پژوهش‌نامهٔ فیزیولوژی ورزشی کاربردی **مقاله مروری**
سال بیستم/ شماره چهل/پاییز و زمستان ۱۴۰۳

دریافت: ۱۴۰۴/۳/۱۸ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۱۹ ص ص:۹۶-۸۱

مروری بر تأثیر تعاملات ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی در تنظیم متابولیسم و تعیین نیازهای تغذیه‌ای ورزشکاران نخبه: مکانیسم‌های مولکولی و پیامدهای عملکردی

معرفت سیاهکوهیان [۱]، نرگس یزدان نسب [۲]، سیده زینب پرندک [۳]، زهرا حرمتی اوغول بیگ [۴]، امیرحسین حرمتی اوغول بیگ [۵]

چکیده

اهداف: عملکرد ورزشی نخبه حاصل تعامل پیچیده بین ژنتیک، اپی‌ژنتیک و تغذیه است. ژن‌ها مسیرهای متابولیکی را کنترل می‌کنند و عوامل اپی‌ژنتیکی مانند متیلاسیون DNA وmiRNA ها، تحت تأثیر سبک زندگی، بر بیان ژن‌ها اثر می‌گذارند. این مطالعه با هدف مرور شواهد علمی مرتبط با نقش این تعاملات در تنظیم متابولیسم و تعیین نیازهای تغذیه‌ای ورزشکاران نخبه، جهت زمینه‌سازی طراحی برنامه‌های تغذیه‌ای و تمرینی شخصی‌سازی‌شده انجام شد.

روش مطالعه: این پژوهش به‌صورت مرور سیستماتیک انجام شد. مقالات فارسی و انگلیسی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ با استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط با ژنتیک، اپی‌ژنتیک و تغذیه ورزشی در پایگاه‌هایPubMed ، Scopus، Web of Scienceو Google Scholar جست‌وجو شدند. پس از غربالگری و ارزیابی کیفیت با پرسشنامه دان‌وبلک، ۱۴ مقاله برای تحلیل نهایی انتخاب شد.

یافته‌ها: نتایج نشان دادند که پلی‌مورفیسم‌های ژنی، متیلاسیون DNA وmiRNA ها نقش کلیدی در تنظیم متابولیسم، پاسخ تغذیه‌ای و عملکرد ورزشی دارند. ترکیب رژیم غذایی با ورزش می‌تواند مسیرهای اپی‌ژنتیکی را تعدیل کرده و سلامت متابولیک را بهبود بخشد. شواهدی از اثربخشی رژیم‌های شخصی‌سازی‌شده بر اساس ژنتیک فرد در ارتقاء عملکرد و پیشگیری از اختلالات متابولیکی به‌دست آمد. نقش میکروبیوتای روده، مکمل‌های هدفمند وmiRNA ها در طراحی مداخلات شخصی نیز برجسته بود.

نتیجه گیری: استفاده از داده‌های ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی، راهی نوین برای تدوین برنامه‌های دقیق، شخصی‌سازی‌شده و مبتنی بر شواهد در تغذیه ورزشی فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اپی‌ژنتیک، تنظیم متابولیسم، عملکرد ورزشکاران نخبه، نوتریژنومیکس، تغذیه ورزشی

[۱] استاد گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران نویسنده مسئول: m_siahkohian@uma.ac.ir
[۲] دانشجوی دکتری گروه زیست شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[۴] دانشجوی کارشناسی ارشد گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[۵] دانشجوی دکتری گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مقدمه

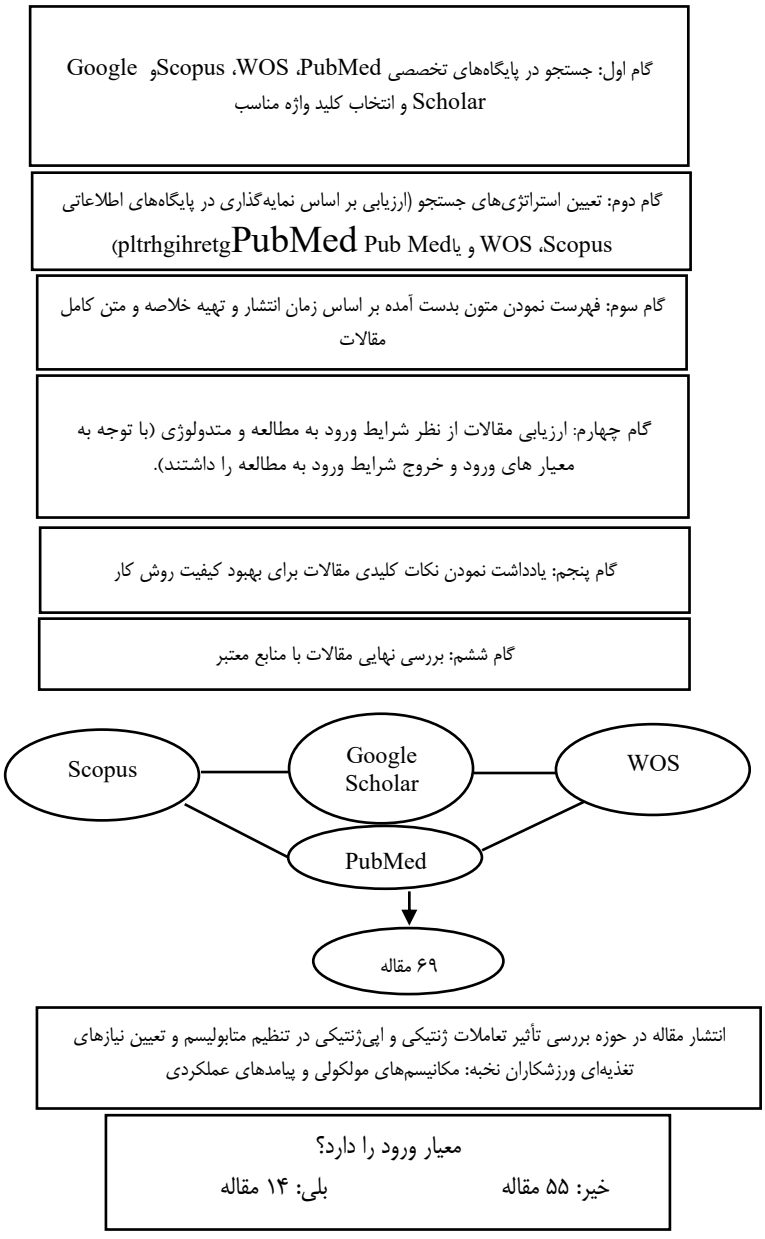
تنظیم متابولیسم بدن انسان تحت تأثیر شبکه‌ای پیچیده از عوامل ژنتیکی، اپی‌ژنتیکی و محیطی است که در کنار یکدیگر نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ سلامت، بهبود عملکرد بدن و میزان خطر ابتلا به بیماری‌ها دارند (Barati et al. 2022). در سال‌های اخیر، مجموعه‌ای رو به رشد از پژوهش‌ها، ابعاد پیچیده‌ای تعاملات مولکولی میان ژنوم و عوامل سبک زندگی قابل تغییر همچون رژیم غذایی و فعالیت بدنی را روشن ساخته‌اند (Li and Qi 2019; Szczechla et al. 2023). مکانیسم‌های اپی‌ژنتیکی از متیلاسیون DNA و اصلاحات هیستونی تا تنظیم RNAهای غیرکدکننده بیان ژن‌ها را بدون دستکاری توالی DNA به‌گونه‌ای پویا و انعطاف‌پذیر کنترل می‌کنند و تعیین می‌کنند کدام ژن‌ها، چه زمانی و با چه شدتی فعال یا غیرفعال شوند؛ فرایندی که به ارگانیسم‌ها امکان می‌دهد در برابر وضعیت‌های تغذیه‌ای، تقاضاهای انرژی و فشارهای فیزیولوژیکی سازگاری لازم را پیدا کنند (Kumar and Rani 2023; Xu et al. 2024). این فرایندها در ورزشکاران نخبه از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، چرا که کارایی متابولیکی، توانایی ریکاوری و نتایج عملکردی آن‌ها به طور نزدیک با تعاملات دقیق و تنظیم شده میان ژن و محیط مرتبط است. درک این تعاملات، چشم‌اندازهای امیدبخشی برای توسعه راهبردهای تمرینی و تغذیه‌ای شخصی‌سازی شده، متناسب با ویژگی‌های ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی هر فرد فراهم می‌سازد. در زمینه عملکرد ورزشی نخبه که در آن نیازهای متابولیکی به طور چشمگیری بالا است، تنظیم تعادل انرژی، استفاده از مواد مغذی و فرایند ریکاوری به طور حیاتی به ویژگی‌های ژنتیکی موروثی و مکانیسم‌های اپی‌ژنتیکی پاسخگو به محیط وابسته می‌شود (Silva et al. 2022). اجزای تغذیه‌ای از جمله ماکرونوترینت‌ها، میکرونوترینت‌های خاص و ترکیبات زیست فعال موجود در رژیم غذایی می‌توانند از طریق فرآیندهای اپی‌ژنتیکی، بیان ژن‌ها را تغییر دهند، در حالی که تمرینات منظم و شدید نیز این مسیرهای تنظیمی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Ramos-Lopez et al. 2022). شواهد نوین نشان می‌دهند که هم‌افزایی میان فعالیت ورزشی و تغذیه هدفمند، موجب تعدیل مسیرهای مولکولی کلیدی مرتبط با افزایش ظرفیت میتوکندریایی سلول (Mitochondrial Biogenesis)، بهبود فرآیندهای تولید انرژی وابسته به اکسیژن (Oxidative Metabolism) و تنظیم پاسخ‌های التهابی می‌شود. در ورزشکاران نخبه، این سازوکارهای اپی‌ژنتیکی می‌توانند با ارتقای بهره‌وری فیزیولوژیکی، تسریع بازسازی سلولی و کاهش خطر اختلالات متابولیکی، به ایجاد یک مزیت رقابتی پایدار منجر شوند (Roberts and Markby 2021; San-Millan et al. 2020). این یافته‌ها بر اهمیت به‌کارگیری بینش‌های ژنومی و اپی‌ژنومی در طراحی برنامه‌های تمرینی و تغذیه‌ای فردمحور تأکید دارند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که برخی واریانت‌های ژنتیکی خاص از جمله آن‌هایی که با گیرنده‌های فعال‌شونده با پرواکسی‌زوم (PPARs) و آنزیم‌های میتوکندریایی مرتبط هستند. نحوه استفاده از مواد مغذی، ظرفیت استقامتی و میزان آسیب‌پذیری نسبت به تنش‌های متابولیکی در ورزشکاران نخبه اثرگذارند (Mujika, Sharma, and Stellingwerff 2019). با این حال، شواهد فزاینده‌ای نشان می‌دهد که این زمینه‌های ژنتیکی به‌تنهایی عمل نمی‌کنند. تغییرات اپی‌ژنتیکی نظیر متیلاسیونDNA ، استیلاسیون هیستون، و فعالیتRNA های غیرکدکننده تنظیمی همچونmiRNA ها به‌عنوان پل‌های مولکولی عمل کرده و ورودی‌های محیطی را به تنظیم بیان ژن متصل می‌سازند (Adithya, Balagangadharan, and Selvamurugan 2022; Xu, Liu, and Li 2022a). این مکانیسم‌ها نسبت به الگوهای تغذیه‌ای، شدت و حجم تمرین، و وضعیت متابولیکی بسیار حساس هستند و امکان بازبرنامه‌ریزی پویا و انعطاف‌پذیر مسیرهای متابولیکی را فراهم

