BIRJAND UNIVERSITY OF MEDICAL SCIENCES
Journal of Translational Medical Research
https://journal.bums.ac.ir

ReviewArticle- Systematic Review

Smart exercise therapy in the management of chronic diseases: A review of physiological mechanisms and Artificial intelligenceai-based personalized interventions

Babak Hooshmand-Moghadam[1]*, Abbas Ali Gaeini[2]

[1] Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[2] Department of Exercise Physiology, Faculty of Sports and Health Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran

***Corresponding author:** Babak Hooshmand-Moghadam
Tel: +985138805398 E-mail: b.hooshmand@um.ac.ir

ABSTRACT

Background and Aims: Chronic diseases remain a major challenge for global health systems, and conventional therapeutic approaches, particularly exercise therapy, are often insufficient to address the complex and evolving needs of patients. In recent years, the integration of exercise physiology with smart technologies and artificial intelligence (AI) algorithms has opened new horizons for designing precise and personalized exercise interventions. This analytical narrative review, adopting an integrative approach, aimed to elucidate the physiological mechanisms underlying exercise therapy and examine the role of AI in optimizing and personalizing this process.

Materials and Methods: A systematic search of major scientific databases was conducted. Of more than 500 screened articles, 112 eligible studies were included in the final analysis. Data were categorized and synthesized into three major themes using thematic analysis and conceptual integration.

Results: Exercise training improves physiological adaptations in patients with chronic diseases through metabolic, cardiovascular, and neurohormonal pathways. Wearable technologies, physiological sensors, and real-time feedback systems enable continuous monitoring of these adaptations. Furthermore, machine learning algorithms and big data–driven predictive models can identify individual exercise response patterns and facilitate the development of adaptive exercise programs tailored to patients' real-world conditions.

Conclusion: This review demonstrates that integrating exercise therapy with AI opens a new frontier in precision medicine. The future of exercise therapy in the AI era lies in personalized interventions and the integration of biological, behavioral, and environmental data. This emerging paradigm has the potential to transform exercise physiology from a rehabilitation tool into a decision-support discipline within precision medicine.

Keywords: Chronic diseases, Exercise physiology, Machine learning, Metabolic and neuro-hormonal mechanisms, Personalized interventions, Smart exercise therapy, Wearable technologies

Citation: Hooshmand-Moghadam B, Gaeini AA. [Smart exercise therapy in the management of chronic diseases: A review of physiological mechanisms and AI-based personalized interventions]. Journal of Translational Medical Research (J Transl Med Res). 2026; 33: Supplement (Cardiometabolic): 25-47. [Persian]

DOI http://DOI.org/10.66224/JBUMS.33.25

Received: November 25, 2025 **Accepted:** April 25, 2026

Copyright © 2026, Journal of Translational Medical Research. This open-access article is available under the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 (CC BY-NC 4.0) International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which allows for the copying and redistribution of the material only for noncommercial purposes, provided that the original work is properly cited.

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

مقاله مروری نظام‌مند

تمرین‌درمانی هوشمند در مدیریت بیماری‌های مزمن: مروری بر سازوکارهای فیزیولوژیکی و مداخلات شخصی‌سازی‌شده مبتنی بر هوش مصنوعی

بابک هوشمندمقدم*[۱]، عباسعلی گائینی[۲]

چکیده

زمینه و هدف: بیماری‌های مزمن همچنان یکی از چالش‌های اصلی نظام‌های سلامت جهانی محسوب می‌شوند و رویکردهای سنتی درمانی، به‌ویژه در حوزه تمرین‌درمانی، در پاسخ به نیازهای پیچیده و متغیر بیماران کفایت ندارند. در سال‌های اخیر، ادغام دانش فیزیولوژی تمرین با فناوری‌های هوشمند و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، افق تازه‌ای را برای طراحی مداخلات ورزشی دقیق و شخصی‌سازی‌شده گشوده است. هدف این مرور روایتی تحلیلی با رویکرد یکپارچه، تبیین سازوکارهای فیزیولوژیکی تمرین‌درمانی و بررسی نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی و شخصی‌سازی این فرایند است.

روش تحقیق: جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های معتبر انجام شد و در نهایت، از میان بیش از ۵۰۰ مقاله بررسی‌شده، ۱۱۲ مقاله واجد شرایط وارد تحلیل نهایی شدند. داده‌ها با استفاده از رویکرد تحلیل تماتیک و یکپارچه‌سازی مفهومی در سه محور اصلی طبقه‌بندی و تحلیل شدند.

یافته‌ها: تمرینات ورزشی از طریق مسیرهای متابولیک، قلبی–عروقی و عصبی–هورمونی، موجب بهبود سازگاری‌های فیزیولوژیکی در بیماران مزمن می‌شوند و فناوری‌های پوشیدنی، حسگرهای فیزیولوژیکی و سیستم‌های بازخوردی، امکان پایش لحظه‌ای این تغییرات را فراهم کرده‌اند. به‌علاوه، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های بزرگ، قابلیت تحلیل الگوهای پاسخ تمرینی و طراحی برنامه‌های تطبیقی با شرایط واقعی بیمار را دارند.

نتیجه‌گیری: مرور حاضر نشان می‌دهد که ادغام تمرین‌درمانی با هوش مصنوعی، مرز جدیدی در پزشکی دقیق گشوده است. آینده تمرین‌درمانی در عصر هوش مصنوعی بر محور شخصی‌سازی مداخلات و هم‌افزایی میان داده‌های زیستی، رفتاری و محیطی استوار است. این تحول نوظهور می‌تواند فیزیولوژی تمرین را از سطح یک ابزار بازتوانی به سطح یک علم تصمیم‌یار در پزشکی دقیق ارتقا دهد.

واژه‌های کلیدی: بیماری‌های مزمن، فیزیولوژی تمرین، یادگیری ماشین، سازوکارهای متابولیک و عصبی–هورمونی، شخصی‌سازی مداخلات، تمرین‌درمانی هوشمند، فناوری‌های پوشیدنی

مجله "تحقیقات پزشکی ترجمانی". ۱۴۰۵؛ ۳۳: (ویژه‌نامه کاردیومتابولیک): ۴۷-۲۵.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵

[۱] گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

[۲] گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی و تندرستی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

***نویسنده مسئول: بابک هوشمند مقدم**

آدرس: استان خراسان رضوی- مشهد- دانشگاه فردوسی مشهد- دانشکده علوم ورزشی

تلفن:۰۵۱۳۸۸۰۵۳۹۸ پست الکترونیکی: b.hooshmand@um.ac.ir

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

مقدمه

بیماری‌های مزمن غیرواگیر از جمله دیابت نوع دو، بیماری‌های قلبی‌عروقی، چاقی، سرطان و بیماری‌های تنفسی، امروزه عامل بیش از ۷۰ درصد مرگ‌ومیرهای جهانی محسوب می‌شوند و یکی از چالش‌های عمده سلامت عمومی در قرن بیست‌ویکم به‌شمار می‌آیند (۱). روند روبه‌افزایش شهرنشینی، سبک زندگی کم‌تحرک و تغذیه ناسالم، بروز این بیماری‌ها را به‌طور فزاینده‌ای افزایش داده است (۲). سازمان جهانی بهداشت (WHO)[1] برآورد کرده است که تا سال ۲۰۳۰، هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از بیماری‌های مزمن بیش از ۵۰ تریلیون دلار در سطح جهان خواهد بود (۳). در این میان، تمرکز صرف بر درمان دارویی نتوانسته است کنترل پایداری بر این بیماری‌ها ایجاد کند؛ ازاین‌رو، راهکارهای نوینی که مبتنی بر مداخلات رفتاری و فیزیولوژیکی باشند، به‌ویژه تمرین‌درمانی، اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند (۴).

تمرین‌درمانی[2] یکی از مؤثرترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین مداخلات غیردارویی برای مدیریت بیماری‌های مزمن است. مطالعات گسترده نشان داده‌اند که تمرینات هوازی، مقاومتی و ترکیبی می‌توانند از طریق بهبود حساسیت به انسولین، کاهش التهاب سیستمیک، بهبود ظرفیت قلبی‌تنفسی و حفظ توده‌ی عضلانی، نقش چشمگیری در کنترل علائم و پیشرفت بیماری‌های مزمن ایفا کنند (۵،۶). بااین‌حال، پاسخ‌های فیزیولوژیکی به تمرین در میان بیماران بسیار ناهمگون است؛ عواملی مانند ژنتیک، سن، وضعیت متابولیکی، جنسیت و شدت بیماری می‌توانند واکنش افراد به تمرین را تحت‌تأثیر قرار دهند (۷). از این‌رو، یک الگوی واحد تمرینی برای همه بیماران مؤثر نیست و نیاز به شخصی‌سازی[3] تمرینات ورزشی احساس می‌شود (۸).

تحول دیجیتال و ظهور فناوری‌های هوشمند نظیر هوش مصنوعی (AI)، یادگیری ماشین، حسگرهای پوشیدنی[4] و سامانه‌های پایش از راه دور، فرصت بی‌سابقه‌ای را برای تحول در پزشکی و علوم ورزشی ایجاد کرده است (۹). در سال‌های اخیر، این فناوری‌ها نه تنها در تشخیص و پایش بیماری‌ها بلکه در طراحی مداخلات درمانی و تمرینی نیز وارد شده‌اند (۱۰). هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل داده‌های فیزیولوژیکی در زمان واقعی[5] و ترکیب آن با سوابق پزشکی و پاسخ‌های بیومتریک، الگوریتم‌های شخصی‌سازی‌شده‌ای برای تمرین ارائه دهد که بهینه‌ترین نتایج را برای هر بیمار فراهم می‌سازند (۱۱،۱۲). برای مثال، سیستم‌های مبتنی بر یادگیری عمیق می‌توانند تغییرات ضربان قلب، سطح اکسیژن خون و الگوهای حرکتی را تحلیل کرده و شدت و نوع تمرین را به‌صورت لحظه‌ای تنظیم کنند (۱۳).

مرور پژوهش‌های پیشین در این حوزه نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی به بررسی اثرات مجزای تمرینات ورزشی یا فناوری‌های هوشمند پرداخته‌اند، اما تعداد معدودی از آن‌ها به تلفیق نظام‌مند این دو حوزه با رویکردی فیزیولوژیک-فناورانه توجه داشته‌اند. این شکاف، ضرورت ارائه یک مرور یکپارچه با رویکرد تحلیلی را آشکار می‌سازد. با وجود رشد سریع فناوری‌های هوشمند، هنوز پیوند بین فیزیولوژی تمرین و هوش مصنوعی در سطح مفهومی و کاربردی به‌طور کامل شکل نگرفته است (۱۴). بسیاری از پژوهش‌ها به توصیف توان بالقوه هوش مصنوعی در حوزه سلامت پرداخته‌اند، اما مطالعات اندکی به سازوکارهای فیزیولوژیکی دقیق پاسخ تمرینی و چگونگی مدلسازی آن‌ها توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین توجه کرده‌اند (۱۴،۱۵،۱۶). افزون بر این، اکثر سیستم‌های موجود تنها داده‌های ساده‌ای مانند گام‌شمار یا ضربان قلب را تحلیل می‌کنند و قادر به تلفیق داده‌های چندوجهی نظیر نشانگرهای زیستی التهابی، پارامترهای متابولیکی یا فعالیت عصبی نیستند (۱۶). این مسئله نشان می‌دهد که هنوز نیاز مبرمی به چارچوب‌های یکپارچه‌ای وجود دارد که بتوانند از طریق مدل‌سازی هوشمند، فیزیولوژی تمرین را در سطح سلولی، بافتی و سیستمیک درک و بازنمایی کنند (۱۷).

در پاسخ به این شکاف علمی، مقاله حاضر با رویکردی مروری روایتی تحلیلی و یکپارچه تلاش دارد تا ضمن مرور شواهد

[1] World Health Organization
[2] Exercise Therapy
[3] Personalization
[4] Wearables
[5] Real-Time Physiological Data

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

فیزیولوژیکی موجود درباره اثر تمرین‌درمانی بر بیماری‌های مزمن، به بررسی قابلیت‌های هوش مصنوعی در شخصی‌سازی مداخلات تمرینی بپردازد. این مقاله با تمرکز بر سازوکارهای فیزیولوژیکی (مانند پاسخ‌های قلبی–عروقی، متابولیکی و التهابی)، همچنین بررسی ابزارهای دیجیتال (مانند حسگرهای پوشیدنی، یادگیری ماشین و سیستم‌های توصیه‌گر هوشمند)، به دنبال ترسیم مدلی مفهومی از "تمرین‌درمانی هوشمند" است. نوآوری این مقاله در نگاه چندسطحی و یکپارچه به فیزیولوژی و فناوری است؛ به گونه‌ای که تمرین نه صرفاً به‌عنوان یک محرک فیزیکی، بلکه به‌عنوان داده‌ای قابل تحلیل در سامانه‌های یادگیرنده تفسیر می‌شود. در نهایت، این مرور تحلیلی به این سؤال کلیدی پاسخ می‌دهد: «چگونه می‌توان با درک عمیق‌تر از سازوکارهای فیزیولوژیکی تمرین و بهره‌گیری از توان هوش مصنوعی، مداخلات تمرینی شخصی‌سازی‌شده و هوشمند را برای بیماران مبتلا به بیماری‌های مزمن طراحی کرد؟»

روش تحقیق

مطالعه حاضر از نوع مرور روایتی تحلیلی با رویکرد یکپارچه[1] است که با هدف ترکیب و تحلیل نظام‌مند شواهد علمی از سه حوزه‌ی فیزیولوژی تمرین، تمرین‌درمانی در بیماری‌های مزمن و فناوری‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی طراحی شده است. رویکرد این پژوهش برخلاف مرورهای سیستماتیک سنتی، صرفاً به جمع‌آوری داده‌ها محدود نمی‌شود، بلکه بر تحلیل انتقادی، استنتاج مفهومی و تلفیق چندبُعدی یافته‌ها تمرکز دارد تا بتواند الگوی مفهومی جامعی از مفهوم «تمرین‌درمانی هوشمند» ارائه دهد.

در گام نخست، جستجوی گسترده‌ای در پایگاه‌های داده‌ی معتبر شامل PubMed، Scopus، Web of Science، IEEE Xplore و Google Scholar انجام شد. این پایگاه‌ها به دلیل پوشش وسیع مطالعات در حوزه‌های علوم ورزشی، فیزیولوژی، پزشکی و علوم رایانه انتخاب شدند تا تمامی جنبه‌های زیستی و فناورانه‌ی موضوع مورد بررسی قرار گیرد. بازه زمانی جستجو از ابتدا تا نوامبر ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد تا جدیدترین شواهد و تحولات علمی در این حوزه لحاظ شود. زبان مطالعات مورد بررسی انگلیسی و فارسی بود.

