

## The Impact of Vanadium-Zinc Supplementation Combined with Two Different Intensities of Aerobic Exercise on Modulation of Lipid Profile and Insulin Resistance in Rats Fed High-Fructose Corn Syrup

Nader Hamedchaman<sup>1</sup>, Alireza Safarzade<sup>1\*</sup>, Gholamreza Hamidian<sup>2</sup>, Khadijeh Nasiri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

<sup>2</sup>Department of Basic Sciences, Faculty of Veterinary Medicine, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 14 June 2023 Accepted: 23 July 2023

### Abstract

**Background and Aim:** Insulin resistance is a metabolic disorder marked by insufficient tissue response to insulin secretion and hyperinsulinemia. This metabolic abnormality plays a crucial role in the pathogenesis of many diseases. It appears that changes in lifestyle, such as participating in exercise activity and consumption of non-medicinal supplements, will ameliorate this condition; therefore, the present study aims to investigate the effects of aerobic exercise and vanadium-zinc supplementation on body composition, lipid profile, and insulin resistance index in fructose-fed rats.

**Methods:** In this experimental study, 56 male wistar rats were randomly assigned to one of seven groups (eight rats per group); 1) Normal control (NC), 2) Fructose control (FC), 3) Fructose + Moderate-intensity continuous training (FIT), 4) Fructose + High-intensity interval training (FCT), 5) Vanadium-zinc supplement (FS), 6) Moderate-intensity continuous training + Vanadium-zinc supplement (FSIT), and 7) High-intensity interval training + Vanadium-zinc supplement (FSCT). The protocol of moderate intensity continuous training consisted of running for 12 to 54 min at a velocity of 12 to 20 m/min on a motorized treadmill with a 5% to 15% incline (weeks 1 to 8); also High-intensity interval training performed 3 min bouts at 40 m/min, interspersed by 3 min active recovery at a running velocity of 20 m/min on a motorized treadmill with a 5% to 15% incline. Supplement groups received 10 mg/kg/day of vanadium-zinc through oral gavage. Body composition and serum levels of lipid profile, glucose, insulin, and HOMA-IR index were measured before and 48 hours after the final session of the training program in a fast state.

**Results:** Eight weeks of aerobic exercise and vanadium-zinc supplementation significantly improved body composition ( $P = 0.0001$ ), insulin resistance ( $P = 0.0001$ ), and lipid profile indices ( $P \leq 0.05$ ). Aerobic exercise combined with vanadium-zinc supplementation has the most significant impact on the modulation of serum insulin resistance, lipid profile, and, inguinal and retroperitoneal fat tissue ( $P \leq 0.05$ ).

**Conclusion:** Findings suggest that vanadium-zinc supplementation combined with aerobic exercise can be effective in improving metabolic conditions and body composition.

**Keywords:** Aerobic Training, Vanadium, Zinc, Insulin Resistance, Fructose.

\*Corresponding author: Alireza Safarzade, Email: [a.safarzade@umz.ac.ir](mailto:a.safarzade@umz.ac.ir)

## اثر مکمل یاری و انادیم-روی به همراه فعالیت ورزشی هوازی با دو شدت متفاوت بر پروفایل لیپیدی و شاخص مقاومت انسولینی در رت های تغذیه شده با محلول فروکتوز

نادر حامدچمن<sup>۱</sup>، علیرضا صفرزاده<sup>۱\*</sup>، غلامرضا حمیدیان<sup>۲</sup>، خدیجه نصیری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

<sup>۲</sup> گروه علوم پایه، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

**زمینه و هدف:** مقاومت به انسولین یک اختلال متابولیکی است که با عدم پاسخ مناسب بافت‌ها به ترشح انسولین و هایپرانسولینمیا شناخته می‌شود. این ناهنجاری متابولیکی نقشی اساسی در پاتوژنز بیماری‌های مختلف دارد؛ به نظر می‌رسد تغییر در سبک زندگی نظیر اجرای فعالیت ورزشی و استفاده از مکمل‌های غیردارویی موجب تعدیل این وضعیت می‌گردد؛ لذا، پژوهش حاضر، با هدف بررسی اثر تمرین هوازی و مکمل یاری و انادیم-روی بر ترکیب بدن، پروفایل لیپیدی و شاخص مقاومت به انسولین در رت‌های تغذیه شده با شربت فروکتوز انجام شد.