می‌کنند. در جمعیت‌های ورزشی نخبه، این نوع سازگاری‌ها می‌توانند زیربنای تفاوت‌های اساسی در کارایی مصرف سوخت، مقاومت در برابر استرس اکسیداتیو، و نیازهای تغذیه‌ای فردی باشند؛ عواملی که مستقیماً بر اثربخشی تمرین و پایداری عملکرد بلندمدت تأثیرگذارند (Mujika, Sharma, and Stellingwerff 2019). با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در درک نقش‌های مجزای ژنتیک، اپی‌ژنتیک و تغذیه در تنظیم متابولیسم، همچنان شکاف قابل‌توجهی در فهم جامع و هم‌افزای نحوه تعامل این عوامل در درون بدن ورزشکاران نخبه وجود دارد (Zentgraf, Musculus, Reichert, Will, Roffler, Hacker, Hilpisch, Wiedenbrug, et al. 2024). پیچیدگی تغییرات اپی‌ژنتیکی فراتر از متیلاسیون DNA همچون اصلاحات هیستونی و تنظیمRNA های غیرکدکننده و تأثیرات خاص آن‌ها بر متابولیسم مواد مغذی و سازگاری با تمرین، هنوز به‌طور کامل شناسایی و تبیین نشده‌اند. افزون بر این، ترجمه این دانش مولکولی به راهبردهای تغذیه‌ای عملی که متناسب با ساختار ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی منحصر به فرد هر ورزشکار طراحی شده باشد، همچنان تا حد زیادی دست نخورده باقی مانده است (Abdelaziz et al. 2023a). پرداختن به این خلأها برای بهره‌برداری کامل از ظرفیت تغذیه شخصی‌سازی‌شده و بهینه‌سازی سلامت متابولیکی و عملکرد ورزشی در جمعیت‌های ورزشی با نیازهای بالا، امری ضروری و راهبردی است. این مرور با هدف مرور سیستماتیک شواهد موجود در زمینه مکانیسم‌های مولکولی حاکم بر تعاملات ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی انجام می‌شود؛ تعاملاتی که تنظیم متابولیسم و تعیین نیازهای تغذیه‌ای در ورزشکاران نخبه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

روش‌شناسی تحقیق

این پژوهش از نوع مطالعه مروری سیستماتیک بوده و به تحلیل مطالعات منتشرشده در زمینه ارتباط ژنتیک، اپی‌ژنتیک و تغذیه با سلامت و عملکرد ورزشی می‌پردازد. جستجوی مقالات به زبان فارسی و انگلیسی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ بود، که در پایگاه‌های PubMed، Scopus، Google Scholar و Web of Science نمایه شده بودند، علاوه براین برای جستجوی مقالات از کلید واژه‌های مرتبط مانند Epigenetic inducers, lncRNA, miRNA, circRNA, SIRT1–SIRT7, PGC-1α, Glucose metabolism, Lipid metabolism, Protein metabolism استفاده شد. بررسی مقالات از طریق چکیده، مقدمه و نتایج و انتخاب مطالعات مرتبط صورت گرفت که تجزیه و تحلیل محتوای مطالعات با استفاده از رویکرد کیفی و رویکرد مقایسه‌ای صورت گرفت و طی بررسی، شباهت‌ها و تفاوت‌های یافته‌ها در مقالات مختلف صورت گرفت، علاوه براین استخراج نتایج کلیدی مرتبط با مکانیسم‌های ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی تأثیرگذار بر تغذیه و عملکرد ورزشی میسر شد. معیارهای ورود و خروج مطالعه عبارتند از ۱_ مطالعات مروری، مطالعات تجربی، و مطالعات مشاهده‌ای مرتبط باشند. ۲_ مقالات چاپ شده در ژورنال‌هایی با ضریب تأثیر بالا و نمایه شده در پایگاه‌های معتبر باشند. ۳_مطالعات در حیطه تحقیقات مرتبط با نقش تغذیه، اپی‌ژنتیک و ژنتیک و عملکرد ورزشی باشند. ۴_ در صورت محدودیت در دسترسی به فول‌تکست مطالعه از روند مطالعه حذف شدند. سرانجام ۶۹ عنوان مقاله براساس کلید واژه ها بدست آمد. و پس از بررسی های دقیق وهمچنین استفاده از پرسشنامه دان‌وبلک برای سنجش کیفیت مقالات وسرانجام ۱۴ عنوان مقاله باکیفیت در خصوص تأثیر تعاملات ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی در تنظیم متابولیسم و تعیین نیازهای تغذیه‌ای ورزشکاران نخبه: مکانیسم‌های مولکولی و پیامدهای عملکردی انتخاب شد و مورد بررسی محققان قرار گرفت (شکل ۱). مطالعات وارد شده بر اساس پرسشنامه کیفیت سنجی Black و Downs قرار

گرفتند (Downs and Black 1998). این پرسشنامه ۲۷ سوال دارد که مجموع نمرات ۳۲ می‌باشد. طبق این پرسشنامه میانگین نمره کیفیت مقالات مورد بررسی ۷۱.۴۲ گزارش شد (جدول ۲).



