحی با ساختار پای نرمال تمرکز کرده‌اند و اثر این کفش‌ها بر روی دوندگان نخبه زمان‌محور (زیر ۳ ساعت) و افراد دارای ناهنجاری‌های شایع مانند پای پرونیت صرف نظر کرده اند. همچنین، تفاوت در طراحی‌های آزمایشگاهی و مدل‌های تجاری موجود در بازار، کاربرد مستقیم یافته‌ها را با چالش مواجه می‌کند. بنابراین، با توجه به تنوع روزافزون این فناوری‌ها و اثرات متناقض و ناشناخته آن‌ها بر بیومکانیک دوندگان سالم و آسیب‌دیده، هدف از نگارش این مقاله مروری با عنوان «بررسی اثرات بیومکانیکی کفش‌های با تکنولوژی پیشرفته و صفحات فیبر کربن در دوندگان»، تحلیل سیستماتیک، یکپارچه‌سازی و نقد یافته‌های علمی پیرامون اثرات این تجهیزات بر پارامترهای کینماتیکی، کینتیکی، عضلانی، فیزیولوژیکی و پیشگیری از آسیب در دوندگان (اعم از نخبه، آماتور، پاشنه‌رو، میان‌پارو و افراد دارای پای پرونیت) است تا دیدگاهی جامع و کاربردی برای پژوهشگران، طراحان کفش، متخصصان طب ورزشی

و مربیـان فراهـم آورد.

