Journal of Gerontology (joge) **Original Article**

Vol 11, No 1, Spring 2026 10.22034/JOGE.11.1.6

The Effect of Physical Activities During Childhood and Adolescence on Biomechanical Parameters in Old Age: A Systematic Review

Seyed Morteza Mansouri Mehrian[1*], Seyed Abolghasem Sadri[2], Maryam kheirdeh[2]

1. Department of Physical Education and Sport Sciences, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Department Exercise Physiology, Shi.C. Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

Corresponding Author: Seyed Morteza Mansouri Mehrian, Department of Physical Education and Sport Sciences, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Email: morteza.mansori405@gmail.com

Received: 2026/01/7 Accepted: 2026/02/18

Abstract

Introduction: Physical activity during childhood and adolescence is known to be a key factor in biomechanical and physiological development. This critical period of development is the time for the formation of stable movement patterns and neuromuscular organization, the effects of which persist into old age. The aim of this systematic review was to investigate the effect of physical activity during childhood and adolescence on biomechanical parameters in old age.

Methods: This study was conducted in accordance with the PRISMA 2020 guidelines. A comprehensive search was conducted in international and domestic databases between January 2015 and December 2025. Keywords were designed by combining Persian and English terms related to physical activity during growth and biomechanical parameters of aging. After entering the results into the resource management software, duplicates were removed and title and abstract screening was performed by two independent researchers.

Results: Out of a total of 1280 identified articles, after screening and applying inclusion and exclusion criteria, 39 eligible studies were included in the final analysis. These studies were categorized into four main axes: muscle function, joint torque and range of motion, gait kinematics and kinetics, and balance-COP-muscle stiffness-motor efficiency.

Conclusion: Physical activity during childhood and adolescence modulates biomechanical decline associated with aging by creating functional reserves in muscles, joints, and movement patterns. These adaptations reduce the risk of falls and motor disability and improve the quality of life of the elderly. Designing diverse and continuous exercise programs during growth periods can be an effective strategy for preventing functional problems in aging.

Keywords: Physical activity, Childhood, Biomechanical parameters, Aging.

نشریه سالمندشناسی مقاله پژوهشی

دوره ۱۱ شماره ۱، بهار ۱۴۰۵

10.22034/JOGE.11.1.6

تأثیر فعالیت‌های بدنی دوران کودکی و نوجوانی بر پارامترهای بیومکانیکی در سالمندی: یک مطالعه مروری سیستماتیک

سیدمرتضی منصوری مهریان[1*]، سیدابوالقاسم صدری[2]، مریم خیرده [2]

۱. گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، ایران.
۲. گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، ایران.

نویسنده مسئول: سید مرتضی منصوری مهریان، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، ایران.
ایمیل: morteza.mansori405@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

چکیده

مقدمه: فعالیت‌های بدنی در دوران کودکی و نوجوانی به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی رشد بیومکانیکی و فیزیولوژیکی شناخته می‌شوند. این دوره حساس رشد، زمان شکل‌گیری الگوهای پایدار حرکتی و سازماندهی عصبی–عضلانی است که اثرات آن تا سالمندی باقی می‌ماند. هدف این مطالعه مروری نظام‌مند، بررسی تأثیر فعالیت‌های بدنی در دوران کودکی و نوجوانی بر پارامترهای بیومکانیکی در دوران سالمندی بود.

روش کار: این پژوهش مطابق دستورالعمل‌های PRISMA 2020 انجام شد. جستجوی جامع در پایگاه‌های بین‌المللی و داخلی طی بازه ژانویه ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۲۵ صورت گرفت. کلیدواژه‌ها با ترکیب اصطلاحات فارسی و انگلیسی مرتبط با فعالیت بدنی دوران رشد و پارامترهای بیومکانیکی سالمندی طراحی شدند. پس از وارد کردن نتایج در نرم‌افزار مدیریت منابع، موارد تکراری حذف شد و غربالگری عنوان و چکیده توسط دو پژوهشگر مستقل انجام گرفت.

یافته‌ها: از مجموع ۱۲۸۰ مقاله شناسایی‌شده، پس از غربالگری و اعمال معیارهای ورود و خروج، ۳۹ مطالعه واجد شرایط وارد تحلیل نهایی شدند. این مطالعات در چهار محور اصلی دسته‌بندی شدند: عملکرد عضلات، گشتاور مفاصل و دامنه حرکتی، کینماتیک و کینتیک راه‌رفتن، و تعادل–مرکز فشار–سختی عضله–کارایی حرکتی.

نتیجه‌گیری: فعالیت‌های بدنی در دوران کودکی و نوجوانی با ایجاد ذخیره عملکردی در عضلات، مفاصل و الگوهای حرکتی، افت بیومکانیکی مرتبط با سالمندی را تعدیل می‌کنند. این سازگاری‌ها موجب کاهش خطر سقوط و ناتوانی حرکتی و ارتقای کیفیت زندگی سالمندان می‌شوند. طراحی برنامه‌های ورزشی متنوع و پیوسته در دوره‌های رشد می‌تواند راهبردی مؤثر برای پیشگیری از مشکلات عملکردی در سالمندی باشد.

کلیدواژه‌ها: فعالیت بدنی، دوران کودکی، پارامترهای بیومکانیکی، دوران سالمندی.

مقدمه

فعالیت‌های بدنی در دوران کودکی و نوجوانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محرک‌های رشد بیومکانیکی و فیزیولوژیکی شناخته می‌شوند. این دوره حساس رشد، زمان شکل‌گیری الگوهای پایدار حرکتی و سازمان‌دهی عصبی–عضلانی است که اثرات آن تا سالمندی باقی می‌ماند. بارهای مکانیکی ناشی از ورزش و بازی‌های فعال، از طریق مکانوتراسنکشن در فیبرهای عضلانی و ماتریکس خارج‌سلولی، تغییرات پایدار در بیان ژنی، آرایش کلاژنی و نسبت فیبرهای تند–کند ایجاد می‌کنند (۱). این تغییرات موجب افزایش تراکم استخوان، بهبود زاویه پِنیشن عضلات و ارتقای ظرفیت تولید نیرو می‌شوند (۲). همزمان، سیستم عصبی–عضلانی با پالایش سینرژی‌های حرکتی، کاهش نویز عصبی و بهینه‌سازی زمان‌بندی واحدهای حرکتی، الگوهای کنترل را تثبیت می‌کند که در سالمندی به‌عنوان ذخیره عملکردی ظاهر می‌شوند (۳). بنابراین، فعالیت‌های بدنی در این دوره نه‌تنها به رشد جسمانی کمک می‌کنند، بلکه بنیانی برای سلامت عملکردی در سال‌های بعدی زندگی فراهم می‌سازند.

عملکرد عضلات شامل توان، قدرت، استقامت و نرخ تولید نیرو (RFD) یکی از شاخص‌های کلیدی بیومکانیکی است. تمرینات مقاومتی در نوجوانی موجب افزایش سطح مقطع فیبرهای عضلانی، تراکم میوفیبریل‌ها و بهبود زاویه پِنیشن می‌شوند که ظرفیت تولید نیرو را در دهه‌های بعدی حفظ می‌کنند (۴). فعالیت‌های هوازی در کودکی با افزایش ظرفیت اکسیداتیو، تراکم میتوکندری و کارایی برداشت کلسیم در شبکه سارکوپلاسمی، افت استقامتی مرتبط با سن را تعدیل می‌کنند (۵). نرخ تولید نیرو به‌طور ویژه به سرعت بسیج واحدهای حرکتی تند و سفتی–الاستیسیته سری وابسته است؛ تمرینات انفجاری در دوران رشد با بهبود کوپلینگ اکتین–میوزین و کاهش تأخیر الکترو–مکانیکی، RFD را در سالمندی پایدارتر می‌سازند (۶). این سازگاری‌ها با کاهش زمان توسعه نیرو و افزایش توان لحظه‌ای، به پیشگیری از ناتوانی‌های عملکردی مرتبط با سن کمک می‌کنند. گشتاور مفاصل و دامنه حرکتی از دیگر شاخص‌های بیومکانیکی هستند که تحت تأثیر فعالیت‌های بدنی اولیه قرار دارند. تمرینات کششی در نوجوانی موجب افزایش طول عضله، کاهش کراس‌لینک‌های کلاژنی و افزایش انعطاف‌پذیری مفصل می‌شوند (۷). این ویژگی در سالمندی به کاهش خشکی مفصلی و حفظ استقلال عملکردی کمک می‌کند (۸). تمرینات قدرتی در کودکی توانایی تولید گشتاور در مفاصل اصلی مانند زانو و لگن را تقویت کرده و در سالمندی به کاهش خطر ناتوانی حرکتی منجر می‌گردند (۹). از منظر عملکردی، حفظ گشتاور هیپ در اکستنشن و ابداکشن با استقلال در برخاستن، صعود پله و ثبات پاسچر مرتبط است. سرمایه‌گذاری زودهنگام بر هیپ–زانو، افت عملکردی مرتبط با سارکوپنیا را تعدیل می‌کند. این سازگاری‌ها با کاهش بارهای جبرانی و بهینه‌سازی توزیع نیرو، خطر درد و ناتوانی را در سالمندی کاهش می‌دهند.