شکل۱: نحوه بررسی کیفیت مقالات

نتایج

از ۶۹ مقاله، ۱۴ مقاله در خصوص بررسی تأثیر تعاملات ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی در تنظیم متابولیسم و تعیین نیازهای تغذیه‌ای ورزشکاران نخبه، مکانیسم‌های مولکولی و پیامدهای عملکردی بود (جدول ۱). در یک مطالعه بررسی شد که نوع رژیم غذایی، مواد مغذی مصرفی، و سبک تغذیه‌ای در کودکان و نوجوانان می‌تواند مکانیسم‌های اپی‌ژنتیکی را تنظیم کرده و بیان ژن‌ها و مسیرهای ژنی را تحت تأثیر قرار دهد (Xu, Liu, and Li 2022b). بررسی تأثیر متقابل اپی‌ژنتیک، ورزش، و تغذیه در بیماری‌های متابولیک نشان داد که، ورزش منظم می‌تواند سلامت متابولیک را تقویت کرده و مقاومت به انسولین را کاهش دهد. این یافته‌ها بر پتانسیل ورزش به‌عنوان یک مداخله غیر دارویی در مدیریت بیماری‌های متابولیک تأکید دارند (Zentgraf, Musculus, Reichert, Will, Roffler, Hacker, Hilpisch, Wiedenbrüg, et al. 2024). دو مطالعه‌ی دیگر (Downs and Black 1998; Abraham et al. 2023) نشان داد که اجزای رژیم غذایی، در کنار فعالیت‌های ورزشی، می‌توانند از طریق تغییرات در متیلاسیون DNA و بیان ژن، برنامه‌ریزی مجدد اپی‌ژنتیکی را تسهیل کرده و بیماری‌های متابولیک را بهبود بخشند. این نتایج بر اهمیت رویکردهای ترکیبی تغذیه و ورزش در مدیریت سلامت تأکید دارند. در حوزه عملکرد ورزشی، مطالعه‌ای (Gkiouleka et al. 2025) بر نقش متابولومیک تغذیه در میکروبیوتای روده متمرکز شد و نتیجه گرفت که استراتژی‌های رژیم غذایی روده‌محور، مانند مصرف فیبر و مکمل‌های پروبیوتیک، می‌توانند سلامت و عملکرد ورزشکاران را بهینه کنند. این مطالعه بر ارتباط بین میکروبیوتای روده و پاسخ‌های متابولیکی تأکید دارد که به‌عنوان یک حوزه نوظهور در تغذیه ورزشی شناخته می‌شود. در مطالعه‌ی دیگری مداخلات تغذیه‌ای، از جمله رژیم‌های تقلید ناشتا و ترکیبات زیست‌فعال، می‌توانند نشانه‌های اپی‌ژنتیکی را تعدیل کرده و هموستاز متابولیک را در بیماری‌های مزمن و پیری بهبود بخشند. این یافته‌ها کاربرد گسترده‌تر تغذیه در مدیریت شرایط مرتبط با افزایش سن را نشان می‌دهند (Suleman et al. 2024). در زمینه چاقی، مطالعه‌ای به بررسی تعاملات تغذیه‌ای–ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی پرداخت و نشان داد که عوامل ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی بر حساسیت به چاقی و پیامدهای آن تأثیر می‌گذارند (Ishikawa VN et al. 2023). مطالعه‌ای نیازهای تغذیه‌ای ورزشکاران استقامتی را بررسی کرد و نشان داد که استراتژی‌های تغذیه‌ای بهینه می‌توانند عملکرد را بهبود بخشند، هرچند خطر عدم تعادل تغذیه‌ای همچنان یک چالش باقی می‌ماند (Maciejewska-Skrendo et al. 2022). همچنین، مطالعه‌ای با تمرکز بر ژن‌های رمزگذار گیرنده‌های فعال‌کننده تکثیر پراکسی‌زوم (PPAR) و هم‌فعال‌کننده‌های آن‌ها نشان داد که، مداخلات ورزشی می‌توانند با توجه به آلل‌های خاص ژنتیکی، اثربخشی متابولیسم مواد مغذی و انرژی را بهبود بخشند (Li and Qi 2022). مقاله‌ای با تحلیل داده‌های ۴۰۰ ورزشکار نشان داد که تعاملات ژن–رژیم غذایی بر عملکرد ورزشی، نرخ‌های بازیابی، و سطوح استقامت تأثیر می‌گذارند. با این حال، این مطالعه به محدودیت‌هایی مانند تکیه بر داده‌های ثانویه اشاره کرد که ممکن است درک جامع را محدود کند (Abdelaziz et al. 2023b). به‌طور مشابه، دو مطالعه بر استراتژی‌های تغذیه شخصی برای ورزشکاران متمرکز شد و نتیجه گرفت که مکمل‌های ماکرو و میکرومغذی‌ها، هنگامی که بر اساس نیازهای فردی طراحی شوند، می‌توانند عملکرد ورزشی را بهبود بخشند. این یافته‌ها بر اهمیت تطبیق تغذیه با ویژگی‌های فردی ورزشکاران تأکید دارند (Gomez de Cedron and Ramírez de Molina 2023; Krammer et al. 2022). مقاله‌ی دیگری با تجزیه‌وتحلیل نشانگرهای miRNA در خون مویرگی، مفهوم «نمره تناسب اندام» مبتنی بر miRNA را معرفی کرد. این نمره قادر است

پاسخ‌های فردی به رژیم غذایی، متابولیسم، و ورزش را ارزیابی کرده و به‌عنوان ابزاری غیرتهاجمی برای شخصی‌سازی مداخلات تغذیه‌ای و ورزشی مورد استفاده قرار گیرد (Ramos-Lopez, Riezu-Boj, and Milagro 2022). در نهایت در حوزه ژنومیک ورزشی، مطالعه‌ای (Karlic, Krammer, and Haslberger 2022) با استفاده از مطالعات انجمن ژنومی گسترده (GWAS) و توالی نسل بعدی نشان داد که تنوع ژنتیکی بر فنوتیپ‌های عملکرد ورزشی، از جمله اسپرینت، قدرت، و استقامت، و همچنین خطر آسیب تأثیر می‌گذارد.