روش کار

مطالعـه حاضـر از نـوع مـروری سیسـتماتیک بـود، جسـتجوی مقـالات بـه زبـان فارسـی و لاتیـن از ابتـدای مـاه مـی سـال ۲۰۱۰ تـا ابتـدای مـاه ژوئـن ۲۰۲۶ بـود کـه در پایگاه‌هـای تخصصـی از جملـه: PubMed،WOS ، Scopus ، SID،Magiran ISC Science Direct، JCR و Google Scholar انجـام گرفـت. بـه عـلاوه تحقیقاتـی کـه در ایـن پژوهـش مورد بررسـی و ارزیابـی قـرار گرفتـه انـد از نـوع پژوهشـی نیمه‌تجربـی و آزمایشـگاهی بودنـد. بـرای هـر بانـک اطلاعاتـی از اسـتراتژی جسـت و جـوی مخصـوص و مناسـب آن اسـتفاده شـد، بـه نحـوی کـه در جسـت وجـوی الکترونیکـی پایـگاه های اسـتنادی از MESH و Free Text کلیـدواژه هـا همـراه بـا عملگرهـای بولـی (AND، OR، NOT) اسـتفاده گردیـد. بـرای اسـتخراج مقـالات از کلیدواژه‌هـای کفش‌هـای بـا تکنولـوژی پیشـرفته، ابرکفش‌هـا، صفحـه فیبـر کربـن، سـختی خمشـی طولـی، بیومکانیـک، کینماتیـک، کینتیـک، نیـروی عکس‌العمـل زمیـن، الکترومایوگرافـی، و دونـدگان اسـتفاده شـد. در جسـتجوی اولیـه در پایگاه‌هـای اطلاعاتـی، ۷۵۴ مقالـه شناسـایی شـد، از ایـن تعـداد، ۶۹۸ مقالـه بـه دلایـل: ۱- عـدم ارتبـاط موضوعـی بـا سـؤال تحقیـق مطالعـه روی فعالیت‌هایـی غیـر از دویـدن، ماننـد پـرش یـا راه رفتـن. ۲- مطالعاتـی کـه اثـر نـوع کفـش را به‌طـور مسـتقیم بررسـی نکـرده یـا فنـاوری کفـش مـورد اسـتفاده در آن‌هـا شـامل فنـاوری پیشـرفته یـا صفحـات فیبـر کربنـی نبـود. ۳-مطالعاتـی کـه صرفـا بـه بررسـی متغیرهـای فیزیولوژیکـی، متابولیکـی یـا عملکـردی پرداختـه و هیـچ پیامـد بیومکانیکـی را گـزارش نکـرده بودنـد. ۴- نـوع مطالعاتـی کـه گـروه مداخلـه نداشـتند. ۵- عـدم دسترسـی بـه متـن کامـل مقالـه حذف شـدند. در ادامـه، متـن کامـل ۵۶ مقالـه از نظـر انطبـاق با معیارهـای ورود مـورد ارزیابـی قـرار گرفـت. معیـار ورود بـه مطالعه شـامل مواردی از قبیـل: ۱- اسـتفاده از مقـالات پژوهشـی تجربی و آزمایشـگاهی بـود مطالعاتـی کـه در آن‌هـا کفش‌هـای دارای فنـاوری پیشـرفته یـا صفحـات فیبـر کربنـی بـا کفش‌هـای مرجـع، کفش‌هـای سـنتی یـا سـایر مدل‌هـای کفـش مقایسـه شـده بودنـد. ۲- شـرکت‌کنندگان مطالعـات شـامل دونـدگان سـالم زن و مـرد در سـطوح مختلـف عملکـردی (نخبـه، نیمه‌نخبـه، تفریحـی و آماتـور) بودنـد و محدودیتـی از نظـر الگـوی فـرود پـا (پاشـنه‌رو، میان‌پـارو یـا پنجـه‌رو) اعمـال نشـد. ۳- مطالعاتـی حداقـل یکـی از متغیرهـای بیومکانیکـی (ماننـد کینماتیـک، کینتیـک، نیروهـای عکس‌العمـل زمیـن، کار مفاصـل، فعالیـت الکتریکـی عضـلات) را ارزیابـی کـرده بودنـد. ۴-مطالعاتـی کـه فایـل آن‌هـا در دسـترس بـود به‌عنـوان معیارهـای ورود مطالعـه حاضـر اتخـاذ گردیـد. از ایـن تعـداد، ۴۶ مقالـه بـه دلیـل عـدم دسترسـی بـه متـن کامـل، نامرتبـط بـودن جمعیـت مـورد مطالعـه یـا ناقـص بـودن داده‌هـا کنـار گذاشـته شـدند. بـا توجـه بـه معیارهـای ورود و خـروج ذکـر شـده در نهایـت ۱۰ مقالـه مـورد بررسـی قـرار گرفـت. مراحـل انتخـاب مقـالات در شـکل شـماره ۱ نشـان داده شـده اسـت. هـدف اصلـی محققـان در گام اول، جسـتجو کلیدواژه‌هـای مناسـب و تعییـن اسـتراتژی‌های جسـتجو بـود. طـی گام دوم، هـدف پژوهشـگران بررسـی مقالات جسـتجو شـده بـر اسـاس کلیدواژه‌هـا بـود، در ایـن مرحلـه نویسـندگان تمامـی مقـالات را در پوشـه‌های جداگانـه دسـته‌بندی کردنـد. در گام سـوم ارزیابـی کیفیـت مقالاتـی کـه معیارهـای ورود بـه مطالعـه را داشـتند، توسـط پرسشـنامه دان و بلـک مـورد بررسـی قـرار گرفـت (۲۲). ارزیابـی کیفیـت توسـط دو داور مسـتقل انجـام شـد و در صـورت اختـلاف، بـا نظـر داور سـوم حـل شـد. لازم بـه ذکـر اسـت کـه پرسشـنامه دان و بلـک جـز پرسشـنامه هـای ارزیابـی کیفیـت مقـالات بالینـی مـی باشـد کـه امـکان اسـتفاده ایـن نـوع پرسشـنامه بـرای مطالعاتـی کـه آزمودنـی هـا به‌صـورت تصادفـی و یـا غیرتصادفـی باشـد را فراهـم مـی سـازد. در ایـن پرسشـنامه ۲۷ سـؤال در خصـوص مقـالات مـورد بررسـی ارائـه گردیـده اسـت. اختصـاص عـدد یـک بـه معنـای تأییـد و صفـر بـه معنـای عـدم تأییـد یـا غیرقابل‌تعییـن مـی باشـد. در مطالعـه حاضـر بـرای مقالاتـی کـه بـر اسـاس ۲۷ سـؤال قبلـی نمـره ای مابیـن ۲۰-۱۷، ۲۲-۲۰ و بیشـتر از عـدد ۲۲ را کسـب کـرده بودنـد بـه ترتیـب نمـره کیفیـت ۳، ۴ و ۵ اختصـاص یافـت. بـر اسـاس جـدول ۱، ارزیابـی کیفیـت متدولوژیـک مقـالات واردشـده توسـط پرسشـنامه دان و بلـک (Downs and Black) نشـان داده شـده اسـت. یافته‌هـا نشـان داد کـه میانگیـن کل ارزیابـی کیفیـت مقـالات معـادل ۷۴ درصـد بـود. لازم بـه ذکـر اسـت کـه کمتریـن کیفیـت مقالـه مربـوط بـه مطالعه/مطالعـات (هیالـی و همـکاران) بـا درصـد کیفیـت ۶۰ درصـد و بالاتریـن کیفیـت مقـالات نیـز مربـوط بـه مقالـه هیالـی و همـکاران بـا درصـد کیفیـت ۹۲ درصـد بـود.۱۰۰*(۵۰/ نمـره کل)=کیفیـت مقـالات (برحسـب درصـد).



شکل ۱. دیاگرام استاندارد PRISMA

جدول ۱. ارزیابی مقالات مورد بررسی توسط پرسشنامه دان و بلک

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	نمره	کیفیت
وایوئی و همکاران	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۲۵	۵
اسلامی و همکاران مچ	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۲۱	۴
جعفرنژاد و همکاران	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۲۰	۳
یانگ و همکاران	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۲۰	۳
یوفان و همکاران	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۲۳	۵
سانگ و همکاران	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۲۰	۳
یوفان و همکاران	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱۹	۳

کیم و همکاران	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۴	۵
اسلامی و همکاران	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱۹	۳
هیالی و همکاران	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱۷	۳

