

Original Article

Designing a Novel Transition Stability Index for Early Detection of Fall Risk

Ahmad Nikravan^{*1} , Sogra Taherkhani² ,



Citation: Nikravan, A., Taherkhani, S. Designing a Novel Transition Stability Index for Early Detection of Fall Risk. Iranian Journal of Motor Behavior and Sport Psychology, 2026; 6(1): 12-24.

 10.22034/ijmbp.2026.584742.1161

- **Received:** 1 February 2026
- **Revised:** 11 April 2026
- **Accepted:** 24 April 2026
- **Published:** 21 May 2026

*1. Department of Motor Behavior, Faculty of Humanity Sciences, Semnan University, Semnan, Iran. (Corresponding Author).
E-mail: ahmad_namnik@semnan.ac.ir

2. Master of Motor Behavior, Department of Motor and Sport Psychology, Faculty of Humanities, Semnan University, Semnan, Iran
E-mail: sogra.taherkhani@semnan.ac.ir

Abstract

Falls represent a significant threat to the motor health of older adults and individuals with neuromuscular disorders. Early identification of those at risk plays a crucial role in fall prevention and the design of rehabilitation interventions. Considering the importance of the transition phase in generating gait instability, the objective of this research was to develop and evaluate a composite index, termed the "Gait Stability Index" (GSI), to differentiate between healthy individuals and those at high risk of falls. This cross-sectional analytical study involved 60 participants, comprising 30 healthy individuals and 30 individuals at high risk of falls. Gait data were collected using inertial sensors and a 3D motion analysis system. The GSI was calculated based on dynamic features including center of mass (CoM) oscillations, gait asymmetry, speed instability, and Lyapunov exponents. To assess the diagnostic performance of this index, ROC analysis and machine learning models including Random Forest, Logistic Regression, and Support Vector Machine (SVM) were employed. The results indicated that the mean GSI was significantly higher in the high-risk group compared to the healthy group. Furthermore, a very large effect size ($d = 2.90$) demonstrated a high discriminative power. ROC analysis yielded an AUC of 0.90, with a sensitivity of 0.87 and specificity of 0.83. The Random Forest model also provided the highest classification accuracy compared to other models. Based on these findings, the Gait Stability Index can serve as an effective, cost-efficient, and practical tool for fall risk screening and the development of intelligent motion assessment systems.

Keywords: Accidental Falls, Elderly, Rehabilitation

مقاله پژوهشی

طراحی شاخص جدید "شاخص پایداری گذر" برای تشخیص زود هنگام خطر سقوط

احمد نیکروان^{۱*} ، صغری طاهرخانی^۲

چکیده

سقوط یکی از مهم‌ترین تهدیدهای سلامت حرکتی در سالمندان و افراد مبتلا به اختلالات عصبی-عضلانی است و شناسایی زود هنگام افراد در معرض خطر، نقش مهمی در پیشگیری و طراحی مداخلات توانبخشی دارد. با توجه به اهمیت مرحله گذر در ایجاد بی‌ثباتی حین راه رفتن، هدف این پژوهش توسعه و ارزیابی شاخصی تجمیعی با عنوان «شاخص پایداری گذر» به منظور تمایز افراد سالم از افراد پرخطر سقوط بود. این مطالعه با طرح مقطعی تحلیلی و با مشارکت ۶۰ نفر شامل ۳۰ فرد سالم و ۳۰ فرد پرخطر انجام شد. داده‌های راه رفتن با استفاده از حسگرهای اینرسی و سیستم تحلیل حرکت سه‌بعدی ثبت گردید. شاخص پایداری گذر بر پایه ویژگی‌های دینامیکی شامل نوسانات مرکز جرم، عدم تقارن گام، ناپایداری سرعت و نرخ واگرایی لیاپانوف محاسبه شد. برای ارزیابی عملکرد تشخیصی این شاخص از تحلیل ROC و مدل‌های یادگیری ماشین شامل Random Forest، رگرسیون لجستیک و ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. نتایج نشان داد میانگین شاخص پایداری گذر در گروه پرخطر به‌طور معناداری بیشتر از گروه سالم بود. همچنین اندازه اثر بسیار بزرگ ($d = 2.90$) نشان‌دهنده قدرت تفکیک بالا بود. تحلیل ROC مقدار AUC برابر ۰.۹۰ و حساسیت و ویژگی به ترتیب ۰.۸۷ و ۰.۸۳ را نشان داد. مدل Random Forest نیز بالاترین دقت طبقه‌بندی را نسبت به سایر مدل‌ها ارائه کرد. بر اساس یافته‌ها، شاخص پایداری گذر می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر، کم‌هزینه و کاربردی برای غربالگری خطر سقوط و توسعه سامانه‌های هوشمند ارزیابی حرکتی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سقوط تصادفی، سالمندان، توانبخشی

تاریخ دریافت: ۱۲ بهمن ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری: ۲۲ فروردین ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۴ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ انتشار: ۳۱ اردیبهشت ۱۴۰۵

۱. گروه رفتار حرکتی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. (نویسنده مسئول).

E-mail: ahmad_namnik@semnan.ac.ir

۲. گروه رفتار حرکتی و روانشناسی ورزشی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

E-mail: sogra.taherkhani@semnan.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش جمعیت سالمندان و شیوع اختلالات تعادلی و زمین‌خوردن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات سلامت عمومی مطرح شده است. راه رفتن، یکی از پیچیده‌ترین رفتارهای حرکتی انسان، حاصل تعامل سیستم‌های عصبی، عضلانی و اسکلتی است و با افزایش سن، دچار ناپایداری و نوسان‌های قابل توجهی می‌شود (۱، ۲). با وجود تأکید گسترده بر اهمیت فعالیت بدنی در دوران سالمندی، الگوهای واقعی رفتار حرکتی سالمندان همواره ثابت و یکنواخت نیستند (۳، ۴). سالمندان ممکن است در طول زمان بین سطوح مختلف فعالیت بدنی - مانند کم‌حرکتی، فعالیت متوسط و فعالیت بالا - جابه‌جا شوند (۵). این تغییرات رفتاری تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله وضعیت سلامت، شرایط اجتماعی، انگیزه‌های فردی و محیط زندگی قرار دارد (۶، ۷). در یک مرور نظام‌مند گزارش کردند که افزایش سن معمولاً با کاهش توانایی‌های جسمانی، محدودیت‌های حرکتی، بیماری‌های مزمن و کاهش انگیزش برای فعالیت بدنی همراه است (۸). همین عوامل می‌توانند موجب کاهش سطح

فعالیت بدنی در سالمندان شوند. علاوه بر این، عوامل محیطی و اجتماعی نیز می‌توانند در کاهش فعالیت بدنی سالمندان نقش داشته باشند؛ برای مثال، نبود امکانات مناسب ورزشی (۹)، نگرانی از آسیب‌دیدگی و نبود حمایت اجتماعی ممکن است مشارکت سالمندان در فعالیت‌های بدنی را محدود کند (۱۰، ۱۱). سالمندانی که وضعیت سلامت خود را مطلوب‌تر ارزیابی می‌کنند، انگیزه و آمادگی بیشتری برای مشارکت در فعالیت‌های بدنی دارند (۱۲). در واقع، ادراک مثبت از سلامت جسمانی می‌تواند احساس توانمندی و اعتماد به توانایی‌های بدنی را افزایش دهد و همین امر زمینه مشارکت بیشتر در فعالیت‌های بدنی را فراهم می‌سازد (۱۳، ۱۴).

ادراک سلامت جسمانی یکی از عوامل مهم در افزایش مشارکت سالمندان در فعالیت‌های بدنی و بهبود کیفیت زندگی آنان محسوب می‌شود (۱۵). بیشتر تحقیقات انجام‌شده در حوزه سالمندان عمدتاً بر پیامدهای فیزیولوژیک فعالیت بدنی نظیر بهبود سلامت قلبی-عروقی، قدرت عضلانی و کاهش خطر بیماری‌های مزمن تمرکز داشته‌اند (۱۶، ۱۷).

الگوی گام، یکی از پیچیده‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های راه‌رفت از نظر کنترل تعادل محسوب می‌شود (۲۹).

همچنین اخیر پژوهشگران برای تحلیل الگوهای حرکتی سالمندان از مدل‌های ریاضی و آماری مانند نظریه «قدم زدن تصادفی» استفاده کرده‌اند. این مدل که در علوم مختلف از فیزیک تا زیست‌شناسی کاربرد دارد، به بررسی مسیریایی می‌پردازد که در آن جهت حرکت در هر گام به صورت تصادفی تعیین می‌شود و می‌تواند چارچوبی مناسب برای تحلیل رفتار حرکتی غیرقابل پیش‌بینی سالمندان فراهم کند (۳۰). مرحله گذر بنامند تنظیمات سریع و پیش‌بینانه عصبی-عضلانی است و کوچک‌ترین اختلال در آن می‌تواند موجب افزایش نوسانات مرکز جرم، کاهش هماهنگی بین اندام‌ها، تغییر در طول و زمان گام، و ایجاد الگوهای حرکتی نایمن شود. به همین دلیل، نخستین نشانه‌های بی‌ثباتی در بسیاری از سالمندان و بیماران در همین مرحله ظاهر می‌شود؛ نشانه‌هایی که ممکن است در ارزیابی‌های بالینی رایج آشکار نشوند (۳۱). از این منظر، بررسی مرحله گذر می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره ظرفیت فرد برای حفظ تعادل و مدیریت تغییرات ناگهانی در حرکت فراهم کند.

مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که بسیاری از مطالعات بر شناسایی عوامل سقوط و اختلالات شناختی، اضطراب، تغییرات محیطی و کاهش توانایی جهت‌یابی را در بروز این رفتار بررسی کرده‌اند (۳۲)، با توجه به پیامدهای بالقوه خطرناک پرسه‌زنی در سالمندان، توجه به جنبه‌های ایمنی این رفتار اهمیت ویژه‌ای دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند تعادل و حس حرکت در سالمندان می‌تواند قدرت انجام کارها را در آنها زیاد نماید (۳۳-۳۵). همچنین حس خود باوری و اعتماد به توانستار را فعال نماید (۲۵) از سوی ناتوانی و عدم باور و اعتماد افراد مسن بر توانایی خود باعث شده است، مشارکت سالمندان در فعالیت‌های بدنی را محدود کند (۲۴). بنابراین، تحلیل رفتار حرکتی سالمندان نیازمند رویکردهایی است که بتوانند ماهیت پویای این رفتارها و تغییرات آن‌ها در طول زمان را تبیین کنند (۳۶). در این زمینه، مدل‌های احتمالاتی پویا به ویژه شاخصهای گذر می‌توانند چارچوب تحلیلی مناسبی برای بررسی انتقال افراد بین سطوح مختلف فعالیت بدنی فراهم کنند (۳۷). برای تحلیل این بی‌ثباتی، پارامترهای متعددی پیشنهاد شده‌اند. نوسانات مرکز جرم نشان‌دهنده توانایی بدن در کنترل توده بدنی در فضا است و افزایش آن معمولاً با کاهش پایداری و افزایش خطر سقوط همراه است. عدم تقارن گام نیز بیانگر اختلال در هماهنگی بین اندام‌ها و ناکارآمدی سیستم کنترلی راه‌رفت است و می‌تواند به الگوهای حرکتی غیرایمن منجر شود (۳۸). علاوه بر این، شاخص‌های پایداری غیرخطی مانند نرخ واگرایی لیاپانوف، توانایی سیستم حرکتی را در مقابله با اغتشاشات داخلی و خارجی نشان می‌دهند و از معتبرترین معیارهای ارزیابی پایداری دینامیکی به شمار می‌روند (۲۰). نوسانات چرخه گام در سالمندان معمولاً با افزایش ریسک سقوط ارتباط دارد (۴۰). مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که فعالیت

سقوط یکی از جدی‌ترین معضلات بهداشت عمومی در سالمندان و افراد مبتلا به اختلالات عصبی-عضلانی و اسکلتی-عضلانی است و افزون بر پیامدهای جسمانی، آثار روانی، اجتماعی و اقتصادی قابل‌توجهی به همراه دارد (۱۸). با افزایش سن، تغییرات فیزیولوژیک مانند کاهش توده و قدرت عضلانی، افت حس عمقی، کندی پاسخ‌های عصبی-عضلانی و اختلال در یکپارچگی حسی-حرکتی، توانایی حفظ تعادل را کاهش می‌دهند (۱۹). همچنین، ترس از سقوط و کاهش اعتمادبه‌نفس حرکتی می‌تواند به محدود شدن فعالیت بدنی و افت بیشتر عملکرد منجر شود (۲۰). بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت، حدود یک‌سوم افراد بالای ۶۵ سال سالانه دست‌کم یک بار سقوط را تجربه می‌کنند و سقوط همچنان از علل اصلی مرگ‌ومیر ناشی از آسیب‌های غیرعمدی در این گروه سنی است (۲۱، ۲۲). پیامدهای سقوط شامل شکستگی لگن، آسیب‌های سر، وابستگی به مراقبت، کاهش کیفیت زندگی و افزایش بار مراقبتی برای خانواده و نظام سلامت است (۲۳).

با توجه به پیامدهای بالقوه خطرناک پرسه‌زنی در سالمندان، توجه به جنبه‌های ایمنی این رفتار اهمیت ویژه‌ای دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که پرسه‌زنی می‌تواند احتمال سقوط، آسیب‌های فیزیکی و حتی مرگ ناشی از گم شدن در محیط‌های بیرونی را افزایش دهد (۲۴). همچنین این رفتار فشار روانی و بار مراقبتی زیادی بر خانواده‌ها و مراقبان تحمیل می‌کند (۲۵). بنابراین، شناسایی زود هنگام افراد در معرض خطر، برای پیشگیری و کاهش هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم اهمیت زیادی دارد. در دهه‌های گذشته، آزمون‌های بالینی سنتی مانند: آزمون برخاستن و رفتن زمان‌دار (TUG)، مقیاس تعادل برگ (BBS) و آزمون رسیدن عملکردی (FRT) به‌طور گسترده برای غربالگری خطر سقوط به کار رفته‌اند؛ با این حال، شواهد نشان می‌دهد این ابزارها توانایی محدودی در شناسایی تغییرات ظریف و پیچیده پایداری حرکتی دارند و در پیش‌بینی سقوط‌های آینده از حساسیت و ویژگی کافی برخوردار نیستند (۲۶). دلیل این محدودیت آن است که این آزمون‌ها عمدتاً بر عملکردهای مقطعی و شرایط ساده و کنترل‌شده متکی‌اند و پویایی واقعی سیستم حرکتی انسان را در فعالیت‌های روزمره بازتاب نمی‌دهند. از این‌رو، استفاده از روش‌های پیشرفته مبتنی بر تحلیل حرکت و داده‌های بیومکانیکی برای درک بهتر سازوکارهای بی‌ثباتی و سقوط ضروری به نظر می‌رسد.

با پیشرفت فناوری حسگرهای ایترسی و ابزارهای پوشیدنی، امکان ثبت دقیق و مداوم الگوهای حرکتی در محیط‌های طبیعی فراهم شده است (۲۷). این حسگرها با اندازه‌گیری شتاب خطی و سرعت زاویه‌ای، اطلاعات ارزشمندی درباره الگوی راه‌رفت، نوسانات تنه، تغییرات سرعت و الگوهای تعادل ارائه می‌کنند. راه‌رفت یک فرایند پویا و نوسانی است که توسط سیستم عصبی-عضلانی تنظیم می‌شود و پایداری آن به توانایی بدن در مقابله با اغتشاشات و حفظ مرکز جرم در محدوده‌ای ایمن وابسته است (۲۸). در این میان، مرحله گذر، یعنی زمان تغییر در سرعت، ریتم یا

ارزیابی تعادل باشد.

روش‌شناسی

شرکت‌کننده‌ها

این پژوهش یک مطالعه مقطعی-تحلیلی از نوع توسعه و اعتبارسنجی شاخص تشخیصی بود که با هدف طراحی، ساخت و ارزیابی شاخص جدیدی با عنوان «شاخص پایداری گذر» برای تشخیص زودهنگام خطر سقوط در افراد دارای ناپایداری حرکتی انجام شد. در این مطالعه، داده‌های حرکتی افراد در یک جلسه ارزیابی و در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی گردآوری شد و سپس توان شاخص پیشنهادی در تمایز میان افراد سالم و افراد در معرض خطر سقوط مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب این طرح به دلیل امکان ثبت هم‌زمان متغیرهای سینماتیکی، سینتیکی و زمانی-مکانی راه‌رفت در یک نقطه زمانی، کنترل نسبی متغیرهای مخدوش‌کننده و مناسب بودن آن برای توسعه و ارزیابی اولیه ابزارهای تشخیصی صورت گرفت.

جامعه پژوهش را افراد بزرگسال و سالمند ساکن شهر اهر تشکیل دادند. شرکت‌کنندگان در دو گروه مستقل شامل گروه سالم و گروه در معرض خطر سقوط وارد مطالعه شدند. گروه در معرض خطر سقوط شامل افرادی بود که دست‌کم یکی از معیارهای زیر را داشتند: سابقه حداقل یک سقوط در ۱۲ ماه گذشته، گزارش بی‌ثباتی حرکتی در راه‌رفت یا تغییر مسیر، یا کسب نمره غیرطبیعی در آزمون‌های بالینی رایج تعادل و تحرک. گروه سالم شامل افرادی بود که سابقه سقوط نداشتند، شکایت بالینی از بی‌ثباتی حرکتی گزارش نکردند و در ارزیابی‌های اولیه تعادل، در محدوده طبیعی قرار داشتند.

حجم نمونه بر اساس توان آماری ۸۰٪، سطح معناداری ۰,۰۵ و اندازه اثر مورد انتظار در مقایسه شاخص‌های حرکتی بین دو گروه تعیین شد. بر این اساس، در مجموع ۶۰ نفر وارد مطالعه شدند که به‌طور مساوی در دو گروه ۳۰ نفری قرار گرفتند. روش نمونه‌گیری به‌صورت در دسترس و هدفمند بود؛ بدین معنا که افراد واجد شرایط از میان جامعه هدف شناسایی و پس از بررسی معیارهای ورود و خروج، به مطالعه دعوت شدند.

ابزار

برای ثبت و تحلیل الگوهای حرکتی شرکت‌کنندگان، از ترکیبی از ابزارهای آزمایشگاهی و پوشیدنی شامل سیستم آنالیز حرکت سه‌بعدی Qualisys، صفحات نیرو و حسگرهای پوشیدنی ایترسی (IMU) استفاده شد. به‌کارگیری هم‌زمان این سه سامانه امکان ثبت مکمل داده‌های سینماتیکی، سینتیکی و دینامیکی را فراهم کرد و مبنای استخراج متغیرهای مرتبط با پایداری راه‌رفت و خطر سقوط قرار گرفت.