جدول ۱: خلاصه مطالعات بررسی‌شده

نویسندگان، نام مجله و سال انتشار	نام مطالعه	نوع و روش مطالعه	متغیرمستقل	متغیر وابسته	نتایج	محدودیت
گکیولکا و همکاران Children ۲۰۲۵ (Gkiouleka et al. 2025)	نقش اپی‌ژنتیکی تغذیه در کودکان و نوجوانان	مروری، یک بررسی سیستماتیک بر اساس موارد گزارش‌شده ترجیحی برای بررسی‌سیستماتیک و دستورالعمل‌های متاآنالیز در پنج پایگاه داده (PubMed، Cochrane، Science Direct، Scopus، و Google Scholar)	تغذیه (نوع رژیم غذایی، مواد مغذی مصرفی، سبک تغذیه‌ای)	تغییرات اپی‌ژنتیکی و تأثیر آن بر سلامت و رشد کودکان و نوجوانان	تأثیر مهم رژیم غذایی بر تنظیم مکانیسم‌های اپی ژنتیک و بیان ژن‌ها و مسیرهای ژنی مختلف می‌تواند برای مداخلات تغذیه‌ای شخصی در شرایط مختلف سلامت کودکان مورد استفاده قرار گیرد.	–
لیانگ و همکاران Journal ISSN ۲۰۲۴ (Gkiouleka et al. 2025)	نقش متقابل اپی‌ژنتیک، ورزش و تغذیه در بیماری‌های متابولیک	مروری، بررسی تأثیر متقابل اپی ژنتیک، ورزش و تغذیه. بحث در مورد التهاب و مکانیسم های بیماری متابولیک.	تغییرات اپی ژنتیک ورزش کنید تغذیه	–	اپی ژنتیک، ورزش و تغذیه بر بیماری های متابولیک تأثیر می گذارد. ورزش منظم سلامت متابولیک و مقاومت به انسولین را بهبود می بخشد.	–
سلیمان و همکاران Journal of Health and Rehabilitation Research ۲۰۲۴ (Suleman et al. 2024)	نقش نوتریژنومیکس در عملکرد ورزشی: مروری کمی بر تعاملات ژن–رژیم غذایی	مروری، طرح تحقیق کمی با تجزیه و تحلیل داده های ۴۰۰ ورزشکار. تجزیه و تحلیل های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS: توصیفی، همبستگی، رگرسیون و تحلیل عاملی.	تنوع ژن در مقیاس ۱ تا ۳ کدگذاری شده است نوع رژیم کدگذاری شده در مقیاس ۱ تا ۳	نمرات عملکرد ورزشی نرخ های بازیابی سطوح استقامتی	تغذیه و رویکردهای تمرینی فردی ضروری است. تحقیقات بیشتری در مورد عوامل ژنتیکی و رژیم غذایی مورد نیاز است.	تکیه بر داده های ثانویه درک جامع را محدود می کند. محدوده محدودی از عوامل ژنتیکی و غذایی در نظر گرفته شده است.
آبراهام و همکاران Biomolecules ۲۰۲۳ (Abraham et al. 2023)	بازیابی برنامه‌ریزی مجدد اپی‌ژنتیک با رژیم غذایی و ورزش برای بهبود بیماری‌های متابولیک مرتبط با سلامت	مروری، اجزای رژیم غذایی و ورزش به عنوان استراتژی های درمانی. برنامه ریزی مجدد اپی ژنتیک از طریق تغذیه و فعالیت بدنی.	اجزای رژیم غذایی فعالیت های ورزشی	سطوح متیلاسیون DNAدر بافت عضلانی فعالیت بیان ژن پس از ورزش	رژیم غذایی و ورزش راهبردهای اپی ژنتیکی درمانی برای سلامتی هستند. چشم اندازهای آینده بالقوه در رژیم غذایی و ورزش برای درمان بیماری.	اندازه نمونه و تغییرات جمعیت قومی. مداخله های مختلف ورزشی و تغییرات اپی ژنتیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

ایشیکاوا و همکاران International Journal of Nutrology. ۲۰۲۳ (Ishikawa et al. 2023)	جنبه‌های اصلی متابولیک و متابولومیک تغذیه در میکروبیوتای روده و عملکرد ورزشی: یک بررسی سیستماتیک	مروری، قوانین پلتفرم PRISMAبرای بررسی سیستماتیک. ترکیبی از کلمات کلیدی و عملگرهای بولی	ترکیب و عملکرد میکروبیوتا روده راهبردهای تغذیه ای و مداخله های غذایی	ترکیب میکروبیوتا روده و سلامت معیارهای عملکرد ورزشی و نتایج	استراتژی های رژیم غذایی روده محور برای عملکرد بهینه ورزشی مهم هستند. مصرف کافی فیبر غذایی و مکمل های پیش، پرو و و سینبیوتیک می تواند سلامت و عملکرد ورزشکاران را بهینه کند.	۵۲ مطالعه خطر سوگیری بالایی داشتند. ۷۴ مطالعه مطابق با درجه نبود.
گومز و همکاران Frontiers in Oncology ۲۰۲۳ Gómez de Cedrón,) Moreno Palomares, and Ramírez de Molina (2023)	تعامل متابولیک–اپی‌ژنتیک، مداخلات تغذیه‌ای هدفمند را در بیماری‌های مزمن و پیری فراهم می‌کند.	مروری، مداخله های تغذیه ای: رژیم های تقلید ناشتا، مواد غذایی، ترکیبات زیست فعال ورزش به عنوان روشی برای مقابله با تغییرات اپی ژنتیکی	مداخله های تغذیه ای: رژیم غذایی، ترکیبات زیست فعال، مواد مغذی شدت و نوع ورزش	تغییر بیان ژن به دلیل تغییرات اپی ژنتیکی. وضعیت متابولیک و اثرات مداخله های غذایی.	اصلاحات اپی ژنتیکی در بیماری‌های مزمن و پیری نقش دارند. مداخله‌های تغذیه‌ای می‌تواند نشانه‌های اپی ژنتیکی را تعدیل کند و هموستاز متابولیک را	تنظیم نامتعادل عوامل نظارتیm6A تغییر مشخصات متابولوم در طول پیری به تغییرات اپی ژنتیکی کمک می کند.
لی و همکاران Journal of Personalized Medicine ۲۰۲۲ (Li and Qi 2022)	اپی‌ژنتیک در تغذیه دقیق	مروری، اینفینیوم انسانمتیلاسیون ۴۵۰ BeadChipدر سراسر ژنوم. اعتبار سنجی توسط سکوینوم اپیتیپر ماسآرایه	آرایه جزیره CpG 8.1 K انسانی در سراسر ژنوم مداخله کاهش وزن ۱ ساله (رژیم کاهش وزن و ورزش)	سطوح متیلاسیون DNA واکنش به عوامل رژیم غذایی و سبک زندگی	تغییرات اپیژنتیک، به ویژه متیلاسیون DNA، بر تغییرات سلامت متابولیک تأثیر می گذارد. اپی ژنتیک نشانگرها و اهداف بالقوه برای مداخله های تغذیه دقیق ارائه می دهد.	تحقیقات اپیژنوم تا حد زیادی در تغذیه دقیق نادیده گرفته می شود. اندازه نمونه کوچک برخی از یافته های مطالعه را محدود می کند.
لوپز و همکاران Nutrition & Metabolic Care ۲۰۲۲ Ramos-Lopez, Riezu-) (Boj, and Milagro 2022	تعاملات تغذیه‌ای ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی مؤثر بر خطر چاقی و پیامدهای چاقی	مروری، مروری بر عوامل ژنتیکی/اپی ژنتیکی و جنبه های تغذیه ای. تجزیه و تحلیل تعاملهای بین مصرف اپیژنوم و رژیم غذایی.	عوامل ژنتیکی: پلی مورفیسم‌های تک نوکلئوتیدی مرتبط با چاقی. جنبه های تغذیه‌ای: الگوهای غذایی و مصرف مواد مغذی.	وزن بدن و شاخص توده بدنی دور کمر و درصد چربی بدن	عوامل ژنتیکی و اپی ژنتیکی بر حساسیت چاقی و پیامدهای چربی تأثیر می گذارد. درک این تعاملها می تواند در مدیریت چاقی و درمان های تغذیه شخصی کمک کند.	اصلاحات هیستون کووالانسی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. روابط بیشتر با نشانگرهای دقیق تضمین شده است.
کارلیچ و همکاران Functional Food Science-Online ISSN ۲۰۲۲ Karlic, Krammer, and) (Haslberger 2022	مکمل‌های غذایی برای ورزشکاران و شخصی‌سازی؛ مروری کوتاه	مروری، این مقاله به بحث استراتژی های تغذیه شخصی بر اساس نیازهای فردی می پردازد. این مقاله به ایجاد «نمره تناسب اندام» مبتنی بر miRNA برای ارزیابی پاسخ فرد به رژیم غذایی، متابولیسم و ورزش اشاره می کند.	–	–	استراتژی های تغذیه شخصی و غذاهای کاربردی برای ورزشکاران مهم هستند. مکمل های ماکرومغذی و ریز مغذی می توانند بر اساس نیازهای فردی برای ورزشکاران مفید باشند.	دوزهای خاص مورد نیاز برای مکمل های ریز مغذی بر اساس نیازهای فردی. توجه دقیق مورد نیاز برای فرمولاسیون نوشیدنی های ورزشی و غذاهای ورزشی.