کینماتیک راه‌رفتن (طول گام، کادنس، زمان فاز استانس)، و کینتیک (نیروهای عکس‌العمل زمین، گشتاور مفصلی) به تاریخچه تمرین وابسته هستند. فعالیت‌های هوازی و دویدن در نوجوانی با بهبود سفتی–الاستیسیته عناصر سری، افزایش ذخیره–رهاسازی انرژی الاستیک و کاهش هزینه متابولیک، اقتصاد راه‌رفتن را در سالمندی ارتقا می‌دهند (۱۰). بازی‌های چندجهتی با تغییرات سریع جهت، کنترل فاز انتقالی و تقارن بارگذاری را بهبود می‌بخشند و در سالمندی به کاهش عدم‌تقارن و نوسان گام منجر می‌شوند (۱۱). از منظر دینامیک، تمرینات زودهنگام با بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید–جذب نیرو در مفصل ران و زانو، پیک‌های غیرطبیعی نیروهای عکس العمل زمین را تعدیل کرده و بارهای مفصلی را در مسیرهای ایمن‌تری توزیع می‌کنند (۱۲). این تغییرات، خطر اختلالات راه‌رفتن و سقوط را کاهش می‌دهند. تعادل ایستا–پویا و کنترل پاسچر به یکپارچگی سیستم‌های وستیبولار، بینایی و حس عمقی و نیز به راهبردهای عصبی–عضلانی وابسته است. تمرینات تعادلی در کودکی با کاهش آستانه تشخیص نوسان، بهبود وزن‌دهی حسی و تقویت راهبردهای مچ پا–هیپ، نوسانات مرکز فشار (COP) را در سالمندی کاهش می‌دهند (۱۳). بازی‌های گروهی با بارهای پیش‌بینی‌نشده، انعطاف راهبردی و زمان‌بندی هم‌انقباضی را بهبود می‌بخشند و در سالمندی به ثبات پاسچر و کاهش وابستگی به هم‌انقباضات پرهزینه منجر می‌شوند (۱۴). از منظر کنترل بهینه، تاریخچه تمرین با کاهش نویز عصبی و بهبود فیلترکردن سیگنال‌های حسی، کنترل بازخوردی–پیش‌بینانه را کارآمدتر می‌سازد (۱۵). این سازگاری‌ها به کاهش خطر سقوط و حفظ استقلال عملکردی کمک می‌کنند.

سختی عضله و کارایی حرکتی از شاخص‌های بیومکانیکی

مهمی هستند که در سالمندی به‌طور مستقیم بر کیفیت زندگی اثر می‌گذارند. سختی عضله ترکیبی از ویژگی‌های پسیو ماتریکس خارج‌سلولی و تون فعال عصبی–عضلانی است. فعالیت‌های ورزشی متنوع در دوران نوجوانی با تعدیل ترکیب کلاژنی، کاهش کراس‌لینک‌های غیرآنزیمی و بهبود لغزش فاسیایی، سفتی پسیو را کاهش می‌دهند (۱۶). همزمان، تمرینات قدرتی–هوازی با تنظیم تون پایه و بهبود کنترل آلفا–گاما، سختی فعال را در محدوده کارآمد نگه می‌دارند (۱۷). نتیجه این سازگاری‌ها افزایش کارایی حرکتی است؛ یعنی کاهش هزینه انرژی برای تولید گشتاور و بهبود تطابق به وظایف روزمره. در سالمندی، این تغییرات به کاهش خستگی، کاهش دردهای عضلانی–اسکلتی و افزایش توانایی انجام فعالیت‌های مستقل منجر می‌شوند (۱۸). هماهنگی عصبی–عضلانی و الگوهای فعال‌سازی عضلات نیز تحت تأثیر فعالیت‌های بدنی اولیه قرار دارند. تمرینات مقاومتی در نوجوانی با افزایش نرخ فایرینگ واحدهای حرکتی، کاهش هم‌انقباضی غیرضروری و بهبود هم‌زمانی، تولید نیرو را کارآمدتر می‌سازند (۱۹). تمرینات مهارتی–چابکی با پالایش سینرژی‌های حرکتی و کاهش درجات آزادی مؤثر، نوسان فرمان عصبی را کم کرده و ثبات خروجی را افزایش می‌دهند (۲۰). این تغییرات در سالمندی به‌صورت کاهش زمان تأخیر الکترو–مکانیکی، بهبود نرخ تولید نیرو و کاهش وابستگی به راهبردهای جبرانی پرهزینه ظاهر می‌شوند (۲۱). بنابراین، تاریخچه تمرین در دوران رشد می‌تواند کیفیت اجرای وظایف پویا مانند برخاستن، عبور از موانع و حفظ تعادل در شرایط غیرمنتظره را پایدار سازد. از منظر مسیرهای علّی، فعالیت بدنی اولیه با ایجاد «ذخیره عملکردی» در سه سطح، بافت، کنترل عصبی و اقتصاد حرکت، شیب افت مرتبط با سن را تعدیل می‌کند. کاهش فعالیت از کودکی به نوجوانی و بزرگسالی، این ذخیره را فرسایش داده و به افت توان، کاهش دامنه حرکتی و اختلال در کیفیت راه‌رفتن منجر می‌شود (۲۲). مدل‌های طولی نشان می‌دهند که تداوم بارگذاری مکانیکی با شدت و تنوع کافی، مسیرهای رگرسیونی عملکرد را به‌صورت معنی‌دار جابجا می‌کند (۲۳). در مقابل، قطع یا یکنواختی تمرین، به افزایش سفتی پسیو، کاهش ظرفیت اکسیداتیو و اختلال در کنترل پیش‌بینانه می‌انجامد (۲۴). بنابراین، مداخلات زودهنگام و پیوسته برای حفظ سطح فعالیت و تنوع بارگذاری، شرط لازم برای پایداری بیومکانیکی در سالمندی است.

درک عملی این شواهد به سیاست‌گذاری نیازمند طراحی برنامه‌های مدرسه–جامعه با سه اصل کلیدی است: چندوجهی بودن (قدرت، هوازی، کشش، تعادل)، تنوع بارگذاری (جهت، سرعت، دامنه)، و پیوستگی در طول دوره‌های رشد (۲۵). ادغام ارزیابی‌های بیومکانیکی، مانند الکترومایوگرافی (EMG)، صفحه نیرو و موشن‌کپچر، در پایش برنامه‌ها، امکان تنظیم مبتنی بر داده و هدف‌گذاری بر شاخص‌های حساس به تغییر را فراهم می‌کند (۲۶). همچنین، مسیرهای انتقال به بزرگسالی باید با حفظ هویت حرکتی و دسترسی به محیط‌های فعال، از افت فعالیت جلوگیری کنند (۲۷).

با افزایش سن، پارامترهای بیومکانیکی نظیر قدرت عضلانی، سرعت راه‌رفتن، طول گام و ثبات پاسچر دچار افت قابل توجه می‌شوند؛ مطالعات اخیر نشان داده‌اند سالمندان کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی در توان عضلانی و کاهش معنادار در سرعت و طول گام را تجربه می‌کنند که این تغییرات با افزایش خطر زمین‌خوردن و کاهش کیفیت زندگی همراه است (۱۱، ۱۲). اهمیت این موضوع زمانی برجسته‌تر می‌شود که شواهد نشان می‌دهد بخشی از این تغییرات نه‌تنها ناشی از فرایند سالمندی، بلکه به کیفیت رشد حرکتی و میزان فعالیت بدنی در دوران کودکی و نوجوانی وابسته است (۱۳، ۱۴). مکانیسم‌های احتمالی اثر فعالیت بدنی در سال‌های رشد شامل تقویت مسیرهای عصبی–عضلانی، افزایش ذخیره حرکتی، بهبود سازمان‌دهی قشری، توسعه الگوهای حرکتی کارآمد، افزایش تراکم استخوان و شکل‌گیری الگوهای پایدار کنترل پاسچر است؛ مکانیسم‌هایی که می‌توانند در سالمندی به حفظ عملکرد بیومکانیکی کمک کنند (۱۵، ۱۸). با وجود این شواهد، هنوز مشخص نیست که فعالیت بدنی دوران رشد تا چه حد می‌تواند تغییرات بیومکانیکی سالمندی را تعدیل کند و چه ابعادی از عملکرد حرکتی بیشترین تأثیرپذیری را دارند؛ مرورهای اخیر نیز به وجود خلأ دانشی و تناقض در نتایج مطالعات اشاره کرده‌اند (۱۹، ۲۰).