بدنی با شاخص‌های متعددی از سلامت و کیفیت زندگی سالمندان ارتباط مثبت دارد. برای مثال، پارسا و همکاران (۲۸) گزارش کردند که افزایش سطح فعالیت بدنی با بهبود سلامت جسمانی و روانی سالمندان همراه است. همچنین صابری و همکاران (۴۱) نشان دادند که سالمندانی که در برنامه‌های ورزشی منظم شرکت می‌کنند، از سطح بالاتری از رضایت از زندگی و عملکرد اجتماعی برخوردارند. در سطح بین‌المللی نیز مطالعات متعددی تأثیر مثبت فعالیت بدنی بر کیفیت زندگی و کاهش ناتوانی‌های عملکردی سالمندان را تأیید کرده‌اند (۴۲). بررسی پیشینه پژوهش‌ها نشان داد مفهومی با عنوان شاخص گذر در راه‌رفت مورد استفاده قرار نگرفته، اما تمرکز عمده بر پیش‌بینی وقفه‌های راه‌رفت یا الگوهای کینماتیکی بوده است. برای مثال، (۴۳) راه‌رفت را یک سیستم دینامیکی پیچیده معرفی کردند و نوسانات چرخه‌ای را پیش‌بینی‌کننده اختلالات حرکتی دانستند. با این حال، بسیاری از این مطالعات ماهیت ایستا دارند و کمتر به بررسی پویایی تغییرات رفتار حرکتی سالمندان در طول زمان پرداخته‌اند (۱۴). با وجود ارزش بالای این متغیرها، بیشتر مطالعات پیشین آن‌ها را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند و هنوز شاخصی تجمیعی که بتواند چندین ویژگی کلیدی را به‌طور هم‌زمان و به‌ویژه در مرحله گذر تحلیل کند، به‌طور گسترده توسعه نیافته است.

این خلأ نشان می‌دهد که مدل‌های موجود در تبیین جامع پایداری حرکتی با محدودیت مواجه‌اند و توان پیش‌بینی آن‌ها برای شناسایی افراد پرخطر به اندازه کافی مطلوب نیست. همچنین، کم‌توجهی به مرحله گذر باعث شده بخشی از رفتار واقعی و پویای سیستم حرکتی در تحلیل‌ها نادیده گرفته شود. در این زمینه، توسعه یک شاخص تجمیعی می‌تواند رویکردی نوآورانه برای ارزیابی خطر سقوط فراهم آورد، زیرا این شاخص قادر است اطلاعات بیومکانیکی، زمانی-مکانی و دینامیک پایداری را در یک ساختار یکپارچه گردآوری کند. افزون بر این، اگر شاخص‌های گذر در قالب یک مدل ریاضی-آماری و با تکیه بر مفاهیم فرایندهای تصادفی تفسیر شوند، می‌توان تغییرات راه‌رفت را نه صرفاً به‌عنوان نوسانات ساده، بلکه به‌عنوان بازتابی از رفتار احتمالاتی و پویای سیستم کنترل حرکتی در نظر گرفت. این دیدگاه می‌تواند بعدی نو به تحلیل بی‌ثباتی، پیش‌بینی خطر سقوط و طراحی مدل‌های هوشمند ارزیابی تعادل اضافه کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف توسعه و اعتبارسنجی «شاخص پایداری گذر» طراحی شد؛ شاخصی که برای نخستین بار ترکیبی از پارامترهای مرتبط با نوسانات مرکز جرم، عدم تقارن گام، ناپایداری سرعت و شاخص‌های پایداری غیرخطی را در مرحله گذر مورد بررسی قرار می‌دهد. هدف اصلی این مطالعه آن است که مشخص شود آیا این شاخص می‌تواند ابزاری حساس، معتبر و قابل‌اعتماد برای تمایز افراد سالم از افراد در معرض خطر سقوط باشد یا خیر. در صورت تأیید کارایی، این شاخص می‌تواند گامی مؤثر در ارتقای دقت غربالگری خطر سقوط، بهبود برنامه‌های توان‌بخشی و توسعه فناوری‌های هوشمند

مانند نوسانات تنه، تغییرات لحظه‌ای سرعت، تقارن گام، تغییرپذیری حرکتی و برخی شاخص‌های پایداری دینامیکی استفاده شد. حسگرها بر روی بخش‌هایی از بدن که بیشترین ارتباط را با تحلیل راه رفتن و کنترل تعادل داشتند، از جمله ناحیه کمری و اندام‌های تحتانی، نصب شدند. این حسگرها به‌ویژه برای ثبت تغییرات ظریف حرکتی در مرحله گذار و شناسایی الگوهای ناپایداری‌ای که ممکن است در ارزیابی‌های بالینی سنتی آشکار نشوند، نقش مهمی داشتند.

۴. کالیبراسیون، هم‌زمان‌سازی و کنترل کیفیت اندازه‌گیری پیش از شروع آزمون‌ها، تمامی تجهیزات بر اساس دستورالعمل کارخانه سازنده کالیبره شدند و هم‌زمان‌سازی میان سامانه‌های ثبت سینماتیک، سینتیک و حسگرهای اینرسی انجام گرفت تا امکان تطابق زمانی دقیق داده‌ها فراهم شود. به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد اندازه‌گیری‌ها، ثبت داده‌ها در شرایط محیطی کنترل‌شده، شامل سطح یکنواخت راه رفتن، نور مناسب و حداقل نویز محیطی انجام شد. همچنین برای کاهش خطاهای ناشی از خستگی یا اثر یادگیری، بین تکرارها زمان استراحت کافی در نظر گرفته شد و توالی آزمون‌ها تا حد امکان استانداردسازی شد. پایایی ابزارها از طریق آزمون بازآزمایی در بخشی از نمونه و روایی آن‌ها از طریق مقایسه با شاخص‌های مرجع و بررسی همگرایی بین‌ابزاری ارزیابی و تایید شد.

روش اجرا

پس از غربالگری اولیه و احراز معیارهای ورود، اهداف پژوهش برای شرکت‌کنندگان توضیح داده شد و رضایت‌نامه آگاهانه کتبی از آن‌ها اخذ شد. سپس اطلاعات جمعیت‌شناختی و بالینی پایه شامل سن، جنس، قد، وزن و سابقه سقوط ثبت شد. در ادامه، مارکرهای بازتابی و/یا حسگرهای اینرسی بر اساس پروتکل استاندارد بر روی نقاط آناتومیک مشخص نصب شدند و شرکت‌کنندگان برای اجرای آزمون‌ها آماده شدند. ارزیابی حرکتی در یک مسیر راه رفتن استاندارد در آزمایشگاه انجام شد. از شرکت‌کنندگان خواسته شد چند وضعیت حرکتی را اجرا کنند که شامل:

۱. راه رفتن با سرعت طبیعی،
 ۲. راه رفتن با سرعت بیشتر از حد معمول،
 ۳. راه رفتن با سرعت کمتر از حد معمول،
 ۴. و انجام گذار از حالت پایدار به ناپایدار بود.
- برای ایجاد وضعیت گذار از پایداری به ناپایداری، در میانه مسیر یک تغییر ناگهانی اما کنترل‌شده در تکلیف حرکتی اعمال شد؛ به‌گونه‌ای که شرکت‌کننده ناچار به تغییر سرعت، تغییر جهت یا تطبیق فوری الگوی راه رفتن خود شود. این وضعیت به‌منظور شبیه‌سازی شرایطی طراحی شد که در آن سیستم کنترل حرکتی باید در زمان کوتاه با اغتشاش محیطی یا درونی سازگار شود. هر شرایط آزمون در چند تکرار اجرا شد و بین تریال‌ها زمان استراحت

۱. سیستم آنالیز حرکت سه‌بعدی Qualisys

سیستم Qualisys برای ثبت دقیق حرکت سه‌بعدی اندام‌ها، تنه و برآورد جابه‌جایی مرکز جرم استفاده شد. این سامانه با بهره‌گیری از دوربین‌های مادون‌قرمز و مارکرهای بازتابی نصب‌شده بر نقاط آناتومیک استاندارد، مختصات فضایی بخش‌های مختلف بدن را با دقت بالا ثبت می‌کند. دقت اندازه‌گیری این سیستم وابسته به مدل دستگاه، تعداد دوربین‌ها، کیفیت کالیبراسیون، نرخ نمونه‌برداری و حجم ثبت است و معمولاً در مطالعات بیومکانیک در محدوده زیر میلی‌متر تا چند میلی‌متر گزارش می‌شود. در این پژوهش، داده‌های حاصل از این سامانه برای استخراج متغیرهایی نظیر جابجایی مرکز جرم، طول و زمان گام، سرعت لحظه‌ای، دامنه حرکتی مفاصل و شاخص‌های هماهنگی بین‌قطعه‌ای به‌کار رفت.

در اجرای آزمون، پس از نصب مارکرها بر روی نقاط آناتومیک منتخب، از شرکت‌کنندگان خواسته شد مسیر راه رفتن تعیین‌شده را در شرایط استاندارد و با سرعت ترجیحی خود طی کنند. داده‌های ثبت‌شده توسط این سامانه، مبنای اصلی تحلیل سینماتیک و بازسازی الگوی حرکت در طول چرخه راه رفتن و به‌ویژه مرحله گذار بود.

۲. صفحات نیرو

برای اندازه‌گیری نیروهای عکس‌العمل زمین، از صفحات نیرو استفاده شد. این ابزار امکان ثبت مؤلفه‌های عمودی، قدامی-خلفی و داخلی-خارجی نیرو را فراهم می‌کند و از حساسیت بالایی برای تحلیل بیومکانیکی تماس پا با زمین برخوردار است. دقت صفحات نیرو نیز به نوع دستگاه، ظرفیت اندازه‌گیری، کیفیت نصب و شرایط کالیبراسیون وابسته است و به‌طور معمول برای تحلیل دقیق فازهای تماس و انتقال وزن در راه رفتن مناسب در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، از داده‌های صفحات نیرو برای بررسی الگوی بارگذاری، زمان تماس پا، نحوه انتقال وزن و پاسخ مکانیکی بدن در برابر تغییرات تعادلی استفاده شد.