ماسیجوسکا-اسکرندو و همکاران Nutrients ۲۰۲۲ (Maciejewska-Skrendo et al. 2022)	تأثیر تمایز ژن‌های کدکننده گیرنده‌های فعال‌کننده تکثیر پراکسیزوم و فعال‌کننده‌های کمکی آنها بر متابولیسم مواد مغذی و انرژی	مروری، مرور ادبیات در مورد ژنهای رمزگذار کننده PPAR و همفعال کننده های آنها. تحلیل آلل های خاص در ژنهای PPARو خصوصیات انسان	انواع ژنتیکی در ژنهایPPAR مداخله های تغذیه ای و مداخله ورزشی	اثربخشی متابولیسم مواد مغذی و انرژی خصوصیات بدن مرتبط با مداخله های غذایی	آلل های خاص در ژن های PPAR با ویژگی های بدن انسان بسیار مهم برای مداخله های تغذیه ای و ورزشی مرتبط هستند. آزمایش ژنتیکی میتواند کار متخصصان تغذیه و مربیان را در برنامه ریزی رژیم های غذایی و آموزش شخصی تکمیل کند.	آزمایش ژنتیکی برای رژیم های غذایی شخصی هنوز در حال توسعه است. اهمیت عملکردی بسیاری از انواع چندمورفیک ناشناخته است.
کارامر و همکاران Journal of the International Society of Sports Nutrition ۲۰۲۲ (Krammer et al. 2022)	نمره تناسب اندام» مبتنی بر miRNA برای ارزیابی پاسخ فرد به رژیم غذایی، متابولیسم و ورزش	مطالعه تجربی، تجزیه و تحلیل نشانگرهای ژنتیکی و اپی ژنتیکی در خون مویرگی. بررسی پرسشنامه های مصرف غذا و سلامت.	مدت زمان مداخله تمرینی ورزشی ۱۲ هفته تجزیه و تحلیل نشانگرهای زیستی ژنتیکی و اپی ژنتیکی	سطوح بیان miRNA های خاص نمره تناسب اندام بر اساس عوامل سبک زندگی	تجزیه و تحلیل بیومارکر ترکیبی نشان دهنده تناسب اندام فردی و نیازهای تغذیه ای است. میRNA ها را می توان به حداقل تهاجمی اندازه گیری کرد.	–
گینویچین و همکاران Biomedicines ۲۰۲۲ (Ginevičienė et al. 2022)	دیدگاه‌ها در ژنومیک ورزشی	مروری، GWAS مبتنی بر آرایه SNP برای شناسایی تنوع ژنتیکی. توالی نسل بعدی برای مطالعات تجزیه و تحلیل عملکردی.	–	فنوتیپ های عملکرد ورزشی: اسپرینت، قدرت، استقامت. ریسک آسیب و معیارهای پیشگیری.	ژنتیک بر عملکرد ورزشی و خطر آسیب تأثیر می گذارد.رویکردهای چندگانه از تجزیه و تحلیل عملکرد و طب ورزشی شخصی پشتیبانی می کنند.	چالش ماهیت پلی ژنی در صفات مرتبط با ورزش. دوپینگ ژنی و مرگ ناگهانی در طول رویدادهای ورزشی برجسته شده است.
روسو و همکاران Cahiers de Nutrition et de Diététique ۲۰۲۲ (Rousseau 2022)	تغذیه، سلامت و عملکرد ورزشکاران استقامتی	مروری، این مقاله به بررسی نیازهای تغذیه ای و اثرات سلامتی ورزشکاران استقامتی می پردازد. این مقاله به بررسی مکانیسم های مولکولی دخیل در پاسخ تطبیقی به ورزش می پردازد.	–	–	توصیه‌های تغذیه‌ای برای ورزشکاران استقامتی پیچیده و اغلب متفاوت است. استراتژیهای بهینه‌سازی تغذیه‌ای می تواند ورزشکاران را در معرض عدم تعادل تغذیه ای	دیدگاه های متفاوتی و مشاوره از متخصصان خطر عدم تعادل تغذیه ای و در دسترس بودن کم انرژی

هولزاپفل و همکاران Molecular Nutrition & Food Research ۲۰۲۲ (Holzapfel et al. 2022)	ژنتیک و اپی‌ژنتیک در تغذیه شخصی‌سازی‌شده: شواهد، انتظارات و تجربیات.	مروری، فن آوریهای تجزیه و تحلیل ژنتیکی با عملکرد بالا. ابزارهای نظارت بر خود و زیستی، سیستم های بازخورد، الگوریتم های هوش مصنوعی.	–	–	عدم وجود شواهد برای موفقیت توصیه های غذایی مبتنی بر ژن. راه حل های تغذیه شخصی در آینده باید شامل اقدامات فنوتیپی بیشتری باشد.	عدم وجود شواهد برای موفقیت توصیه های غذایی مبتنی بر ژن. نیاز به مفاهیم و ابزارهای تغذیه شخصی جدید.

جدول ۲: ارزیابی کیفیت مطالعات وارد شده با استفاده از پرسشنامهDowns & Black

مطالعات عناوین	گکیولکا و همکاران	لیانگ و همکاران	سلیمان و همکاران	ابراهام و همکاران	ایشیکاوا و همکاران	گومز و همکاران	لی و همکاران	لوپز و همکاران	کارلیچ و همکاران	ماسیجوسکا-اسکرندو و همکاران	کارامر و همکاران	گنوپیخین و همکاران	روسو و همکاران	هولزاپفل و همکاران
آیا فرضیات و اهداف مطالعه به وضوح شرح داده شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا نتایج اصلی به وضوح شرح داده شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا ویژگی بیماران به وضوح شرح داده شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا مداخلات شرح داده شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا در خصوص عوامل مخدوش کننده توضیحاتی ارائه شده است؟	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱
آیا یافته‌ها به وضوح شرح داده شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا داده های این مطالعه بصورت تصادفی برای پیامدهای اصلی ارائه شده است؟	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰
آیا عوارض جانبی گزارش شده است؟	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱
آیا در خصوص ترک بیماران از مطالعه و عوارض آن اطلاعاتی ارائه شده است؟	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
آیا مقادیر واقعی داده‌ها گزارش شده است (بصورت دقیق نه تخمینی)؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا در خصوص نحوه انتخاب نمونه‌های مطالعه اطلاعاتی ارائه شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا آزمودنی‌ها آمادگی لازم را برای اجرای آزمون داشتند؟	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰
آیا در مورد خصوصیات مکان و امکانات اطلاعاتی ارائه شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰
آیا در خصوص تلاش مداخلات که بیماران داشتند اطلاعاتی ارائه شده است؟	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
آیا برای یکسان‌سازی مطالعه اطلاعاتی ارائه شده است؟	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰
آیا نتایج مطالعه پس از نرمال کردن داده‌ها به وضوح شرح داده شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا اطلاعاتی از نتایج دوره مداخلات تمرینی و گروه کنترل ارائه شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱
آیا از آزمون‌های آماری مناسبی برای تحلیل داده‌ها استفاده شده است؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