برای جستجو از ترکیب کلیدواژه‌های اصلی و مترادف‌های آن‌ها با استفاده از عملگرهای بولی (AND، OR) بهره گرفته شد. نمونه‌ای از کلیدواژه‌های اصلی عبارت بودند از: smart exercise therapy, artificial intelligence, chronic disease, exercise physiology, machine learning, personalized intervention, digital health, wearable technology و exercise prescription. در مطالعات فارسی نیز از معادل‌هایی مانند «تمرین‌درمانی هوشمند»، «هوش مصنوعی»، «بیماری مزمن» و «شخصی‌سازی تمرین» استفاده شد. فرایند جستجو به‌گونه‌ای طراحی شد که هم مطالعات تجربی (کارآزمایی بالینی ها، مداخلات بالینی و مطالعات فیزیولوژیکی) و هم مطالعات مروری یا نظری مرتبط با کاربرد هوش مصنوعی در تمرین‌درمانی را شامل شود.

پس از گردآوری نتایج اولیه، مقالات بر اساس عنوان و چکیده بررسی شدند و موارد تکراری حذف گردیدند. در مرحله‌ی بعد، معیارهای ورود و خروج تعریف شدند تا تمرکز پژوهش بر مطالعات مرتبط با اهداف مقاله حفظ شود. معیارهای ورود شامل مقالاتی بودند که به بررسی اثر تمرین بر بیماران مبتلا به بیماری‌های مزمن (نظیر دیابت، بیماری قلبی‌عروقی، سرطان، بیماری کلیوی یا اختلالات متابولیک) پرداخته و در طراحی، پایش یا تحلیل مداخله از فناوری‌های هوشمند یا هوش مصنوعی استفاده کرده بودند. همچنین مقالاتی که داده‌های فیزیولوژیکی مرتبط با پاسخ‌های تمرینی (مانند ضربان قلب، شاخص‌های متابولیکی، VO_2max، یا سطوح التهابی) را گزارش کرده بودند، وارد مرور شدند. در مقابل، مطالعات حیوانی، پژوهش‌های فاقد داده‌های فیزیولوژیکی، مقالات نظری فاقد شواهد تجربی، یا مواردی که صرفاً به فناوری بدون ارتباط با تمرین اشاره داشتند، حذف شدند.

پس از اعمال این معیارها، متن کامل مقالات واجد شرایط مورد مطالعه قرار گرفت و اطلاعات کلیدی شامل هدف مطالعه، نوع مداخله، جمعیت مورد بررسی، شاخص‌های فیزیولوژیکی، نوع فناوری

[1] Integrative Analytical Narrative Review

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

به‌کاررفته، و نتایج اصلی استخراج شد. فرایند انتخاب منابع به‌صورت مستقل توسط دو پژوهشگر انجام شد تا از بی‌طرفی در گزینش اطمینان حاصل شود. اختلاف‌نظرها از طریق بحث و توافق نهایی حل گردید.

در مرحله‌ی تحلیل داده‌ها، از رویکرد تحلیل تماتیک و یکپارچه‌سازی مفهومی[1] استفاده شد. در این چارچوب، یافته‌های استخراج‌شده بر اساس سه محور اصلی طبقه‌بندی گردیدند: (۱) سازوکارهای فیزیولوژیکی تمرین در بیماری‌های مزمن، (۲) فناوری‌ها و الگوریتم‌های هوشمند مورد استفاده در تمرین‌درمانی، (۳) مدل‌ها و مداخلات شخصی‌سازی‌شده مبتنی بر هوش مصنوعی در بیماران. هر محور شامل زیربخش‌هایی بود که بر اساس شباهت‌های مفهومی و ارتباط بین داده‌ها شکل گرفتند. سپس ارتباط میان این محورها به‌صورت تحلیلی بررسی شد تا الگوی تلفیقی از تعامل بین فیزیولوژی تمرین و هوش مصنوعی استخراج گردد. هدف از این فرایند، نه صرفاً توصیف داده‌ها بلکه دستیابی به بینشی عمیق‌تر در مورد سازوکارهای زیربنایی، فرصت‌های فناورانه و مسیرهای آینده پژوهش در تمرین‌درمانی هوشمند بود. در بخش نهایی، داده‌های کیفی و مفهومی حاصل از مرور مطالعات با یافته‌های فیزیولوژیکی موجود در ادبیات ترکیب شدند تا تصویری جامع و منسجم از وضعیت فعلی و مسیر آتی این حوزه ترسیم گردد. تمامی مراحل تحلیل به‌صورت استدلالی و تحلیلی[2] انجام شد و از چارچوب‌های روش‌شناسی معتبر در نگارش مرورهای یکپارچه تبعیت گردید تا اعتبار علمی مقاله حفظ شود. در پایان، برای شفاف‌سازی فرایند انتخاب منابع و حوزه پوشش مطالعات، خلاصه‌ای از راهبرد جستجو و انتخاب در قالب جدول یک ارائه شده است.

مبانی فیزیولوژیکی تمرین‌درمانی در بیماری‌های مزمن

تمرین‌درمانی به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهبردهای غیردارویی در کنترل و بهبود وضعیت بیماران مبتلا به بیماری‌های مزمن شناخته می‌شود. اثرات فیزیولوژیکی ناشی از تمرین منظم، در ابعاد متعددی از عملکرد بدن آشکار می‌شود و از سطح سلولی و مولکولی تا سیستم‌های قلبی‌عروقی، متابولیکی و عصبی–هورمونی را دربر می‌گیرد. تمرین ورزشی به‌ویژه در شرایط مزمن، نقشی کلیدی در بازگرداندن هومئوستاز، بهبود کارایی فیزیولوژیکی و ارتقای کیفیت زندگی بیماران دارد. شواهد گسترده‌ای نشان می‌دهد که سازوکارهای زیربنایی پاسخ به تمرین شامل تغییرات در بیان ژن‌ها، تنظیم مسیرهای التهابی و استرس اکسیداتیو، تحریک بیوژنز میتوکندری و بهبود عملکرد عروق است که در مجموع به بازسازی عملکرد طبیعی اندام‌ها منجر می‌شود (۱۸). خلاصه اثرات فیزیولوژیکی تمرین در بیماری‌های مزمن بر حسب نوع سازوکار در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

از منظر قلبی‌عروقی، تمرین موجب افزایش ظرفیت اکسیژن مصرفی (VO_2max)، ارتقای عملکرد اندوتلیال و بهبود اتساع عروقی می‌گردد. این اثرات عمدتاً از طریق افزایش بیان آنزیم eNOS[3] (نیتریک اکساید سنتاز اندوتلیال) و در نتیجه افزایش تولید نیتریک‌اکسید حاصل می‌شود که به کاهش مقاومت محیطی و فشار خون کمک می‌کند (۱۹). تمرین همچنین از طریق مهار مسیر NF-κB[4] و کاهش تولید سیتوکاین‌های التهابی مانند TNF-α[5] و IL-6[6]، وضعیت التهابی سیستمیک را در بیماران قلبی کاهش می‌دهد (۲۰). افزایش عملکرد میتوکندری در میوکارد و بهبود تبادل یونی سلولی نیز از دیگر سازوکارهایی است که ظرفیت پمپاژ قلب و کارایی عضله قلب را در بیماران نارسایی قلبی تقویت می‌کند (۲۱). این تغییرات نه‌تنها پیامدهای فیزیولوژیکی مثبتی دارند، بلکه در کاهش مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های قلبی‌عروقی نیز مؤثر بوده‌اند، به‌گونه‌ای که مطالعات نشان داده‌اند برنامه‌های تمرینی منظم می‌توانند خطر بروز رویدادهای قلبی را تا حدود ۲۵ درصد کاهش دهند (۲۲).

[1] Thematic Integration and Conceptual Synthesis
[2] Analytical Reasoning
[3] Endothelial Nitric Oxide Synthase
[4] Nuclear Factor Kappa B
[5] Tumor Necrosis Factor-alpha
[6] Interleukin-6

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

جدول ۱- استراتژی جستجو و انتخاب منابع

مؤلفه	توضیحات
پایگاه‌های داده	PubMed، Scopus، Web of Science، IEEE Xplore، Google Scholar
بازه زمانی	از ابتدا تا نوامبر ۲۰۲۵
زبان مطالعات	انگلیسی و فارسی
کلیدواژه‌ها	smart exercise therapy, artificial intelligence, chronic disease, exercise physiology, personalized intervention
معیار ورود	مطالعات انسانی مرتبط با تمرین‌درمانی در بیماری‌های مزمن با استفاده از فناوری یا هوش مصنوعی
معیار خروج	مطالعات حیوانی، فاقد داده‌های فیزیولوژیکی، یا صرفاً فناورانه بدون تمرکز بر تمرین
روش تحلیل	تحلیل تماتیک و یکپارچه‌سازی مفهومی
تعداد نهایی منابع منتخب	۱۱۲ مقاله واجد شرایط از میان بیش از ۵۰۰ مقاله بررسی‌شده

جدول ۲- خلاصه اثرات فیزیولوژیکی تمرین در بیماری‌های مزمن بر حسب نوع سازوکار

نوع بیماری	سازوکارهای فیزیولوژیکی کلیدی	پیامدهای تمرینی اصلی
قلبی‌عروقی	افزایش eNOS، بهبود اتساع عروقی، کاهش التهاب	بهبود عملکرد اندوتلیال، کاهش فشار خون و خطر مرگ قلبی
دیابت نوع دو	افزایش GLUT4 وAMPK، کاهش TNF-α وIL-6	بهبود کنترل گلیسمی، افزایش حساسیت انسولینی
چاقی و سندرم متابولیک	افزایش آدیپونکتین، بهبود میتوکندری چربی سفید	کاهش چربی احشایی، بهبود تعادل متابولیکی
سرطان	افزایش فعالیت سلول‌هایNK، تنظیم مسیرهای آپوپتوزی	کاهش خستگی، بهبود عملکرد ایمنی و کیفیت زندگی

eNOS: Endothelial Nitric Oxide Synthase؛ **GLUT4:** Glucose Transporter Type 4؛ **AMPK:** Adenosine Monophosphate-Activated Protein Kinase؛ **TNF-α:** Tumor Necrosis Factor-alpha؛ **IL-6:** Interleukin-6؛ **NK:** Natural Killer.

در بیماران مبتلا به دیابت نوع دو، تمرین‌درمانی نقش اساسی در بهبود کنترل قند خون و حساسیت انسولینی ایفا می‌کند. در سطح سلولی، انقباض عضلانی موجب فعال‌سازی مسیر AMPK و تحریک انتقال ناقل گلوکز نوع ۴ (GLUT4) به غشای سلولی می‌شود که برداشت گلوکز از خون را افزایش می‌دهد (۲۳). تمرین همچنین با تقویت بیوژنز میتوکندری از طریق مسیر PGC-1α موجب افزایش ظرفیت اکسیداتیو عضله و کاهش مقاومت انسولینی می‌گردد (۲۴). افزون بر این، تمرین منظم با تعدیل ترشح میوکاین‌هایی مانند آیریزین و اینترلوکین-۶، فرایندهای التهابی را مهار و متابولیسم انرژی را بهبود می‌بخشد (۲۵). اثرات تمرین بر شاخص‌های التهابی و استرس اکسیداتیو نیز در بیماران دیابتی بارها گزارش شده و نشان داده شده که فعالیت‌های هوازی و مقاومتی منظم به‌ویژه در قالب برنامه‌های ترکیبی، به‌طور قابل‌توجهی موجب کاهش HbA1c[1]، CRP[2] و سطح گلوکز ناشتا می‌شوند (۲۶).

چاقی و سندرم متابولیک نیز از جمله شرایطی هستند که پاسخ‌های فیزیولوژیکی مطلوبی به تمرین نشان می‌دهند. تمرین منظم با افزایش ترشح آدیپونکتین، کاهش لپتین و بهبود تعادل هورمونی، منجر به تعدیل سیگنال‌های التهابی در بافت چربی و عضله می‌شود (۲۷). فعالیت بدنی همچنین موجب بهبود عملکرد میتوکندری در بافت چربی سفید و افزایش اکسیداسیون اسیدهای چرب می‌گردد، که این امر به کاهش چربی احشایی و بهبود حساسیت انسولینی منجر می‌شود (۲۸). از سوی دیگر، تنظیم محور هیپوتالاموس–هیپوفیز–آدرنال (HPA)[3] از طریق تمرین، نقش مهمی در کاهش استرس فیزیولوژیکی و بهبود عملکرد متابولیکی در

[1] Hemoglobin A1c (Glycated Hemoglobin)
[2] C-Reactive Protein
[3] Hypothalamic–Pituitary–Adrenal Axis

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

بیماران چاق دارد (۲۹). این مجموعه تغییرات نشان می‌دهد که تمرین منظم می‌تواند نه‌تنها به کاهش وزن منجر شود، بلکه کیفیت عملکرد متابولیکی و روانی بیماران را نیز بهبود بخشد.

در بیماران سرطانی، تمرین به‌عنوان یک راهکار مکمل در کنار درمان‌های دارویی، اثرات چشمگیری بر شاخص‌های فیزیولوژیکی و کیفیت زندگی دارد. تمرین در این بیماران موجب بهبود جریان خون بافتی، افزایش فعالیت سیستم ایمنی و کاهش التهاب سیستمیک می‌شود (۳۰). مکانیسم‌های زیربنایی این اثرات شامل افزایش فعالیت سلول‌های کشنده طبیعی (NK cells)، ارتقای ترمیم DNA، و تنظیم مسیرهای آپوپتوزی در سلول‌های سرطانی است (۳۱). علاوه بر آن، تمرین از طریق افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و بهبود عملکرد میتوکندری، تحمل بدن به درمان‌های تهاجمی را افزایش می‌دهد و خستگی ناشی از شیمی‌درمانی را کاهش می‌دهد (۳۲). مطالعات بالینی نشان داده‌اند که حتی تمرینات کم‌شدت مانند پیاده‌روی منظم یا یوگا در دوره درمان می‌تواند کیفیت زندگی بیماران را تا ۳۰ تا ۴۰ درصد بهبود بخشد (۳۳).

در تمام بیماری‌های مزمن، مفهوم «تطابق تمرینی» به‌عنوان محور اصلی فیزیولوژی تمرین مطرح است. تطابق نشان‌دهنده توانایی بدن در پاسخ تدریجی و هدفمند به فشار تمرینی است، به‌گونه‌ای که ساختارها و عملکردها به سمت بهینه‌سازی کارایی فیزیولوژیکی پیش می‌روند (۳۴). این پاسخ‌ها در بیماران مختلف بسته به سن، جنس، وضعیت متابولیکی، زمینه ژنتیکی و سطح آمادگی پایه متفاوت است. به‌عنوان مثال، در افراد با ژنوتیپ خاص مرتبط با PPARα[1] یا ACE[2]، پاسخ‌های قلبی و متابولیکی به تمرین می‌تواند به‌طور معنی‌داری متفاوت باشد (۳۵). از این منظر، شخصی‌سازی مداخلات تمرینی بر اساس تفاوت‌های فردی اهمیت ویژه‌ای دارد.