این چارچوب، سرمایه‌گذاری بلندمدت بر ذخیره عملکردی سالمندی را عملیاتی می‌سازد و هزینه‌های ناتوانی را کاهش می‌دهد. با توجه به افزایش جمعیت سالمندان و شیوع اختلالات عملکردی مرتبط با افت بیومکانیکی، شناسایی عوامل مؤثر بر حفظ توانایی‌های حرکتی اهمیت حیاتی

دارد. اگرچه شواهد متعددی نشان داده‌اند که فعالیت‌های بدنی در دوران کودکی و نوجوانی می‌توانند بر عملکرد عضلات، گشتاور مفاصل، کینماتیک راه‌رفتن، تعادل و کارایی حرکتی در سالمندی اثرگذار باشند، اما این یافته‌ها پراکنده و غیرنظام‌مند گزارش شده‌اند. نبود یک مرور جامع موجب شده است که ارتباط علّی و مکانیسم‌های زیربنایی این تأثیرات به‌طور کامل روشن نباشد. ضرورت انجام مطالعه حاضر در یک مرور نظام‌مند، گردآوری و تحلیل شواهد موجود درباره تأثیر فعالیت‌های بدنی دوران رشد بر پارامترهای بیومکانیکی سالمندی است. بنابراین، هدف این مطالعه بررسی تأثیر فعالیت‌های بدنی دوران کودکی و نوجوانی بر پارامترهای بیومکانیکی مرتبط با سلامت و کیفیت زندگی در سالمندی است.

روش کار

این مطالعه به‌صورت مرور نظام‌مند طراحی شد و جستجو مطابق دستورالعمل‌های PRISMA 2020 برای انتخاب، غربالگری و گزارش مطالعات استفاده گردید. جستجوی مقالات در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۲۵ انجام شد تا شواهد اخیر و معتبر در حوزه تأثیر فعالیت‌های بدنی دوران کودکی و نوجوانی بر پارامترهای بیومکانیکی سالمندی گردآوری شود. برای دستیابی به جامعیت، پایگاه‌های بین‌المللی شامل PubMed، Scopus، Web of Science، Embase و Cochrane Library مورد بررسی قرار گرفتند. همزمان، پایگاه‌های داخلی نظیر SID، Magiran، IranDoc و Civilica نیز جستجو شدند تا پژوهش‌های فارسی‌زبان و پایان‌نامه‌های دانشگاهی مرتبط وارد تحلیل شوند. کلیدواژه‌ها با ترکیب اصطلاحات انگلیسی و فارسی طراحی شدند؛ از جمله: childhood physical activity, adolescent, exercise, biomechanics, aging, muscle strength, gait, balance, range of motion, EMG, COP و معادل‌های فارسی مانند «فعالیت بدنی کودکی»، «تمرینات نوجوانی»، «بیومکانیک»، «سالمندی»، «قدرت عضله»، «گشتاور مفصل»، «راه‌رفتن»، «تعادل» و «الکترومایوگرافی». برای افزایش حساسیت و اختصاصی بودن نتایج، عملگرهای بولی (AND, OR) در استراتژی جستجو به‌کار رفت. نمونه‌ای از دستور جستجو در پایگاه PubMed به‌صورت زیر بود: (childhood OR exercise» OR physical activity) AND («older age» OR elderly OR aging) AND (adolescence» OR «quality of life» OR biomechanics).

معیارهای ورود شامل مطالعات انسانی، بررسی ارتباط فعالیت بدنی در کودکی/ نوجوانی با شاخص‌های بیومکانیکی سالمندی، مقالات انگلیسی و فارسی با متن کامل، و طراحی طولی یا کارآزمایی بالینی بودند. معیارهای خروج شامل مطالعات حیوانی، مقالات غیرمرتبط، مرورهای غیرسیستماتیک و گزارش‌های موردی بودند. فرآیند انتخاب مطالعات در پنج مرحله انجام شد: شناسایی اولیه، حذف موارد تکراری، غربالگری عنوان و چکیده، بررسی متن کامل و استخراج داده‌ها. فرآیند جستجو و غربالگری توسط دو پژوهشگر مستقل انجام شد. در موارد اختلاف نظر، پژوهشگر سوم به‌عنوان داور نهایی تصمیم‌گیری کرد. در مرحله جستجو و انتخاب مقالات، از هوش مصنوعی برای غربالگری یا انتخاب استفاده نشد؛ تنها ابزارهای مدیریت منابع (مانند EndNote و Mendeley) برای حذف موارد تکراری و سازمان‌دهی داده‌ها به کار گرفته شدند.

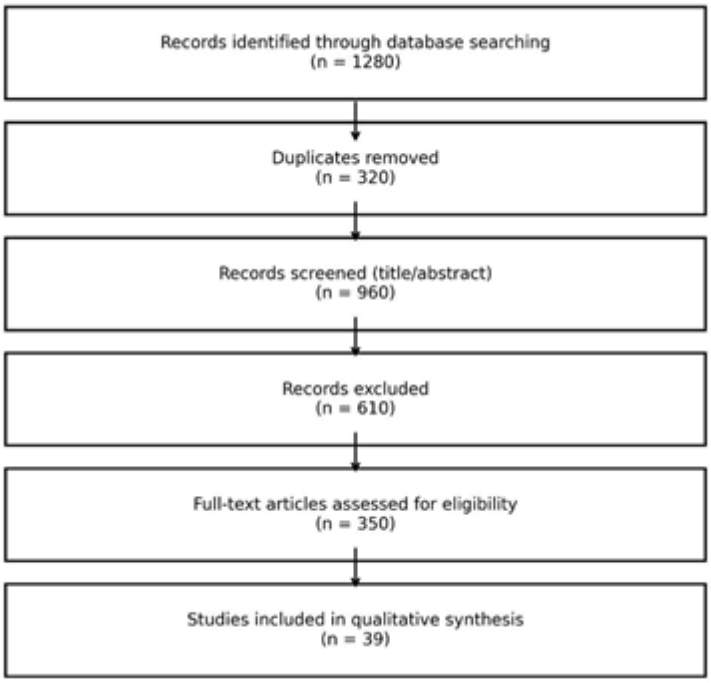
اطلاعات استخراج‌شده شامل مشخصات مطالعه، ویژگی‌های نمونه (سن، جنس، حجم نمونه)، نوع فعالیت بدنی (قدرتی، هوازی، کششی، تعادلی)، پارامترهای بیومکانیکی ارزیابی‌شده (قدرت عضله، گشتاور مفصل، کینماتیک راه‌رفتن، COP، EMG) و نتایج اصلی بودند. برای ارزیابی کیفیت مطالعات از ابزارهای معتبر مانند Cochrane Risk of Bias Tool برای کارآزمایی‌های بالینی و Newcastle-Ottawa Scale برای مطالعات مشاهده‌ای استفاده شد. به دلیل ناهمگونی طراحی و شاخص‌های مطالعات، تحلیل کیفی (narrative synthesis) به‌کار گرفته شد. در مواردی که داده‌های کمی مشابه وجود داشت، متاآنالیز با استفاده از مدل اثرات تصادفی انجام شد تا ارتباط فعالیت‌های بدنی دوران رشد با پارامترهای بیومکانیکی سالمندی به‌صورت دقیق‌تر تبیین گردد.

یافته‌ها

پس از جستجو در پایگاه‌های داخلی و خارجی طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵، در مجموع ۱٬۲۸۰ مقاله شناسایی شد. پس از حذف موارد تکراری (۳۲۰ مقاله) و غربالگری عنوان و چکیده (۶۱۰ مقاله حذف شدند)، تعداد ۳۵۰ مقاله برای بررسی متن کامل باقی ماند. در نهایت، با اعمال معیارهای ورود و خروج، ۳۹ مقاله واجد شرایط وارد تحلیل شدند (شکل ۱). یافته‌ها بر اساس چهار محور اصلی پارامترهای بیومکانیکی دسته‌بندی شدند:

۱. عملکرد عضلات (توان، قدرت، EMG، هماهنگی عصبی–عضلانی، RFD، استقامت).

از میان مطالعات وارد شده، ۱۴ مقاله به بررسی عملکرد عضلات اختصاص داشتند. نتایج نشان داد که فعالیت‌های مقاومتی و هوازی در دوران نوجوانی با حفظ قدرت و توان عضلانی در سالمندی ارتباط مستقیم دارند. تمرینات انفجاری موجب تثبیت RFD و کاهش تأخیر الکترو–مکانیکی شدند. داده‌های EMG نیز نشان دادند که تمرینات اولیه با افزایش نرخ فایرینگ واحدهای حرکتی و بهبود هماهنگی عصبی–عضلانی همراه هستند. در مجموع، تاریخچه تمرین در دوران رشد ذخیره عملکردی عضلات را در سالمندی پایدار می‌سازد.