یافته ها

در مطالعه حاضر، ۵۶ مقاله از طریق جستجوی پایگاه‌های اطلاعاتی شناسایی شد که پس از حذف موارد تکراری و انجام مراحل غربالگری، ۱۰ مقاله بر اساس معیارهای ورود و خروج برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. دسته‌بندی مطالعات بر اساس فناوری یا متغیر اصلی مورد بررسی در هر پژوهش انجام شد. از این تعداد، ۵ مطالعه به بررسی ویژگی‌های بیومکانیکی کفش‌های مجهز به صفحات فیبر کربنی (CFP) شامل مدل‌های Nike Vaporfly، ASICS Metaspeed Sky Paris، ASICS Metaspeed Edge Paris و نمونه‌های آزمایشگاهی دارای صفحات کربنی خمیده، تخت، کامل و بخش‌بندی‌شده پرداختند. نتایج این مطالعات نشان داد که طراحی هندسی صفحات کربنی، به‌ویژه صفحات خمیده و کامل، در کنار تعامل آن‌ها با فوم‌های پیشرفته زیره میانی، نقش مهمی در بهبود عملکرد بیومکانیکی، توزیع بار در ناحیه پنجه، بهبود عملکرد مفاصل اندام تحتانی و کاهش خطر آسیب‌های ناشی از دویدن‌های طولانی‌مدت دارد. همچنین ۳ مطالعه به بررسی فناوری‌های نوین زیره و کفی کفش شامل سیستم تنظیم فعال سختی پیچشی (TARS)، کفش‌های ناپایدار و کفش‌های مجهز به نانوکامپوزیت پلی‌یورتان پرداختند. یافته‌ها نشان داد که فناوری TARS و کفی‌های نانوکامپوزیت پلی‌یورتان با کاهش بارگذاری مکانیکی مفاصل و تسهیل کنترل حرکات مچ پا، پتانسیل مناسبی برای پیشگیری از آسیب‌های مرتبط با دویدن دارند. در مقابل، استفاده از کفش‌های ناپایدار با افزایش سرعت بارگذاری نیروهای عمودی، می‌تواند خطر بروز آسیب‌هایی نظیر شکستگی استرسی درشت‌نی را افزایش دهد. در نهایت، ۲ مطالعه به مقایسه کفش‌های کنترل و کفش‌های دارای فناوری پیشرفته (AFT) پرداختند. این مطالعات شامل کفش کنترل البرز و کفش‌های میخی پیشرفته Nike ZoomX Dragonfly 1، Nike ZoomX Dragonfly 2 و Nike Air Zoom Victory بودند. نتایج نشان داد که کفش کنترل استاندارد با کاهش نیروی اوج خارجی عکس‌العمل زمین می‌تواند به کاهش خطر آسیب کمک کند. همچنین اگرچه کفش‌های AFT برخی شاخص‌های بیومکانیکی را بهبود می‌بخشند، اما در برخی شرایط ممکن است تغییرات حرکتی نامطلوبی ایجاد کنند که نیازمند ارزیابی‌های ایمنی دقیق‌تر است. علاوه بر این، در مسابقات استقامت، کفش‌های میخی مبتنی بر فوم پیشرفته عملکرد و راحتی بیشتری نسبت به نمونه‌های مجهز به صفحه کربنی نشان دادند و افزودن صفحه کربنی مزیت متابولیکی قابل‌توجهی ایجاد نکرد. خلاصه نتایج مطالعات واردشده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. بررسی اثرات بیومکانیکی کفش‌های با تکنولوژی پیشرفته در دوندگان

نام نویسنده/ سال	نوع مقاله	جامعه‌آماری	سابقه دویدن	نوع کفش مورد بررسی	متغیرهای مورد بررسی	ابزار اندازه‌گیری	نتیجه	بررسی ایمنی
امیرعلی جعفرنژاد و همکاران/ ۲۰۲۱ (۲۳)	نیمه تجربی و آزمایشگاهی	۳۹ دانشجوی پسر تربیت بدنی با دامنه سنی ۱۸–۲۸ سال	دوندگان تفریحی	کفش‌های دویدن البرز و چابکی	نیروهای عکس‌العمل زمین	دستگاه تخته نیروی برتک	کاهش نیروی اوج خارجی عکس العمل زمین در کفش کربن و کاهش احتمالی آسیب	نسبتا ایمن