برای جلوگیری از تغییر عمودی الگوی راه رفتن، صفحات نیرو در مسیر حرکت به‌گونه‌ای قرار داده شدند که شرکت‌کنندگان بدون تمرکز بر محل دقیق آن‌ها، راه رفتن طبیعی خود را حفظ کنند. داده‌های حاصل از این ابزار برای تحلیل مرحله برخورد پا با زمین، توزیع نیرو و ارتباط میان کنترل تعادل و جابه‌جایی مرکز جرم به‌کار رفت.

۳. حسگرهای پوشیدنی اینرسی (IMU)

حسگرهای IMU برای ثبت شتاب خطی، سرعت زاویه‌ای و تغییرات دینامیکی حرکت بدن مورد استفاده قرار گرفتند. این حسگرها به دلیل قابلیت حمل و استفاده در شرایط نزدیک‌تر به عملکرد طبیعی فرد، ابزار مناسبی برای ارزیابی پایداری حرکتی در راه رفتن محسوب می‌شوند. دقت این حسگرها به ویژگی‌های فنی شتاب‌سنج و ژيروسکوپ، کیفیت کالیبراسیون، محل نصب، تثبیت مناسب روی بدن و روش پردازش سیگنال وابسته است. در این پژوهش، از داده‌های IMU برای استخراج متغیرهایی

شد و مقادیر سطح زیر منحنی (AUC)، حساسیت، ویژگی، ارزش اخباری مثبت و منفی و نقطه برش بهینه گزارش گردید. همچنین، برای بررسی توان طبقه‌بندی داده‌ها، از مدل‌هایی مانند رگرسیون لجستیک، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (Random Forest) استفاده شد. به منظور کاهش خطر بیش‌برازش و بررسی قابلیت تعمیم‌پذیری، داده‌ها به دو بخش آموزش و اعتبارسنجی تقسیم شدند و در صورت امکان از روش‌های اعتبارسنجی متقابل نیز استفاده شد. عملکرد مدل‌ها بر اساس شاخص‌هایی مانند دقت، حساسیت، ویژگی و AUC مقایسه شد.

نتایج

میانگین شاخص پایداری گذر در گروه پرخطر (۰.۵۴) به طور قابل توجهی بالاتر از گروه سالم (۰.۳۶) است. این تفاوت نشان‌دهنده آن است که افراد در معرض خطر سقوط، الگوهای حرکتی ناپایدارتری در مرحله گذر از خود نشان می‌دهند که منجر به مقادیر بالاتر این شاخص می‌شود. همچنین در گروه سالم؛ مقادیر شاخص بین ۰.۲۵ (حداقل) تا ۰.۴۷ (حداکثر) متغیر است. میانگین شاخص ۰.۳۵ و چارک اول (۱Q) ۰.۳۱ و چارک سوم (۳Q) ۰.۴۱ است. این توزیع نشان‌دهنده همگنی نسبی مقادیر در این گروه است. در گروه پرخطر؛ مقادیر شاخص بین ۰.۴۵ (حداقل) تا ۰.۶۶ (حداکثر) متغیر است. میانگین شاخص ۰.۵۳ و چارک اول (۱Q) ۰.۵۱ و چارک سوم (۳Q) ۰.۵۶ است. مقادیر این گروه در دامنه بالاتری نسبت به گروه سالم قرار دارند. با توجه به اینکه کمترین مقدار در گروه پرخطر (۰.۴۵) از بیشترین مقدار در گروه سالم (۰.۴۷) بالاتر است (به جز چند مورد همپوشانی جزئی)، و میانگین‌ها تفاوت فاحشی دارند.

جدول ۱. شاخص پایداری گذر در گروه سالم و گروه پرخطر

گروه	تعداد (n)	میانگین شاخص پایداری گذر	انحراف معیار (SD)	حداقل	چارک اول (Q1)	میانگین (Median)	چارک سوم (Q3)	حداکثر
سالم	۳۰	۰,۳۶	۰,۰۶	۰,۲۵	۰,۳۱	۰,۳۵	۰,۴۱	۰,۴۷
پرخطر	۳۰	۰,۵۴	۰,۰۵	۰,۴۵	۰,۵۱	۰,۵۳	۰,۵۶	۰,۶۶

جدول ۲. شاخص‌های توصیفی متغیرها

پارامتر (مقایسه گروه سالم و پرخطر)	(سالم) میانگین \pm SD	(پرخطر) میانگین \pm SD	معنای تفاوت
شاخص پایداری گذر	۰,۳۶ \pm ۰,۰۶	۰,۵۴ \pm ۰,۰۵	تفاوت بسیار معنادار ($p < 0.001$); مقادیر بالاتر در گروه پرخطر، نشان دهنده ناپایداری بیشتر.
نوسانات مرکز جرم (CoM)	۰,۲۳ \pm ۰,۰۷	۰,۳۴ \pm ۰,۰۲	تفاوت معنادار ($p < 0.05$); مقادیر بالاتر در گروه پرخطر، نشان دهنده کنترل ضعیف‌تر CoM در مرحله گذر.
تغییرات لحظه‌ای سرعت	۰,۱۴ \pm ۰,۰۲	۰,۲۱ \pm ۰,۰۱	تفاوت معنادار ($p < 0.05$); نوسانات دامنه بالاتر در گروه پرخطر، نشان دهنده الگوی حرکتی ناپایدارتر.
تقارن گام (اختلاف نرمال تماس)	۰,۲۴ \pm ۰,۰۴	۰,۲۳ \pm ۰,۰۵	تفاوت معنادار ($p < 0.05$); اختلاف بیشتر در گروه پرخطر، نشان دهنده توزیع نامتوازن وزن و وزن.
هماهنگی بین قطعه‌ای	۰,۱۶ \pm ۰,۰۱	۰,۴۸ \pm ۰,۰۶	تفاوت معنادار ($p < 0.05$); نظر کمتر در گروه پرخطر، نشان دهنده اختلال در هماهنگی حرکتی.

کافی برای پیشگیری از خستگی در نظر گرفته شد. ترتیب اجرای شرایط مختلف به صورت تصادفی تعیین شد تا اثر یادگیری یا خستگی بر نتایج به حداقل برسد. در تمام مراحل، یک پژوهشگر آموزش‌دیده بر ایمنی آزمون نظارت داشت و در صورت مشاهده علائم ناراحتی، خستگی شدید یا بی‌ثباتی خطرناک، آزمون متوقف می‌شد.

روش آماری

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و در صورت نیاز نرم‌افزارهای مکمل برای مدل‌سازی یادگیری ماشین انجام شد. پیش از اجرای آزمون‌های استنباطی، توزیع داده‌ها از نظر نرمال بودن با آزمون Shapiro-Wilk و همگنی واریانس‌ها با آزمون Levene بررسی شد. داده‌های پرت با استفاده از روش‌های استاندارد شناسایی شدند و در صورت وجود داده‌های گمشده، نحوه مدیریت آن‌ها بر اساس میزان و الگوی فقدان داده مشخص شد.

برای مقایسه ویژگی‌های پایه و نمره شاخص پایداری گذر بین دو گروه، در صورت برقراری پیش‌فرض‌ها از آزمون تی مستقل و در صورت عدم برقراری پیش‌فرض‌ها از آزمون‌های ناپارامتری متناظر استفاده شد. در تحلیل چندشرطی و بررسی اثر هم‌زمان متغیرهای فردی و حرکتی، از تحلیل واریانس یا مدل‌های خطی تعمیم‌یافته استفاده شد. سطح معناداری آماری در تمام آزمون‌ها $p < 0.05$ در نظر گرفته شد و برای تفسیر بهتر نتایج، اندازه اثر و فاصله اطمینان ۹۵ درصد نیز گزارش شد. برای ارزیابی توان تشخیصی شاخص پایداری گذر، منحنی ROC ترسیم

تعداد را دشوار کرده و به طور مستقیم به افزایش خطر سقوط منجر می‌شود، و این پارامتر به عنوان یک نشانگر سطح پایه اختلال در کنترل حرکتی عمل می‌کند. مجموع این یافته‌ها، بر اهمیت نقش کلیدی مؤلفه‌های مرتبط با CoM و سرعت در شاخص پایداری گذر و درک بهتر مکانیسم‌های بی‌ثباتی در افراد در معرض خطر سقوط تأکید دارد.

نمودارهای (۱) و (۲) نشان‌دهنده توانایی بالای شاخص پایداری گذر در تفکیک افراد در معرض خطر سقوط از افراد سالم در مرحله گذار راه رفتن است. این شاخص، که از ترکیب پارامترهای سینماتیکی و سینتیکی به دست آمده، توانسته است تفاوت‌های معناداری را در الگوهای حرکتی این دو گروه آشکار سازد.

در جدول (۳) مقایسه میانگین مقدار شاخص در دو گروه با استفاده از آزمون تی و آنالیز واریانس نشان داد که تفاوت میان گروه سالم و گروه پرخطر از لحاظ آماری معنی‌دار و دارای اندازه اثر بالا است.

جدول ۳ نشان داد: تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر روی متغیرهای حرکتی، سه مؤلفه کلیدی را آشکار ساخته که در مجموع بیش از ۷۰٪ از واریانس داده‌ها را تبیین می‌کنند و هر کدام جنبه‌ای حیاتی از پایداری گذر را برجسته می‌سازند.