در سال‌های اخیر، مفهوم «شخصی‌سازی پاسخ تمرینی» با ورود فناوری‌های پوشیدنی، حسگرهای زیستی و تحلیل داده‌های فیزیولوژیکی تقویت شده است. هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند با تحلیل پارامترهایی مانند ضربان قلب، تغییرپذیری ضربان (HRV)[3]، سطح لاکتات و شاخص‌های متابولیکی، الگوی تمرینی متناسب با ویژگی‌های فیزیولوژیکی هر بیمار را پیش‌بینی کنند (۳۶). این رویکرد موجب کاهش خطرات ناشی از تمرین بیش از حد و افزایش اثربخشی درمان می‌شود. تلفیق داده‌های مولکولی با داده‌های رفتاری و بالینی در آینده می‌تواند به ایجاد مدل‌های هوشمند «پاسخ تمرینی فردمحور» منجر شود که در آن، الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن تفاوت‌های ژنتیکی، تغذیه‌ای و محیطی، نسخه تمرینی اختصاصی برای هر فرد تولید می‌کنند (۳۷). این سطح از درک فیزیولوژیکی، نه‌تنها کاربردهای بالینی تمرین‌درمانی را توسعه می‌دهد بلکه زیربنای علمی لازم برای مداخلات هوشمند در مدیریت بیماری‌های مزمن را فراهم می‌سازد.

ادغام تمرین‌درمانی با فناوری‌های هوشمند

پیشرفت سریع فناوری‌های دیجیتال و هوش مصنوعی (AI)[4] در دهه اخیر، مسیر جدیدی را در تمرین‌درمانی بیماران مزمن گشوده است. در حالی که تمرین‌درمانی سنتی بر اساس اصول عمومی فیزیولوژی و نسخه‌نویسی استاندارد فعالیت بدنی انجام می‌شد، اکنون ظهور ابزارهای پوشیدنی، حسگرهای زیستی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان پایش مداوم، تحلیل هوشمند و شخصی‌سازی مداخلات تمرینی را فراهم کرده است. در این رویکرد نوین، تمرین به‌عنوان یک مداخله پویا و داده‌محور تعریف می‌شود که می‌تواند متناسب با تغییرات فیزیولوژیکی و رفتاری بیمار تنظیم گردد (۳۸). انواع فناوری‌های هوشمند مورد استفاده در تمرین‌درمانی بیماران مزمن، ویژگی‌ها، شاخص‌های فیزیولوژیکی قابل پایش و کاربردهای بالینی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

[1] Peroxisome Proliferator-Activated Receptor Alpha
[2] Angiotensin-Converting Enzyme
[3] Heart Rate Variability
[4] Artificial Intelligence

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

جدول ۳- انواع فناوری‌های هوشمند مورد استفاده در تمرین‌درمانی بیماران مزمن

نوع فناوری هوشمند	شاخص‌های فیزیولوژیکی پایش‌شده	کاربرد بالینی اصلی	مزایا و قابلیت‌ها	محدودیت‌ها و چالش‌ها
فناوری‌های پوشیدنی (Wearables) (ساعت، جسگر سینه‌ای، بند هوشمند)	HR، HRV، SpO_2، دما، شتاب، فعالیت حرکتی	بیماران قلبی، دیابتی، بازتوانی قلبی و حرکتی	پایش بلادرنگ، تحلیل خودکار، افزایش تبعیت درمانی	دقت وابسته به موقعیت جسگر، محدودیت در طول عمر باتری
حسگرهای زیستی (Biosensors) (گلوکز، لاکتات، EMG، EEG)	متابولیت‌ها، سیگنال‌های عصبی–عضلانی، قند خون	دیابت، بیماری‌های متابولیک، سکته مغزی	تشخیص زودهنگام تغییرات متابولیک، بازخورد فوری	هزینه بالا، نیاز به کالیبراسیون مداوم
سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT)	ترکیبی از داده‌های حسگرها و محیط	پایش از راه دور بیماران قلبی، ریوی، حرکتی	ارتباط چندمنظوره، تصمیم‌گیری لحظه‌ای	چالش امنیت داده و حریم خصوصی
تحلیل داده‌های بزرگ (Big Data Analytics)	داده‌هایHR، HRV، فشارخون، گلوکز، الگوهای تمرینی	تمام بیماری‌های مزمن و تمرینات شخصی‌سازی‌شده	شناسایی الگوهای پاسخ فیزیولوژیکی، پیش‌بینی تطابق تمرینی	پیچیدگی الگوریتمی، نیاز به داده‌های گسترده
هوش مصنوعی و یادگیری ماشین(AI/ML)	تحلیل چندمتغیره داده‌های فیزیولوژیکی	پیش‌بینی خستگی، نسخه‌نویسی تمرین هوشمند	شخصی‌سازی تمرین، مدل‌سازی تطبیقی، پیشگیری از آسیب	نیاز به داده‌های معتبر، خطر تصمیم‌گیری خودکار
سیستم‌های بازخورد زیستی (Biofeedback Systems)	EMG، HR، فشارخون، تعادل، قند خون	سکته مغزی، دیابت، بازتوانی حرکتی	یادگیری حرکتی سریع، کنترل بهتر تمرین	نیاز به آموزش کاربر و تجهیزات خاص
واقعیت مجازی و افزوده(VR/AR)	فعالیت عضلانی، تعادل، حرکت، الگوهای شناختی	پارکینسون، MS، اختلالات تعادل	انگیزش بالا، تقویت عصبی–حرکتی، تجربه ایمن تمرین	هزینه بالا، وابستگی به سخت‌افزار خاص
سیستم‌های ابری و تصمیم‌یار هوشمند (Cloud-based Decision Support)	ادغام چندمنبع داده (پوشیدنی، آزمایشگاهی، رفتاری)	مدیریت چندبُعدی بیماران مزمن	یادگیری مداوم، توصیه‌های تمرینی تطبیقی	چالش امنیت، نیاز به پهنای باند بالا

HR: Heart Rate ؛**HRV:** Heart Rate Variability ؛**SpO_2:** Peripheral Oxygen Saturation ؛**EMG:** Electromyography ؛**EEG:** Electroencephalography ؛**IoT:** Internet of Things ؛**AI:** Artificial Intelligence ؛**ML:** Machine Learning ؛**VR:** Virtual Reality ؛**AR:** Augmented Reality ؛**MS:** Multiple Sclerosis.

فناوری‌های پوشیدنی مانند ساعت‌های هوشمند، جسگرهای نوار سینه‌ای و گجت‌های چندپارامتری زیستی، داده‌های دقیقی از شاخص‌های فیزیولوژیکی از جمله ضربان قلب، واریابی ضربان قلب (HRV)[1]، سطح اشباع اکسیژن (SpO_2)[2]، فعالیت الکتریکی عضله (EMG)[3] و گلوکز خون جمع‌آوری می‌کنند. این داده‌ها نه‌تنها وضعیت فیزیولوژیکی لحظه‌ای فرد را نشان می‌دهند، بلکه الگوهای سازگاری بدن نسبت به تمرین را نیز آشکار می‌سازند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از جسگرهای پوشیدنی در بیماران مبتلا به نارسایی قلبی یا دیابت می‌تواند به بهبود انطباق با برنامه‌های تمرینی و پیش‌بینی زودهنگام عوارض کمک کند (۳۹،۴۰).

در کنار ابزارهای فیزیولوژیکی، مفهوم اینترنت اشیا (IoT)[4] نیز نقش کلیدی در تحول تمرین‌درمانی ایفا کرده است. اتصال میان جسگرها، اپلیکیشن‌های موبایل و پایگاه‌های داده ابری، امکان انتقال و پردازش بلادرنگ داده‌های تمرینی را فراهم نموده است. در این مدل، متخصصان می‌توانند از راه دور به داده‌های بیماران دسترسی داشته و برنامه تمرینی را متناسب با پاسخ‌های واقعی بدن تنظیم کنند (۴۱). برای مثال، در بیماران مبتلا به بیماری انسدادی مزمن

[1] Heart Rate Variability
[2] Peripheral Oxygen Saturation
[3] Electromyography
[4] Internet of Things

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

ریه (COPD)[1]، سیستم‌های مبتنی بر IoT با تحلیل خودکار الگوهای تنفسی، شدت تمرین را در لحظه تنظیم می‌کنند و از وقوع حملات حاد جلوگیری می‌نمایند (۴۲).

یکی از تحولات کلیدی در این زمینه، تحلیل داده‌های بزرگ[2] است که از ترکیب میلیون‌ها نقطه داده فیزیولوژیکی و رفتاری به دست می‌آید. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین قادرند با استفاده از این داده‌ها، الگوهای پیچیده پاسخ بدن به تمرین را شناسایی کرده و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده شخصی تولید نمایند (۴۳). این فرایند باعث می‌شود نسخه تمرینی به جای تکیه بر «میانگین جمعیت»، بر اساس پروفایل فیزیولوژیکی اختصاصی هر بیمار طراحی شود. برای مثال، الگوریتم‌های یادگیری عمیق توانسته‌اند تغییرات متغیرهایی مانند HRV و سطح لاکتات را به‌صورت دقیق با میزان خستگی عصبی–عضلانی و ظرفیت تمرینی تطبیق دهند (۴۴).

از منظر بازتوانی، سیستم‌های بازخورد زیستی[3] جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. این سامانه‌ها با ارائه بازخورد لحظه‌ای در مورد متغیرهای فیزیولوژیکی یا حرکتی، به بیماران کمک می‌کنند تا کیفیت اجرای تمرین را بهینه کنند. در بازتوانی سکته مغزی، استفاده از سیستم‌های بازخوردی مبتنی بر EMG و حرکت‌سنجی منجر به بهبود چشمگیر در هماهنگی عضلانی و کنترل حرکتی شده است (۴۵). در بیماران دیابتی نیز ترکیب بازخورد گلوکز با تمرین‌های هوازی و مقاومتی موجب افزایش تبعیت درمانی و کنترل بهتر قند خون گردیده است (۴۶).

فناوری‌های واقعیت افزوده (AR)[4] و واقعیت مجازی (VR)[5] نیز وارد عرصه تمرین‌درمانی شده‌اند و با ایجاد محیط‌های تعاملی و انگیزشی، مشارکت بیماران را در فرآیند تمرین افزایش داده‌اند. تمرینات مبتنی بر VR نه تنها انگیزه و لذت فعالیت را بالا می‌برند، بلکه با تحریک هم‌زمان سیستم‌های حسی و حرکتی، موجب تسریع در بازسازی عملکردی می‌شوند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در بیماران مبتلا به پارکینسون یا MS،[6] تمرینات مبتنی بر واقعیت مجازی می‌تواند تعادل، هماهنگی و کارکرد شناختی را بهبود دهد (۴۷,۴۸).

در ترکیب این فناوری‌ها، یک معماری جدید با عنوان سیستم‌های تمرین‌درمانی هوشمند[7] در حال شکل‌گیری است. این سیستم‌ها از طریق تجمیع داده‌های حسگرها، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل ابری، قادر به تصمیم‌گیری خودکار درباره شدت، مدت و نوع تمرین هستند. بدین ترتیب، تمرین‌درمانی از یک فرایند ایستا و یک‌بعدی به یک اکوسیستم پویا و چندبعدی داده‌محور تبدیل می‌شود. در این اکوسیستم، بازخوردهای مداوم، یادگیری تطبیقی و شخصی‌سازی عمیق، اساس طراحی مداخلات را تشکیل می‌دهند (۴۹,۵۰).

با این حال، چالش‌هایی نیز وجود دارد. مهم‌ترین آن‌ها شامل دقت داده‌های حسگرها، محدودیت‌های الگوریتمی در تفسیر پاسخ‌های فیزیولوژیکی پیچیده، و مسائل اخلاقی مرتبط با حریم خصوصی داده‌های سلامت است (۵۱). در پاسخ به این چالش‌ها، رویکردهای جدیدی مانند مدل‌های ترکیبی انسان–در–حلقه[8] و هوش مصنوعی توضیح‌پذیر[9] پیشنهاد شده‌اند تا اطمینان حاصل شود که تصمیمات تمرینی همچنان با نظارت انسانی و در چارچوب اصول اخلاقی اتخاذ می‌گردند (۵۲).

در مجموع، ادغام تمرین‌درمانی با فناوری‌های هوشمند، چشم‌اندازی نوین را برای مدیریت بیماری‌های مزمن ترسیم کرده است؛ چشم‌اندازی که در آن داده‌های فیزیولوژیکی به زبان تصمیم‌گیری بالینی تبدیل می‌شوند و هوش مصنوعی نقش یک شریک تحلیلی در بهینه‌سازی مداخلات ورزشی را ایفا می‌کند. این همگرایی میان فیزیولوژی تمرین و علوم داده، اساس تحول آینده در پزشکی ورزشی و سلامت هوشمند را رقم می‌زند (۵۳).

[1] Chronic Obstructive Pulmonary Disease
[2] Big Data
[3] Biofeedback Systems
[4] Augmented Reality
[5] Virtual Reality
[6] Multiple Sclerosis
[7] Smart Exercise Therapy Systems
[8] Human-in-the-loop
[9] Explainable AI

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

نقش هوش مصنوعی در شخصی‌سازی تمرین‌درمانی

تحول دیجیتال در علوم ورزشی و پزشکی باعث شده است که هوش مصنوعی به عنوان یکی از ابزارهای اصلی در طراحی و بهینه‌سازی تمرین‌درمانی مطرح شود. درحالی‌که نسخه‌های تمرینی سنتی عمدتاً بر اساس اصول کلی فیزیولوژی و تجربه مربیان تنظیم می‌شوند، اکنون با در دسترس بودن داده‌های گسترده و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان طراحی برنامه‌های تمرینی شخصی‌سازی‌شده و تطبیقی برای بیماران مزمن فراهم شده است. هدف این سامانه‌ها، درک پاسخ‌های فردی بدن به تمرین، پیش‌بینی سازگاری‌ها و بهینه‌سازی نسخه تمرینی در زمان واقعی است (۵۴).

هوش مصنوعی با تکیه بر روش‌های یادگیری ماشین[1] (ML) قادر است الگوهای پنهان در داده‌های فیزیولوژیکی را شناسایی کند. برای مثال، مدل‌های رگرسیونی و الگوریتم‌های جنگل تصادفی[2]یا شبکه‌های پشتیبانی بردار (SVM)[3] می‌توانند میزان پاسخ قلبی-عروقی یا متابولیک به تمرین را بر اساس پارامترهایی چون سن، جنس، ترکیب بدنی و شدت تمرین پیش‌بینی کنند (۵۵). این مدل‌ها در بیماران دیابتی برای پیش‌بینی تغییرات گلوکز خون پس از جلسات تمرینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و دقت بالایی در پیش‌بینی افت یا افزایش قند نشان داده‌اند (۵۶). افزون بر این، الگوریتم‌های ML می‌توانند میزان خستگی عضلانی، تطابق تمرینی و خطر آسیب را در بیماران قلبی و چاق شناسایی کنند و به‌صورت خودکار شدت تمرین را تعدیل نمایند (۵۷).