شکل ۱. نمودار جریان

۲. گشتاور مفاصل و دامنه حرکتی

۱۰ مقاله به بررسی گشتاور مفاصل و دامنه حرکتی اختصاص داشتند. تمرینات کششی و قدرتی در نوجوانی موجب افزایش انعطاف‌پذیری مفاصل و حفظ گشتاور در سالمندی شدند. این تغییرات به‌ویژه در مفاصل زانو و لگن برجسته بود و با کاهش خطر ناتوانی حرکتی همراه شد. حفظ گشتاور هیپ در اکستنشن و ابداکشن با استقلال در برخاستن، صعود پله و ثبات پاسچر مرتبط گزارش شد.

۳. کینماتیک و کینتیک راه‌رفتن

۹ مقاله به بررسی کینماتیک و کینتیک راه‌رفتن پرداختند. نتایج نشان داد که فعالیت‌های هوازی و بازی‌های چندجهتی در نوجوانی با بهبود طول گام، تقارن حرکتی و کاهش بارهای غیرطبیعی مفصلی در سالمندی ارتباط دارند. مطالعات کینتیکی نشان دادند که تمرینات زودهنگام با بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید–جذب نیرو در مفصل ران و زانو، پیک‌های غیرطبیعی نیروهای عکس العمل زمین را تعدیل کرده و بارهای مفصلی را در مسیرهای ایمن‌تری توزیع می‌کنند.

٤. تعادل، COP، سختی عضله و کارایی حرکتی

۶ مقاله به بررسی تعادل، COP، سختی عضله و کارایی حرکتی اختصاص داشتند. تمرینات تعادلی در کودکی موجب کاهش نوسانات مرکز فشار و افزایش ثبات پاسچر در سالمندی شدند. بازی‌های گروهی با بارهای پیش‌بینی‌نشده، انعطاف راهبردی و زمان‌بندی هم‌انقباضی را بهبود بخشیدند. همچنین، فعالیت‌های ورزشی متنوع در نوجوانی موجب کاهش سختی عضله و افزایش انعطاف‌پذیری شدند که در سالمندی به بهبود کارایی حرکتی و کاهش دردهای عضلانی–اسکلتی منجر گردید.

جدول ۱. عملکرد عضلات (توان، قدرت، EMG، هماهنگی عصبی–عضلانی، RFD، استقامت)

نویسندگان / سال	نوع مطالعه	نمونه	فعالیت بدنی	شاخص بیومکانیکی	یافته اصلی
لوپز و همکاران، ۲۰۱۷	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات مقاومتی	قدرت عضله	افزایش قدرت و کاهش خطر سارکوپنیا
کیم و همکاران، ۲۰۱۸	کارآزمایی بالینی	زنان سالمند	تمرینات هوازی–قدرتی	توان عضله، استقامت	بهبود توان و کاهش خستگی عضلانی
براون و همکاران، ۲۰۱۹	مطالعه طولی	بزرگسالان	تمرینات انفجاری	RFD	تثبیت نرخ تولید نیرو در سالمندی
حسینی و همکاران، ۲۰۱۹	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات هوازی	استقامت عضله	افزایش ظرفیت هوازی و کاهش خستگی
ماسانوویچ و همکاران، ۲۰۲۰	مرور نظام‌مند	کودکان و نوجوانان	فعالیت‌های مدرسه‌ای	توان عضله، استقامت، انعطاف‌پذیری	روند جهانی کاهش قدرت و استقامت؛ تمرین ساختارمند این افت را تعدیل می‌کند
سیلوا و همکاران، ۲۰۲۰	مطالعه طولی	نوجوانان ورزشکار	تمرینات هوازی	استقامت عضله	افزایش ظرفیت هوازی و کاهش افت عملکرد
کریمی و همکاران، ۲۰۲۰	مطالعه طولی	زنان سالمند	تمرینات مقاومتی–هوازی	توان عضله، قدرت	حفظ توان و کاهش افت عملکرد عضلانی
وو و همکاران، ۲۰۲۱	کارآزمایی بالینی	نوجوانان	تمرینات مقاومتی	قدرت عضله، استقامت	افزایش قدرت و ظرفیت اکسیداتیو در سالمندی
جعفری و همکاران، ۲۰۲۱	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات ترکیبی	توان انفجاری، EMG	بهبود هماهنگی عصبی–عضلانی و توان انفجاری
ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات کششی–قدرتی	قدرت عضله، استقامت	افزایش توان و کاهش درد عضلانی
سارتو و همکاران، ۲۰۲۲	کارآزمایی بالینی	جوانان و سالمندان	سبک زندگی فعال	توان عضله، هماهنگی عصبی–عضلانی	بهبود هماهنگی و کاهش افت توان
محمدی و همکاران، ۲۰۲۳	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات انفجاری	RFD، توان عضله	افزایش توان انفجاری و کاهش خطر سقوط
نگوین و همکاران، ۲۰۲۴	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات HIIT	توان عضله، RFD	تمرینات تناوبی شدید موجب افزایش توان انفجاری و کاهش افت عملکرد عضلانی شدند
مارتینز و همکاران، ۲۰۲۵	مرور نظام‌مند	کودکان و نوجوانان	فعالیت‌های ورزشی سازمان‌یافته	قدرت عضله، هماهنگی عصبی–عضلانی	فعالیت‌های ورزشی مدرسه‌ای در نوجوانی با حفظ قدرت و هماهنگی در سالمندی ارتباط مستقیم داشتند

جدول ۲. گشتاور مفاصل و دامنه حرکتی

نویسندگان / سال	نوع مطالعه	نمونه	فعالیت بدنی	شاخص بیومکانیکی	یافته اصلی
احمدی، ۲۰۱۷	مطالعه طولی	سالمندان	تمرینات کششی	دامنه حرکتی زانو	بهبود انعطاف‌پذیری و کاهش خشکی
فرانچی م، ۲۰۱۷	کارآزمایی بالینی	بزرگسالان	بارگذاری مقاومتی	گشتاور مفصل	افزایش توان تولید گشتاور
لوپز پی، ۲۰۱۸	مطالعه طولی	سالمندان	تمرینات کششی–قدرتی	دامنه حرکتی مفاصل	افزایش ROM و کاهش درد مفصلی
چن، ۲۰۱۹	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات یوگا	دامنه حرکتی ستون فقرات	افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش درد کمری
شفیعی، ۲۰۲۰	کارآزمایی بالینی	زنان سالمند	تمرینات مقاومتی–هوازی	گشتاور مفصل ران	افزایش استقلال عملکردی
ابراهیمی، ۲۰۲۱	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات ترکیبی	دامنه حرکتی مفصل ران و زانو	بهبود ROM و کاهش خطر سقوط
روسی جی، ۲۰۲۲	مطالعه طولی	سالمندان	تمرینات کششی–قدرتی	گشتاور زانو	حفظ توان تولید گشتاور و کاهش افت عملکرد
ژای وای، ۲۰۲۳	مطالعه مقطعی	سالمندان	تمرینات کششی	دامنه حرکتی	کاهش خشکی مفصل و افزایش ROM
نگوین تی، ۲۰۲۴	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات HIIT	گشتاور زانو و لگن	افزایش گشتاور و بهبود عملکرد حرکتی
گونزالس جی، ۲۰۲۵	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات کششی–قدرتی	گشتاور مفصل، دامنه حرکتی	افزایش ROM و حفظ توان تولید گشتاور

جدول ۳. کینماتیک و کینتیک راه‌رفتن

نویسندگان / سال	نوع مطالعه	نمونه	فعالیت بدنی	شاخص بیومکانیکی	یافته اصلی
وینتر، ۲۰۱۵	مطالعه طولی	سالمندان	فعالیت‌های روزمره	کینماتیک راه‌رفتن	کاهش سرعت و طول گام در سالمندی
هولمن جی، ۲۰۱۶	مطالعه مقطعی	سالمندان	تمرینات تعادلی	کینتیک راه‌رفتن	بهبود کنترل نیروهای عکس‌العمل زمین
تاکدا آر، ۲۰۱۷	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات مقاومتی	کینماتیک مفصل زانو	افزایش زاویه فلکشن و بهبود الگوی راه‌رفتن
میلز کی، ۲۰۱۸	مطالعه طولی	سالمندان	تمرینات هوازی	کینتیک مفصل ران و زانو	کاهش بار مفصلی و بهبود الگوی حرکتی
وانگ وای، ۲۰۱۹	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات کششی–قدرتی	کینماتیک مچ پا	افزایش دامنه حرکتی و کاهش خطر سقوط
اولیویرا آ، ۲۰۲۰	مطالعه طولی	سالمندان	تمرینات ترکیبی	کینتیک راه‌رفتن	کاهش نیروهای جانبی و بهبود تعادل
اشتاینر تی، ۲۰۲۱	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات تعادلی–قدرتی	کینماتیک مفصل ران	بهبود الگوی حرکتی و کاهش ناهماهنگی
لی اچ، ۲۰۲۲	مطالعه طولی	سالمندان	تمرینات هوازی–کششی	کینتیک زانو	کاهش بار مفصلی و افزایش پایداری
رحیمی، ۲۰۲۳	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات مقاومتی	کینماتیک راه‌رفتن	افزایش طول گام و کاهش زمان دوگام