آیا مداخلات قابل اعتماد بود؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا معیار نتایج اصلی قابل اعتماد بود؟	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آیا گروه‌ها تحت مداخلات متفاوتی قرار داشتند؟	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
آیا آزمودنی‌ها یکسازی شدند؟	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱
آیا آزمودنی‌ها به صورت تصادفی در گروه‌ها قرار گرفتند؟	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰
آیا مداخلات به صورت تصادفی اعمال شد؟	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱
آیا شرایطی برای عوامل کنترل نشده در نظرگرفته شده بود؟	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱
آیا برنامه خاصی برای از دست دادن بیماران داشتید؟	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
آیا مقالات قابل اعتماد و استناد هستند؟	۴	۴	۳	۳	۳	۴	۴	۳	۴	۳	۳	۳	۳	۳
کیفیت مقالات بر حسب درصد	۸۰/۶۴	۷۰/۹۶	۷۴/۱۹	۷۷/۴۱	۷۴/۱۹	۶۷/۷۴	۷۴/۱۹	۶۴/۵۱	۷۷/۴۱	۷۴/۱۹	۶۷/۷۴	۶۴/۵۱	۷/۹۶	۶۴/۵۱

بحث و بررسی:

مطالعات بررسی‌شده نشان می‌دهند که رژیم غذایی و فعالیت بدنی بر مکانیسم‌های اپی‌ژنتیکی از جمله متیلاسیون DNA، اصلاحات هیستونی وRNA های غیرکدکننده تأثیر می‌گذارند و از این طریق، بیان ژن‌های مرتبط با متابولیسم در ورزشکاران نخبه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تعامل میان واریانت‌های ژنتیکی خاص از جمله ژن‌های مرتبط با گیرنده‌های فعال‌شونده با پرواکسی‌زوم (PPAR) و عوامل اپی‌ژنتیکی، مسیرهای متابولیکی، ظرفیت استقامتی و روند ریکاوری را تنظیم می‌کند. افزون بر این، میکروبیوتای روده و الگوهای متابولومیکی به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های مهم سلامت متابولیکی و عملکرد ورزشی ظاهر شده‌اند. راهبردهای تغذیه‌ای شخصی‌سازی‌شده بر اساس پروفایل‌های ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی فردی، چشم‌اندازهای امیدبخشی در بهینه‌سازی عملکرد و مدیریت نیازهای متابولیکی ارائه می‌کنند.

چندین مطالعه، از جمله پژوهش‌های رن و همکاران (Rönn et al. 2013) و لینگ و همکاران (Ling et al. 2007)، با یافته‌های ما همخوانی دارند و نقش حیاتی تغییرات اپی‌ژنتیکی، نظیر متیلاسیون DNA و تنظیم miRNA، را در میانجی‌گری اثرات رژیم غذایی و ورزش بر متابولیسم برجسته می‌کنند. پژوهش‌های مرتبط با بیماری‌های متابولیک، مانند مطالعه بارس و همکاران نشان می‌دهند که مداخلات سبک زندگی می‌توانند نشانه‌های اپی‌ژنتیکی را بازبرنامه‌ریزی کنند تا حساسیت به انسولین و عملکرد میتوکندریایی را بهبود بخشند (Barres et al. 2012)، که با فواید مشاهده‌شده در ورزشکاران حرفه‌ای همخوانی دارد. علاوه بر این، مطالعات مربوط به انواع ژن PPAR، مانند پژوهش‌های احمدوف و همکاران، تأثیر این ژن‌ها بر متابولیسم مواد مغذی و نتایج عملکردی را تأیید می‌کنند (Ahmetov et al. 2006).

در مقابل، برخی مطالعات، از جمله پژوهش‌های دایه و همکاران (Dayeh et al. 2013) و زاناس و همکاران (Zannas et al. 2015)، ناسازگاری‌هایی در میزان و جهت تغییرات اپی‌ژنتیکی گزارش کرده‌اند که احتمالاً ناشی از تفاوت در جمعیت‌های مورد مطالعه، پروتکل‌های غذایی و رژیم‌های ورزشی است. پیچیدگی تنظیم اپی‌ژنتیکی، که شامل تغییرات متعددی فراتر از متیلاسیون DNA مانند استیلاسیون هیستون و فعالیت سیرتوئین‌ها می‌شود، به این تنوع دامن می‌زند. تفاوت در روش‌های ارزیابی نشانگرهای اپی‌ژنتیکی و پلی‌مورفیسم‌های ژنتیکی نیز به این

ناسازگاری‌ها کمک می‌کند. بنابراین، هرچند چارچوب کلی مورد تأیید قرار گرفته است، تعاملات دقیق و ظریف‌تر نیازمند پژوهش‌های عمیق‌تر برای رفع ناسازگاری‌های موجود هستند.

تعامل پیچیده عوامل ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی که در این مطالعات آشکار شده، نشان‌دهنده آن است که تنظیم اپی‌ژنتیکی در ورزشکاران نخبه فراتر از متیلاسیون ساده DNA یا mRNA است. اصلاحات هیستونی، از جمله استیلاسیون و فسفوریلاسیون، در کنار یوبی‌کویتیناسیون و سومویلاسیون، به‌طور قابل‌توجهی به تغییرات پویا در بیان ژن در پاسخ به محرک‌های تغذیه‌ای و ورزشی کمک می‌کنند (Kawaf, Ramadan, and El-Awady 2024). RNAهای غیرکدکننده به‌ویژه miRNA ها، RNAهای غیرکدکننده بلند وRNAهای حلقوی به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های کلیدی این فرآیندها عمل می‌کنند و مسیرهای متابولیکی ضروری برای هموستاز انرژی و ریکاوری را به‌دقت تنظیم می‌نمایند (Huang et al. 2025). به‌طور خاص، نقش سیرتوئین‌ها، به‌ویژهSIRT1 ، به‌عنوان یک تنظیم‌کننده اپی‌ژنتیکی کلیدی برجسته می‌شود که وضعیت انرژی سلولی را به سازگاری متابولیکی پیوند می‌دهد. SIRT1 بر بیوژنز میتوکندری، اکسیداسیون اسیدهای چرب و کنترل التهاب تأثیر می‌گذارد و پتانسیل آن را به‌عنوان هدفی درمانی برای بهینه‌سازی متابولیسم ورزشکاران نشان می‌دهد (Munteanu et al. 2024). درک این مکانیسم‌های مولکولی چندوجهی، پایه‌ای برای توسعه مداخلات تغذیه‌ای و تمرینی شخصی‌سازی‌شده فراهم می‌کند که با بهره‌گیری از پروفایل‌های ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی فردی، عملکرد و سلامت متابولیکی را به حداکثر می‌رسانند (Missong et al. 2024).