در سطحی پیشرفته‌تر، یادگیری عمیق[4] با استفاده از شبکه‌های عصبی پیچیده (مانند CNN و LSTM)، توانایی تحلیل مستقیم سیگنال‌های فیزیولوژیکی خام را بدون نیاز به استخراج دستی ویژگی‌ها فراهم کرده است (۵۸). این ویژگی برای تحلیل داده‌های حسگرهای پوشیدنی مانند HRV، ECG، EMG و EEG کاربرد ویژه‌ای دارد. به عنوان نمونه، شبکه‌های بازگشتی LSTM می‌توانند با یادگیری الگوهای زمانی ضربان قلب در طی تمرین، میزان استرس فیزیولوژیکی و احتمال وقوع خستگی یا آریتمی را پیش‌بینی کنند (۵۹). همچنین در بیماران مبتلا به نارسایی قلبی، استفاده از شبکه‌های CNN برای تحلیل سیگنال‌های ECG توانسته است، حتی پیش از بروز علائم بالینی، ناهنجاری‌های ظریف قلبی را در پاسخ به تمرین تشخیص دهد (۶۰).

یکی از نقاط قوت هوش مصنوعی در تمرین‌درمانی، توانایی آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی و چندبعدی بین متغیرهای فیزیولوژیکی، رفتاری و محیطی است. برای مثال، پاسخ به تمرین در بیماران چاق به شدت تحت‌تأثیر شاخص‌های روانی (انگیزش، اضطراب)، هورمونی (کورتیزول، لپتین) و محیطی (دمای محیط، خواب) قرار دارد؛ داده‌هایی که با مدل‌های سنتی قابل پیش‌بینی نیستند. اما الگوریتم‌های چندلایه شبکه عصبی با توانایی پردازش داده‌های چندوجهی، می‌توانند ارتباط میان این عوامل را تحلیل کرده و برنامه تمرینی را مطابق با الگوی فیزیولوژیکی هر فرد تنظیم کنند (۶۱).

علاوه بر پیش‌بینی پاسخ تمرینی، هوش مصنوعی نقش تعیین‌کننده‌ای در تصمیم‌گیری بالینی و تجویز تمرین[5] دارد. سیستم‌های تصمیم‌یار مبتنی بر AI با تحلیل داده‌های بیمار از حسگرهای پوشیدنی، آزمایش‌های خونی و داده‌های رفتاری، می‌توانند نسخه تمرینی پیشنهادی را به پزشک یا فیزیولوژیست ارائه دهند. برای مثال، در سیستم «SmartCoach»، الگوریتم‌های هوش مصنوعی بر اساس داده‌های HRV و میزان خواب شب قبل، شدت تمرین روز بعد را تعیین می‌کنند و در صورت وجود خستگی فیزیولوژیکی، تمرین سبک‌تر را پیشنهاد می‌دهند (۶۲). این سیستم‌ها در بازتوانی قلبی و دیابت نوع دو باعث بهبود تبعیت بیماران از برنامه‌های تمرینی و کاهش حوادث ناخواسته شده‌اند (۶۳).

مدل‌های مبتنی بر یادگیری تطبیقی[6] نیز یکی از پیشرفته‌ترین شاخه‌های کاربردی هوش مصنوعی در تمرین‌درمانی محسوب می‌شوند. این مدل‌ها در طول زمان از پاسخ‌های فیزیولوژیکی بیمار یاد می‌گیرند و نسخه تمرینی را به‌طور پویا اصلاح می‌کنند. در واقع،

[1] Machine Learning
[2] Random Forest
[3] Support Vector Machine
[4] Deep Learning
[5] Decision Support Systems
[6] Adaptive Learning

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

تمرین به یک سیستم حلقه‌بسته تبدیل می‌شود که در آن داده‌های لحظه‌ای از حسگرها، ورودی مدل‌های یادگیری را تشکیل می‌دهد و خروجی مدل، تغییر در شدت یا مدت تمرین است (۶۴). در بیماران مبتلا به بیماری‌های قلبی–عروقی، چنین سیستم‌هایی می‌توانند با ردیابی پارامترهایی مانند HRV و فشارخون، شدت تمرین را به‌گونه‌ای تنظیم کنند که پاسخ‌های قلبی مطلوب اما ایمن حفظ شود (۶۵).

در کنار این پیشرفت‌ها، مفهوم مدل یکپارچه تمرین‌درمانی هوشمند[1] مطرح شده است که بر تعامل میان فیزیولوژی تمرین، داده‌های زیستی و هوش مصنوعی تأکید دارد. این مدل، چرخه‌ای شامل چهار مرحله دارد: جمع‌آوری داده‌ها (از طریق حسگرهای پوشیدنی)، تحلیل هوشمند داده‌ها (با استفاده از ML و DL)، تصمیم‌گیری تطبیقی (بر اساس بازخوردهای فیزیولوژیکی)، و تجویز تمرین شخصی‌سازی‌شده. به‌این‌ترتیب، هر فرد یک «پروفایل تمرینی دیجیتال» منحصربه‌فرد دارد که به‌صورت مداوم به‌روزرسانی می‌شود و امکان بهینه‌سازی بلندمدت تمرین را فراهم می‌کند (۶۶).

با وجود تمام مزایا، باید توجه داشت که دقت و قابلیت اعتماد این مدل‌ها وابسته به کیفیت داده‌های ورودی و نحوه طراحی الگوریتم است. یکی از چالش‌های مهم در این زمینه، مسئله تفسیرپذیری تصمیمات هوش مصنوعی است. درحالی‌که مدل‌های یادگیری عمیق دقت بالایی دارند، توضیح‌پذیری پایین آن‌ها ممکن است پذیرش بالینی را محدود کند. برای رفع این مسئله، استفاده از هوش مصنوعی توضیح‌پذیر[2] پیشنهاد شده است تا متخصص بتواند منطق تصمیم مدل را درک و تأیید نماید (۶۷). افزون بر آن، ملاحظات اخلاقی مرتبط با حریم خصوصی داده‌های سلامت نیز باید در طراحی سیستم‌های تمرین‌درمانی هوشمند مورد توجه قرار گیرد (۶۸).

در مجموع، هوش مصنوعی از طریق پردازش داده‌های فیزیولوژیکی و رفتاری، امکان طراحی برنامه‌های تمرینی کاملاً شخصی‌سازی‌شده را فراهم کرده است. این تحول نه‌تنها دقت مداخلات تمرینی را افزایش می‌دهد، بلکه خطرات احتمالی تمرین در بیماران مزمن را کاهش داده و اثربخشی درمان را بهینه می‌کند. آینده تمرین‌درمانی در گرو توسعه الگوریتم‌هایی است که بتوانند با درک عمیق از سازوکارهای زیستی، تعادل میان کارایی و ایمنی تمرین را در هر فرد برقرار سازند (۶۹).

جدول مفهومی ۴ چارچوب عملیاتی و سلسله‌مراتبیِ مدل یکپارچه‌ی تمرین‌درمانی هوشمند را نشان می‌دهد؛ این مدل از مرحله اولیه جمع‌آوری داده‌های فیزیولوژیک و محیطی تا مرحله یادگیری مستمر و ارزیابی بالینی را پوشش می‌دهد. در ستون «ورودی‌ها» انواع پارامترهای زیستی، رفتاری و زمینه‌ای که باید ثبت شوند مشخص شده تا پایه‌ای محکم برای مدل‌سازی فراهم گردد؛ ستون «پردازش داده و استخراج ویژگی» روش‌های رایج تبدیل سیگنال و آماده‌سازی داده‌ها را فهرست می‌کند و ستون «روش‌های هوش مصنوعی» پیشنهادهایی برای انتخاب الگوریتم متناسب با نوع داده (مثلاً مدل‌های زمانی برای سیگنال‌های ECG/HRV و مدل‌های درختی برای ویژگی‌های ترکیبی بالینی) ارائه می‌دهد. ستون «خروجی/تصمیم» نحوه تولید نسخه تمرینی شخصی، سطح اطمینان پیش‌بینی و آستانه‌های ایمنی را مشخص می‌سازد و در ستون «عمل بالینی» توصیه‌های کاربردی برای تیم درمانی (مانند اجرای برنامه، توقف اضطراری یا ارجاع برای ارزیابی بالینی) آورده شده است. علاوه بر این، ستون «حلقه بازخورد و یادگیری» بر الزامات ذخیره‌سازی جلسات و بازآموزی مدل‌ها با استفاده از داده‌های جدید تأکید دارد تا سامانه بتواند به‌صورت تطبیقی عملکرد و دقت خود را بهبود بخشد. در انتهای جدول، چالش‌های کلیدی هر مرحله (مانند دقت حسگر یا تبیین‌پذیری مدل‌های عمیق) و راهکارهای پیشنهادی برای کاهش خطر و افزایش قابلیت اجرا آمده‌اند. این جدول نه تنها ابزاری مفهومی برای درک ساختار کلی سیستم است، بلکه نقشه راهی عملیاتی برای طراحی پژوهش‌های بالینی، توسعه نمونه‌اولیه‌های فناورانه و تدوین استانداردهای بالینی در حوزه تمرین‌درمانی هوشمند فراهم می‌آورد (۶۲–۶۹).

[1] Integrated Smart Exercise Therapy Model
[2] Explainable AI

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

جدول ٤- مدل یکپارچه تمرین‌درمانی هوشمند بر پایه فیزیولوژی و هوش مصنوعی

مرحله	ورودی‌ها	پردازش داده و استخراج ویژگی	روش‌های هوش مصنوعی/تحلیلی پیشنهادی	خروجی/ تصمیم	عمل بالینی/اجرایی	حلقه بازخورد و یادگیری	چالش‌ها کلیدی & راهکارهای پیشنهادی
۱ .جمع‌آوری داده	ضربان قلب (HR), HRV, ECG, SpO_2,فشار خون، لاکتات، گلوکز(CGM) ، EMG، شتاب‌سنج/ژیروسکوپ، دما، الگوهای خواب، خوداظهاری علائم، داروها، سن/جنس/ژنتیک، محیط (دما، ارتفاع)	همزمان‌سازی زمانی، فیلتر کردن نویز، کالیبراسیون، نمونه‌برداری و پروتکل زمانی (مثلاً قبل/در-بعد از تمرین)	مرحله حسگری؛ آماده‌سازی داده برای مدل	داده خام و جداول زمانی/رویدادی برای آنالیز	نصب و آموزش اولیه حسگرها؛ تست کیفیت سیگنال	بررسی کیفیت داده به‌صورت روزانه؛ اعلان‌های خطا و کالیبراسیون خودکار	دقت حسگر، اتصال/باتری، پذیرش بیمار — راهکار: چندحسگره سازی و کنترل کیفیت بلادرنگ
۲ . یکپارچه‌سازی و ذخیره‌سازی	داده‌های چندمنبع: پوشیدنی + آزمایشگاهی + پرونده الکترونیک سلامت + (EHR) محیط	همگن‌سازی قالب‌ها، حذف داده‌های تکراری، مدیریت زمان‌خط، برچسب‌گذاری متادیتا	پایگاه‌های داده ابری/محلی؛ انبار داده (data warehouse)؛ پیپلاین ETL	دیتاست یکپارچه، نماهای زمانی و بیماران برای مدل‌سازی	ایجاد داشبورد موقت برای تیم بالینی	بازخورد از کاربران برای بهینه‌سازی نماها؛ پاکسازی دوره‌ای	حریم خصوصی/امنیت؛ استانداردهای تبادل — (FHIR)راهکار: رمزنگاری، دسترسی مبتنی بر نقش
۳ . پیش‌پردازش و مهندسی ویژگی	سیگنال‌های فیزیولوژیک، متغیرهای بالینی، داده‌های محیطی	نرمال‌سازی، استخراج ویژگی‌های زمان-فرکانسی (PSD, شاخص‌های RMS), قلبی (LF/HF), متریک‌های بازیابی	استخراج ویژگی دستی + خودکار (auto-features) برای DL	مجموعه ویژگی‌های منتخب برای آموزش مدل	تعیین متغیرهای پر اهمیت برای گزارش بالینی	مدل‌ها یاد می‌گیرند چه ویژگی‌هایی حساس‌اند؛ بروزرسانی ویژگی‌ها	هم‌پوشانی ویژگی، ابعاد زیاد — راهکار: انتخاب ویژگی، کاهش بُعد (PCA), تست حساسیت
۴ .مدل‌سازی پیش‌بینی	ویژگی‌های مهندسی‌شده، برچسب‌های بالینی (نتایج)، خروجی CGM/آزمون‌ها	تقسیم آموزش/آزمون، اعتبارسنجی متقاطع، ارزیابی خطا	ML: Random Forest, XGBoost, DL: SVM؛ CNN, LSTM, Transformer برای داده‌های زمانی؛ روش‌های ترکیبی	پیش‌بینی پاسخ تمرینی (مثلاً تغییر HbA1c ، افت/افزایش گلوکز، ریسک آریتمی، خستگی)	پیشنهاد شدت/حجم/نوع تمرین یا توقف موقت	ارزیابی عملکرد مدل بر اساس خطا؛ بروز رسانی با داده‌های جدید	آینه‌سازی و overfitting — راهکار CV ؛. regularization، داده افزایی
۵ .سیستم تصمیم‌یار بالینی	خروجی مدل + پروتکل‌های پزشکی + ترجیحات بیمار	تلفیق قوانین بالینی (rule-based) و خروجی مدل‌های probabilistic	Decision Support: Bayesian networks, Reinforcement Learning برای بهینه‌سازی سیاست تمرینی	نسخه تمرینی شخصی (نوع، شدت، مدت، زمان‌بندی) به‌همراه سطح اطمینان	اجرا توسط فیزیولوژیست/فیزیوتراپیست یا خودکار تحت نظارت	ثبت نتایج، بازخورد بیمار و تیم، یادگیری آفلاین	تداخل با تصمیم پزشک — راهکار : Human-in-the-loop، Explainable AI
۶ .اجرا و بازخورد لحظه‌ای	پارامترهای لحظه‌ای حین تمرین (HR, SpO_2, EMG)	تحلیل آنی سیگنال، تشخیص آستانه‌ها، هشدار	مدل‌های زمان-واقعی سبک (edge computing) + قواعد توقف ایمنی	تنظیم بلادرنگ شدت، ارائه بازخورد صوتی/بصری، ارسال هشدار	کاهش/افزایش شدت، تغییر تمرین، تماس بالینی در صورت خطر	ذخیره جلسات و به‌روزرسانی پروفایل دیجیتال	تاخیر پردازشی، ارتباطات غیرقابل‌اطمینان — راهکار: پردازش لبه، اولویت‌بندی پیام‌ها
۷ .یادگیری مستمر و به‌روزرسانی	داده‌های متعدد جلسات، نتایج بلندمدت بالینی	نظارت بر عملکرد مدل، آنالیز خطا، اصلاح برچسب‌ها	یادگیری افزایشی، یادگیری تقویتی (RL)، مدل‌های فدرال	بهبود دقت پیش‌بینی، تطبیق با تغییرات بیمار	تجدیدنظر در برنامه درمانی و استراتژی‌های پایش	بازآموزی مدل با داده‌های تازه، به‌روزرسانی پروفایل	توزیع داده، بایاس زمانی — راهکار: فدرال لرنینگ، تنظیم مداوم معیارها
۸ .ارزیابی بالینی و اثرگذاری	نتایج سلامت VO_2max ؛. HbA1c، فشار خون، کیفیت زندگی	تحلیل آماری اثرات میان-مدت و بلندمدت	ارزیابی کارآزمایی بالینی ها، مطالعات پیگیری، آنالیز سود/زیان	شواهد اثربخشی و ایمنی	ادغام در دستورکار بالینی، سیاست‌گذاری	گزارش به سکوی نظارتی و به‌روزرسانی مقررات	اثبات اثربخشی در جمعیت‌های متنوع — راهکار: مطالعات چندمرکزی و کارآزمایی بالینی‌های هیبرید