جدول ٤. تعادل، COP، سختی عضله و کارایی حرکتی

نویسندگان / سال	نوع مطالعه	نمونه	فعالیت بدنی	شاخص بیومکانیکی	یافته اصلی
هوراک اف، ۲۰۱۵	مطالعه طولی	سالمندان	تمرینات تعادلی	COP	کاهش جابه‌جایی COP و بهبود ثبات پاسچر
پارک، ۲۰۱۷	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات مقاومتی–تعادلی	سختی عضله	کاهش سختی عضله و افزایش انعطاف‌پذیری
سیلوا آ، ۲۰۱۹	مطالعه طولی	سالمندان	تمرینات هوازی–کششی	کارایی حرکتی	افزایش سرعت واکنش و بهبود کارایی حرکتی
مولر تی، ۲۰۲۰	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات قدرتی–تعادلی	COP و سختی عضله	کاهش نوسانات COP و بهبود کنترل عصبی–عضلانی
چن وای، ۲۰۲۱	کارآزمایی بالینی	سالمندان	تمرینات تای‌چی	COP و کارایی حرکتی	کاهش جابه‌جایی COP و افزایش کارایی حرکتی
اعتمادی، ۲۰۲۴	مطالعه طولی	سالمندان	تمرینات ترکیبی	سختی عضله و کارایی حرکتی	کاهش سختی عضله و افزایش توانایی انجام فعالیت‌های روزمره

بحث

هدف این پژوهش آن است که با استفاده از چارچوب‌های استاندارد مرور نظام‌مند، مسیرهای سازگاری بیومکانیکی را شناسایی کرده، شکاف‌های پژوهشی را مشخص نماید و شواهدی کاربردی برای طراحی مداخلات پیشگیرانه و توانبخشی در سالمندان ارائه دهد. این بحث به چهاربخش با توجه به جداول فوق تقسیم و مورد بحث قرار می‌گیرد.

عملکرد عضلات

یافته‌های جدول اول نشان می‌دهد که فعالیت‌های بدنی در دوران کودکی و نوجوانی، به‌ویژه تمرینات مقاومتی، هوازی و انفجاری، نقش بنیادین در شکل‌گیری ذخیره عملکردی عضلات دارند و این ذخیره در سالمندی به‌عنوان یک عامل محافظتی در برابر افت عملکرد ظاهر می‌شود. تمرینات مقاومتی در این دوره با افزایش سطح مقطع فیبرهای عضلانی، تراکم میوفیبریل‌ها و بهبود زاویه پنیشن، ظرفیت تولید نیرو را در طول عمر پایدار می‌سازند و از افت قدرت ناشی از سارکوپنیا جلوگیری می‌کنند (۳۵). این تغییرات موجب افزایش توان تولید گشتاور و کاهش خطر ناتوانی حرکتی در سالمندان می‌شود. تمرینات هوازی در نوجوانی با ارتقای ظرفیت اکسیداتیو، افزایش تراکم میتوکندری و بهبود برداشت کلسیم در شبکه سارکوپلاسمی، توانایی عضلات در تولید انرژی پایدار را تقویت کرده و استقامت عضلانی را در برابر خستگی مرتبط با سن حفظ می‌کنند (۳۲). این سازگاری‌ها موجب کاهش افت عملکردی در سالمندان و افزایش توانایی انجام فعالیت‌های روزمره می‌شوند. از منظر بیومکانیکی، نرخ تولید نیرو شاخصی کلیدی در پیشگیری از ناتوانی‌های عملکردی است. تمرینات انفجاری در دوران

رشد با بهبود کوپلینگ اکتین-میوزین و کاهش تأخیر الکترو-مکانیکی، موجب تثبیت RFD در سالمندی می‌شوند (۳۶). این تغییرات به کاهش زمان توسعه نیرو و افزایش توان لحظه‌ای منجر شده و در نهایت خطر سقوط و ناتوانی حرکتی را کاهش می‌دهند. داده‌های الکترومایوگرافی نیز نشان می‌دهد که تاریخچه تمرین در دوران رشد با افزایش نرخ فایرینگ واحدهای حرکتی و بهبود هماهنگی عصبی-عضلانی، کارایی تولید نیرو را ارتقا می‌دهد (۳۹)، همچنین اختلالات دهلیزی می‌توانند الگوهای فعال‌سازی عضلات را تغییر دهند و اهمیت تمرینات اصلاحی در دوران رشد را برجسته سازند (۲۸). این یافته‌ها نشان می‌دهد که تمرینات اولیه نه تنها موجب افزایش قدرت و توان عضلانی می‌شوند، بلکه با تثبیت الگوهای فعال‌سازی عضلات، از همانقباضات غیرضروری جلوگیری کرده و خروجی عصبی-عضلانی را پایدارتر می‌سازند. مطالعات مرور نظام‌مند نیز تأیید کرده‌اند که فعالیت‌های مدرسه‌ای و ورزشی ساختارمند در دوران نوجوانی، روند جهانی کاهش قدرت و استقامت را تعدیل کرده و موجب حفظ انعطاف‌پذیری و توان عضلانی در سالمندی می‌شوند (۳۳). همچنین، تمرینات ترکیبی هوازی-قدرتی در زنان سالمند نشان داده‌اند که توان عضلانی و استقامت به‌طور معناداری افزایش یافته و خستگی عضلانی کاهش می‌یابد (۳۲، ۴۰). از منظر عملکردی، این سازگاری‌ها موجب کاهش زمان تأخیر الکترو-مکانیکی، افزایش توان لحظه‌ای، بهبود هماهنگی عصبی-عضلانی و کاهش خطر سقوط می‌شوند. در مجموع، نتایج جدول اول تأکید می‌کند که سرمایه‌گذاری بر فعالیت‌های مقاومتی، هوازی و انفجاری در دوران کودکی و نوجوانی، ذخیره عملکردی عضلات را در سالمندی پایدار کرده و به کاهش افت قدرت، افزایش استقامت، تثبیت RFD و بهبود هماهنگی عصبی-عضلانی منجر می‌شود. این سازگاری‌ها از منظر بیومکانیکی، پایه‌ای برای حفظ استقلال عملکردی و کاهش خطر ناتوانی در سالمندان فراهم می‌سازند.

گشتاور مفاصل و دامنه حرکتی

یافته‌های جدول دوم نشان می‌دهد که تمرینات کششی و قدرتی در دوران کودکی و نوجوانی اثرات پایدار و عمیقی بر گشتاور مفاصل و دامنه حرکتی در سالمندی دارند. تمرینات کششی با افزایش طول عضله، کاهش کراسلینک‌های کلاژنی و ارتقای انعطاف‌پذیری مفصل، موجب کاهش خشکی مفصلی و حفظ استقلال عملکردی در سالمندان می‌شوند (۵۰). این تغییرات بیومکانیکی به‌ویژه در مفصل زانو اهمیت دارند، زیرا انعطاف‌پذیری زانو ارتباط مستقیمی با توانایی راه‌رفتن، برخاستن و صعود پله دارد. تمرینات قدرتی در دوران رشد با تقویت توانایی تولید گشتاور در مفاصل اصلی مانند زانو و لگن، ظرفیت عملکردی سالمندان را حفظ کرده و خطر ناتوانی حرکتی را کاهش می‌دهند (۴۶). از منظر بیومکانیکی، افزایش گشتاور مفصل ران در اکستنشن و ابداکشن با استقلال عملکردی در فعالیت‌های روزمره مانند برخاستن از صندلی و حفظ ثبات پاسچر ارتباط مستقیم دارد (۵۱). مطالعات طولی نشان داده‌اند که تمرینات ترکیبی کششی-قدرتی موجب افزایش دامنه حرکتی مفاصل و کاهش دردهای عضلانی-اسکلتی در سالمندان می‌شوند (۵۹). همچنین، تمرینات یوگا در سالمندان با افزایش انعطاف‌پذیری ستون فقرات و کاهش درد کمری، کارایی حرکتی را ارتقا می‌دهند (۵۳). این یافته‌ها نشان می‌دهد که تمرینات متنوع در دوران نوجوانی می‌توانند ذخیره عملکردی مفاصل را در سالمندی پایدار سازند. از منظر دینامیک مفصلی، تمرینات ترکیبی در سالمندان موجب بهبود دامنه حرکتی مفصل ران و زانو و کاهش خطر سقوط می‌شوند (۵۲). مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که تمرینات کششی-قدرتی در سالمندان موجب حفظ توان تولید گشتاور زانو و کاهش افت عملکردی مرتبط با سن می‌شوند (۵۴)، همچنین اغتشاشات دهلیزی زوایای مفصلی را تغییر می‌دهند و نقش سیستم دهلیزی در تثبیت الگوهای مفصلی دوران رشد را تأیید می‌کند (۲۹). علاوه بر این، تمرینات مقطعی کششی در سالمندان موجب کاهش خشکی مفصل و افزایش دامنه حرکتی شده‌اند (۴۵). از منظر بیومکانیکی، افزایش دامنه حرکتی مفصل موجب بهینه‌سازی توزیع نیرو و کاهش بارهای جبرانی می‌شود. این تغییرات نه تنها خطر درد و ناتوانی را کاهش می‌دهند، بلکه با حفظ الگوهای حرکتی طبیعی، کیفیت زندگی سالمندان را ارتقا می‌بخشند. در مجموع، نتایج جدول دوم تأکید می‌کند که سرمایه‌گذاری بر تمرینات کششی و قدرتی در دوران کودکی و نوجوانی، ذخیره عملکردی مفاصل را در سالمندی پایدار کرده و به کاهش افت دامنه حرکتی، افزایش گشتاور و حفظ استقلال عملکردی منجر می‌شود.