مؤلفه اول: نوسانات دینامیکی مرکز جرم (CoM)

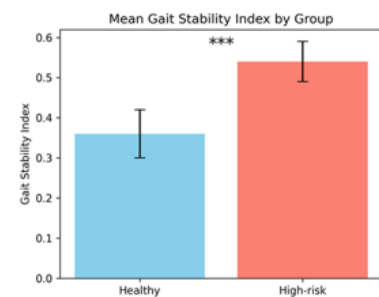
این مؤلفه، که بیشترین سهم را در توضیح واریانس دارد، به طور مستقیم به دامنه، سرعت و شتاب نوسانات مرکز جرم بدن در حین حرکت، به ویژه در لحظات گذار (مانند شروع حرکت، توقف، یا تغییر جهت)، می‌پردازد. در افراد سالم، سیستم عصبی-عضلانی این نوسانات را با دقت و کارایی بالایی کنترل کرده و در محدوده قابل پیش‌بینی نگه می‌دارد. اما در افراد پرخطر، این نوسانات نه تنها افزایش می‌یابند، بلکه الگوهای آن‌ها نامنظم‌تر، غیریکنواخت‌تر و با دامنه‌های بزرگتر ظاهر می‌شوند.

می‌توان نتیجه گرفت که شاخص پایداری گذر دارای قدرت تفکیک بالایی بین این دو گروه است. این بدان معناست که با استفاده از این شاخص، می‌توان با اطمینان بالایی افراد در معرض خطر سقوط را از افراد سالم تشخیص داد.

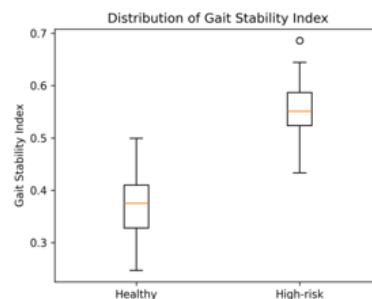
یافته‌های جدول (۲) این مطالعه نشان‌دهنده تفاوت‌های آماری معنی‌دار و قابل توجهی در پارامترهای کلیدی پایداری گذر بین گروه سالم و گروه در معرض خطر سقوط است که اعتبار شاخص پایداری گذر را به عنوان یک معیار تفکیک‌کننده قوی تأیید می‌کند. شاخص پایداری گذر به طور بسیار معنی‌داری ($p > 0.001$) در گروه پرخطر (0.05 ± 0.04) بالاتر از گروه سالم (0.06 ± 0.04) قرار دارد، که حاکی از ناپایداری حرکتی قابل توجه در مرحله گذر برای افراد در معرض خطر است. این ناپایداری کلی، ریشه در نقص‌های زیربنایی دارد: نوسانات مرکز جرم (CoM) در گروه پرخطر (0.02 ± 0.04) به طور معنی‌داری بیشتر از گروه سالم (0.03 ± 0.07) است ($p > 0.05$)، که بیانگر ضعف سیستم کنترل حرکتی در تثبیت CoM و حفظ بدن در مسیر پایدار حرکتی است. علاوه بر این، دامنه نوسانات تغییرات لحظه‌ای سرعت در گروه پرخطر (0.01 ± 0.21) نسبت به گروه سالم (0.02 ± 0.14) افزایش یافته ($p > 0.05$)، نشان‌دهنده الگوی حرکتی نامنظم‌تر و دشواری در کنترل شتاب‌گیری و کاهش شتاب است. اختلاف زمان تماس در تفران گام نیز در گروه پرخطر (0.33 ± 0.05) نسبت به گروه سالم (0.04 ± 0.04) افزایش یافته ($p > 0.05$)، که به معنای توزیع نامتوازن وزن و الگوی گام‌برداری نامتوازن است. در نهایت، هماهنگی بین‌قطعه‌ای به طور قابل توجهی در گروه پرخطر (0.06 ± 0.04) نسبت به گروه سالم (0.01 ± 0.16) مختل شده است ($p > 0.05$)، که نشان‌دهنده حرکات نامنظم و ناهماهنگ بین بخش‌های مختلف بدن است. این اختلال در هماهنگی، مدیریت نیروها و حفظ

جدول ۳. مقایسه شاخص پایداری گذر بین گروه سالم و پرخطر (آزمون t مستقل)

متغیر	گروه‌ها	میانگین \pm SD	t (آماري)	درجه آزادی (df)	مقدار p	اندازه اثر (Cohen's d)
شاخص پایداری گذر	سالم ($n=30$)	0.06 ± 0.04	۱۱,۲۰۰	۵۸	$p > 0.001$	۲,۹۰
	پرخطر ($n=30$)	0.05 ± 0.04				



نمودار ۱. نوسانات مرکز جرم در مرحله گذر سالم و پرخطر



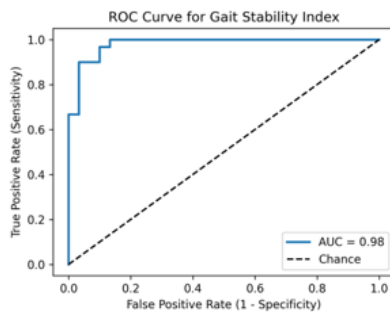
نمودار ۲. شاخص پایداری گذر بین گروه سالم و پرخطر

معنی‌داری بالاتر از گروه سالم است، که نشان‌دهنده رفتار آشوبناک و واگرایی سیستم حرکتی آن‌ها می‌باشد. این بدان معناست که سیستم حرکتی این افراد ذاتاً به سمت عدم قطعیت و انحراف گرایش دارد؛ به جای بازگشت خودکار به وضعیت تعادلی پایدار، مسیرهای حرکتی آن‌ها تمایل به گسترش و انحراف دارند. این موضوع، پتانسیل از دست دادن کنترل، عدم توانایی در اصلاح تعادل و در نهایت سقوط را به شدت افزایش می‌دهد و بر اهمیت در نظر گرفتن دینامیک غیرخطی و پیچیده سیستم حرکتی، فراتر از مشاهده صرف حرکات ناپایدار، تأکید می‌کند.

جدول ۴. شاخص‌های منحنی ROC برای شاخص پایداری گذر در تشخیص خطر سقوط

شاخص	مقدار
مساحت زیر منحنی (AUC)	۰,۹۰
فاصله اطمینان AUC %۹۵	۰,۸۴ - ۰,۹۶
بهترین نقطه برش (Cut-off)	۰,۴۵
حساسیت (Sensitivity)	۰,۸۷
ویژگی (Specificity)	۰,۸۳
ارزش اخباری مثبت (PPV)	۰,۸۲
ارزش اخباری منفی (NPV)	۰,۸۸

نتایج تحلیل ROC، به ویژه AUC در محدوده ۰,۸۵-۰,۹۳، اعتماد به نتایج واقعی شاخص پایداری گذر را از طریق ارائه معیارهای عینی عملکرد آن ایجاد می‌کند؛ این محدوده بالا، قدرت تفکیک عالی شاخص را در تمایز افراد سالم از پرخطر نشان می‌دهد، در حالی که تعیین بهینه نقطه برش بر اساس توازن حساسیت و ویژگی، اطمینان می‌دهد که خطاهای طبقه‌بندی (تشخیص نادرست افراد سالم به عنوان پرخطر یا بالعکس) به حداقل رسیده و این مقادیر در عمل اهمیت بسزایی دارند زیرا مبنای تصمیم‌گیری بالینی در ارزیابی خطر سقوط، طراحی برنامه‌های غربالگری مؤثر و اطمینان از قابلیت اعتماد ابزار جدید در محیط‌های واقعی را فراهم می‌کنند.



نمودار ۳: نمودار ROC

این افزایش نوسانات CoM، که نمایانگر توزیع جرم کل بدن است، نشان‌دهنده ضعف در توانایی حفظ مرکز ثقل بالای سطح اتکا می‌باشد. این ضعف می‌تواند ناشی از عواملی چون ضعف عضلانی در عضلات تثبیت‌کننده، اختلال در پردازش اطلاعات حسی (بینایی، وستیبولار، پروپریوسپتیو) و کندی پاسخ‌های عصبی-عضلانی باشد. در نتیجه، این مؤلفه مستقیماً به کاهش توانایی بدن در مقاومت در برابر اختلالات داخلی یا خارجی که منجر به از دست دادن تعادل می‌شود، اشاره دارد و "لرزش" و "بی‌ثباتی" در هسته حرکتی بدن را منعکس می‌کند.

مؤلفه دوم: الگوهای ناپایداری سرعت لحظه‌ای

این مؤلفه بر تحلیل تغییرات سرعت حرکت بدن در طول زمان تمرکز دارد. در مرحله گذار، که نیازمند تنظیم دقیق سرعت است، افراد پرخطر الگوهای سرعتی ناهمگون و غیریکنواخت نشان می‌دهند. این شامل شتاب‌گیری‌ها و کاهش شتاب‌های ناگهانی، تغییرات سرعت با نوسانات بالا، و فقدان الگوی سرعتی مشخص و قابل پیش‌بینی است. توانایی کنترل دقیق سرعت برای حرکات سیال، قابل پیش‌بینی و ایمن ضروری است؛ بنابراین، ناپایداری در سرعت لحظه‌ای بیانگر ناتوانی در کنترل دقیق نیروهای عضلانی، منجر به الگوهای حرکتی نامنظم، گام‌برداری غیریکنواخت و اختلال در هماهنگی کلی حرکت می‌شود. این مؤلفه، "رفتار غیرقابل پیش‌بینی" و "کنترل ناکافی" در حرکت را نشان می‌دهد که پیش‌بینی مسیر و زمان‌بندی واکنش به اختلالات را دشوار کرده و ریسک سقوط را افزایش می‌دهد.