**روش‌ها:** در این پژوهش تجربی، ۵۶ سر رت نر با نژاد ویستار به طور تصادفی در ۷ گروه (هر گروه ۸ سر)، شامل: ۱. گروه کنترل سالم، ۲. گروه کنترل فروکتوز، ۳. گروه فروکتوز + تمرین هوازی با شدت متوسط، ۴. گروه فروکتوز + تمرین هوازی با شدت بالا، ۵. گروه فروکتوز + مکمل و انادیم-روی، ۶. گروه فروکتوز + تمرین هوازی با شدت متوسط + مکمل و انادیم-روی و ۷. گروه فروکتوز + تمرین هوازی با شدت بالا + مکمل و انادیم-روی قرار گرفتند. پروتکل تمرین هوازی با شدت متوسط شامل دویدن به میزان ۱۲ تا ۵۴ دقیقه با سرعت ۱۲ تا ۲۰ متر در دقیقه و شیب ۵ تا ۱۵ درجه نوارگردان (هفته اول تا هشتم) و تمرین هوازی با شدت بالا شامل ۶ و هله ۳ دقیقه‌ای دویدن با سرعت ۱۵ تا ۴۰ متر در دقیقه و استراحت فعال ۳ دقیقه‌ای با سرعت ۱۲ تا ۲۰ متر در دقیقه بین و هله‌ها با شیب ۵ تا ۱۵ درجه نوارگردان بود. گروه‌های مکمل میزان ۱۰ میلی گرم/کیلوگرم/روز به صورت گاوآژ خوراکی دریافت کردند. ترکیب بدن و مقادیر سرمی پروفایل لیپیدی، گلوکز، انسولین و شاخص مقاومت به انسولین قبل و ۴۸ ساعت بعد از اجرای آخرین و هله برنامه تمرینی در حالت ناشتا اندازه‌گیری شد. داده‌های پژوهش با استفاده از آزمون‌های آماری تحلیل واریانس یک طرفه و تعقیبی بنفرونی در سطح معنی‌داری ( $P \leq 0/05$ ) تجزیه و تحلیل شدند.

**یافته‌ها:** هشت هفته برنامه تمرین هوازی و مکمل یاری و انادیم-روی به طور معناداری ترکیب بدن ( $P = 0/0001$ ) و مقاومت به انسولین ( $P = 0/0001$ ) را بهبود بخشیده و شاخص‌های پروفایل لیپیدی را تعدیل کرد ( $P \leq 0/05$ ). تمرینات هوازی به همراه مصرف مکمل و انادیم-روی بیشترین اثر را بر تعدیل مقاومت به انسولین و چربی خون، احشائی و زیرجلدی را نشان داد ( $P \leq 0/05$ ).

**نتیجه‌گیری:** یافته‌های پژوهش پیشنهاد می‌کند که استفاده از این مکمل با مدالیته تمرین هوازی می‌تواند در بهبود شرایط متابولیکی و ترکیب بدن مؤثر باشد.