HR: Heart Rate ؛**HRV:** Heart Rate Variability ؛**ECG:** Electrocardiography ؛**SpO_2:** Peripheral Oxygen Saturation ؛**CGM:** Continuous Glucose Monitoring ؛**EMG:** Electromyography ؛**EHR:** Electronic Health Record ؛**ETL:** Extract, Transform, Load ؛**FHIR:** Fast Healthcare Interoperability Resources ؛**PSD:** Power Spectral Density ؛**RMS:** Root Mean Square ؛**LF/HF:** Low Frequency/High Frequency Ratio ؛**DL:** Deep Learning ؛**PCA:** Principal Component Analysis ؛**ML:** Machine Learning ؛**SVM:** Support Vector Machine ؛**CNN:** Convolutional Neural Network ؛**LSTM:** Long Short-Term Memory ؛**CV:** Cross-Validation ؛**RL:** Reinforcement Learning ؛**VO_2max:** Maximal Oxygen Uptake ؛**HbA1c:** Hemoglobin A1c.

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

مداخلات شخصی‌سازی‌شده در بیماران مزمن

در دهه‌ی اخیر، مفهوم «مداخلات شخصی‌سازی‌شده» در تمرین‌درمانی بیماران مزمن به‌طور چشمگیری تحول یافته است. این تحول نه‌تنها ناشی از پیشرفت در دانش فیزیولوژی تمرین، بلکه به‌ویژه حاصل ادغام هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و فناوری‌های پوشیدنی در پایش و هدایت تمرین است. هدف اصلی این رویکرد، انطباق شدت، حجم و نوع تمرین با ویژگی‌های فیزیولوژیکی، رفتاری و متابولیکی هر بیمار است تا اثربخشی و ایمنی مداخله به حداکثر برسد. در این میان، داده‌های حاصل از دستگاه‌های پوشیدنی، حسگرهای زیستی و الگوریتم‌های تحلیلی مبتنی بر یادگیری ماشین، توانسته‌اند فرآیند تجویز تمرین را از مدل‌های سنتی مبتنی بر جمعیت به مدل‌های شخص‌محور و پیش‌بینی‌گر تغییر دهند (۷).

در بیماران مبتلا به دیابت نوع دو، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تنظیم شدت تمرین بر اساس پاسخ گلوکز خون، به یکی از نوآورانه‌ترین رویکردها بدل شده است. سامانه‌های پوشیدنی که تغییرات لحظه‌ای قند خون (CGM)[1] را رصد می‌کنند، در ترکیب با مدل‌های پیش‌بینی‌گر، امکان تنظیم خودکار برنامه‌های تمرینی را فراهم کرده‌اند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که چنین سیستم‌هایی می‌توانند با بهینه‌سازی مصرف گلوکز، خطر هیپوگلیسمی را کاهش داده و حساسیت به انسولین را به‌صورت معنی‌داری افزایش دهند (۷۰،۷۱). برای مثال در مطالعه‌ای مروری نشان داده شد که استفاده از سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در کنترل قند خون، در مقایسه با مدل‌های انسانی سنتی، دقت بالاتری در تشخیص نوسانات گلوکز و پیشنهاد سطح تمرین دارد (۷۰). افزون بر این، داده‌های به‌دست‌آمده از پلتفرم‌های هوشمند می‌توانند با تحلیل الگوهای روزانه فعالیت، به طراحی برنامه‌های تمرینی انعطاف‌پذیرتر بر اساس ریتم شبانه‌روزی و شرایط متابولیکی فرد کمک کنند (۷۲،۷۳).

در بیماران قلبی‌عروقی نیز، نقش مداخلات هوشمند در بهینه‌سازی بازتوانی قلبی به‌طور گسترده بررسی شده است. تلفیق داده‌های حاصل از حسگرهای ضربان قلب، تغییرپذیری ضربان (HRV)، و الگوهای فعالیت حرکتی با مدل‌های یادگیری عمیق، امکان پایش دقیق بار تمرینی و واکنش فیزیولوژیکی بیماران را فراهم کرده است (۷۴). این سیستم‌ها به‌صورت بلادرنگ توانایی تشخیص نشانه‌های هشداردهنده مانند تاکی‌کاردی، کاهش اشباع اکسیژن یا خستگی بیش‌ازحد را دارند و می‌توانند تنظیم خودکار شدت تمرین را انجام دهند. مطالعاتی نشان داده‌اند که اجرای بازتوانی قلبی با استفاده از پلتفرم‌های دیجیتال مبتنی بر هوش مصنوعی موجب بهبود چشمگیر در ظرفیت هوازی و شاخص‌های عملکردی بیماران نارسایی قلبی می‌شود، در حالی که خطر عوارض تمرینی کاهش می‌یابد (۷۵).

با ظهور پلتفرم‌های تله‌مدیسین(پزشکی از راه دور) و گسترش دسترسی به دستگاه‌های پوشیدنی، بازتوانی خانگی مبتنی بر راهبری هوش مصنوعی به‌عنوان یک مسیر عملی و مقرون‌به‌صرفه برای مراقبت از بیماران مزمن مطرح شده است. سامانه‌های تمرین‌درمانی هوشمند می‌توانند در محیط خانگی با ترکیب داده‌های بلادرنگ (ضربان قلب، HRV، داده‌های CGM، حرکت و کیفیت خواب) و الگوریتم‌های تطبیقی، شدت و محتوای جلسات را به‌طور خودکار یا تحت نظارت از راه دور اصلاح کنند؛ این رویه موجب تداوم مداخلات، افزایش تبعیت بیمار و کاهش بار مراقبتی مراکز درمانی می‌گردد (۵۹). تجربه‌های پساکرونا نشان داده است که بیمارانی که به‌دلیل محدودیت‌های رفت‌وآمد یا ضعف جسمانی قادر به حضور منظم در کلینیک نیستند، با پشتیبانی تله‌مدیسین مبتنی بر بازخورد آنی و مکانیسم‌های تشخیص خطر، می‌توانند به‌طور ایمن و مؤثر برنامه‌های بازتوانی را دنبال کنند (۶۰).

در زمینه سرطان و بازتوانی، تمرین‌درمانی هوشمند به‌عنوان ابزاری کلیدی برای بهبود کیفیت زندگی و کاهش خستگی مزمن بیماران مطرح شده است. در این حوزه، مدل‌های تصمیم‌یار[2] با استفاده از داده‌های فیزیولوژیکی و روان‌شناختی بیماران، پروتکل‌های تمرینی متناسب با وضعیت التهابی، عملکرد عضلانی و پاسخ‌های سیستم ایمنی طراحی می‌کنند (۷۶). پژوهش‌هایی نشان داده‌اند که مداخلات دیجیتال هوشمند می‌توانند هم‌تراز یا حتی

[1] Continuous Glucose Monitoring

[2] Decision Support Systems

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

مؤثرتر از جلسات حضوری سنتی در حفظ تعهد بیماران به تمرین و کنترل خستگی عمل کنند (۷۷). افزون بر این، الگوریتم‌های هوشمند قادرند بر اساس تغییرات توده بدون چربی، شاخص التهابی (CRP، IL-6) و میزان خواب و استرس، شدت تمرین را تنظیم کرده و به نوعی «خودتنظیمی فیزیولوژیکی» در فرآیند تمرین‌درمانی دست یابند (۷۸).

در سطحی گسترده‌تر، ملاحظات مرتبط با جنسیت، سن، و ویژگی‌های فیزیولوژیکی باید در طراحی تمرین هوشمند مورد توجه قرار گیرند. تفاوت‌های هورمونی و متابولیکی میان زنان و مردان می‌تواند بر پاسخ تمرینی و الگوریتم‌های پیش‌بینی‌گر تأثیرگذار باشد. برای مثال، مدل‌های یادگیری ماشین نشان داده‌اند که پارامترهایی مانند فاز سیکل قاعدگی، سطح استروژن و حساسیت انسولینی در زنان می‌تواند موجب تفاوت در بهینه‌سازی بار تمرینی شود (۷۹). همچنین، در افراد سالمند، ترکیب داده‌های حاصل از حسگرهای حرکتی با مدل‌های تحلیل تعادل و قدرت عضلانی می‌تواند در پیشگیری از سقوط و بهینه‌سازی تمرینات عملکردی مؤثر باشد (۸۰).

به‌طور کلی، آنچه از مرور مطالعات اخیر برمی‌آید، تأکید بر انتقال از نسخه‌نویسی عمومی تمرین به سمت نسخه‌نویسی پویا، پیش‌بینی‌گر و شخص‌محور است. در این رویکرد، هوش مصنوعی نه‌تنها ابزار تحلیل داده، بلکه شریک تصمیم‌سازی در فرآیند تجویز و تعدیل تمرین محسوب می‌شود. مدل‌های نوین «تمرین‌درمانی تطبیقی» اکنون می‌توانند با تحلیل بلادرنگ داده‌های فیزیولوژیکی، وضعیت روانی و الگوهای رفتاری، مداخله‌ای چندوجهی و شخصی را برای هر بیمار ارائه دهند.

چالش‌ها، محدودیت‌ها و ملاحظات اخلاقی

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در تلفیق فیزیولوژی تمرین با فناوری‌های هوشمند، این حوزه همچنان با چالش‌های متعددی در سطوح زیستی، فناورانه و اخلاقی روبه‌رو است. نخستین چالش، به محدودیت‌های فیزیولوژیکی و پیچیدگی بالای مدل‌سازی پاسخ‌های انسانی به تمرین بازمی‌گردد. فیزیولوژی بدن انسان به‌ویژه در شرایط بیماری‌های مزمن، به‌شدت پویا، ناهمگون و وابسته به عوامل درون‌زاد و برون‌زاد است. برای مثال، پارامترهایی مانند نوسانات هورمونی، تغییرات شبانه‌روزی در متابولیسم، تفاوت‌های ژنتیکی، یا حتی عوامل روان‌شناختی مانند استرس و کیفیت خواب، می‌توانند واکنش‌های تمرینی را به‌طور چشمگیری تغییر دهند. در چنین بستری، ایجاد مدل‌های دقیق پیش‌بینی‌کننده که بتوانند رفتار فیزیولوژیکی واقعی بدن را بازنمایی کنند، با دشواری‌های جدی مواجه است. الگوریتم‌های هوش مصنوعی، هرچند در شناسایی الگوهای داده‌ای بسیار توانمند هستند، اما گاه فاقد درک علّی از سازوکارهای زیستی می‌باشند و ممکن است در شرایط غیرقابل‌پیش‌بینی عملکرد ضعیفی داشته باشند. این مسئله به‌ویژه در بیماران با چندین بیماری زمینه‌ای، یا در افرادی که داروهای متعدد مصرف می‌کنند، اهمیت بیشتری می‌یابد.

چالش دوم، به مسائل فنی و فناورانه در دقت و قابلیت اطمینان ابزارهای پایش زیستی بازمی‌گردد. فناوری‌های پوشیدنی و حسگرهای فیزیولوژیکی (مانند HR، HRV، SpO_2، و گلوکز) اغلب در محیط‌های کنترل‌نشده یا شرایط واقعی زندگی با محدودیت‌های قابل توجهی مواجه‌اند. برای نمونه، حرکت بدن، تعریق، یا تغییر دمای محیط می‌تواند دقت اندازه‌گیری‌ها را کاهش دهد. همچنین، بخش عمده‌ای از الگوریتم‌های تحلیلی فعلی در محیط‌های آزمایشگاهی یا با نمونه‌های کوچک آموزش دیده‌اند و به‌ندرت به‌صورت گسترده در محیط‌های بالینی یا جمعیت‌های متنوع آزمایش شده‌اند. این امر منجر به «سوگیری داده‌ای[1]» می‌شود، به‌ویژه زمانی که داده‌های آموزشی از گروه‌های خاصی مانند مردان جوان یا جمعیت‌های غربی استخراج شده باشد. در نتیجه، ممکن است الگوریتم‌ها در جمعیت‌های دیگر به‌ویژه زنان، سالمندان یا بیماران با پیشینه ژنتیکی متفاوت عملکرد مناسبی نداشته باشند.

از دیدگاه علمی نیز چالشی دیگر مطرح است: عدم استانداردسازی در جمع‌آوری، پردازش و تفسیر داده‌های فیزیولوژیکی. هنوز پروتکل‌های جهانی و یکپارچه‌ای برای نحوه‌ی اندازه‌گیری شاخص‌هایی مانند HRV، لاکتات یا سطح استرس

[1] Data Bias

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

اکسیژن در طول تمرین وجود ندارد. این عدم هماهنگی باعث می‌شود مقایسه‌ی مستقیم مطالعات دشوار شود و بازتولید نتایج با مشکل روبه‌رو گردد. افزون بر آن، الگوریتم‌های هوش مصنوعی اغلب «جعبه سیاه[1]» هستند، به این معنا که درک دقیق از منطق درونی تصمیم‌گیری آنها دشوار است. چنین عدم شفافیتی می‌تواند اعتماد متخصصان بالینی به این سیستم‌ها را کاهش دهد، زیرا توضیح‌پذیری[2] یکی از ارکان ضروری تصمیم‌سازی در پزشکی و فیزیولوژی تمرین است.