هیالی و همکاران/۲۰۲۲ (۲۴)	نیمه‌تجربی	۱۷ مرد دونده با میانگین سنی ۲۴ سال	با سوابق متغییر	Nike Vaporfly (VFintact)) و a cut Nike Vaporfly (VFcut))	زوایای مفصلی، سرعت‌های زاویه‌ای مفاصل، سرعت دویدن، نیروهای عکس‌العمل زمین، گشتاورهای مفصلی، توان‌های مفصلی، کار مفصلی و مرکز فشار	موشن کپچر– صفحه نیرو	بهبود عملکرد بیومکانیکی مفصل MTP ناشی از تعامل صفحه کربنی با فوم میانی و طراحی کلی کفش نه صرفا کاهش سختی خمشی یا وجود صفحه کربنی منحنی	ایمنی مشروط
یوفان و همکاران/ ۲۰۲۵ (۲۵)	نیمه تجربی و آزمایشگاهی	۱۲ دونده مرد با میانگین سنی ۲۱ سال	نخبه	دومدل کفش ASICS META-SPEEDSKYPAR-ISو ASICSMETA-SPEEDEDGE-PARIS	فعالیت الکتریکی عضلات– نیروهای عکس‌العمل زمین– ضربان قلب– خستگی	الکترومایوگرافی– سیستم ثبت حرکت سه بعدی– صفحه نیرو کلیستر– مانیتور ثبت ضربان قلب	بهبود عملکرد دویدن و کاهش خطر آسیب‌ها	ایمن
فیو و همکاران/ ۲۰۲۱ (۲۶)	نیمه تجربی	۱۵ مرد دونده با میانگین سنی ۳۴	با تجربه	کفش دارای صفحه فیبر کربنی بخش‌بندی‌شده (Segmented CFP) در زیره میانی. کفش دارای صفحه فیبر کربنی کامل (Full CFP) در زیره میانی	ویژگی‌های کینماتیکی و کینتیکی اندام تحتانی شامل: زاویه، سرعت زاویه‌ای، کار مفاصل ران، زانو، مچ پا و پنجه و نیروی عکس‌العمل زمین	صفحات نیرو، سیستم آنالیز حرکت دوربین‌دار، دروازه‌های زمان‌سنج	بهبود و کاهش فشار وارد بر زیره کفش، سودمند برای دویدن طولانی‌مدت	ایمن
سانگ و همکاران /۲۰۲۴ (۱۷)	مقایسه‌ای	مردان ۲۸ ساله با میانگین سنی ۲۸ سال	توجیه شده و کاربلد	صفحه کربنی تخت (و NCFB FCFP) و خمیده (CCFP) طراحی شده در آزمایشگاه	نیروهای عکس‌العمل زمین	صفحه نیرو	جلوگیری از آسیب‌های ناشی از دویدن‌های طولانی	ایمن
کیم و همکاران/ ۲۰۲۵ (۲۷)	نیمه‌تجربی و آزمایشگاهی	۱۶ دونده بین ۲۰ تا ۳۵ سال	دونده تفریحی	کفش آزمایشگاهی TARS– کفش مینیمالیستی– کفش کنترل	زاویه برخورد پا با زمین، زوایای مفاصل، سرعت‌های زاویه‌ای مفاصل، طول اندام تحتانی، نیروهای عکس‌العمل زمین، اوج نیروی عکس‌العمل عمودی زمین، نیروهای واکنش مفصلی داخلی، گشتاورهای مفصلی، نیروهای عضلانی،	سیستم آنالیز حرکت سه بعدی– تردمیل مجهز به صفحه نیرو– ۲۶ مارکر– دستگاه‌های آنالیز تنفسی قابل حمل– دستگاه ضربان سنج قلب	کاهش بارگذاری مکانیکی و کاهش آسیب اما وابسته به ویژگی‌های گام‌برداری فردی	ایمن

اسلامی و همکاران/ ۲۰۱۴ (۲۸)	نیمه تجربی	۲۵ مرد جوان سالم با میانگین سنی ۲۱ سال / با سابقه آشنایی در فعالیت‌های دویدنی (دوندگان تفریحی)		کفش ناپایدار		صفحه نیروسنج	خطر آسیب شکستگی درشت‌نی	نا ایمن
						متغییرهای وابسته به آسیب شکستگی استرسی درشت‌نی شامل حداکثر نیروهای عمودی فعال و غیرفعال و همچنین سرعت بارگذاری نیروی عمودی بررسی شد.		
سانتاماریا و همکاران/ ۲۰۲۵ (۲۹)	نیمه‌تجربی	۱۲ مرد با میانگین سنی ۳۵	با تجربه	کفش‌های تکنولوژیکی پیشرفته (AFT)		مانیتور ضربان قلب همراه با یک بند سینه‌ای ضربان قلب- مترونوم- دوربین اکشن- دستگاه اندازه‌گیری لاکتات خون- دستگاه موقعیت‌یاب- متر	ممکن است تغییرات بیومکانیکی نامطلوبی ایجاد کنند.	نا ایمن
						سرعت حداکثر هوازی (MAS)- حداکثر مصرف اکسیژن (VO-۲max)- لاکتات خون- ضربان قلب- زمان- سرعت- قدرت- نوسان عمودی مرکز ثقل- فرکانس گام، طول گام، زمان تماس، نوسان عمودی مرکز ثقل، سختی پا و سختی عمودی.		
وایوئی و همکاران/ ۲۰۲۵ (۳۰)	آزمایشگاهی	۱۳مرد دونده مسافت با میانگین سنی ۲۱ سال	نخبه	کفش‌های میخیِ مجهز به فناوری پیشرفته کفش (AFT)- Nike ZoomX Dragon-and Drag- fly۱ Nike Air -onfly۲ Zoom Victory۱		سیستم متا مکس	عملکرد بهتری و احساس راحتی بیشتری نسبت به کفش‌های مجهز به صفحه کربن	نسبتا ایمن
						مصرف اکسیژن- تولید دی‌اکسید کربن- نسبت تبادل گازی تنفسی- پارامترهای راه رفتن		
اسلامی و همکاران/ ۲۰۱۶ (۳۱)	نیمه‌تجربی	۱۸ آزمودنی مرد سالم با میانگین سنی ۲۳ سال	-	سه کفش ورزشی با جنس زیره پلی‌اورتان (PU)، نانوکامپوزیت پلی‌اورتان- کلی ۱درصد (NPU۱) و ۲درصد (NPU۲)		توان مچ‌پا- سرعت زاویه‌ای- گشتاور	تسهیل کنترل حرکات مچ‌پا را درصفحه هوریزنتال	ایمن
						صفحه نیروسنج- دوربین- ۲۲ مارکر		