**کلیدواژه‌ها:** تمرین هوازی، و انادیم، روی، مقاومت به انسولین، فروکتوز.

## مقدمه

در جامعه امروزی استفاده از وعده‌های غذایی و نوشیدنی‌های آماده بسیار رایج شده است (۱). این مواد غذایی حاوی اشکال مختلف و پنهان گلوکز هستند (۱،۲). از جمله این موارد، می‌توان به فروکتوز به عنوان یک شیرین‌کننده اصلی در غذاهای آماده و نوشابه‌ها به عنوان جایگزینی برای ساکارز اشاره کرد (۳). این ماده معمولاً به صورت شربت ذرت فروکتوز-۵۵ درصد استفاده می‌شود که حاوی ۵۵٪ فروکتوز و ۴۳٪ گلوکز است (۴-۱). بهره‌مندی از این نوع رژیم غذایی در کنار سبک زندگی غیرفعال منجر به افزایش شیوع عوارضی همچون التهاب سیستمیک و اختلالات متابولیکی مختلفی از جمله مقاومت به انسولین گردیده است (۵). مقاومت به انسولین به عنوان یک پاسخ بیولوژیکی به غلظت انسولین در بدن است که در آن بافت‌های حساس به انسولین (کبد، عضله اسکلتی و بافت چربی) پاسخ مناسبی به انسولین نمی‌دهند (۶). از عواقب آن می‌توان به اختلال در جذب گلوکز و متعاقباً افزایش سطح قند خون اشاره کرد (۷). در این وضعیت، مقدار انسولین مترشحه از غده پانکراس در حد طبیعی و حتی بیشتر از مقدار طبیعی بوده که با بروز شرایط هایپرانسولینمیا (Hyper-insulinemia) (۸) همراه است و موجب فعال‌سازی مسیرهای التهابی در بافت‌های حساس به انسولین و متعاقباً رخداد وضعیت مقاومت به انسولین سیستمیک و موضعی می‌شود (۷،۸).

روش‌های متعددی برای تعدیل وضعیت متابولیکی بدن وجود دارد که از جمله رویکردهای غیرتهاجمی آن می‌توان به فعالیت ورزشی اشاره کرد. نقش فعالیت ورزشی منظم در درمان و پیشگیری از بیماری‌های متابولیکی مانند مقاومت به انسولین و التهاب مزمن خفیف سیستمی شناخته شده است (۲۳-۹). از جمله این فعالیت‌ها می‌توان به تمرینات تداومی هوازی با شدت متوسط اشاره کرد، که شامل اجرای وهله‌های تمرینی با شدت متوسط و طولانی هستند و اجرای آن‌ها دارای منافع متابولیکی از جمله تعدیل شاخص‌های التهابی در گردش خون افراد سالم و بیمار (۹)، بهبود مقاومت انسولینی (۱۰)، کاهش التهاب مزمن سیستمیک (۱۱)، افزایش محتوا و تراکم میتوکندریایی (۱۲)، تحریک بیشتر لیپولیز (۱۳)، کاهش پروفایل لیپیدی (۱۴)، تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی (۱۵)، کاهش شاخص‌های استرس اکسیداتیو (۱۶) و بهبود ترکیب بدن است (۱۷). تمرینات هوازی تناوبی با شدت متوسط به طور چشمگیری منجر به بهبود مقاومت انسولین می‌گردد که ممکن است به واسطه اثرگذاری بر اندازه آدیپوسیت‌ها باشد (۱۸). همسو با این فرضیه، کاهش توده چربی، اندازه آدیپوسیت‌ها و همچنین بهبود مقاومت به انسولین به دنبال ۸ هفته تمرین تداومی هوازی با شدت متوسط در رت‌های صحرایی گزارش شده است (۱۹).

پروتکل تمرینی دیگر که سبب سازگاری در بافت‌های مختلف بدن، بویژه بافت چربی می‌شود، تمرینات تناوبی شدت بالا هستند؛ این تمرینات نیز شامل اجرای متناوب وهله‌های تمرین شدید و