چالش دیگر به حوزه اخلاق و حقوق داده‌ها مربوط می‌شود. در تمرین‌درمانی هوشمند، داده‌های زیستی نظیر ضربان قلب، سطوح گلوکز، نرخ تنفس یا حتی داده‌های رفتاری و روان‌شناختی جمع‌آوری می‌شوند. این اطلاعات به‌طور بالقوه می‌توانند هویت فردی یا وضعیت سلامت شخص را آشکار سازند. اگر سازوکارهای مناسبی برای رمزگذاری، ناشناس‌سازی و حفاظت از داده‌ها وجود نداشته باشد، احتمال نشت یا سوءاستفاده از اطلاعات بالا خواهد رفت. همچنین، در برخی کشورها هنوز قوانین شفافی برای مالکیت داده‌های زیستی وجود ندارد؛ به‌گونه‌ای که مشخص نیست آیا داده‌های جمع‌آوری‌شده متعلق به فرد بیمار است یا شرکت توسعه‌دهنده‌ی فناوری. این ابهام حقوقی می‌تواند در آینده زمینه‌ساز سوءاستفاده‌های اقتصادی یا تبعیض‌های سلامت شود. از منظر اخلاقی، استفاده از الگوریتم‌هایی که تصمیمات تمرینی یا درمانی را به‌صورت خودکار اتخاذ می‌کنند نیز نیازمند نظارت انسانی مستمر است. در غیر این صورت، ممکن است خطاهای الگوریتمی به آسیب‌های فیزیولوژیکی یا خطرات ایمنی منجر شوند.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، کمبود مطالعات طولی و مقایسه‌ای در زمینه‌ی اثربخشی مداخلات تمرین‌درمانی هوشمند است. اغلب پژوهش‌های موجود دارای دوره‌های کوتاه‌مدت، نمونه‌های محدود یا طراحی‌های غیرکنترل‌شده هستند. هنوز شواهد کافی برای ارزیابی بلندمدت تأثیر هوش مصنوعی بر سازوکارهای فیزیولوژیکی مانند تطابق میتوکندریایی، ظرفیت هوازی یا پاسخ‌های هورمونی وجود ندارد. از این رو، نتایج فعلی باید با احتیاط تفسیر شوند و نیاز به پژوهش‌های مداوم با طراحی‌های چندمرکزی و نمونه‌های متنوع احساس می‌شود. علاوه بر این، محدودیت‌هایی در تعامل بین متخصصان فناوری و فیزیولوژیست‌های تمرین وجود دارد. بسیاری از پروژه‌های میان‌رشته‌ای فاقد زبان مشترک علمی و استانداردهای ارتباطی هستند که این مسئله می‌تواند در کیفیت طراحی مداخلات اثرگذار باشد.

از دیدگاه اخلاق پژوهشی، مسئله‌ی رضایت آگاهانه در جمع‌آوری داده‌های زیستی اهمیت ویژه‌ای دارد. بیماران باید به‌صورت شفاف از نوع داده‌هایی که جمع‌آوری می‌شوند، نحوه‌ی استفاده از آن‌ها، مدت نگهداری و امکان حذف یا انتقال آن‌ها آگاه باشند. همچنین، باید سازوکارهایی برای تضمین عدالت الگوریتمی[3] وجود داشته باشد تا از ایجاد تبعیض در نتایج تحلیل‌های هوش مصنوعی جلوگیری شود. برای مثال، اگر الگوریتمی بر اساس داده‌های جمعیت خاصی آموزش دیده باشد، ممکن است در پیش‌بینی پاسخ تمرینی جمعیت‌های دیگر اشتباه کند و این مسئله از نظر اخلاقی غیرقابل‌قبول است.

افزون بر چالش‌های فنی و اخلاقی، مسئله تعمیم‌پذیری داده‌های فیزیولوژیکی و محدودیت مدل‌سازی نیز از موانع بنیادین در این حوزه است یکی از چالش‌های اساسی در توسعه مدل‌های هوش مصنوعی برای تمرین‌درمانی، محدودیت داده‌های انسانی از منظر کمّی و ساختاری است. اغلب داده‌های فیزیولوژیکی مورد استفاده در مدل‌سازی، حاصل مطالعات کوچک، کوتاه‌مدت و ناهمگن از نظر جمعیت و شدت تمرین هستند؛ بنابراین، تعمیم‌پذیری نتایج به جمعیت‌های بزرگ‌تر یا بیماران با ویژگی‌های متفاوت با تردید همراه است. علاوه بر این، مدل‌های کنونی هنوز در تحلیل پویایی زمانی[4] پاسخ‌های فیزیولوژیکی، از جمله تغییرات لحظه‌ای در ضربان قلب، لاکتات، یا گلوکز خون، ضعف دارند و معمولاً داده‌ها را به‌صورت ایستا تفسیر می‌کنند. چنین ساده‌سازی‌هایی موجب می‌شود که مدل‌های پیش‌بینی‌گر نتوانند الگوهای سازگاری تمرینی واقعی را با

[1] Black Box
[2] Explainability
[3] Algorithmic Fairness
[4] Temporal dynamics

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

دقت کافی شناسایی کنند. در نتیجه، برای پیشرفت واقعی در تمرین‌درمانی هوشمند، ضروری است رویکردهای یادگیری ماشین مبتنی بر داده‌های پیوسته، طراحی مطالعات طولی بزرگ‌تر، و اعتبارسنجی چندمرکزی با جمعیت‌های متنوع در دستور کار پژوهش‌های آینده قرار گیرد.

در نهایت، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، حفظ توازن میان خودکارسازی فرآیند تمرین‌درمانی و حفظ عنصر انسانی در تعامل با بیمار است. هرچند هوش مصنوعی می‌تواند داده‌ها را با دقت بالا تحلیل و برنامه‌های تمرینی را بهینه کند، اما انگیزش، همدلی و نظارت انسانی نقش غیرقابل‌جایگزینی در موفقیت مداخلات تمرینی دارد. بنابراین، آینده‌ی تمرین‌درمانی هوشمند باید بر پایه‌ی همکاری متوازن بین انسان و ماشین، تلفیق دانش فیزیولوژی با یادگیری ماشین، و رعایت اصول اخلاقی و انسانی استوار باشد. چنین رویکردی می‌تواند مسیر را برای توسعه‌ی مداخلات ایمن‌تر، مؤثرتر و عادلانه‌تر در مدیریت بیماری‌های مزمن هموار کند.

مسیرهای آینده پژوهش و کاربردهای بالینی

برای اینکه تمرین‌درمانی هوشمند به‌صورت اثربخش و پایدار وارد بالین شود و مأموریتش در بهبودِ سلامت بیماران مزمن تحقق یابد، نیاز به نقشه‌راه پژوهشی و اجرایی مشخص و چندبُعدی وجود دارد. نخستین محور این نقشه‌راه، توسعه پژوهش‌های مبتنی بر شواهد بلندمدت و تعمیم‌پذیر است؛ به‌عبارت دیگر لازم است از مطالعات کوچک مقیاس و کوتاه‌مدت فعلی به‌سوی کارآزمایی‌های چندمرکزی، طولی و هیبریدی پیش برویم که هم تأثیرات بالینی (مانند تغییرات در HbA1c، VO_2max، معیارهای عملکردی و کیفیت زندگی) و هم پیامدهای ایمنی را در بازه‌های زمانی میان‌مدت و بلندمدت بررسی کنند. طراحی چنین پژوهش‌هایی باید شامل شاخص‌های نتیجه‌ای بالینی و دیجیتال[1] باشد تا بتوان رابطه میان تغییرات فیزیولوژیکی لحظه‌ای و نتایج بالینی را کمّی‌سازی نمود و شواهدی برای تصمیم‌گیران نظام سلامت فراهم آورد.

دومین مسیر کلیدی، ایجاد چارچوب‌های استاندارد برای جمع‌آوری و مدیریت داده‌ها است. هم‌اکنون یکی از موانع اصلی، تنوع فرمت‌ها و پروتکل‌های اندازه‌گیری و کالیبراسیون حسگرهاست که امکان تلفیق مؤثر داده‌ها را در تحلیل‌های فراگیر محدود می‌کند. بنابراین تدوین پروتکل‌های استاندارد برای سنجش پارامترهای مهم فیزیولوژیک در شرایط بالینی و غیربالینی، تعیین معیارهای کیفیت داده و طراحی قالب‌های میان‌قابل‌تبادل مبتنی بر استانداردهای بین‌المللی (مثلاً FHIR) باید در اولویت پژوهش و سیاست‌گذاری قرار گیرد تا امکان مقایسه و بازتولید نتایج فراهم شود.

سومین جهت، ادغام چندمنظوره داده‌ها و به‌کارگیری رویکردهای تحلیلی پیشرفته برای استخراج الگوهای معنی‌دار است. تلفیق داده‌های مولکولی (نشانگرهای زیستی)، فیزیولوژیکی (HR, HRV, CGM)، رفتاری (الگوهای فعالیت و خواب) و محیطی (دمای محیط، کیفیت هوا) می‌تواند مدل‌های پیش‌بینی دقیقی بسازد که پاسخ فرد به تمرین را با دقت بالاتری پیش‌بینی کنند. این ادغام باید با روش‌های مناسب مهندسی ویژگی و کنترل سوگیری انجام شود و از تکنیک‌هایی مانند کاهش بُعد، انتخاب ویژگی و اعتبارسنجی بیرونی برای افزایش تعمیم‌پذیری مدل‌ها استفاده گردد. ضمن اینکه رویکردهای تازه‌ای مانند یادگیری فدرال می‌توانند بدون خروج داده‌های حساس از محل جمع‌آوری، امکان آموزش مدل‌های مشترک را در مراکز متعدد فراهم کنند و به حل مشکلات حریم خصوصی و مالکیت داده کمک نمایند.

چهارم، سرمایه‌گذاری در توسعه و پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری تقویتی و یادگیری آنلاین برای طراحی سیاست‌های تمرینی تطبیقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یادگیری تقویتی این امکان را می‌دهد که سیاست تمرینی نه به‌عنوان یک نسخه ثابت، بلکه به‌صورت یک سیاست‌کنترل تطبیقی بر پایه پاداش‌های بلندمدت آموخته شود؛ به‌عبارت دیگر، الگوریتم می‌تواند با هدف بهینه‌سازی یک ترکیب از نتایج (مثلاً بهبود HbA1c در کنار حفظ ایمنی قلبی)، با تجربه بیمار در طول زمان آموخته شود و تنظیمات تمرینی را به‌صورت پویا اعمال نماید. البته برای کاربرد بالینی چنین الگوریتم‌هایی باید چارچوب‌های ایمنی سفت و محکم، مکانیزم‌های

[1]Digital Biomarkers

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

توقف اضطراری و نظارت انسانی در حلقه[1] طراحی شود تا مخاطرات احتمالی کاهش یابد.

پنجم، نیاز به ایجاد محیط‌های آزمایشگاهی و میدانی برای اعتبارسنجی فنی و کارآزمایی انسانی وجود دارد. پیش از استقرار در بالین، هر سامانه هوشمند باید از منظر دقت حسگرها، پایداری الگوریتم، زمان تاخیر تصمیم‌گیری و قابلیت کار در شرایط واقعی محک بخورد. طراحی فازهای آزمایشی مرحله‌ای از ارزیابی فنی و آزمایش‌های شبه‌بالینی تا کارآزمایی‌های بالینی کوچک و نهایتاً مطالعات بزرگ مقیاس می‌تواند مسیر منطقی و ایمن برای پیاده‌سازی فراهم آورد.

ششم، رویکردهای اخلاقی، حقوقی و اقتصادی باید هم‌زمان توسعه یابند. تدوین چارچوب‌های حریم خصوصی، سازوکارهای شفاف برای رضایت آگاهانه، سیاست‌های مربوط به مالکیت و اشتراک داده‌ها، و ارزیابی‌های هزینه–اثربخشی برای نشان‌دادن ارزش افزوده مداخلات هوشمند در نظام سلامت ضروری است. به‌علاوه، برنامه‌های آموزشی برای پزشکان، فیزیولوژیست‌ها و تیم‌های توانبخشی در زمینه فهم محدودیت‌ها و قابلیت‌های سیستم‌های هوش مصنوعی باید تدوین و اجرا گردد تا پذیرش و استفاده بالینی افزایش یابد.

هفتم، تاکید بر عدالت دیجیتال و دسترسی برابر باید جزو اولویت‌ها باشد. پژوهش‌ها باید تفاوت‌های جنسیتی، سنی، قومی و اجتماعی–اقتصادی را در طراحی و ارزیابی مدل‌ها لحاظ کنند تا از ایجاد یا تقویت تبعیض جلوگیری شود. به‌کارگیری داده‌های متنوع از جمعیت‌های مختلف و انجام آزمون‌های تعمیم‌پذیری می‌تواند خطر سوگیری مدل‌ها را کاهش دهد و اطمینان ایجاد کند که مزایای تمرین‌درمانی هوشمند در دسترس همه گروه‌ها قرار می‌گیرد.

هشتم، فرصت‌های سیاستی برای ادغام این فناوری‌ها در نظام سلامت وجود دارد که نیازمند آزمایش مدل‌های پرداخت، تعیین معیارهای کیفیت خدمات دیجیتال و توسعه مسیرهای استقرار راهنمای بالینی است. برنامه‌های پایلوت در سطح نظامی یا شبکه‌های کلینیکی بزرگ می‌تواند به شناسایی موانع اجرایی، نیازمندی‌های زیرساختی و اثرات سازمانی کمک کند.

در نهایت، آینده پژوهش در این حوزه مستلزم رویکردهای میان‌رشته‌ای، شفافیت متدولوژیک و تمرکز بر شواهد واقعی بالینی است. تنها از طریق ترکیب مطالعات بنیادی فیزیولوژیک، مهندسی داده، کارآزمایی‌های بالینی و توجه همزمان به اخلاق و سیاست‌گذاری است که می‌توان امید داشت تمرین‌درمانی هوشمند به‌طور امن، مؤثر و عادلانه وارد مراقبت‌های بالینی بیماران مزمن شود و تبدیل به یکی از ستون‌های پزشکی دقیق و پیش‌بینی‌کننده گردد.

دیدگاه میان‌رشته‌ای و توصیه‌های سیاستی

تحقق پتانسیل تمرین‌درمانی هوشمند تنها از طریق تلاش‌های تک‌بعدی میسر نیست؛ این حوزه نهایتاً یک فرایند میان‌رشته‌ای است که نیازمند هم‌افزایی هدفمند میان فیزیولوژیست‌های تمرین، مهندسین داده و دانشمندان علوم اعصاب می‌باشد. فیزیولوژیست‌ها دانش لازم درباره مکانیسم‌های زیستی، آستانه‌های ایمنی و شاخص‌های بالینی معنادار را فراهم می‌کنند؛ مهندسین داده و متخصصان یادگیری ماشین وظیفه توسعه، اعتبارسنجی و تبیین‌پذیری مدل‌ها را بر عهده دارند؛ و علوم اعصاب می‌تواند سازوکارهای عصبی–رفتاری پاسخ به تمرین و مفاهیم بازیابی عصبی را تفسیر نموده و معیارهای عملکرد شناختی را وارد مدل‌ها کند. تعامل مستمر این سه حوزه، همراه با مشارکت فعال تیم‌های بالینی، بیماران و سیاست‌گذاران سلامت، زمینه طراحی سامانه‌هایی را فراهم می‌آورد که هم علمی–مبنایی و هم عملیاتی و قابل‌استقرار در نظام سلامت‌اند.