بحث

هدف از مطالعه حاضر، مرور نظام‌مند پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه اثرات بیومکانیکی کفش‌های دارای فناوری پیشرفته و صفحات فیبر کربن بر متغیرهای عملکردی و شاخص‌های مرتبط با آسیب در دوندگان بود. یافته‌های این مرور نشان داد که اگرچه کفش‌های دارای فناوری پیشرفته قادرند الگوهای بیومکانیکی دویدن را تغییر دهند، اما اثرات آن‌ها بر عملکرد و خطر آسیب در تمامی مطالعات یکسان نبوده است. به نظر می‌رسد پاسخ دوندگان به این فناوری‌ها حاصل تعامل پیچیده‌ای میان ویژگی‌های ساختاری کفش و خصوصیات بیومکانیکی فرد می‌باشد. در زمینه عملکرد، نتایج مطالعات بررسی شده حاکی از آن بود که وجود صفحه فیبر کربن به‌تنهایی تضمین‌کننده بهبود عملکرد نیست. هیالی و همکاران (۲۶) نشان دادند که کاهش سختی خمشی طولی در کفش Vaporfly تاثیر معنی‌داری بر اقتصاد دویدن ندارد و تغییرات بیومکانیکی مشاهده‌شده نیز محدود است.

همچنین وایوئی و همکاران (۳۲) گزارش کردند که در برخی دوندگان، کفش‌های مجهز به فوم پیشرفته بدون صفحه کربنی اقتصاد دویدن بهتری نسبت به کفش‌های دارای صفحه کربنی ایجاد می‌کنند و افزایش بیش از حد سختی کفش حتی ممکن است هزینه انرژی را افزایش دهد. از سوی دیگر، سانتاماریا و همکاران (۳۱) نشان دادند که کفش‌های دارای فناوری پیشرفته در دویدن کوهستانی موجب بهبود عملکرد یا شاخص‌های فیزیولوژیک نمی‌شوند. این یافته‌های همسو نشان می‌دهند که مزایای عملکردی مشاهده‌شده را نمی‌توان فقط به حضور صفحه کربنی نسبت داد.

در مقابل، برخی مطالعات نشان داده‌اند که طراحی صفحه کربنی می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد ایفا کند. یوفان و همکاران (۲۷) گزارش کردند که صفحات کربنی خمیده با کاهش زوایا و ممان‌های مفاصل ران و زانو، الگوی حرکتی اندام تحتانی را بهینه می‌کنند. همچنین فیو و همکاران (۲۸) نشان دادند که تغییر ساختار صفحه کربنی موجب افزایش سرعت زاویه‌ای پلانتارفلکشن مفصل متاتارسوفالانژیال و افزایش کار مثبت مفصل زانو می‌شود. اسلامی و همکاران (۳۳) نیز گزارش کردند که استفاده از زیره‌های مبتنی بر فناوری نانو می‌تواند توان تولیدی مچ پا را در صفحه ساجیتال افزایش دهد. در مجموع، این مطالعات نشان می‌دهند که بهبود عملکرد احتمالا حاصل تعامل میان صفحه کربنی، ویژگی‌های فوم میان‌کفی، هندسه گهواره‌ای کفش و نحوه توزیع توان مکانیکی در اندام تحتانی است. به عبارت دیگر، صفحه کربنی زمانی می‌تواند اثر عملکردی مطلوب ایجاد کند که در کنار سایر ویژگی‌های مکانیکی کفش قرار گیرد. از منظر مکانیکی، چندین سازوکار می‌تواند این یافته‌ها را توضیح دهد. فوم‌های با قابلیت بازگشت انرژی بالا می‌توانند بخشی از انرژی مکانیکی ذخیره‌شده در فاز اتکا را در فاز پیش‌رانش بازگردانند، در حالی که صفحات کربنی با افزایش سختی نسبی جلوی پا و محدود کردن خم‌شدگی بیش از حد مفصل متاتارسوفالانژیال، اتلاف انرژی را کاهش می‌دهند (۲۶، ۲۸). علاوه بر این، طراحی خمیده برخی صفحات کربنی با ایجاد اثر گهواره‌ای، انتقال مرکز فشار را آسان کرده و نیاز به تولید گشتاورهای زیاد در مفاصل انتهایی اندام تحتانی را کاهش می‌دهد (۲۷). بنابراین به نظر می‌رسد صرفه‌جویی انرژی و بهبود عملکرد ناشی از برهم‌کنش چندین عامل مکانیکی باشد و نه صرفاً افزایش سختی خمشی طولی کفش. در ارتباط با متغیرهای بیومکانیکی، تقریبا تمامی مطالعات مرورشده وجود تغییراتی در الگوی حرکت اندام تحتانی را تأیید کردند. یوفان و همکاران (۲۷) نشان دادند که شکل صفحات فیبر کربن می‌تواند زوایا و ممان‌های مفاصل ران و زانو را تغییر دهد. کیم و همکاران (۲۹) گزارش کردند که کفش‌های دارای فناوری پیشرفته با تغییر الگوی فرود پا به سمت فرود میانی یا جلوی پا، افزایش پلانتارفلکشن مچ پا در تماس اولیه و کاهش نیروهای واکنش مفصلی مچ پا همراه هستند. همچنین فیو و همکاران (۲۸) تغییر در سرعت زاویه‌ای مفصل متاتارسوفالانژیال و افزایش کار مثبت زانو را گزارش کردند. اسلامی و همکاران (۳۳) نیز افزایش توان تولیدی مچ پا در صفحه ساجیتال را نشان دادند، در حالی که سانتاماریا و همکاران (۳۱) تغییراتی در فرکانس گام و نوسان عمودی مرکز جرم مشاهده کردند. همسویی این مطالعات نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین کفش قادرند الگوهای کینماتیکی و کینتیکی دویدن را تحت تأثیر قرار دهند، هرچند جهت و شدت این تغییرات به نوع طراحی کفش و ویژگی‌های فردی دونده وابسته است.