کوتاه‌مدت به همراه دوره‌های ریکاوری و استراحت بین آن است (۲۰). مطالعات نشان دادند که شدت بالای تمرین هوازی با مکانیسم ایجاد اصطکاک و تنش برشی (Shear pressure) بیشتر، همواره با انقباضات پی در پی و کاهش مقاومت عروقی، خون و اکسیژن بالاتری به قلب و عضلات فعال می‌رساند و حساسیت انسولین را بهبود می‌بخشد (۲۱). در اجرای این گونه تمرینات، به دلیل انقباض‌های مکرر در تناوب‌های شدید و به‌کارگیری تارهای تند انقباض، از طریق افزایش بیان Glucose transporter 4 (Glut 4)، برداشت گلوکز را افزایش داده (۲۲) و با به‌کارگیری تارهای کند انقباض در تناوب‌های استراحت فعال منجر به تنظیم افزایشی آنزیم‌های ضد اکسایشی می‌شود (۲۳)، زیرا بازگشت به حالت اولیه فعال با شدت کم پس از افزایش متابولیسم سلولی در اجرای وهله‌های شدید تمرین باعث آزادسازی متسع‌کننده‌های عروقی و سپس فراخوانی عوامل آنتی‌اکسیدانی می‌گردد (۲۴).

بهره‌گیری از مکمل‌های غذایی روش دیگری برای بهبود و تعدیل وضعیت استرس اکسایشی است. عنصر روی (Zn) به عنوان یک کوفاکتور در بسیاری از آنزیم‌ها و پروتئین‌های دخیل در دفاع آنتی‌اکسیدانی، انتقال الکترون و ترمیم DNA عمل می‌کند (۲۴). اعمال متابولیکی این عنصر نیز شامل سنتز، ذخیره‌سازی و ترشح انسولین توسط سلول‌های  $\beta$  پانکراس است (۲۵). استرس اکسیداتیو ناشی از کمبود عنصر روی منجر به افزایش تولید گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن و نیتروژن و اختلال در ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در بدن می‌گردد (۲۶). از سوی دیگر، تحقیقات نشان داده است که غلظت وانادیم به طور مثبت با عملکرد سلول‌های  $\beta$  مرتبط است، و یک اثر محافظتی بالقوه دارد، زیرا این نشانگر زیستی با کاهش خطر مقاومت به انسولین مرتبط است (۲۷). طبق پژوهش‌های مختلف، مکمل‌یاری وانادیم به طور قابل توجهی تعداد سلول‌های  $\beta$  را در موش‌های صحرایی نر بالغ دیابتی افزایش داد (۲۸). بنابراین، محققان پیشنهاد کردند که وانادیم ممکن است به هموستاز گلوکز در داخل بدن کمک کند (۲۸، ۲۷). وانادیم درمانی به مدت ۶ هفته به میزان ۱۵۰ میلی‌گرم در روز منجر به کاهش ۱/۵ برابری آنزیم گلیکوژن سنتتاز (به عنوان آنزیم تبدیل‌کننده گلوکز به گلیکوژن) و کاهش آنزیم گلیکوژن فسفریلاز (در نقش تجزیه گلیکوژن کبدی) در بیماران مبتلا به دیابت نوع ۲ گردید؛ بنابراین، در نمونه‌های دیابتی حیوانات و انسان، مصرف وانادیم، تولید گلوکز کبدی را کاهش می‌دهد (۳۰، ۲۹).

علی‌رغم مطالعات صورت گرفته در مورد اختلال در هموستاز گلوکز و علل بروز مقاومت به انسولین که با هایپر انسولینمیا، چاقی و استرس اکسیداتیو همراه است، اطلاعات ناقص و پراکنده‌ای در باب مقایسه اثر انحصاری و متقابل کمپلکس وانادیم-روی و تمرینات هوازی در طول بازه بلندمدت بر تعدیل هموستاز متابولیک وجود دارد. بنابراین پژوهش حاضر با هدف مقایسه اثر دو شیوه مختلف تمرین هوازی همراه با کمپلکس وانادیم-روی بر بهبود

متوسط + مکمل وانادیم-روی (FSCT)، ۶. تمرین هوازی با شدت بالا + مکمل وانادیم-روی (FSIT) تقسیم‌بندی شدند. به مدت ۸ هفته دیگر، مصرف محلول شربت فروکتوز به همراه اجرای پروتکل‌های تمرینی و مکمل‌دهی وانادیم-روی ادامه یافت.