با وجود بینش‌های ارزشمندی که به دست آمده است، باید به چندین محدودیت اشاره کرد. بسیاری از مطالعات به داده‌های مقطعی یا تحلیل‌های ثانویه وابسته هستند که تفسیرهای علّی درباره تعاملات ژنتیکی–اپی‌ژنتیکی–تغذیه‌ای را محدود می‌کند. ناهمگونی در طراحی مطالعات، جمعیت‌های مورد بررسی و روش‌های ارزیابی اپی‌ژنتیکی نیز تعمیم‌پذیری یافته‌ها را با چالش مواجه می‌سازد. علاوه بر این، ماهیت پیچیده و پویای تغییرات اپی‌ژنتیکی نیازمند رویکردهای طولی و چند–اُمیکسی (Multi-Omics) است تا نقش آن‌ها در متابولیسم ورزشکاران به‌طور کامل درک شود. تحقیقات آینده باید بر یکپارچه‌سازی داده‌های جامع ژنومی، اپی‌ژنومی و متابولومی با مداخلات کنترل‌شده تغذیه‌ای و ورزشی تمرکز کنند. این امر توسعه استراتژی‌های تغذیه‌ای دقیق و شخصی‌سازی‌شده را تسهیل خواهد کرد که سلامت متابولیکی و عملکرد ورزشی را در طول زمان بهینه می‌سازد علاوه بر آن مطالعات بررسی‌شده نشان داده‌اند که سیرتوئین‌ها به‌ویژه SIRT1، SIRT3 و SIRT6 نقش‌های محوری در تنظیم متابولیسم انرژی، عملکرد میتوکندری، و پاسخ به استرس اکسیداتیو دارند. این پروتئین‌های دِاستیلاز وابسته به نیکوتین‌آمید آدنین دی‌نوکلئوتید با تنظیم مسیرهایی نظیر PGC-1α و AMPK، نیازهای تغذیه‌ای مرتبط با لیپولیز و اکسیداسیون اسیدهای چرب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از سوی دیگر، miRNAهای خاص مانند miR-21، miR-133a و miR-486 نیز در تنظیم بازسازی عضلانی، پاسخ به تمرین و مسیرهای سیگنال‌دهی متابولیکی مانند IGF-1 و mTOR نقش دارند. این عوامل با تعدیل بیان ژن‌های کلیدی، موجب تطبیق بهتر ورزشکاران نخبه با نیازهای تغذیه‌ای ویژه و استرس‌های متابولیکی می‌شوند.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با بررسی دقیق تعاملات ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی در متابولیسم و عملکرد ورزشکاران نخبه، نشان داد که ویژگی‌های فردی مانند پلی‌مورفیسم‌های ژنی (CYP1A2، ACTN3، MTHFR) و تنظیمات اپی‌ژنتیکی (از

جمله متیلاسیون DNA و بیان miRNAها) نقش تعیین‌کننده‌ای در پاسخ بدن به تغذیه، تمرین و مداخلات ورزشی دارند. این یافته‌ها اهمیت طراحی استراتژی‌های تغذیه‌ای و تمرینی شخصی‌سازی‌شده را برجسته کرده و نشان می‌دهند که با بهره‌گیری از ابزارهای نوین ژنومیک و اپی‌ژنتیک، می‌توان عملکرد ورزشی را بهینه‌سازی کرد، خطر آسیب‌ها را کاهش داد و از بروز بیماری‌های متابولیکی پیشگیری نمود. با وجود این، برای تعمیم این رویکردها به سطح عملی و کلینیکی، انجام مطالعات بین‌رشته‌ای با نمونه‌های بزرگ‌تر، طراحی مداخلات کنترل‌شده و تحلیل‌های omics ضروری است. در مجموع، آینده تغذیه ورزشی در گرو بهره‌گیری از علم ژنومیک و اپی‌ژنتیک در مسیر تدوین برنامه‌هایی دقیق، فردمحور و اثربخش خواهد بود. علاوه براین، نقش عوامل اپی‌ژنتیکی مانند SIRT1، SIRT3، SIRT6 و miRNAهای miR-21، miR-133a، و miR-486 در تنظیم متابولیسم و انطباق با نیازهای تغذیه‌ای ورزشکاران نخبه برجسته است؛ بنابراین، تحلیل این نشانگرها می‌تواند به طراحی دقیق‌تر مداخلات تغذیه‌ای و تمرینی کمک کند

تضاد منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

Abdelaziz, N., Therachiyil, L., Sadida, H. Q., Ali, A. M., Khan, O. S., Singh, M., Khan, A. Q., Al-Shabeeb Akil, A. S., Bhat, A. A., & Uddin, S. (2023). Epigenetic inhibitors and their role in cancer therapy. *International Review of Cell and Molecular Biology, 380*, 211–251.

Abraham, M. J., El Sherbini, A., El-Diasty, M., Askari, S., & Szewczuk, M. R. (2023). Restoring epigenetic reprogramming with diet and exercise to improve health-related metabolic diseases. *Biomolecules, 13*, 318.

Adithya, S. P., Balagangadharan, K., & Selvamurugan, N. (2022). Epigenetic modifications of histones during osteoblast differentiation. *Biochimica et Biophysica Acta—Gene Regulatory Mechanisms, 1865*, 194780.

Ahmetov, I. I., Mozhayskaya, I. A., Flavell, D. M., Astratenkova, I. V., Komkova, A. I., Lyubaeva, E. V., Tarakin, P. P., Shenkman, B. S., Vdovina, A. B., & Netreba, A. I. (2006). PPARα gene variation and physical performance in Russian athletes. *European Journal of Applied Physiology, 97*, 80–103.

Barati, S., Fabrizio, C., Strafella, C., Cascella, R., Caputo, V., Megalizzi, D., Peconi, C., Mela, J., Colantoni, L., Caltagirone, C., Termine, A., & Giardina, E. (2022). Relationship between nutrition, lifestyle, and neurodegenerative disease: Lessons from ADH1B, CYP1A2 and MTHFR. *Genes, 13*.

Barres, R., Yan, J., Egan, B., Treebak, J. T., Rasmussen, M., Fritz, T., Caidahl, K., Krook, A., O'Gorman, D. J., & Zierath, J. R. (2012). Acute exercise remodels promoter methylation in human skeletal muscle. *Cell Metabolism, 15*, 405–411.

Dayeh, T. A., Olsson, A. H., Volkov, P., Almgren, P., Rönn, T., & Ling, C. (2013). Identification of CpG-SNPs associated with type 2 diabetes and differential DNA methylation in human pancreatic islets. *Diabetologia, 56*, 1036–1046.

Downs, S. H., & Black, N. (1998). The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-

randomised studies of health care interventions. *Journal of Epidemiology & Community Health, 52*, 377–384.

Ginevičienė, V., Utkus, A., Pranckevičienė, E., Semenova, E. A., Hall, E. C. R., & Ahmetov, I. I. (2022). Perspectives in sports genomics. *Biomedicines, 10*, 298.

Gkiouleka, M., Karalexi, M., Sergentanis, T. N., Nouvakis, D., Proikaki, S., Kornarou, E., & Vassilakou, T. (2025). The epigenetic role of nutrition among children and adolescents: A systematic literature review. *Children, 12*, 143.

Gomez de Cedron, M., & Ramírez de Molina, A. (2023). Metabolo-epigenetic interplay provides targeted nutritional interventions in chronic diseases and ageing. *Frontiers in Oncology, 13*, 1169168.

Holzapfel, C., Waldenberger, M., Lorkowski, S., Daniel, H., & Working Group "Personalized Nutrition" of the German Nutrition Society. (2022). Genetics and epigenetics in personalized nutrition: Evidence, expectations, and experiences. *Molecular Nutrition & Food Research, 66*, 2200077.

Huang, Z., Yao, Q., Ma, S., Zhou, J., Wang, X., Meng, Q., Liu, Y., Yu, Z., & Chen, X. (2025). The synergistic role of gut microbiota and RNA in metabolic diseases: Mechanisms and therapeutic insights. *Frontiers in Microbiology, 16*, 1504395.

Ishikawa, V. N., Gontijo, G. M., Ichikawa, A. I. T., Bubna, P., da Silva Conter, F., de Queiroz, A. C. M., et al. (2023). Major metabolic and metabolomic aspects of nutrition in the gut microbiota and sports performance: A systematic review. *International Journal of Nutrology, 16*(2).

Karlic, H., Krammer, U., & Haslberger, A. (2022). Nutritional supplements for athletes and personalization: A short review. *Functional Food Science, 2*, 224–241.

Kawaf, R. R., Ramadan, W. S., & El-Awady, R. (2024). Deciphering the interplay of histone post-translational modifications in cancer: Co-targeting histone modulators for precision therapy. *Life Sciences, 346*, 122639.