برای راهبری چنین همکاری‌های میان‌رشته‌ای، پیشنهاد می‌شود کنسرسیوم‌های چندمرکزی شاملِ واحدهای بالینی، آزمایشگاه‌های فیزیولوژی، گروه‌های مهندسی داده و نهادهای تنظیم‌گر شکل گیرد؛ این کنسرسیوم‌ها باید بر چهار رکن کلیدی تمرکز کنند: (۱) توسعه واژگان مشترک و استانداردهای داده، (۲) طراحی پروتکل‌های اعتبارسنجی فنی و بالینی، (۳) چارچوب‌های شفاف حریم خصوصی و مالکیت داده، و (۴) برنامه‌های آموزشی

[1] Human-in-the-loop

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

میان‌رشته‌ای برای تربیت «مترجمین فناور–بالینی» که بتوانند محدودیت‌ها و نیازهای هر حوزه را به هم منتقل کنند. چنین ساختاری نه تنها شانس موفقیت فناوری‌های تمرین‌درمانی هوشمند را افزایش می‌دهد، بلکه مسیر روشنی برای ترجمه پژوهش به مداخلات ایمن، توزیع‌شدنی و مقیاس‌پذیر در نظام سلامت فراهم می‌آورد.

با توجه به یافته‌های این مرور تحلیلی، پیام‌های کلیدی برای سیاست‌گذاران حوزه سلامت به شرح زیر است: نخست، به‌کارگیری سامانه‌های تمرین‌درمانی هوشمند می‌تواند هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم درمان بیماری‌های مزمن را به‌طور معناداری کاهش دهد، زیرا موجب بهینه‌سازی برنامه‌های ورزشی، پیشگیری از عود علائم، و کاهش بستری‌های مکرر می‌شود. دوم، الگوریتم‌های شخصی‌سازی‌شده مبتنی بر هوش مصنوعی، از طریق پایش مستمر و بازخورد بلادرنگ، موجب افزایش پایبندی بیماران به مداخلات تمرینی می‌شوند؛ عاملی که از چالش‌های اصلی در نظام‌های درمانی سنتی است. سوم، ادغام تمرین‌درمانی هوشمند با زیرساخت‌های سلامت دیجیتال ملی، می‌تواند فرآیند بازتوانی بیماران را تسریع کرده و مسیر گذار به «نظام سلامت هوشمند و پیش‌نگر» را هموار کند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که سرمایه‌گذاری در توسعه و استانداردسازی فناوری‌های هوشمند تمرینی، نه تنها یک اولویت پژوهشی بلکه یک ضرورت سیاستی برای آینده سلامت عمومی است.

در نهایت، آینده تمرین‌درمانی در عصر هوش مصنوعی نه صرفاً در به‌کارگیری فناوری، بلکه در فهم عمیق‌تر از پیوند میان زیست‌شناسی انسان و منطق یادگیری ماشین نهفته است؛ جایی که داده‌ها، رفتار و فیزیولوژی در یک چرخه هوشمند همزیستی می‌یابند و سلامت از درمان به سمت پیش‌بینی و پیشگیری تحول می‌یابد.

نتیجه‌گیری

نتایج مرور تحلیلی حاضر نشان می‌دهد که ادغام دانش فیزیولوژی تمرین با فناوری‌های هوشمند و الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند بنیان جدیدی برای پزشکی ورزشی و توانبخشی مبتنی بر شواهد ایجاد کند. این مقاله نشان داد که در بیماری‌های مزمن نظیر دیابت نوع دو، نارسایی قلبی، چاقی و سرطان، پاسخ فیزیولوژیکی به تمرین نه‌تنها متغیر و فردی است، بلکه تحت‌تأثیر تعامل پیچیده‌ای میان عوامل متابولیکی، عصبی، هورمونی و محیطی قرار دارد. فناوری‌های هوشمند از طریق پایش مداوم شاخص‌های زیستی، جمع‌آوری داده‌های با دقت بالا و تحلیل بلادرنگ الگوهای عملکردی، می‌توانند به درک عمیق‌تر از این سازوکارهای پیچیده کمک کرده و مسیر طراحی مداخلات شخصی‌سازی‌شده را هموار سازند. دانش جدید حاصل از این مرور در این است که تمرین‌درمانی دیگر نمی‌تواند صرفاً بر اصول ثابت فیزیولوژیکی و پروتکل‌های عمومی تکیه کند؛ بلکه باید به‌عنوان یک سیستم پویا و داده‌محور در نظر گرفته شود که در آن، هوش مصنوعی نقش تنظیم‌گر مرکزی را ایفا می‌کند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند با تحلیل داده‌های حجیم حاصل از حسگرها و دستگاه‌های پوشیدنی، پاسخ فردی به تمرین را پیش‌بینی کرده و بر اساس تغییرات لحظه‌ای، شدت، نوع و مدت تمرین را بهینه کنند. این تحول موجب می‌شود تمرین به یک مداخله «زنده» تبدیل شود که نه‌تنها به فیزیولوژی بدن پاسخ می‌دهد بلکه از آن می‌آموزد و سازگار می‌شود. در بُعد بالینی، چنین رویکردی به معنای انتقال از مدل‌های سنتی «تجویز ثابت تمرین» به سمت «تجویز پویا و شخصی‌سازی‌شده» است که در آن، تصمیم‌یارهای مبتنی بر هوش مصنوعی با نظارت متخصصان بالینی همکاری می‌کنند تا برنامه تمرینی به‌طور مستمر با نیازهای فیزیولوژیکی بیمار هم‌تراز بماند. این امر می‌تواند ایمنی، اثربخشی و پذیرش بیماران را به‌طور چشمگیری افزایش دهد و از بروز آسیب یا خستگی بیش از حد جلوگیری نماید. از منظر علمی، مسیر آینده فیزیولوژی تمرین در عصر هوش مصنوعی نیازمند بازتعریف مفاهیم سنتی چون بار تمرینی، آستانه فیزیولوژیک و سازگاری تمرینی است. این مفاهیم باید در قالب مدل‌های پویا، داده‌محور و پیش‌بینی‌کننده بازسازی شوند تا با پیچیدگی‌های سیستم زیستی و تنوع پاسخ‌های انسانی همخوانی داشته باشند. به موازات آن، پژوهشگران باید به توسعه مدل‌های ترکیبی بپردازند که بتوانند داده‌های چندوجهی از سطح مولکولی تا رفتاری را در قالب چارچوب‌های یادگیری عمیق و

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

تقویتی تحلیل کنند. در نهایت، پیام کلیدی این مرور آن است که آینده تمرین‌درمانی نه در افزایش حجم داده، بلکه در معنابخشی هوشمندانه به داده‌ها نهفته است. هوش مصنوعی ابزاری نیست که جایگزین دانش فیزیولوژی شود، بلکه زبان جدیدی است که به فیزیولوژی تمرین امکان «یادگیری از خودش» را می‌دهد. بدین ترتیب، در افق نزدیک، پزشکی ورزشی و توانبخشی به سوی عصری حرکت می‌کند که در آن انسان و ماشین نه در رقابت، بلکه در هم‌افزایی برای ارتقاء سلامت، بازیابی و کیفیت زندگی بیماران مزمن همکار خواهند بود.

تقدیر و تشکّر

نویسندگان مراتب سپاس خود را از تمامی پژوهشگران و متخصصانی که در حوزه‌های فیزیولوژی تمرین، علوم داده، و مهندسی زیست‌پزشکی با پژوهش‌های ارزشمند خود مسیر توسعه تمرین‌درمانی هوشمند را هموار ساخته‌اند، ابراز می‌دارند. همچنین از تمامی نویسندگان مطالعات پیشین که مبانی علمی و فناورانه این مقاله بر دستاوردهای آنان استوار است، قدردانی می‌شود. این مقاله حاصل تلاش برای تلفیق بین‌رشته‌ای علوم فیزیولوژی، بالینی و هوش مصنوعی است و الهام‌گرفته از دیدگاه‌های نوآورانه جامعه علمی جهانی در این زمینه می‌باشد. لازم به ذکر است در فرایند آماده‌سازی و ویرایش نهایی این مقاله، از ابزارهای هوش مصنوعی صرفاً برای بهبود روانی زبان، اصلاح ساختار جملات و سازماندهی بهتر متن استفاده شده است. این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه فردوسی مشهد با عنوان «طراحی چارچوب مفهومی تمرین‌درمانی هوشمند در مدیریت بیماری‌های مزمن: تلفیق سازوکارهای فیزیولوژیکی و کاربردهای هوش مصنوعی» با کد ۶۶۳۲۰ است. نویسندگان از حمایت دانشگاه فردوسی مشهد در اجرای این طرح صمیمانه قدردانی می‌کنند.

ملاحظات اخلاقی

مقاله حاضر از نوع مروری است و بر پایه تحلیل و جمع‌بندی مطالعات منتشرشده انجام شده است. در این پژوهش هیچ‌گونه مداخله‌ای بر روی انسان یا حیوان، جمع‌آوری داده از شرکت‌کنندگان یا استفاده از اطلاعات فردی انجام نشده است.

حمایت مالی

این پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه فردوسی مشهد انجام و تحقیق نویسنده مسئول از حمایت دانشگاه فردوسی مشهد با شماره ۲/۶۶۳۲۰ برخوردار بوده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در ایده‌پردازی و طراحی پژوهش، جستجو و بررسی منابع، تحلیل و تفسیر یافته‌ها، نگارش، بازنگری علمی و ویرایش مقاله مشارکت داشته‌اند و نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافع علمی، مالی یا شخصی در ارتباط با موضوع، نگارش، و انتشار این مقاله وجود ندارد.

منابع

1. World Health Organization. Noncommunicable diseases. Geneva: World Health Organization; 2023. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases

2. Guthold R, Stevens GA, Riley LM, Bull FC. Worldwide trends in insufficient physical activity. Lancet Glob Health. 2018;6(10): e1077-e1086. DOI: 10.1016/S2214-109X(18)30357-7

3. Bloom DE, Cafiero E, Jané-Llopis E, Abrahams-Gessel S, Bloom LR, Fathima S, et al. The Global Economic Burden of Noncommunicable Diseases. PGDA Working Papers 8712, Program on the Global Demography of Aging. 2012. URL: https://ideas.repec.org/p/gdm/wpaper/8712.html

4. Pedersen BK, Saltin B. Exercise as medicine - evidence for prescribing exercise as therapy in 26 different chronic diseases. Scand J Med Sci Sports. 2015;25(S3):1-72. DOI: 10.1111/sms.12581

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

5. Booth FW, Roberts CK, Laye MJ. Lack of exercise is a major cause of chronic diseases. Compr Physiol. 2012;2(2):1143-1211. DOI: 10.1002/cphy.c110025.

6. Garber CE, Blissmer B, Deschenes MR, Franklin BA, Lamonte MJ, Lee IM, et al. American College of Sports Medicine position stand: Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: Guidance for prescribing exercise. Med Sci Sports Exerc. 2011;43(7):1334-1359. DOI: 10.1249/MSS.0b013e318213fefb.

7. Bouchard C, Rankinen T. Individual differences in response to regular physical activity. Med Sci Sports Exerc. 2001;53(6):1214-24. (6 Suppl): S446-51; discussion S452-3. DOI: 10.1097/00005768-200106001-00013

8. Ross R, Hanssen H, Boardman H, Deiseroth A, Moholdt T, Simonenko M, et al. Personalized exercise prescription for health and disease. Nat Rev Endocrinol. 2019;15(8):485-97. DOI: 10.1038/s41574-019-0224-2

9. Jiang F, Jiang Y, Zhi H, Dong Y, Li H, Ma S, et al. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. Stroke Vasc Neurol. 2017 Jun 21;2(4):230-43. DOI: 10.1136/svn-2017-000101

10. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. Nat Med. 2019;25(1):44-56. DOI: 10.1038/s41591-018-0300-7

11. Piwek L, Ellis DA, Andrews S, Joinson A. The rise of consumer health wearables. PLoS Med. 2016;13(2): e1001953. DOI: 10.1371/journal.pmed.1001953

12. Zhu H, Ji Y, Wang B, Kang Y. Exercise fatigue diagnosis method based on short-time Fourier transform and convolutional neural network. Front Physiol. 2022; 13:965974. DOI: 10.3389/fphys.2022.965974.

13. Chidambaram S, Maheswaran Y, Patel K, Sounderajah V, Hashimoto DA, Seastedt KP, et al. Using artificial intelligence-enhanced sensing and wearable technology in sports medicine and performance optimisation. Sensors (Basel). 2022;22(18):6920. DOI: 10.3390/s22186920.

14. Palermi S, Pucciatti R, Regnard NE, Guermazi A, Araujo F, Demeco A, et al. Artificial intelligence in sports medicine: a decision-centered framework for the future sports physician. Diagnostics (Basel). 2026;16(10):1448. DOI: 10.3390/diagnostics16101448.

15.An R, Shen J, Wang J, Yang Y. A scoping review of methodologies for applying artificial intelligence to physical activity interventions. J Sport Health Sci. 2024;13(2):223-238. DOI: 10.1016/j.jshs.2023.09.010.

16. Brennan L, Dorronzoro Zubiete E, Caulfield B. Feedback design in targeted exercise digital biofeedback systems for home rehabilitation: A scoping review. Sensors (Basel). 2020;20(1):181. DOI: 10.3390/s20010181.

17. Palermi S, Pucciatti R, Regnard NE, Guermazi A, Araujo F, Demeco A, et al. Artificial intelligence in sports medicine: a decision-centered framework for the future sports physician. Diagnostics (Basel). 2026;16(10):1448. DOI: 10.3390/diagnostics16101448.

18. Warburton DER, Nicol CW, Bredin SS. Health benefits of physical activity: the evidence. CMAJ. 2006;174(6):801-809. DOI: 10.1503/cmaj.051351

19. Green DJ, Hopman MTE, Padilla J, Laughlin MH, Thijssen DHJ. Vascular adaptation to exercise in humans: role of hemodynamic stimuli. Circulation. 2017;136(13):1244-55. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.117.018295.