### پروتکل تمرین

**تمرین هوازی تناوبی با شدت بالا:** این تمرینات با دویدن به تعداد ۲ وهله ۳ دقیقه‌ای با سرعت ۱۵-۲۰ متر در دقیقه و استراحت فعال سه دقیقه‌ای با سرعت ۱۴-۱۲ متر در دقیقه بین وهله‌ها با شیب ۵ درجه شروع شد. در این پروتکل، تعداد وهله، سرعت و شیب فعالیت به صورت تدریجی به میزان ۶ وهله با سرعت ۴۰ متر بر دقیقه و ۱۵ درجه افزایش پیدا کرد. جلسه اول تمرینی با سرعت اولیه ۱۵ متر در دقیقه شروع و سپس در هر جلسه ۲-۱ متر در دقیقه بر اساس توانایی موش‌ها به سرعت نوارگردان اضافه شد. در انتهای هفته‌ی پنجم سرعت به ۴۰ متر در دقیقه رسید و تا پایان دوره تمرینی ثابت باقی ماند. سرعت نوارگردان در ریکاوری فعال نیز با سرعت ۱۲ متر در دقیقه برای جلسه اول شروع و هر هفته ۱-۲ متر در دقیقه به سرعت نوارگردان اضافه شد. تمرینات به مدت ۸ هفته با تواتر ۵ جلسه در هفته بر روی نوارگردان موتوردار اجرا شدند (جدول ۱-۳). بر اساس تحقیقات قبلی سرعت ۴۰ متر بر دقیقه معادل با شدت مساوی یا بیشتر از ۸۵ درصد اوج اکسیژن مصرفی در موش صحرائی است (جدول ۱) (۳۳).

وضعیت مقاومت به انسولین، ترکیب بدن و پروفایل لیپیدی انجام شد.

### روش‌ها

در این پژوهش مداخله‌ای-تجربی، ۵۶ سررت صحرائی نر با نژاد ویستار (محدوده سنی ۶-۴ هفته و میانگین وزنی ۱۵۰-۱۳۰ گرم) از انستیتو پاستور خریداری شده و در شرایط استاندارد نگهداری حیوانات آزمایشگاهی به صورت گروه‌های ۸ تایی (در دو قفس ۴ تایی) پلی‌اتیلنی استاندارد، با دمای محیط  $22 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و چرخه نوری ۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی نگهداری شدند (۳۱). در فاز اول، حیوانات بعد از یک هفته سازگاری با محیط آزمایشگاه بر اساس همسان‌سازی وزنی میانگین + خطای استاندارد وزن اولیه، به ۲ گروه (۱) تغذیه شده با غذای نرمال (NC) (۸ رت) و (۲) تغذیه با محلول فروکتوز شربت ذرت (FC) (۴۸ رت) تقسیم‌بندی شدند. محلول فروکتوز ذرت ۵۵ درصد توسط آب یونیزه شده به صورت محلول ۲۰ درصد رقیق‌سازی شده و در بطری‌های مجزا به صورت نوشیدن اختیاری بر روی قفس رت‌ها قرار داده شد (۳۲). پس از ۸ هفته، رت‌های تغذیه شده با محلول فروکتوز (۴۸ رت) به ۶ گروه: ۱. کنترل فروکتوز (FC)، ۲. تمرین هوازی با شدت متوسط (FCT)، ۳. تمرین هوازی با شدت بالا (FIT)، ۴. مکمل وانادیم-روی (FS)، ۵. تمرین هوازی با شدت