مکانیزم احتمالی این تغییرات را می‌توان در تغییر مسیر انتقال نیرو در طول زنجیره حرکتی اندام تحتانی جستجو کرد. افزایش ضخامت و خاصیت ارتجاعی میان‌کفی همراه با حضور صفحات نسبتاً سخت‌تر، محل اعمال نیرو، زمان‌بندی تولید گشتاورهای مفصلی و نحوه توزیع کار مکانیکی بین مفاصل را تغییر می‌دهد (۲۸، ۲۹). در نتیجه بخشی از کاری که در شرایط عادی توسط عضلات و تاندون‌ها انجام می‌شود، از طریق تغییر شکل الاستیک اجزای کفش تأمین شده و الگوی عملکرد مفاصل تغییر می‌کند. همچنین تغییر موقعیت مرکز فشار و اثر گهواره‌ای کفش می‌تواند نیاز به خم‌شدگی زیاد مفاصل پنجه پا را کاهش داده و موجب تغییر در فعالیت عضلات اندام تحتانی شود (۲۷، ۲۹).

یکی از مهم‌ترین موضوعات مطرح‌شده در مطالعات بررسی شده، ارتباط کفش‌های پیشرفته با خطر آسیب بود. بخش قابل توجهی از مطالعات نشان دادند که فناوری‌های نوین کفش می‌توانند برخی عوامل خطر آسیب‌های ناشی از استفاده بیش از حد را کاهش دهند.

سانگ و همکاران (۱۹) گزارش کردند که صفحات کربنی خمیده موجب کاهش فشار اوج در ناحیه جلوی پا و توزیع یکنواخت‌تر بار می‌شوند. یوفان و همکاران (۲۷) نیز کاهش زوایا و ممان‌های مفاصل ران و زانو را عاملی بالقوه در کاهش بارهای مکانیکی وارد بر اندام تحتانی دانستند. همچنین کیم و همکاران (۲۹) نشان دادند که کفش‌های دارای فناوری پیشرفته با کاهش نیروهای واکنش مفصلی مچ پا و نیروهای عضلانی برخی عضلات ساق می‌توانند خطر تاندینوپاتی آشیل و شکستگی‌های استرسی متاتارس را کاهش دهند. این مطالعات از این دیدگاه حمایت می‌کنند که توزیع مناسب‌تر بار و کاهش بارهای تکراری وارد بر بافت‌ها می‌تواند در پیشگیری از آسیب‌های ناشی از استفاده بیش از حد نقش داشته باشد. با این حال، تمامی مطالعات نتایج مشابهی گزارش نکردند. جعفرنژاد و همکاران (۲۵) نشان دادند که استفاده از کفش‌های ناپایدار در مقایسه با کفش‌های رایج ممکن است احتمال بروز عوامل خطر مرتبط با شکستگی استرسی درشت‌نی را افزایش دهد. همچنین منصور اسلامی و همکاران (۳۰) گزارش کردند که نوع کفش می‌تواند برخی متغیرهای مرتبط با خطر شکستگی استرسی درشت‌نی را تحت تأثیر قرار دهد. این یافته‌های ناهمسو نشان می‌دهد که تمامی فناوری‌های به‌کاررفته در کفش‌های ورزشی الزاما اثر محافظتی ندارند و در برخی شرایط ممکن است موجب تغییرات نامطلوب در الگوی بارگذاری اندام تحتانی شوند. تفاوت در طراحی کفش‌ها، میزان سختی صفحات، ویژگی‌های فوم میان‌کفی، سطح مهارت دوندگان، نوع فرود پا و شرایط اجرای آزمون می‌تواند از مهم‌ترین دلایل اختلاف نتایج مطالعات باشد. بنابراین به نظر می‌رسد اثر فناوری‌های نوین کفش بر خطر آسیب ماهیتی وابسته به فرد و وابسته به طراحی دارد و نمی‌توان درباره اثرات آن‌ها حکم کلی صادر کرد. از منظر کاربردهای بالینی و مربیگری، نتایج این مرور نشان می‌دهد که انتخاب کفش‌های دارای فناوری پیشرفته باید متناسب با ویژگی‌های هر دونده انجام شود و نمی‌توان یک نوع کفش را برای همه افراد مناسب دانست. در دوندگان نخبه که به دنبال بهبود عملکرد و افزایش اقتصاد دویدن هستند، استفاده از کفش‌های مجهز به صفحات فیبر کربن و فوم‌های با قابلیت بازگشت انرژی بالا، به‌ویژه در شرایط مسابقه، می‌تواند در صورت تناسب با ویژگی‌های بیومکانیکی فرد مفید باشد. در مقابل، برای دوندگان تفریحی که معمولاً با شدت و حجم تمرین کمتری فعالیت می‌کنند، انتخاب کفش بر اساس راحتی، تناسب با الگوی دویدن و کاهش فشارهای مکانیکی بر اندام تحتانی، نسبت به بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته اهمیت بیشتری دارد. همچنین، با توجه به تفاوت الگوی فرود پا میان دوندگان، انتظار می‌رود افراد پاشنه‌رو و میان‌پارو یا جلوی‌پارو پاسخ‌های متفاوتی به این نوع کفش‌ها نشان دهند. بنابراین ارزیابی الگوی فرود، سابقه آسیب و ویژگی‌های بیومکانیکی هر دونده پیش از انتخاب کفش می‌تواند به مربیان و متخصصان توانبخشی ورزشی در اتخاذ تصمیمی مناسب‌تر کمک کند و احتمال بروز آسیب یا عدم سازگاری با این فناوری‌ها را کاهش دهد. البته این مطالعه دارای محدودیت‌هایی هم بود نخست، مطالعات وارد شده از نظر نوع کفش، شکل و سختی صفحات کربنی، ویژگی‌های میان‌کفی، سطح آمادگی آزمودنی‌ها، سرعت دویدن و متغیرهای ارزیابی‌شده ناهمگن بودند که مقایسه مستقیم نتایج را محدود می‌کرد. دوم، بخش عمده مطالعات در شرایط آزمایشگاهی و طی آزمون‌های کوتاه‌مدت انجام شده بودند و اطلاعات محدودی درباره سازگاری‌های بلندمدت، عملکرد واقعی در مسابقات و بروز واقعی آسیب‌ها ارائه کردند. سوم، بیشتر مطالعات بر روی مردان جوان یا دوندگان نخبه انجام شده و شواهد محدودی در خصوص زنان و سالمندان وجود دارد. چهارم، بسیاری از مطالعات از شاخص‌های بیومکانیکی به‌عنوان جانشین خطر آسیب استفاده کرده‌اند و ارتباط مستقیم این شاخص‌ها با بروز واقعی آسیب هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است. از این رو، انجام مطالعات همراستا با حجم نمونه بیشتر که به‌صورت همزمان پیامدهای عملکردی، بیومکانیکی و آسیب‌شناختی را بررسی کنند، برای درک دقیق‌تر اثرات فناوری‌های نوین کفش ضروری به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مرور سیستماتیک نشان داد که کفش‌های دارای فناوری پیشرفته و صفحات فیبر کربن می‌توانند بر متغیرهای بیومکانیکی، عملکردی و برخی شاخص‌های مرتبط با آسیب در دوندگان تأثیر بگذارند. با این حال، جهت و میزان این اثرات در مطالعات مختلف یکسان نبوده و به عواملی نظیر طراحی صفحه کربنی، ویژگی‌های میان‌کفی، شرایط دویدن و خصوصیات فردی دوندگان وابسته است.