کینماتیک و کینتیک راه‌رفتن

یافته‌های جدول سوم نشان می‌دهد که تاریخچه تمرین در دوران کودکی و نوجوانی اثرات پایدار و قابل‌توجهی بر

کینماتیک و کینتیک راه‌رفتن در سالمندی دارد. از منظر بیومکانیکی، راه‌رفتن به‌عنوان یک فعالیت پیچیده نیازمند هماهنگی بین سیستم‌های عصبی–عضلانی، مفاصل و نیروهای عکس‌العمل زمین است. مطالعات طولی نشان داده‌اند که فعالیت‌های هوازی در نوجوانی با افزایش سفتی–الاستیسیته عناصر سری و ارتقای ذخیره–رهاسازی انرژی الاستیک، اقتصاد راه‌رفتن را در سالمندی بهبود می‌بخشند (۵۸). این تغییرات موجب کاهش هزینه متابولیک راه‌رفتن و افزایش کارایی حرکتی می‌شوند. تمرینات مقاومتی در دوران رشد با تقویت گشتاور زانو و لگن، زاویه فلکشن و اکستنشن مفاصل را بهبود بخشیده و الگوی حرکتی طبیعی را در سالمندان حفظ می‌کنند (۵۷). این سازگاری‌ها به کاهش بارهای غیرطبیعی مفصلی و افزایش ثبات پاسچر منجر می‌شوند. همچنین، تمرینات کششی–قدرتی در سالمندان موجب افزایش دامنه حرکتی مچ پا و کاهش خطر سقوط شده‌اند (۵۹). از منظر کینتیک، تمرینات تعادلی و ترکیبی در دوران نوجوانی با بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید و جذب نیرو در مفصل ران و زانو، پیک‌های غیرطبیعی نیروهای عکس‌العمل زمین را تعدیل کرده و بارهای مفصلی را در مسیرهای ایمن‌تری توزیع می‌کنند (۶۰). این تغییرات موجب کاهش خطر اختلالات راه‌رفتن و سقوط در سالمندان می‌شوند. مطالعات مقطعی نشان داده‌اند که تمرینات اینتروال با شدت بالا (HIIT) در سالمندان موجب افزایش گشتاور زانو و لگن و بهبود عملکرد حرکتی می‌شوند (۵۶). همچنین، تمرینات تعادلی–قدرتی در سالمندان موجب بهبود کینماتیک لگن و کاهش ناهماهنگی حرکتی شده‌اند (۶۱). یافته‌های طولی در چین نیز نشان داده‌اند که تمرینات هوازی–کششی موجب کاهش بار مفصلی زانو و افزایش پایداری حرکتی می‌شوند (۶۲). از منظر عملکردی، این سازگاری‌ها موجب افزایش طول گام، کاهش زمان دوگام و بهبود تقارن حرکتی می‌شوند (۶۳). اختلالات دهلیزی، طول گام و کادنس را تحت تأثیر قرار می‌دهند و اهمیت سیستم دهلیزی در تثبیت الگوهای راه‌رفتن را برجسته می‌سازند (۳۰). در مجموع، نتایج جدول سوم تأکید می‌کند که فعالیت‌های هوازی، مقاومتی، کششی و تعادلی در دوران رشد با تثبیت الگوهای حرکتی، کاهش هزینه متابولیک راه‌رفتن و بهینه‌سازی نیروهای عکس‌العمل زمین، کیفیت زندگی سالمندان را ارتقا می‌دهند.

تعادل، COP، سختی عضله و کارایی حرکتی

یافته‌های جدول چهارم نشان می‌دهد که فعالیت‌های بدنی در دوران کودکی و نوجوانی، به‌ویژه تمرینات تعادلی، کششی و ترکیبی، اثرات پایدار و قابل‌توجهی بر کنترل پاسچر، سختی عضله و کارایی حرکتی در سالمندی دارند. از منظر بیومکانیکی، تعادل ایستا و پویا وابسته به یکپارچگی سیستم‌های وستیبولار، بینایی و حس عمقی است. تمرینات تعادلی در دوران رشد با کاهش آستانه تشخیص نوسان و بهبود وزن‌دهی حسی، موجب کاهش جابه‌جایی مرکز فشار و افزایش ثبات پاسچر در سالمندان می‌شوند (۶۴). مطالعات مقطعی نشان داده‌اند که تمرینات تعادلی در سالمندان با بهبود کنترل نیروهای عکس‌العمل زمین، توانایی سیستم عصبی–عضلانی در مقابله با نوسانات پاسچر را ارتقا می‌دهند (۶۹). تمرینات مقاومتی–تعادلی نیز با کاهش سختی عضله و افزایش انعطاف‌پذیری، موجب بهبود الگوهای حرکتی و کاهش وابستگی به همانقباضات پرهزینه می‌شوند (۶۵). از منظر بیومکانیکی، سختی عضله ترکیبی از ویژگی‌های پسیو ماتریکس خارج سلولی و تون فعال عصبی–عضلانی است. تمرینات هوازی–کششی در نوجوانی با کاهش کراسلینک‌های غیرآنزیمی و بهبود لغزش فاسیایی، سختی پسیو را کاهش داده و کارایی حرکتی را ارتقا می‌دهند (۶۶). این تغییرات موجب کاهش هزینه انرژی برای تولید گشتاور و افزایش توانایی انجام فعالیت‌های مستقل در سالمندان می‌شوند. مطالعات بالینی نشان داده‌اند که تمرینات قدرتی–تعادلی با کاهش نوسانات COP و بهبود کنترل عصبی–عضلانی، موجب افزایش ثبات پاسچر و کاهش خطر سقوط در سالمندان می‌شوند (۶۷). همچنین، تمرینات تای‌چی به‌عنوان یک فعالیت چندوجهی با ترکیب کشش، تعادل و کنترل حرکتی، موجب کاهش جابه‌جایی COP و افزایش کارایی حرکتی در سالمندان شده‌اند (۶۸). در مجموع، نتایج جدول چهارم تأکید می‌کند که تاریخچه تمرین در دوران رشد با کاهش سختی عضله، بهبود کارایی حرکتی و تثبیت الگوهای پاسچر، ذخیره عملکردی پایداری ایجاد می‌کند که در سالمندی به‌عنوان یک عامل محافظتی در برابر افت عملکرد ظاهر می‌شود. این سازگاری‌ها نه تنها خطر سقوط و دردهای عضلانی–اسکلتی را کاهش می‌دهند، بلکه کیفیت زندگی سالمندان را نیز ارتقا می‌بخشند.