Krammer, U. D. B., Tschida, S., Berner, J., Lilja, S., Switzeny, O. J., Hippe, B., Rust, P., & Haslberger, A. G. (2022). MiRNA-based "fitness score" to assess the individual response to diet, metabolism, and exercise. *Journal of the International Society of Sports Nutrition, 19*, 455–473.

Kumar, M., & Rani, K. (2023). Epigenomics in stress tolerance of plants under climate change. *Molecular Biology Reports, 50*, 6201–6216.

Li, X., & Qi, L. (2019). Gene–environment interactions on body fat distribution. *International Journal of Molecular Sciences, 20*(1), Article 20.

Li, X., & Qi, L. (2022). Epigenetics in precision nutrition. *Journal of Personalized Medicine, 12*, 533.

Ling, C., Poulsen, P., Simonsson, S., Rönn, T., Holmkvist, J., Almgren, P., Hagert, P., Nilsson, E., Mabey, A. G., & Nilsson, P. (2007). Genetic and epigenetic factors are associated with expression of respiratory chain component

NDUFB6 in human skeletal muscle. *The Journal of Clinical Investigation, 117*, 3427–3435.

Maciejewska-Skrendo, A., Massidda, M., Tocco, F., & Leźnicka, K. (2022). The influence of the differentiation of genes encoding peroxisome proliferator-activated receptors and their coactivators on nutrient and energy metabolism. *Nutrients, 14*, 5378.

Missong, H., Joshi, R., Khullar, N., Thareja, S., Navik, U., Bhatti, G. K., & Bhatti, J. S. (2024). Nutrient–epigenome interactions: Implications for personalized nutrition against aging-associated diseases. *Journal of Nutritional Biochemistry, 127*, 109592.

Mujika, I., Sharma, A. P., & Stellingwerff, T. (2019). Contemporary periodization of altitude training for elite endurance athletes: A narrative review. *Sports Medicine, 49*, 1651–1669.

Munteanu, C., Onose, G., Postaru, M., Turnea, M., Rotariu, M., & Galaction, A. I. (2024). Hydrogen sulfide and gut microbiota: Their synergistic role in modulating sirtuin activity and potential therapeutic implications for neurodegenerative diseases. *Pharmaceuticals, 17*.

Ramos-Lopez, O., Martinez-Urbistondo, D., Vargas-Nunez, J. A., & Martinez, J. A. (2022). The role of nutrition on meta-inflammation: Insights and potential targets in communicable and chronic disease management. *Current Obesity Reports, 11*, 305–335.

Ramos-Lopez, O., Riezu-Boj, J. I., & Milagro, F. I. (2022). Genetic and epigenetic nutritional interactions influencing obesity risk and adiposity outcomes. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care, 25*, 235–240.

Roberts, F. L., & Markby, G. R. (2021). New insights into molecular mechanisms mediating adaptation to exercise: A review focusing on mitochondrial biogenesis, mitochondrial function, mitophagy, and autophagy. *Cells, 10*.

Rönn, T., Volkov, P., Davegårdh, C., Dayeh, T., Hall, E., Olsson, A. H., Nilsson, E., Tornberg, Å., Dekker Nitert, M., & Eriksson, K.-F. (2013). A six-month exercise intervention influences the genome-wide DNA methylation pattern in human adipose tissue. *PLoS Genetics, 9*, e1003572.

Rousseau, A.-S. (2022). Nutrition, santé et performance du sportif d'endurance. *Cahiers de Nutrition et de Diététique, 57*, 78–94.

San-Millan, I., Stefanoni, D., Martinez, J. L., Hansen, K. C., D'Alessandro, A., & Nemkov, T. (2020). Metabolomics of endurance capacity in World Tour professional cyclists. *Frontiers in Physiology, 11*, 578.

Silva, H. H., Silva, M. G., Cerqueira, F., Tavares, V., & Medeiros, R. (2022). Genomic profile in association with sport-type, sex, ethnicity, psychological traits and sport injuries of elite athletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 62*, 418–434.

Suleman, S., Niaz, A. Q., Akram, M. N., Hadi, B., Usman, M., Sajjad, M., Waseem, M., Rajjab, A., & Muqarrab, R. M. (2024). The role of nutrigenomics in sports performance: A quantitative overview of gene–diet interactions. *Journal of Health and Rehabilitation Research, 4*, 1713–1718.

Szczechla, M., Balewska, A., Naskret, D., Zozulinska-Ziolkiewicz, D., & Uruska, A. (2023). Molecular changes in cells of patients with type 2 diabetes mellitus depending on changes in glycemia level in the context of lifestyle: An overview of the latest scientific discoveries. *Current Issues in Molecular Biology, 45*, 1961–1981.

Xu, B., Ye, X., Wen, Z., Chen, S., & Wang, J. (2024). Epigenetic regulation of megakaryopoiesis and platelet formation. *Haematologica, 109*, 3125–3137.

Xu, N., Liu, J., & Li, X. (2022). Lupus nephritis: The regulatory interplay between epigenetic and microRNAs. *Frontiers in Physiology, 13*, 925416.

Zannas, A. S., Arloth, J., Carrillo-Roa, T., Iurato, S., Röh, S., Ressler, K. J., Nemeroff, C. B., Smith, A. K., Bradley, B., & Heim, C. (2015). Lifetime stress accelerates epigenetic aging in an urban African American cohort: Relevance of glucocorticoid signaling. *Genome Biology, 16*, 1–12.

Zentgraf, K., Musculus, L., Reichert, L., Will, L., Roffler, A., Hacker, S., Hilpisch, C., Wiedenbrüg, K., Cermak, N., Lenz, C., de Haan, H., Mutz, M., Wiese, L., Al-Ghezi, A., Raab, M., & Kruger, K. (2024). Advocating individual-based profiles of elite athletes to capture the multifactorial nature of elite sports performance. *Scientific Reports, 14*, 26351.

.

A Review of the Impact of Genetic and Epigenetic Interactions on Metabolic Regulation and the Nutritional Requirements of Elite Athletes: Molecular Mechanisms and Performance Implications

Marefat Siahkouhian[1*], Narges Yazdan-Nasab[2], Seyedeh Zeinab Parandak[1], Zahra Hormati Oughoulbaig[1], Amir Hossein Hormati Oughoulbaig[1]

1 Department of Exercise Physiology, Faculty of Education and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2 Department of Biology, Faculty of Basic Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

[*]**Corresponding author**: m_siahkohian@uma.ac.ir

Abstract

Objectives: Elite athletic performance results from a complex interaction between genetics, epigenetics, and nutrition. Genes regulate metabolic pathways, while epigenetic factors such as DNA methylation and miRNAs, influenced by lifestyle, affect gene expression. This study aimed to review the scientific evidence related to the role of these interactions in metabolic regulation and to determine the nutritional needs of elite athletes, thereby paving the way for designing personalized nutrition and training programs.

Methods: This research was conducted as a systematic review. Articles published in Persian and English between 2022 and 2025 were searched using keywords related to genetics, epigenetics, and sports nutrition in the PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases. After screening and quality assessment using the Downs and Black checklist, 14 articles were selected for the final analysis.

Results: The results showed that gene polymorphisms, DNA methylation, and miRNAs play key roles in regulating metabolism, nutritional responses, and athletic performance. The combination of diet and exercise can modulate epigenetic pathways and improve metabolic health. Evidence supports the effectiveness of personalized diets based on individual genetics in enhancing performance and preventing metabolic disorders. The roles of gut microbiota, targeted supplements, and miRNAs in designing personalized interventions were also highlighted.

Conclusion: Utilizing genetic and epigenetic data provides a novel approach to developing precise, personalized, and evidence-based programs in sports nutrition.

Key words: Epigenetics; Metabolic Regulation; Elite Athletes' Performance; Nutrigenomics; Sports Nutrition