مؤلفه سوم: عدم تقارن گام و اختلال در هماهنگی بین‌قطعه‌ای

این مؤلفه پارامترهای متعددی را شامل می‌شود، از جمله عدم تقارن در زمان تماس با زمین، طول گام، عرض گام، و همچنین نحوه تعامل و توالی حرکات بین بخش‌های مختلف بدن (لگن، تنه، شانه‌ها، اندام‌ها). در افراد پرخطر، این تقارن معمولاً مختل شده و حرکات بخش‌های مختلف بدن ممکن است مجزا، نامنظم یا با تأخیر نسبت به یکدیگر رخ دهند. تقارن در راه رفتن برای توزیع یکنواخت وزن بدن و حفظ تعادل ضروری است و اختلال در آن، منجر به افزایش بار بر یک سمت بدن و کاهش پایداری دینامیکی می‌شود. همچنین، هماهنگی بین‌قطعه‌ای برای اجرای حرکات پیچیده و پویا مانند راه رفتن حیاتی است، زیرا انتقال نیرو و انرژی را تسهیل کرده و به حفظ تعادل کمک می‌کند. اختلال در این هماهنگی به معنای عملکرد نامناسب اجزای بدن به عنوان یک سیستم یکپارچه است. این مؤلفه، "عدم یکپارچگی" و "اختلال در اجرای حرکتی" در سطح اندام‌ها و مفاصل را منعکس می‌کند که مستقیماً بر پایداری کلی بدن تأثیر می‌گذارد.

تحلیل نمای لیاپانوف و پایداری گذر

نمای لیاپانوف، به عنوان معیاری پیشرفته در تئوری سیستم‌های دینامیکی، میزان واگرایی مسیرهای حرکتی سیستم را اندازه‌گیری می‌کند. یافته‌ها نشان داد که شاخص واگرایی مسیرهای حرکتی در گروه پرخطر به طور

جدول ۵. جدول عملکرد مدل‌های پیش‌بین (Logistic, SVM, Random Forest)

مدل	دقت (Accuracy)	حساسیت	ویژگی	AUC
مرگسیون لجستیک	۰,۸۳	۰,۸۲	۰,۸۴	۰,۸۸
SVM	۰,۸۷	۰,۸۶	۰,۸۸	۰,۹۰
Random Forest	۰,۹۱	۰,۹۰	۰,۹۲	۰,۹۳

افزایش نرخ واگرایی لیاپانوف در گروه پرخطر، نشان می‌دهد این افراد توانایی کمتری در مهار اغتشاشات کوچک و حفظ خط‌سیر پایدار حرکت در مرحله گذر دارند؛ وضعیتی که به‌طور دقیق به مفهوم کاهش پایداری دینامیکی و افزایش آسیب‌پذیری نسبت به سقوط اشاره دارد.

ارزش این یافته زمانی برجسته‌تر می‌شود که در چارچوب پیشینه علمی تحلیل شود. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که افزایش نوسانات مرکز جرم و کاهش هماهنگی اندام‌ها از شاخص‌های مهم بی‌ثباتی راه‌رفتن در سالمندان و بیماران نوروموتور است (۲۶، ۱۹). همچنین گزارش شده که عدم تقارن گام یکی از قوی‌ترین شاخص‌های اختلال در کنترل پاسچرال و افزایش احتمال سقوط محسوب می‌شود (۲۸). افزوده شدن شواهد حاصل از نرخ واگرایی لیاپانوف در پژوهش‌های جدید نیز نشان می‌دهد شاخص‌های پایداری غیرخطی می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره حساسیت سیستم حرکتی به اغتشاشات فراهم کنند (۳۹). یافته‌های حاضر هم‌سویی عمیقی با این شواهد دارد، با این تفاوت که برای نخستین بار این عوامل نه به‌صورت مجزا بلکه در قالب یک شاخص تجمیعی ویژه مرحله گذر تحلیل شده‌اند؛ مرحله‌ای که طبق مطالعات اخیر حساس‌ترین نقطه چرخه راه‌رفتن در آشکارسازی بی‌ثباتی است (۲۹، ۴۴).

تغییرات نوسانی و نامتقارن در الگوهای راه رفتن، که شامل افزایش نوسانات مرکز جرم، عدم تقارن در سرعت و زمان‌بندی گام، و اختلال در هماهنگی بین‌قطعه‌ای است، مستقیماً به افزایش خطر سقوط منجر می‌شود. این اختلالات، توانایی سیستم عصبی-عضلانی را برای اصلاح انحرافات کوچک کاهش داده، منجر به انتشار بیشتر این انحرافات و در نتیجه از دست دادن تعادل می‌شود. همچنین، عدم تقارن در توزیع بار، فشار مضاعفی بر مفاصل و عضلات وارد کرده، باعث ضعف و کاهش هماهنگی کلی حرکتی و کند شدن واکنش‌ها به تغییرات ناگهانی می‌گردد. گسست در هماهنگی بین‌قطعه‌ای، حرکات بدن را غیرقابل پیش‌بینی و ناهماهنگ ساخته و توانایی واکنش سریع و مؤثر در شرایط بحرانی را سلب می‌کند. علاوه بر این، حفظ تعادل در این شرایط نیازمند انرژی بیشتری بوده که منجر به خستگی زودرس و عضلات و کاهش توانایی کنترل حرکتی می‌شود؛ لذا این مجموعه‌ی تغییرات، نشان‌دهنده کاهش پایداری دینامیکی سیستم حرکتی و افزایش آسیب‌پذیری فرد در برابر سقوط، به ویژه در موقعیت‌های چالش‌برانگیز است.

هنگامی که این کفایت کاهش یابد، انحرافات کوچک به‌جای بازگشت به مسیر پایدار، با نرخ واگرایی بیشتری انتشار می‌یابند و نهایتاً احتمال

مدل Random Forest با دقت ۰,۹۱، بالاترین عملکرد را در طبقه‌بندی افراد به عنوان کم‌خطر یا پرخطر نشان می‌دهد، در مقایسه با SVM (۰,۸۷) و مرگسیون لجستیک (۰,۸۳)، که نشان‌دهنده توانایی برتر آن در یادگیری الگوهای پیچیده است؛ اگرچه مدل‌های خطی تعمیم‌یافته تأیید کردند که شاخص پایداری گذر به‌طور مستقل از عواملی مانند سن و جنس بر احتمال سقوط تأثیر می‌گذارد، اما این عوامل در مدل‌سازی پیش‌بینانه می‌توانند به عنوان متغیرهای ورودی اضافی در نظر گرفته شوند تا دقت مدل‌ها افزایش یابد، به خصوص در مواردی که ارتباطات غیرخطی یا پیچیده‌تری بین این عوامل و خطر سقوط وجود داشته باشد

بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد شاخص پایداری گذر، که ترکیبی از نوسانات مرکز جرم، ناپایداری سرعت، عدم تقارن چرخه گام و هماهنگی بین‌قطعه‌ای است، به‌طور قدرتمندی افراد سالم را از افراد در معرض خطر سقوط متمایز می‌کند؛ این شاخص چندبعدی، با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های دینامیکی مرحله گذر راه رفتن، خلأ موجود در ارزیابی‌های سنتی تک‌متغیره را پر کرده و با اندازه اثر بسیار بزرگ ($d=2,90$) و مقادیر بالای (AUC) ROC = ۰,۹۰، حساسیت = ۰,۸۷، و ویژگی = ۰,۸۳، اعتبار بالایی در تفکیک گروه‌ها و کاربرد بالینی دارد، که این یافته‌ها هم‌سو با مطالعات پیشین در مورد اهمیت شاخص‌های نوسانی، عدم تقارن و هماهنگی در کنترل تعادل است، اما با تحلیل تجمیعی این عوامل در مرحله حساس گذر، دیدگاه نوینی ارائه می‌دهد. اندازه اثر بسیار بزرگ ($d=2,90$) در تفاوت میانگین شاخص پایداری گذر بین گروه‌های سالم و پرخطر، به این معناست که تفاوت مشاهده شده بسیار چشمگیر بوده و بازتاب‌دهنده ناهمگنی واقعی در کنترل تعادل است، نه نویز آماری؛ این یافته بزرگ، مبنای محکمی برای ایجاد مداخلات بالینی مؤثر فراهم می‌کند، زیرا نشان می‌دهد تمرکز بر بهبود این شاخص می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه ریسک سقوط شود و همچنین امکان اصلاح ترکیب گروه‌های مخاطران را از طریق طبقه‌بندی دقیق‌تر سطوح خطر (بر اساس مقادیر شاخص) فراهم می‌آورد، که این امر به طراحی پروتکل‌های درمانی شخصی‌سازی شده و تخصصی‌تر برای هر گروه، از جمله مداخلات فشرده‌تر برای افراد با مقادیر بسیار بالای شاخص، منجر خواهد شد. سازگاری این یافته با

محدودیت‌هایی مواجهه شود.

Random Forest، به طور طبیعی قادر به شناسایی و مدل‌سازی این روابط غیرخطی و تعاملات پیچیده است. به عنوان مثال، Random Forest می‌تواند تشخیص دهد که اثر یک متغیر خاص (مانند نوسانات مرکز جرم) ممکن است بسته به سطح متغیر دیگری (مانند سرعت راه رفتن) تغییر کند، که این یک ویژگی کلیدی در تحلیل رفتارهای دینامیکی وابسته به زمینه است. علاوه بر این، Random Forest اهمیت نسبی هر متغیر ورودی را در فرآیند پیش‌بینی مشخص می‌کند، که در این مطالعه نشان داد شاخص پایداری گذر قوی‌ترین متغیر در همه مدل‌ها بوده است. این قابلیت‌ها، Random Forest را به ابزاری قدرتمند برای تحلیل داده‌های بیومکانیکی تبدیل کرده و برتری آن را در مقایسه با روش‌های سنتی‌تر توجیه می‌کند، چرا که این مدل می‌تواند ظرافت‌ها و پیچیدگی‌های کنترل تعادل انسانی را که غالباً ماهیتی غیرخطی و چندعاملی دارد، بهتر منعکس کند (۴۵، ۴۶). بنابراین، ترکیب شاخص پایداری گذر با مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند گامی مهم در توسعه ابزارهای هوشمند پیش‌بینی سقوط باشد.