به نظر می‌رسد مزایای عملکردی این کفش‌ها حاصل تعامل چندین ویژگی ساختاری کفش بوده و صرفا به وجود صفحه فیبر کربن محدود نمی‌شود. بنابراین، انتخاب و استفاده از این کفش‌ها باید با توجه به ویژگی‌های فردی دونده، نوع فعالیت و اهداف عملکردی انجام شود و برای تعیین اثرات بلندمدت آن‌ها بر عملکرد و خطر آسیب، انجام مطالعات بیشتری ضروری است.

سپاسگزاری

از تمامی پژوهشگران در این حوزه کمال تشکر و قدردانی را داریم.

ملاحظات اخلاقی

این مقاله از نوع مروری است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

1. Edouard P, Caumeil B, Giroux C, Bruneau A, Tondut J, Navarro L, et al. Epidemiology of injury complaints in elite sprinting athletes in athletics (track and field). Applied Sciences. 2023;13(14):8105. https://doi.org/10.3390/app13148105
2. Edouard P, Dandrieux P-E, Junge A, Navarro L, Giroux C, Guex K, et al. Is the risk of muscle injuries higher in the finals than in previous rounds of the 100 m, 200 m and 400 m sprints of international athletics championships? Journal of science and medicine in sport. 2024;27(5):302-6. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2024.02.007
3. Xiao X, Lian A, Li Z, Fan Y. Trends and hotspots in running shoe research: a bibliometric study from 2005 to 2024. Frontiers in Sports and Active Living. 2025;7:1609141. https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1609141
4. Burns GT, Tam N. Is it the shoes? A simple proposal for regulating footwear in road running. BMJ Publishing Group Ltd and British Association of Sport and Exercise Medicine; 2020. p. 439-40. https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-100480
5. Frederick E. Let's just call it advanced footwear technology (AFT). Taylor & Francis; 2022. p. 131-. https://doi.org/10.1080/19424280.2022.2127526
6. Hoogkamer W, Kipp S, Frank JH, Farina EM, Luo G, Kram R. A comparison of the energetic cost of running in marathon racing shoes. Sports Medicine. 2018;48(4):1009-19. https://doi.org/10.1007/s40279-017-0811-2
7. Oh K, Park S. The bending stiffness of shoes is beneficial to running energetics if it does not disturb the natural MTP joint flexion. Journal of biomechanics. 2017;53:127-35. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.01.014
8. Tenforde A, Hoenig T, Saxena A, Hollander K. Bone stress injuries in runners using carbon fiber plate footwear. Sports Medicine. 2023;53(8):1499-505. https://doi.org/10.1007/s40279-023-01818-z
9. Hébert-Losier K, Pamment M. Advancements in running shoe technology and their effects on running economy and performance-a current concepts overview. Sports Biomechanics. 2023;22(3):335-50. https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2110512
10. Hannigan J, Pollard CD. Differences in running biomechanics between a maximal, traditional, and minimal running shoe. Journal of science and medicine in sport. 2020;23(1):15-9. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2019.08.008
11. Hardin EC, Van Den Bogert AJ, Hamill J. Kinematic adaptations during running: effects of footwear, surface, and duration. Medicine & Science in Sports & Exercise. 2004;36(5):838-44. https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000126605.65966.40
12. Dubbeldam R, Buurke J, Simons C, Groothuis-Oudshoorn C, Baan H, Nene A, et al. The effects of walking speed on forefoot, hindfoot and ankle joint motion. Clinical Biomechanics. 2010;25(8):796-801. https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2010.06.007
13. Lundgren P, Nester C, Liu A, Arndt A, Jones R, Stacoff A, et al. Invasive in vivo measurement of rear-, mid-and forefoot motion during walking. Gait & posture. 2008;28(1):93-100. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.10.009
14. Durante G, Clermont C, Barrons Z, Fukuchi C, Stefanyshyn D, Wannop JW. The influence of longitudinal bending stiffness on running economy and biomechanics in male and female runners. Footwear Science. 2024;16(3):171-7. https://doi.org/10.1080/19424280.2024.2369985
15. McLeod AR, Bruening D, Johnson AW, Ward J, Hunter I. Improving running economy