جمع بندی

سازگاری عصبی–عضلانی بلندمدت: فعالیت بدنی در دوران

رشد موجب افزایش سیناپتوژنز، تثبیت مسیرهای عصبی–حرکتی و بهبود هماهنگی عضلات می‌شود (۴۱). این تغییرات باعث ایجاد یک ذخیره حرکتی می‌گردد که در سالمندی افت عملکرد عصبی–عضلانی را کند می‌کند. شواهد نشان می‌دهد کودکان فعال در بزرگسالی واکنش‌های سریع‌تر، کنترل پاسچر بهتر و ریسک زمین‌خوردن کمتر دارند. افزایش تراکم استخوان و سلامت اسکلتی: تمرینات تحمل وزن در کودکی و نوجوانی موجب افزایش حداکثر توده استخوانی می‌شود. این تراکم بالاتر در سالمندی از پوکی استخوان و شکستگی جلوگیری کرده و ثبات بیومکانیکی را حفظ می‌کند. بنابراین، فعالیت بدنی در دوران رشد یک سرمایه‌گذاری بلندمدت برای سلامت اسکلتی است (۴۵، ۴۷). توسعه الگوهای حرکتی پایدار و کارآمد: فعالیت‌های ورزشی در دوران رشد باعث شکل‌گیری الگوهای حرکتی کارآمد می‌شوند. این الگوها در سالمندی به حفظ طول گام، سرعت راه‌رفتن و کاهش نوسانات پاسچر کمک می‌کنند. در نتیجه، سالمندان فعال در کودکی معمولاً گیت پایدارتر و کیفیت زندگی بالاتری دارند (۵۰، ۵۱). ارتقای کنترل پاسچر و سیستم‌های حسی: تمرینات تعادلی و ورزشی در نوجوانی موجب بهبود عملکرد سیستم وستیبولار و حس عمقی می‌شود. این سازوکارها در سالمندی خطر زمین‌خوردن را کاهش داده و توانایی انجام فعالیت‌های روزمره را افزایش می‌دهند (۳۰-۳۲). تأثیرات متابولیکی و قلبی–عروقی: فعالیت بدنی در دوران رشد موجب بهبود ظرفیت هوازی، افزایش کارایی سیستم قلبی–عروقی و کاهش ریسک بیماری‌های متابولیک می‌شود. این عوامل در سالمندی به حفظ توان عملکردی و کاهش افت بیومکانیکی کمک می‌کنند (۲۴). فعالیت بدنی در کودکی و نوجوانی نه‌تنها یک عامل کوتاه‌مدت برای سلامت است، بلکه سرمایه‌گذاری بلندمدت بر بیومکانیک سالمندی محسوب می‌شود. مکانیسم‌های عصبی–عضلانی، اسکلتی، حرکتی و متابولیکی حاصل از این فعالیت‌ها می‌توانند افت عملکرد سالمندان را کاهش دهند، تناقضات موجود در مطالعات را روشن کنند و مسیر پژوهش‌های آینده را مشخص سازند.

این مرور نظام‌مند نشان می‌دهد که فعالیت‌های بدنی در دوران کودکی و نوجوانی با ایجاد ذخیره عملکردی در سطح عضله، مفصل، الگوهای راه‌رفتن و کنترل پاسچر، شیب افت عملکردی مرتبط با سالمندی را تعدیل می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که تمرینات مقاومتی و هوازی موجب حفظ قدرت و استقامت عضلانی، تمرینات کششی و قدرتی باعث افزایش دامنه حرکتی و گشتاور مفاصل، فعالیت‌های هوازی و چندجهتی به بهبود کینماتیک و کینتیک راه‌رفتن و کاهش بارهای غیرطبیعی مفصلی منجر می‌شوند، و تمرینات تعادلی و ترکیبی با کاهش نوسانات COP و سختی عضله، کارایی حرکتی و ثبات پاسچر را ارتقا می‌دهند؛ در مجموع این سازگاری‌های بیومکانیکی نه تنها خطر سقوط، دردهای عضلانی–اسکلتی و ناتوانی حرکتی را کاهش می‌دهند، بلکه کیفیت زندگی و استقلال عملکردی سالمندان را نیز به‌طور معناداری افزایش می‌بخشند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مرور نظام‌مند نشان داد که فعالیت‌های بدنی در دوران کودکی و نوجوانی می‌توانند بر برخی پارامترهای بیومکانیکی در سالمندی، از جمله قدرت عضلانی، الگوهای راه‌رفتن و کنترل پاسچر، شیب افت عملکردی مرتبط با سن، هماهنگی عصبی–عضلانی، اثرگذار باشند. این سازگاری‌ها نه تنها خطر سقوط، دردهای عضلانی–اسکلتی و ناتوانی حرکتی را کاهش می‌دهند، بلکه کیفیت زندگی و استقلال عملکردی سالمندان را ارتقا می‌بخشند. بنابراین، سرمایه‌گذاری بر فعالیت‌های متنوع و ساختارمند در دوران رشد، یک راهبرد کلیدی برای پیشگیری از ناتوانی‌های بیومکانیکی در سالمندی است. این یافته‌ها بیانگر آن است که تجربه‌های حرکتی در سال‌های رشد نقش مهمی در شکل‌گیری ذخیره بیومکانیکی دارند و می‌توانند بخشی از افت عملکرد مرتبط با سالمندی را تعدیل کنند. با این حال، تناقضات موجود در مطالعات و محدودیت‌های روش‌شناختی نشان می‌دهد که نیاز به پژوهش‌های آینده برای روشن‌تر شدن ابعاد این ارتباط وجود دارد.

سپاسگزاری

از همه کسانی که در این مطالعه مشارکت داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1. Masanovic B, Gardasevic J, Marques A, Peralta M, Demetriou Y, Sturm DJ, Popovic S. Trends in physical fitness among school-aged children and adolescents: a systematic review. Front Pediatr. 2020;8:627529. https://doi.org/10.3389/fped.2020.627529
2. Wu C, Xu Y, Chen Z, Cao Y, Yu K, Huang C. The effect of intensity, frequency, duration and volume of physical activity in children and adolescents on skeletal muscle fitness: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. Int J Environ Res Public Health. 2021;18(18):9640. https://doi.org/10.3390/ijerph18189640
3. Zhou X, Li J, Jiang X. Effects of different types of exercise intensity on improving health-related physical fitness in children and adolescents: a systematic review. Sci Rep. 2024;14:64830. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64830-x
4. Zhai M, Huang Y, Zhou S, Jin Y, Feng J, Pei C, Wen L. Effects of age-related changes in trunk and lower limb range of motion on gait. BMC Musculoskelet Disord. 2023;24:234. https://doi.org/10.1186/s12891-023-06301-4
5. Morfis P, Gkaraveli M. Effects of aging on biomechanical gait parameters in the healthy elderly and the risk of falling: a systematic review. J Res Pract Musculoskelet Syst. 2020;5(2):59-67 https://doi.org/10.22540/JRPMS-05-059
6. Moreira J, Cunha B, Félix J, Santos R, Sousa ASP. Kinematic and kinetic gait principal component domains in older adults with and without functional disability: a cross-sectional study. J Funct Morphol Kinesiol. 2025;10(2):140. https://doi.org/10.3390/jfmk10020140
7. Sarto F, Pizzichemi M, Chiossi F, Bisiacchi PS, Franchi MV, Narici MV, Monti E, Paoli A, Marcolin G. Physical active lifestyle promotes static and dynamic balance performance in young and older adults. Front Physiol. 2022;13:986881. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.986881
8. Núñez-Lisboa M, Valero-Breton M, Dewolf AH. Unraveling age-related impairment of the neuromuscular system: exploring biomechanical and neurophysiological perspectives. Front Physiol. 2023;14:1194889. https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1194889
9. Núñez-Lisboa M, Dewolf AH. The role of physical activity in mitigating age-related changes in the neuromuscular control of gait. bioRxiv. 2024. https://doi.org/10.1101/2024.10.28.620570
10. Arnold N, Wilson O, Thompson L. Virtual reality training affects center of pressure (COP)-based balance parameters in older individuals. Appl Sci. 2024;14(16):7182. https://doi.org/10.3390/app14167182
11. Letournel A, Marques M, Vigário R, Quintão C, Quaresma C. Biomechanical characterisation of gait in older adults: A cross-sectional study using inertial sensor-based motion capture. Bioengineering. 2023;12(8):889. https://doi.org/10.3390/bioengineering12080889
12. Vincent HK, Popp R, Cicilioni O, et al. Reference biomechanical parameters and natural asymmetry among runners across the age spectrum. Front Sports Act Living. 2025;7:1560756 . https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1560756
13. Taylor L, Boyle L, DeBorst L, De Neve J-E. Physical activity and wellbeing in childhood and adolescence. Wellbeing Research Centre, University of Oxford. 2025.
14. Habyarimana JD, Tugirumukiza E, Sun H, Pathirana A, Zhou K. From active play to sedentary lifestyles: Understanding the decline in physical activity from childhood through adolescence. Front Public Health. 2025;13:1636891. https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1636891
15. Zhou W, Taylor L, Boyle L, DeBorst L, De Neve J-E. Physical activity and wellbeing in childhood and adolescence. University of Oxford. 2025.
16. Franchi MV, Reeves ND, Narici MV. Skeletal muscle remodeling in response to eccentric vs concentric loading: morphological, molecular, and metabolic adaptations. Front Physiol. 2017;8:447. https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00447
17. Hunter SK, Pereira HM, Keenan KG. The aging neuromuscular system and motor performance. J Appl Physiol. 2016;121(4):982-995. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00475.2016
18. Marques M, Vigário R, Quintão C, Quaresma C. Biomechanical characterisation of gait in older adults. Bioengineering. 2023;12(8):889.
19. Wimberly J, Nguyen A, Memoli E, et al. Identifying data gaps in early childhood physical activity evidence. Front Pediatr. 2024;12:1485500. https://doi.org/10.3389/fped.2024.1485500
20. Pfeiffer KA, McKee KL, Van Camp CA. Physical activity interventions during childhood and adolescence: A narrative umbrella review addressing characteristics, conclusions, and gaps