با وجود این نتایج امیدوارکننده، چند محدودیت بر تفسیر یافته‌ها تأثیر می‌گذارد. نخست اینکه حجم نمونه پژوهش محدود بوده و گرچه اندازه اثر بالا از ثبات نتایج حمایت می‌کند، اما برای افزایش قدرت تعمیم‌پذیری به نمونه‌های بزرگ‌تر و متنوع‌تر نیاز است. دوم اینکه داده‌ها در محیط کنترل‌شده آزمایشگاهی گردآوری شده‌اند و ممکن است الگوهای راه رفتن در شرایط آزاد، شامل تغییرات ناگهانی و اغتشاشات محیطی، تفاوت‌هایی با نتایج ثبت‌شده داشته باشند. سوم اینکه تنها شاخص‌های حرکتی در این مطالعه بررسی شدند، در حالی که عوامل مهمی مانند قدرت عضلانی، عملکرد شناختی، اضطراب حرکتی و تاریخچه سقوط می‌توانند بر خطر واقعی سقوط تأثیرگذار باشند. در نهایت، ماهیت مقطعی مطالعه اجازه بررسی توان پیش‌بینی طولی شاخص پایداری گذر در وقوع واقعی سقوط را فراهم نکرد. در راستای تکمیل تحقیقات پیشین و غلبه بر محدودیت‌های موجود، پژوهش‌های آتی باید بر چهار محور کلیدی تمرکز نمایند: اولاً، انجام مطالعات طولی برای ارزیابی دقیق توانایی شاخص پایداری گذر در پیش‌بینی واقعی رویدادهای سقوط در طول زمان، که نیازمند جمع‌آوری داده‌ها در بازه‌های زمانی مشخص و رصد افراد است. ثانیاً، گسترش حجم نمونه و تنوع شرکت‌کنندگان، شامل طیف وسیع‌تری از افراد با ویژگی‌های دموگرافیک متفاوت و گروه‌های بالینی خاص (مانند افراد مبتلا به بیماری‌های عصبی-عضلانی یا سالمندان با سابقه زمین خوردن). به منظور افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج، ثالثاً، ادغام عوامل چندوجهی مؤثر بر خطر سقوط، از جمله فاکتورهای شناختی (مانند توجه و پردازش اطلاعات)، روان‌شناختی (مانند اضطراب حرکتی) و فیزیولوژیکی (مانند قدرت عضلانی)، در کنار شاخص‌های حرکتی، جهت ایجاد یک مدل جامع‌تر و دقیق‌تر از ریسک سقوط، و در نهایت، بررسی و تحلیل داده‌ها

لخته‌شدن بی‌ثباتی و بروز سقوط افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش ROC با AUC برابر با ۰٫۹۰ نیز مؤید این است که شاخص پایداری گذر نه تنها از منظر بیومکانیکی معتبر است، بلکه از دید آماری نیز توان بالایی در تفکیک گروه‌ها دارد. مقادیر آماری مانند AUC (۰٫۹۰)، حساسیت (۰٫۸۷) و ویژگی (۰٫۸۳) نشان‌دهنده دقت و اعتبار بالای شاخص پایداری گذر در تفکیک افراد سالم از پرخطر هستند. AUC بالا، که نشان‌دهنده توانایی عالی مدل در تمایز بین دو گروه است، اعتبار این شاخص را نه تنها در پزشکی (مانند تشخیص بیماری‌های جدی)، بلکه در حوزه‌هایی مانند پیش‌بینی ورشکستگی مالی یا امنیت سایبری نیز تأیید می‌کند. حساسیت بالا تضمین می‌کند که بخش عمده‌ای از افراد واقعاً در معرض خطر، شناسایی می‌شوند، که برای غربالگری بیماری‌ها یا تهدیدات امنیتی حیاتی است، در حالی که ویژگی بالا، تعداد نتایج مثبت کاذب را کاهش داده و از تشخیص‌های اشتباه و درمان‌های غیرضروری جلوگیری می‌کند، که این امر در مدیریت منابع پزشکی و جلوگیری از اضطراب بیماران اهمیت فراوانی دارد.

این شاخص با سنجش دینامیک راه رفتن در مرحله حساس گذار، نسبت به روش‌های سنتی مانند تست‌های تعادلی ایستا یا پرسشنامه‌ها، مزیت قابل توجهی در تشخیص زودهنگام خطر سقوط دارد؛ زیرا توانایی سیستم حرکتی را در مواجهه با چالش‌های واقعی راه رفتن، که لحظات انتقال وزن و تغییرات سریع مرکز جرم را در بر می‌گیرد، ارزیابی می‌کند. این تشخیص پیشگیرانه، پیش از وقوع سقوط، امکان مداخله به موقع را فراهم می‌آورد. در مدیریت بیمارستانی، ارزیابی منظم این شاخص برای بیماران پرخطر، به ویژه سالمندان، می‌تواند به پیشگیری از حوادث ناگوار، کاهش هزینه‌های درمانی و برنامه‌ریزی بهتر برای ترخیص کمک کند. همچنین، در توانبخشی، این شاخص با شناسایی دقیق مؤلفه‌های مختل شده تعادل (مانند نوسانات مرکز جرم، سرعت، تقارن یا هماهنگی)، امکان طراحی برنامه‌های درمانی بسیار هدفمند و مؤثر را فراهم می‌آورد و با پایش مستمر پیشرفت بیمار، به تنظیم شدت تمرینات و توسعه ابزارهای نوین بازخورد زیستی کمک شایانی می‌کند.

مدل Random Forest به دلیل توانایی‌اش در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی، و همچنین مقاومت نسبی در برابر بیش‌برازش، در تحلیل داده‌های حرکتی پیچیده مانند شاخص پایداری گذر، عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های خطی مانند رگرسیون لجستیک و مدل‌هایی مانند SVM نشان داده است. رگرسیون لجستیک، که یک مدل خطی است، فرض می‌کند که رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی خطی است، در حالی که در حوزه بیومکانیک راه رفتن، روابط اغلب غیرخطی و دارای تعاملات پیچیده بین متغیرها هستند. ماشین بردار پشتیبان (SVM) قادر است روابط غیرخطی را با بهره‌گیری از توابع هسته مدل‌سازی کند. با این حال، در مقایسه با (Random Forest)، ممکن است هنگام پردازش مجموعه داده‌های بزرگ و با ابعاد بالا، یا در تشخیص دقیق تعاملات میان متغیرهای متعدد، با

از آگاهی کامل، رضایت‌نامه آگاهانه کتبی را امضا کردند. شرکت در این پژوهش کاملاً داوطلبانه بود و شرکت‌کنندگان در هر مرحله از مطالعه حق انصراف بدون هیچ پیامدی را داشتند. به‌منظور حفظ محرمانگی، اطلاعات افراد به‌صورت کدگذاری شده و ناشناس ثبت و نگهداری شد و داده‌ها صرفاً برای اهداف پژوهشی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین با توجه به ماهیت آزمون‌های حرکتی، تهییدات لازم برای حفظ ایمنی شرکت‌کنندگان در طول اجرای آزمون‌ها در نظر گرفته شد

حامی مالی

این تحقیق هیچ‌گونه کمک مالی از سازمان‌های تامین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرد.

مشارکت نویسندگان

هر دو نویسنده مشارکت یکسانی داشتند

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

تقدیر و قدردانی

از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش ما را یاری کردند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

در شرایط محیطی متنوع و واقعی‌تر، که با شبیه‌سازی چالش‌های روزمره مانند تغییر ناگهانی سطح اتکا یا وجود موانع، تصویر کامل‌تری از عملکرد تعادلی افراد در دنیای واقعی ارائه می‌دهد. این رویکردها، با بهره‌گیری از تحلیل‌های پیشرفته‌تر و در نظر گرفتن کاربردهای بالینی، می‌توانند به توسعه ابزارها و مداخلات مؤثرتر در جهت پیشگیری از سقوط یاری رسانند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش پیامدهای کاربردی گسترده‌ای را برای حوزه‌های بیومکانیک، توانبخشی و ارتقاء سلامت عمومی، به ویژه در میان سالمندان، به ارمغان می‌آورد. کاربرد بالینی اصلی این پژوهش، معرفی شاخص پایداری گذر به عنوان یک ابزار ارزیابی ساده، سریع و مقرون‌به‌صرفه است که می‌تواند به طور مؤثری در کلینیک‌های تخصصی، مراکز توانبخشی و برنامه‌های غربالگری سلامت مورد استفاده قرار گیرد. این امر به متخصصان امکان می‌دهد تا افراد در معرض خطر سقوط را با دقت بالاتری شناسایی کرده و مداخلات پیشگیرانه را به موقع آغاز کنند. علاوه بر این، ادغام این شاخص با الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین، زمینه را برای توسعه سامانه‌های هوشمند و خودکار ارزیابی تعادل فراهم می‌سازد. این سامانه‌ها قادر خواهند بود داده‌های دریافتی از حسگرهای پوشیدنی را به صورت مداوم تحلیل کرده و هشدارهای پیش‌بینی‌کننده سقوط را به صورت خودکار ارائه دهند، که این امر گامی مهم در جهت توانمندسازی افراد برای مدیریت بهتر سلامت خود محسوب می‌شود. در نهایت، نتایج این پژوهش پایه‌ای محکم برای طراحی مداخلات توانبخشی فردمحور و هدفمند فراهم می‌آورد. با شناسایی الگوهای خاص بی‌ثباتی در هر فرد، برنامه‌های تمرینی می‌توانند به طور اختصاصی بر اصلاح نواقص حرکتی او متمرکز شوند؛ برای مثال، تمرکز بر کاهش نوسانات مرکز ثقل، بهبود هماهنگی بین اندام‌ها، یا اصلاح عدم تقارن در الگوهای گام برداشتن. این رویکرد شخصی‌سازی شده، اثربخشی مداخلات توانبخشی را به طور چشمگیری افزایش داده و به ارتقاء کلی سلامت و کیفیت زندگی افراد، به ویژه در دوران سالمندی، کمک شایانی خواهد کرد. در مجموع، پژوهش حاضر نشان می‌دهد تحلیل مرحله گذر، زمانی که در قالب یک شاخص تجمیعی و چندمتغیره ارائه شود، می‌تواند بینشی دقیق‌تر درباره پایداری دینامیکی فراهم کرده و به‌عنوان ابزاری قدرتمند در پیشگیری از سقوط مورد استفاده قرار گیرد. یافته‌ها مبین اهمیت توجه به رفتارهای غیرخطی، تعاملات پیچیده و نقش تغییرات لحظه‌ای در چرخه راه‌رفتن هستند و چشم‌انداز جدیدی برای پژوهش‌های آینده و توسعه فناوری‌های هوشمند در حوزه سلامت حرکتی ترسیم می‌کنند.