through altered shoe bending stiffness across speeds. Footwear Science. 2020;12(2):79-89. https://doi.org/10.1080/19424280.2020.1734870
16. Willwacher S, König M, Potthast W, Brüggemann G-P. Does specific footwear facilitate energy storage and return at the metatarsophalangeal joint in running? Journal of applied biomechanics. 2013;29(5):583-92. https://doi.org/10.1123/jab.29.5.583
17. Song Y, Cen X, Sun D, Bálint K, Wang Y, Chen H, et al. Curved carbon-plated shoe may further reduce forefoot loads compared to flat plate during running. Scientific Reports. 2024;14(1):13215. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64177-3
18. Day E, Hahn M. Optimal footwear longitudinal bending stiffness to improve running economy is speed dependent. Footwear Science. 2020;12(1):3-13. https://doi.org/10.1080/19424280.2019.1696897
19. Flores N, Rao G, Berton E, Delattre N. Increasing the longitudinal bending stiffness of runners' habitual shoes: An appropriate choice for improving running performance? Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology. 2023;237(3):121-33. https://doi.org/10.1177/17543371211041220
20. Lu R, Chen H, Huang J, Ye J, Gao L, Liu Q, et al. Biomechanical investigation of lower limbs during slope transformation running with different longitudinal bending stiffness shoes. Sensors. 2024;24(12):3902. https://doi.org/10.3390/s24123902
21. Cigoja S, Firminger CR, Asmussen MJ, Fletcher JR, Edwards WB, Nigg BM. Does increased midsole bending stiffness of sport shoes redistribute lower limb joint work during running? Journal of science and medicine in sport. 2019;22(11):1272-7. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2019.06.015
22. Downs SH, Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. Journal of epidemiology & community health. 1998;52(6):377-84. https://doi.org/10.1136/jech.52.6.377
23. Jafarnezhadgero, Yadgar, Oranj Vaz, Aydin, Pour H, Amin. Comparison of reaction force component values during running with running shoes and control in people with knee braces. Journal of Rehabilitation Research in Nursing. 2021;7(2):20-8.
24. Healey LA, Hoogkamer W. Longitudinal bending stiffness does not affect running economy in Nike Vaporfly shoes. Journal of sport and health science. 2022;11(3):285-92. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.07.002
25. Xu Y, Zhu C, Fang Y, Lu Z, Song Y, Hu C, et al. The effects of different carbon-fiber plate shapes in shoes on lower limb biomechanics following running-induced fatigue. Frontiers in bioengineering and biotechnology. 2025;13:1539976. https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1539976
26. Fu F, Levadnyi I, Wang J, Xie Z, Fekete G, Cai Y, et al. Effect of the construction of carbon fiber plate insert to midsole on running performance. Materials. 2021;14(18):5156. https://doi.org/10.3390/ma14185156
27. Kim H, Ahn J. Technologically advanced running shoes reduce biomechanical factors of running related injury risk. Scientific reports. 2025;15(1):17828. https://doi.org/10.1038/s41598-025-03029-0
28. Mansour A, Amin G, Seyed Ismail Han, Vahid J, Elham G. The effect of shoe type on variables associated with tibial stress fracture injury during running in healthy young men. 2014.
29. Corbí-Santamaría P, Gil-Calvo M, Herrero-Molleda A, García-López J, Boullosa D, García-Tormo JV. The impact of advanced footwear technology on the performance and running biomechanics of mountain runners. Applied sciences. 2025;15(2):531. https://doi.org/10.3390/app15020531
30. Wu Y, Zhang H, Wang S, Lu C, Xing Q, Tian Y, et al. Comparative analysis of foam-only versus carbon-plated advanced footwear technology spikes in distance runners. Frontiers in Physiology. 2025;16:1703854. https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1703854
31. Eslami, Mansour, Basiri. The effect of using nanotechnology in the sole of sports shoes on ankle power in the stance phase of running. Journal of Applied Sports Physiology. 2016;12(23):43-52.