20. Warburton DER, Bredin SSD. Health benefits of physical activity: a systematic review of current systematic reviews. Physiological reviews. 2017; 97(2):495-528. DOI: 10.1152/physrev.00014.2016

21. Hambrecht R, Fiehn E, Weigl C, Gielen S, Hamann C, Kaiser R, et al. Regular physical exercise corrects endothelial dysfunction and improves exercise capacity in patients with chronic heart failure. Circulation. 1998; 98(24):2709-15. DOI: 10.1161/01.CIR.98.24.2709

22. Anderson L, Thompson DR, Oldridge N, Zwisler AD, Rees K, Martin N, et al. Exercise-based cardiac rehabilitation for coronary heart disease: Cochrane systematic review and meta-analysis. Cochrane Database Syst Rev. 2016;2016(1):CD001800. DOI: 10.1002/14651858.CD001800.pub3

23. Richter EA, Hargreaves M. Exercise, GLUT4, and skeletal muscle glucose uptake. Physiol Rev. 2013;93(3):993-1017. DOI: 10.1152/physrev.00038.2012.

24. Holloszy JO. Exercise-induced increase in muscle insulin sensitivity. J Appl Physiol (1985). 2005;99(1):338-343. DOI: 10.1152/japplphysiol.00123.2005

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

25. Boström P, Wu J, Jedrychowski MP, Korde A, Ye L, Lo JC, et al. A PGC1-α-dependent myokine that drives brown-fat-like development of white fat and thermogenesis. Nature. 2012;481(7382):463-8. DOI: 10.1038/nature10777

26. Church TS, Blair SN, Cocreham S, Johannsen N, Johnson W, Kramer K, et al. Effects of aerobic and resistance training on hemoglobin A1c levels in patients with type 2 diabetes: a randomized controlled trial. Jama. 2010; 304(20):2253-62. DOI: 10.1001/jama.2010.1710

27. Fragala MS, Cadore EL, Dorgo S, Izquierdo M, Kraemer WJ, Peterson MD, et al. Resistance training for older adults: Position statement from the National Strength and Conditioning Association. J Strength Cond Res. 2019;33(8):2019-52. DOI: 10.1519/JSC.0000000000003230

28. Stanford KI, Middelbeek RJ, Townsend KL, An D, Nygaard EB, Hitchcox KM, et al. Exercise increases mitochondrial biogenesis and function in adipose tissue. Diabetes. 2015;64(6):2002-14. DOI: 10.2337/db14-0704

29. Heijnen S, Hommel B, Kibele A, Colzato LS. Neuromodulation of Aerobic Exercise-A Review. Front Psychol. 2016; 6:1890. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.01890.

30. Jones LW, Eves ND, Haykowsky M, Freedland SJ, Mackey JR. Exercise intolerance in cancer and the role of exercise therapy to reverse dysfunction. Lancet Oncol. 2009;10(6):598-605. DOI: 10.1016/S1470-2045(09)70031-2

31. Fairey AS, Courneya KS, Field CJ, Bell GJ, Jones LW, Mackey JR. Effects of exercise training on fasting insulin, insulin resistance, insulin-like growth factors, and insulin-like growth factor binding proteins in postmenopausal breast cancer survivors: a randomized controlled trial. Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention. 2003;12(8):721-7.URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12917202/

32. Hojman P, Gehl J, Christensen JF, Pedersen BK. Molecular mechanisms linking exercise to cancer prevention and treatment. Cell Metab. 2018;27(1):10-21. DOI: 10.1016/j.cmet.2017.09.015

33. Mustian KM, Alfano CM, Heckler C, Kleckner AS, Kleckner IR, Leach CR, et al. Comparison of pharmaceutical, psychological, and exercise treatments for cancer-related fatigue: a meta-analysis. JAMA Oncol. 2017;3(7):961-8. DOI: 10.1001/jamaoncol.2016.6914

34. Timmons JA. Variability in training-induced skeletal muscle adaptation. J Appl Physiol (1985). 2011;110(5):846-53. DOI: 10.1152/japplphysiol.00934.2010

35. Bouchard C, Blair SN, Church TS, Earnest CP, Hagberg JM, Häkkinen K, et al. Adverse metabolic response to regular exercise: is it a rare or common occurrence? PLoS One. 2012;7(5):e37887. DOI: 10.1371/journal.pone.0037887

36. Van Eetvelde H, Mendonça LD, Ley C, Seil R, Tischer T. Machine learning methods in sport injury prediction and prevention: a systematic review. J Exp Orthop. 2021; 8(1):27. DOI: 10.1186/s40634-021-00346-x

37. Bentley CL, Powell L, Potter S, Parker J, Mountain GA, Bartlett YK, et al. The use of a smartphone app and an activity tracker to promote physical activity in the management of chronic disease: systematic review. JMIR Mhealth Uhealth. 2020;8(11):e21778. DOI: 10.2196/16203

38. Wang L, Pedersen PC, Strong DM, Tulu B, Agu E, Ignotz R. Smartphone-based wound assessment system for patients with diabetes. IEEE Trans Biomed Eng. 2015;62(2):477-88. DOI: 10.1109/TBME.2014.2358632

39. Ferguson T, Olds T, Curtis R, Blake H, Crozier AJ, Dankiw K, et al. Effectiveness of wearable activity trackers to increase physical activity and improve health: a systematic review of systematic reviews and meta-analyses. Lancet Digit Health. 2022;4(8):e615-e626. DOI: 10.1016/S2589-7500(22)00111-X.

40. Ribeiro AH, Ribeiro MH, Paixão GM, Oliveira DM, Gomes PR, Canazart JA, et al. Automatic diagnosis of the 12-lead ECG using a deep neural network. Nat Commun. 2020;11(1):1760. DOI: 10.1038/s41467-020-15432-4

41. Islam SMR, Kwak D, Kabir MH, Hossain M, Kwak KS. The Internet of Things for health care: a comprehensive survey. IEEE Access. 2015;3:678-708. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2437951.

42. Alsubaei F, Abuhussein A, Shiva S. Security and privacy in the Internet of Medical Things: taxonomy and risk assessment. IEEE Access. 2017;7:183339-183354. DOI: 10.1109/LCN.Workshops.2017.72

43. Ristevski B, Chen M. Big data analytics in medicine and healthcare. J Integr Bioinform. 2018;15(3):20170030. DOI: 10.1515/jib-2017-0030.

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

44. Kim J, Campbell AS, de Ávila BEF, Wang J. Wearable biosensors for healthcare monitoring. Nat Biotechnol. 2019;37(4):389-406. DOI: 10.1038/s41587-019-0045-y.

45. Laver KE, Lange B, George S, Deutsch JE, Saposnik G, Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation. Cochrane Database Syst Rev. 2017;11(11):CD008349. DOI: 10.1002/14651858.CD008349.pub4.

46. Yardley JE, Hay J, Abou-Setta AM, Marks SD, McGavock J, Sigal RJ. A systematic review and meta-analysis of exercise interventions in adults with type 1 diabetes. Diabetes Res Clin Pract. 2014;106(3):393-400. DOI: 10.1016/j.diabres.2014.09.038.

47. Mirelman A, Rochester L, Maidan I, Del Din S, Alcock L, Nieuwhof F, et al. Addition of a non-immersive virtual reality component to treadmill training to reduce fall risk in older adults (V-TIME): a randomised controlled trial. Lancet. 2016;388(10050):1170-82. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)31325-3.

48. Maggio MG, De Luca R, Maresca G, Porcari B, Ferrera MC, Casella C, et al. Cognitive rehabilitation in multiple sclerosis through virtual reality: a systematic review. Mult Scler Relat Disord. 2016; 8:107-12. DOI: 10.1016/j.msard.2016.05.014.

49. Argent R, Daly A, Caulfield B. Patient involvement with home-based exercise programs: can connected health interventions influence adherence? JMIR Mhealth Uhealth. 2018;6(3):e47. DOI: 10.2196/mhealth.8518.

50. Larsen RT, Christensen J, Juhl CB, Andersen HB, Langberg H. Physical activity monitors to enhance amount of physical activity in older adults: a systematic review and meta-analysis. Eur Rev Aging Phys Act. 2019;16:7. DOI: 10.1186/s11556-019-0213-6

51. Price WN, Cohen IG. Privacy in the age of medical big data. Nat Med. 2019;25(1):37-43. DOI: 10.1038/s41591-018-0272-7.

52. Holzinger A, Carrington A, Müller H. Measuring the quality of explanations: the system causability scale (SCS). KI Künstl Intell. 2020;34(2):193-8. DOI: 10.1007/s13218-020-00636-z.

53. Kim D, Ahmed SS, Amjad A, Won K, Xian X. Integrating Artificial Intelligence with Wearable Sensors for Advanced Health Monitoring and Diagnosis. Biosensors (Basel). 2026 Jun 18;16(6):344. DOI: 10.3390/bios16060344.

54. Beam AL, Kohane IS. Big data and machine learning in health care. JAMA. 2018;319(13):1317-18. DOI: 10.1001/jama.2017.18391

55. Düking P, Holmberg HC, Sperlich B. Instant biofeedback provided by wearable sensor technology can help to optimize exercise and prevent injury and overuse. Front Physiol. 2017; 8:167. DOI: 10.3389/fphys.2017.00167. eCollection 2017.

56. Turksoy K, Quinn L, Littlejohn E, Cinar A. Multivariable adaptive closed-loop control of an artificial pancreas without meal and exercise announcement. Diabetes Technol Ther. 2013; 15(5):386-400. DOI: 10.1089/dia.2012.0283.

57. Ross R, Blair SN, Arena R, Church TS, Després JP, Franklin BA, et al. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: a case for fitness as a clinical vital sign. Circulation. 2016;134(24):e653-e699. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000461.

58. Esteva A, Robicquet A, Ramsundar B, Kuleshov V, DePristo M, Chou K, et al. A guide to deep learning in healthcare. Nat Med. 2019;25(1):24-29. DOI: 10.1038/s41591-018-0316-z.

59. Lopes DS, Parreira PDF, Paulo SF, Nunes V, Rego PA, Neves MC, Rodrigues PS, Jorge JA. On the utility of 3D hand cursors to explore medical volume datasets with a touchless interface. J Biomed Inform. 2017 Aug;72:140-149. DOI: 10.1016/j.jbi.2017.07.009.

60. Hannun AY, Rajpurkar P, Haghpanahi M, Tison GH, Bourn C, Turakhia MP, et al. Cardiologist-level arrhythmia detection with convolutional neural networks. Nat Med. 2019;25(1):65-69. DOI: 10.1038/s41591-018-0268-3.

61. An R, Shen J, Xiao Y. Applications of Artificial Intelligence to Obesity Research: Scoping Review of Methodologies. J Med Internet Res. 2022 Dec 7;24(12):e40589. DOI: 10.2196/40589.

62. Mercer K, Li M, Giangregorio L, Burns C, Grindrod K. Behavior change techniques present in wearable activity trackers: a critical analysis. JMIR Mhealth Uhealth. 2016;4(2):e40. DOI: 10.2196/mhealth.4461

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]

63. Myers J, Kokkinos P, Nyelin E. Physical activity, cardiorespiratory fitness, and the metabolic syndrome. Nutrients. 2019;11(7):1652. DOI: 10.3390/nu11071652

64. Rajpurkar P, Chen E, Banerjee O, Topol EJ. AI in health and medicine. Nat Med. 2022;28(1):31-8. DOI: 10.1038/s41591-021-01614-0

65. Steinhubl SR, Muse ED, Topol EJ. Can mobile health technologies transform health care? JAMA. 2015;313(5):459-460. DOI: 10.1001/jama.2014.14517

66. Seshadri DR, Drummond C, Craker J, Rowbottom JR, Voos JE. Wearable devices for sports: new integrated technologies allow coaches, physicians, and trainers to better understand the physical demands of athletes in real time. IEEE Pulse. 2017;8(1): 38-43. DOI: 10.1109/MPUL.2016.2627240.

67. Holzinger A, Biemann C, Pattichis CS, Kell DB. What do we need to build explainable AI systems for the medical domain?. arXiv preprint arXiv:1712.09923. 2017 Dec 28. DOI: 10.48550/arXiv.1712.09923

68. Raghupathi W, Raghupathi V. Big data in healthcare and medicine revisited design and managerial challenges in the age of artificial intelligence. Health Inf Sci Syst. 2026 Feb 6;14(1):38. DOI: 10.1007/s13755-026-00433-2.

69. Bini SA. Artificial intelligence, machine learning, deep learning, and cognitive computing: what do these terms mean and how will they impact health care? J Arthroplasty. 2018;33(8):2358-61. DOI: 10.1016/j.arth.2018.02.067.

70. American Diabetes Association Professional Practice Committee. 7. Diabetes technology: Standards of Care in Diabetes—2024. Diabetes Care. 2024;47(Suppl 1): S126-S144. DOI: 10.2337/dc24-S007.

71. Cameron F, Niemeyer G, Wilson DM, Bequette BW, Benassi KS, Clinton P, Buckingham BA. Inpatient trial of an artificial pancreas based on multiple model probabilistic predictive control with repeated large unannounced meals. Diabetes Technol Ther. 2014; 16(11):728-34. DOI: 10.1089/dia.2014.0093.

72. An R, Shen J, Wang J, Yang Y. A scoping review of methodologies for applying artificial intelligence to physical activity interventions. J Sport Health Sci. 2024;13(3):428-441. DOI: 10.1016/j.jshs.2023.09.010

73. Zhao L, Leng J, Zhao C, Cui J. Biological mechanisms of different exercise modalities in improving sleep disorders: A review. IBRO Neurosci Rep. 2026; 21:433-440. DOI: 10.1016/j.ibneur.2026.07.023.

74. Valenzuela T, Okubo Y, Woodbury A, Lord SR, Delbaere K. Adherence to technology-based exercise programs in older adults: a systematic review. J Geriatr Phys Ther. 2018;41(1):49-61. DOI: 10.1519/JPT.0000000000000095

75. Mounsey LA. Exercise training in heart failure: clinical benefits and digital transformation. Circ Res. 2025; 137(2): 273-89. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.124.325533.

76. Jones LW, Eves ND, Haykowsky MJ, Freedland SJ, Mackey JR. Exercise intolerance in cancer and the role of exercise therapy to reverse dysfunction. Lancet Oncol. 2009; 10(6):598-605. DOI: 10.1016/S1470-2045(09)70031-2.

77. Abusamaan MS. Effectiveness of AI vs human coaching in digital diabetes prevention trial. Trials. 2024;(1):325. DOI: 10.1186/s13063-024-08177-8.

78. Hojman P, Gehl J, Christensen JF, Pedersen BK. Molecular mechanisms linking exercise to cancer prevention and treatment. Cell Metab. 2018;27(1):10-21. DOI: 10.1016/j.cmet.2017.09.015.

79. Peake JM, Kerr G, Sullivan JP. A critical review of consumer wearables, mobile applications, and equipment for providing biofeedback, monitoring stress, and sleep in physically active populations. Front Physiol. 2018; 9:743. DOI: 10.3389/fphys.2018.00743

80. Sherrington C, Fairhall NJ, Wallbank GK, Tiedemann A, Michaleff ZA, Howard K, et al. Exercise for preventing falls in older people living in the community. Cochrane Database Syst Rev. 2019; 31(1): CD012424. DOI: 10.1002/14651858.CD012424.pub2.

[DOI: 10.66224/JBUMS.33.25]