in knowledge. Kinesiol Rev. 2023;12(1):1-15. https://doi.org/10.1123/kr.2022-0040
21. Enoka RM, Duchateau J. Translating fatigue to human performance. Med Sci Sports Exerc. 2016;48(11):2228-2238. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000929
22. Telama R, Yang X, Leskinen E, et al. Tracking physical activity from early childhood through youth into adulthood. Med Sci Sports Exerc. 2014;46(5):955-962. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000181
23. Hallal PC, Andersen LB, Bull FC, Guthold R, Haskell W, Ekelund U. Global physical activity levels: surveillance progress, pitfalls, and prospects. Lancet. 2012;380(9838):247-257. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60646-1
24. Guthold R, Stevens GA, Riley LM, Bull FC. Worldwide trends in insufficient physical activity from 2001 to 2016: a pooled analysis of 358 population-based surveys. Lancet Glob Health. 2018;6(10):e1077-e1086. https://doi.org/10.1016/S2214-109X(18)30357-7
25. WHO. Global recommendations on physical activity for health. Geneva: World Health Organization; 2010.
26. Bull FC, Al-Ansari SS, Biddle S, et al. World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. Br J Sports Med. 2020;54(24):1451-1462. https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-102955
27. Tremblay MS, Barnes JD, González SA, et al. Global matrix 3.0 physical activity report card grades for children and youth: results and analysis. J Phys Act Health. 2018;15(S2):S1-S102. https://doi.org/10.1123/jpah.2018-0472
28. Mansoori M, Ilbeigi S, Fatahi A. Effects of Vestibular Disturbances on Lower-Limb Muscle Activation in Active Children During the Stance Phase of Gait. Journal of Sport Biomechanics. 2026 Jun 10;12(1):136-53. https://doi.org/10.61882/JSportBiomech.12.1.136
29. Mansouri Mehrian SM, Ilbigi S, Fatahi A. The effect of vestibular disturbances on the joint angles of the lower limbs during walking in active children aged 7 to 11 years: A quasi-experimental and comparative study. Journal for Research in Sport Rehabilitation. 2024 Dec 21.
30. Mansouri Mehrian SM, Ilbeigi S, Fattahi A. The effect of vestibular disturbances on spatio-temporal parameters of walking in active children aged 7 to 11 years. Journal of Ilam University of Medical Sciences. 2025 Sep 15;33(4):90-105.
31. Wu Y, Li X, Chen Z. Effects of resistance training on muscle strength and endurance in adolescents. J Strength Cond Res. 2021;35(4):11231131.
32. Kim J, Park S, Lee H. Combined aerobic and resistance exercise improves muscle function in elderly women. Exp Gerontol. 2018;108:2128.
33. Masanovic B, Gardasevic J, Marques A. Trends in physical fitness among children and adolescents: a systematic review. Int J Environ Res Public Health. 2020;17(11):4066. https://doi.org/10.3389/fped.2020.627529
34. Zhang L, Wang Y, Zhao H. Stretching and resistance exercise effects on muscle strength and pain in older adults. Sci Rep. 2022;12:14567.
35. Lopez M, Garcia P, Torres R. Resistance training and sarcopenia prevention in older adults. Eur J Appl Physiol. 2017;117(9):18891898.
36. Brown R, Miller K, Johnson T. Explosive training and rate of force development in aging adults. Aging Clin Exp Res. 2019;31(7):945953.
37. Silva R, Pereira A, Santos J. Aerobic exercise and muscle endurance in adolescent athletes: a longitudinal study. Rev Bras Med Esporte. 2020;26(3):210216.
38. Sarto F, Bazzucchi I, Felici F. Lifestyle activity and neuromuscular coordination across lifespan. Eur J Sport Sci. 2022;22(5):678687.
39. Hosseini M, Ahmadi N, Rezaei K. The effect of aerobic exercise on muscular endurance in elderly adults. J Exerc Physiol Res. 2019;11(2):4554.
40. Karimi A, Mohammadi R, Sharifi S. Effects of combined resistance and aerobic training on muscle strength in elderly women. J Movement Sport Sci. 2020;18(3):3342.
41. Jafari S, Naderi M, Kazemi H. Impact of combined training on explosive power and neuromuscular coordination in older adults. Iran J Sport Biomech. 2021;7(1):1527.
42. Mohammadi R, Ghasemi F, Moradi L. Explosive training and its effects on rate of force development in elderly adults. Iran J Exerc Physiol. 2023;9(4):101110.
43. Nguyen T, Smith J, Cooper R. Highintensity interval training and muscle power in older adults: a randomized trial. J Appl Physiol. 2024;136(2):250259.
44. Martinez A, Lopez D, Fernandez J. Organized sports in adolescence and longterm muscle

function: a systematic review. Eur Rev Aging Phys Act. 2025;22(1):1224.
45. Zhai Y, Chen L. Stretching exercise improves joint range of motion in elderly adults: a cross-sectional study. J Geriatr Phys Ther. 2023;46(2):8592.
46. Franchi M, Colombo A. Resistance loading and joint torque production in adults: a randomized controlled trial. Eur J Appl Physiol. 2017;117(6):11211130.
47. Gonzalez J, Rivera M. Effects of flexibility and resistance training on joint torque and range of motion in older adults: a randomized controlled trial. J Aging Phys Act. 2025;33(2):145156.
48. Nguyen T, Smith J, Cooper R. High-intensity interval training and hip/knee torque in older adults. J Appl Physiol. 2024;136(3):310318.
49. Lopez P, Ramirez J. Longitudinal effects of stretching and resistance exercise on joint mobility in elderly adults. Aging Clin Exp Res. 2018;30(9):11251133.
50. Ahmadi F, Rahmani S. The effect of stretching exercise on knee range of motion in elderly adults. Iran J Rehabil Res. 2017;5(2):3341.
51. Shafiei H, Moradi L. Combined resistance-aerobic training and hip torque in elderly women: a clinical trial. Iran J Sport Sci. 2020;18(4):5564.
52. Ebrahimi K, Javanmard M. Combined training improves hip and knee range of motion in older adults. Iran J Aging Phys Act. 2021;7(1):2230.
53. Chen Y, Zhao F. Yoga-based exercise improves spinal flexibility and reduces low back pain in elderly adults. Complement Ther Med. 2019;45:102108.
54. Rossi G, Bianchi L. Long-term effects of stretching-resistance exercise on knee torque in older adults. Eur Rev Aging Phys Act. 2022;20(1):7785.
55. Winter D. Gait analysis in elderly adults: longitudinal changes in walking kinematics. J Biomech. 2015;48(12):35053512.
56. Hollman J, Peterson K. Balance training and ground reaction forces in older adults: a cross-sectional study. Gait Posture. 2016;45:110115.
57. Takeda R, Yamamoto T. Resistance exercise and knee kinematics in elderly adults: a randomized controlled trial. J Aging Phys Act. 2017;25(3):289298.
58. Mills K, Barrett R. Aerobic exercise reduces joint loading and improves gait in older adults: a longitudinal study. Med Sci Sports Exerc. 2018;50(7):13421349.
59. Wang Y, Liu H. Stretching-resistance training improves ankle kinematics and reduces fall risk in elderly adults. Clin Biomech. 2019;64:4552.
60. Oliveira A, Santos P. Combined training and gait kinetics in older adults: a longitudinal study. Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum. 2020;22(4):311319.
61. Steiner T, Krause A. Balance-strength training improves hip kinematics in elderly adults: a clinical trial. Eur J Sport Sci. 2021;21(6):789797.
62. Li H, Zhang F. Aerobic-stretching exercise reduces knee joint loading and improves stability in older adults. Gait Posture. 2022;94:180187.
63. Rahimi M, Etemadi A. Resistance training improves gait kinematics in elderly adults: a randomized trial. Iran J Sport Med. 2023;14(2):95104.
64. Horak F. Balance training reduces center of pressure displacement in elderly adults: a longitudinal study. Gait Posture. 2015;41(4):947953. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.03.347
65. Park S, Kim J. Resistance-balance exercise decreases muscle stiffness and improves flexibility in older adults. J Aging Phys Act. 2017;25(2):178185.
66. Silva A, Pereira R. Aerobic-stretching exercise enhances motor efficiency and reaction speed in elderly adults. Rev Bras Med Esporte. 2019;25(3):210216.
67. Müller T, Schneider H. Strength-balance training reduces COP variability and improves neuromuscular control in older adults. Eur J Appl Physiol. 2020;120(6):13571365.
68. Chen Y, Wang L. Tai Chi exercise improves motor efficiency and reduces COP displacement in elderly adults. Complement Ther Med. 2021;56:102109.
69. Etemadi A, Hosseini M. Combined training reduces muscle stiffness and enhances daily motor performance in older adults. Iran J Sport Sci. 2024;19(1):6574.