ملاحظات اخلاقی

این پژوهش با رعایت اصول اخلاقی پژوهش در انسان انجام شد. پیش از ورود به مطالعه، تمامی شرکت‌کنندگان اطلاعات کامل درباره اهداف پژوهش، مراحل اجرا، منافع و مخاطرات احتمالی آن دریافت کردند و پس

References

1. Hausdorff JM. Gait dynamics, fractals and falls: finding meaning in the stride-to-stride fluctuations of human walking. *Human Movement Science*. 2007;7:60-56.
2. Kang HG, Dingwell JB. Separating the effects of age and walking speed on gait variability. *Gait & Posture*,. 2008;17(21):124-7.
3. Anderson D, M D. Athletic identity and physical activity behavior: A systematic review of psychological influences on sport participation. . *Psychol Sport Exerc* 2022;16(6):553-70.
4. Brewer BW, Cornelius AE. Norms and factorial invariance of the Athletic Identity Measurement Scale. *Academic Athletic Journal*,. 2001;15(2):103-13.
5. Washburn RA, Smith KW, Jette AM, Janney CA. The Physical Activity Scale for the Elderly (PASE): development and evaluation. *Journal of Clinical Epidemiology*. 1993;10(2):75-84.
6. Zou H, Hastie T. Regularization and Variable Selection via the Elastic Net. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*. 2005;67(2):301-20.
7. Strachan SM, Woodgate J, Brawley LR, Tse A. The relationship of self efficacy and self identity to long term maintenance of vigorous physical activity. *Journal of Applied Social Psychology*,. 2015;27(2):216-24.
8. Kim J, Kim M, Lee S. Machine Learning Models for Predicting Exercise Participation among Elderly Adults: The Role of Sports Identity and Social Factors. *Frontiers in Psychology*. 2022;66(8):713-9.
9. Brage S, Westgate K, Wareham N. Longitudinal Prediction of Physical Activity in Older Adults Using Machine Learning: Psychological, Cognitive, and Environmental Factors. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2023;20(35):279-88.
10. Rejeski WJ, SL M. Physical activity and quality of life in older adults. . *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2020;36(6):30-4.
11. Santos D, Rodrigues F, D T. Psychological determinants of physical activity among older adults: The role of motivation and identity. *Int J Sport Exerc Psychol*. 2021;2(4):55-64.
12. Li F, Y. W. Physical activity and healthy aging: Effects on functional health and quality of life among older adults. . *Health IJERP*, editor. 32021.
13. McAuley E, Doerksen S, Morris K, Motl R, Hu L, Wójcicki TR, et al. Pathways from physical activity to quality of life in older women. *Ann Behav Med*. 2006;31(1):22-32.
14. Rhodes RE, Janssen I, Bredin S, Warburton D, & Bauman A. Physical activity: health impact, prevalence, correlates and interventions. *Psychology & Health*. 2017;32(8): 58–67.
15. Sallis JF, N. O. Ecological models of health behavior. In: Glanz K, Rimer BK, Viswanath K, editors. *Health Behavior: Theory, Research, and Practice*. 5th ed San Francisco: Jossey-Bass. 2015:43-64.
16. Chodzko Zajko WJ, et al. Exercise and physical activity for older adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, . *Health Services and Delivery Research*. 2009;41(7):1-133.
17. Bauman AE, et al. Correlates of physical activity: why are some people physically active and others not? . *Journal of Medical Pharmaceutical and Allied Sciences*. 2012;32(4):1121-35.
18. Dingwell JB, Cusumano JP. Human walking: Continuous adjustments of control and local dynamic stability. *Journal of Biomechanics*. 2021;10(9):205-16.
19. Van Schooten KS, Tabor Aea. Wearable sensors to predict fall risk in daily life. *Journal of Active Aging*. 2022;12(3):41-52.
20. AV C, Y Z, S. L. Reliability and validity of physical activity scales in older adults: a systematic review. *J Aging Phys Act*. 2022;30(22):345 58.
21. Organization. WH. WHO report on falls in older adults. 2021.
22. James SL, et al. Global injury burden related to falls in older adults: Systematic review. *The Lancet Public Health*, . 2022;7(1):e13–e24.
23. James SL, Terrier P. Global burden of falls in older adults. *The Lancet Public Health*,. 2022;11(42):36-44.

24. Jonason PK, Baughman HM, Carter GL, Parker P. Dorian Gray without his portrait: Psychological, social, and physical health costs associated with the Dark Triad. *Personality and Individual Differences*. 2015;78:5-13.
25. Furnham A, Richards S, Rangel L, Jones DN. Measuring malevolence: Quantitative issues surrounding the Dark Triad of personality. *Personality and individual differences*. 2014;67:114-21.
26. Barry G, Galna B. Clinical gait assessments fail to identify subtle balance deficits. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2020;17(58):24-48.
27. Kang HG, Dingwell JB. Dynamic stability of superior vs. inferior performers in an attention-demanding locomotor task. *Gait & Posture*. 2009;29(3):460-4.
28. Parsa M, et al. . The Relationship Between Physical Activity and Social Health of Older Adults. *Quarterly Journal of Elderly Health Research*. 2017;2(4):55-64.
29. Bruijn SM, van Dieën JH. Control of human gait stability through foot placement. *Journal of The Royal Society Interface*. 2020;17(3620190636).
30. Rincón-Campos YE, Sanchez-Lopez J, López-Walle JM, Ortiz-Jiménez X. Dynamics of executive functions, basic psychological needs, impulsivity, and depressive symptoms in American football players. *Frontiers in psychology*. 2019;10:2409.
31. Hak L, van Dieën JH, & van der Wurff P. Gait transitions are associated with impaired stability in older adults. *Gait & Posture*. 2021;84:99-105.
32. Vaughan R, Madigan DJ, Carter GL, Nicholls AR. The Dark Triad in male and female athletes and non-athletes: Group differences and psychometric properties of the Short Dark Triad (SD3). *Psychology of Sport and Exercise*. 2019;43:64-72.
33. Brewer BW, Van Raalte JL, DE. L. Athletic identity: Hercules' muscles or Achilles heel? *Int J Sport Psychol* 1993;16(12):237-54.
34. Anderson CB. Athletic identity and its relation to exercise behavior. *Journal of Sport Behavior*. 2004;27(2):1-10.
35. Miller KE, Kerr G, al e. The role experimentation of intercollegiate student athletes. *Journal of Applied Biomechanics*. 2003;36(4):245-52.
36. Piatt J, Kang S, Wells MS, Nagata S, Hoffman J, J. T. Changing identity through sport: The Paralympic sport club experience among adolescents with mobility impairments. *Disability and health journal*. 2018;11(2):6-26.
37. Lee B, J. S. Structural relationships between physical activity and quality of life in older adults: a gender invariance analysis. *Aging Ment Health*. 2023;27(9):1750-8.
38. Mahmoudian A, et al. Gait asymmetry as a predictor of future falls: A systematic review. *Gait & Posture*. 2023;101: 58-67.
39. Stenum J, Choi J, Takens F. Lyapunov stability measures in fall risk assessment. Young (Eds), *Dynamical Systems and Turbulence* (pp 366-381) Springer-Scientific Reports. 2022:(pp. 366-81).
40. Hausdorff JM. Gait variability: methods, modeling and meaning. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2001;15(3):163-218.
41. Saberi A, et al. The Effect of Physical Activity on the Quality of Life of Older Adults: *Journal of Sport Sciences Research*; 2020.
42. Harrison V, Moulds ML, Jones K. Perceived social support and prenatal wellbeing; The mediating effects of loneliness and repetitive negative thinking on anxiety and depression during the COVID-19 pandemic. *Women and Birth*. 2022;35(3):232-41.
43. Dingwell JB, Cusumano JP). Identifying stride-to-stride control strategies in human walking. *Journal of The Royal Society Interface*. 2015;21(6):59-66.
44. Hak L, van Dieën J, Latash M. Transitional gait stability in older adults. *Journal of Biomechanics*. 2021;30(2):279-89.
45. Zhao A, Van Schooten KS, et al. Machine learning and wearable sensors for fall prediction: Advances and challenges. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2022;15:42-57.