جدول ۱- برنامه تمرین تناوبی با شدت بالا و تداومی با شدت متوسط

هفته	وهله‌ها (تعداد)	سرعت (متر در دقیقه)	شیب (درجه)	مدت زمان فعالیت (دقیقه)
۱	۲	تناوبی: ۱۵ - ۲۰	۵	۱۲
	۱	ریکاوری: ۱۲-۱۴		۱۲/۵ - ۱۵
۲	۳	تناوبی: ۲۰ - ۲۵	۱۰	۱۸
	۱	ریکاوری: ۱۴-۱۶		۱۵ - ۲۰
۳	۴	تناوبی: ۲۵ - ۳۰	۱۵	۲۴
	۱	ریکاوری: ۱۶-۱۸		۲۰ - ۲۸
۴	۵	تناوبی: ۳۰ - ۳۵	۱۵	۳۰
	۱	ریکاوری: ۱۸-۲۰		۲۸ - ۳۹
۵	۶	تناوبی: ۳۵ - ۳۰	۱۵	۳۶
	۱	ریکاوری: ۲۰		۴۰ - ۵۴
۶-۱۰	۶	تناوبی: ۴۰	۱۵	۳۶
	۱	ریکاوری: ۲۰		۵۴

کردن با سرعت ۱۰ متر در دقیقه بر روی نوارگردان موتوردار بدون شیب اجرا شد (جدول ۱) (۳۳).

### دز مصرفی مکمل وانادیم-روی

کمپلکس وانادیم-روی به صورت پودر و با دز مصرفی ۱۰ میلی‌گرم/کیلوگرم (وزن بدن)/روز در ۱ سی‌سی آب دیونیزه حل

**تمرین هوازی تداومی با شدت متوسط:** این تمرینات با سرعت ۲۰ متر بر دقیقه و شیب ۵ تا ۱۵ درجه بود که از نظر مسافت طی شده با تمرین تناوبی با شدت بالا برابر بود. مدت زمان فعالیت از ۱۲ دقیقه در هفته اول شروع و به ۵۴ دقیقه در هفته‌های آخر رسید. هر جلسه شامل ۵ دقیقه گرم کردن و ۵ دقیقه سرد

شده و به صورت گاوآژ خوراکی استفاده شد (۳۴).

### اندازه‌گیری شاخص‌های بیوشیمیایی

در انتهای ۱۶ هفته مصرف محلول فروکتوز و ۸ هفته پروتکل تمرین + مصرف مکمل، رت‌ها پس از ۷۲ ساعت از آخرین جلسه تمرین و ناشتایی شبانه، توسط تزریق درون صفاقی کتامین (۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و زایلازین (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیهوش شدند. حدود ۵ میلی‌گرم خون از بطن چپ رت‌ها گرفته شده و پس از جداسازی سرم به وسیله سانتریفیوژ (۳۰۰۰ دور در دقیقه)، به فریزر با دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد منتقل شد. اندازه‌گیری گلوکز و پروفایل لیپیدی خون توسط روش الایزا، کیت مخصوص رت‌های صحرایی (پارس آزمون، کرج، ایران) و انسولین (ZellBio, Germany, Cat. No. ZB-10707C-R9648) انجام گرفت. شاخص مقاومت انسولینی (HOMA-IR) نیز توسط فرمول زیر محاسبه گردید (۳۳):

$$\text{HOMA-IR} = [\text{fasting insulin (mIU/ml)}] \times [\text{fasting glucose (mg/dl)}] \div 405$$

### تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

به منظور تایید توزیع طبیعی داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل آماری و بررسی تاثیر هر یک از متغیرها از آزمون تحلیل واریانس یک طرفه (One-way ANOVA) و آزمون تعقیبی بونفرونی (Bonferroni) استفاده شد. تمامی داده‌ها به صورت میانگین  $\pm$  خطای انحراف از استاندارد ارائه شدند. محاسبه‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۲ انجام شد و سطح معنی‌داری آزمون‌ها  $P \leq 0.05$  در نظر گرفته شد.

### ملاحظات اخلاقی

تمامی مراحل انجام طرح اعم از نگهداری حیوانات، گاوآژ و

اجرای تمرینات ورزشی در آزمایشگاه فیزیولوژی ورزش دانشکده علوم ورزشی دانشگاه مازندران و زیر نظر متخصص مربوطه انجام شد و کلیه مراقبت‌ها و اصول اخلاقی بر اساس راهنمای استفاده و مراقبت از حیوانات آزمایشگاهی رعایت و به تأیید کمیته اخلاقی دانشگاه مازندران با کد IR.UMZ.REC.1400.028 رسید.

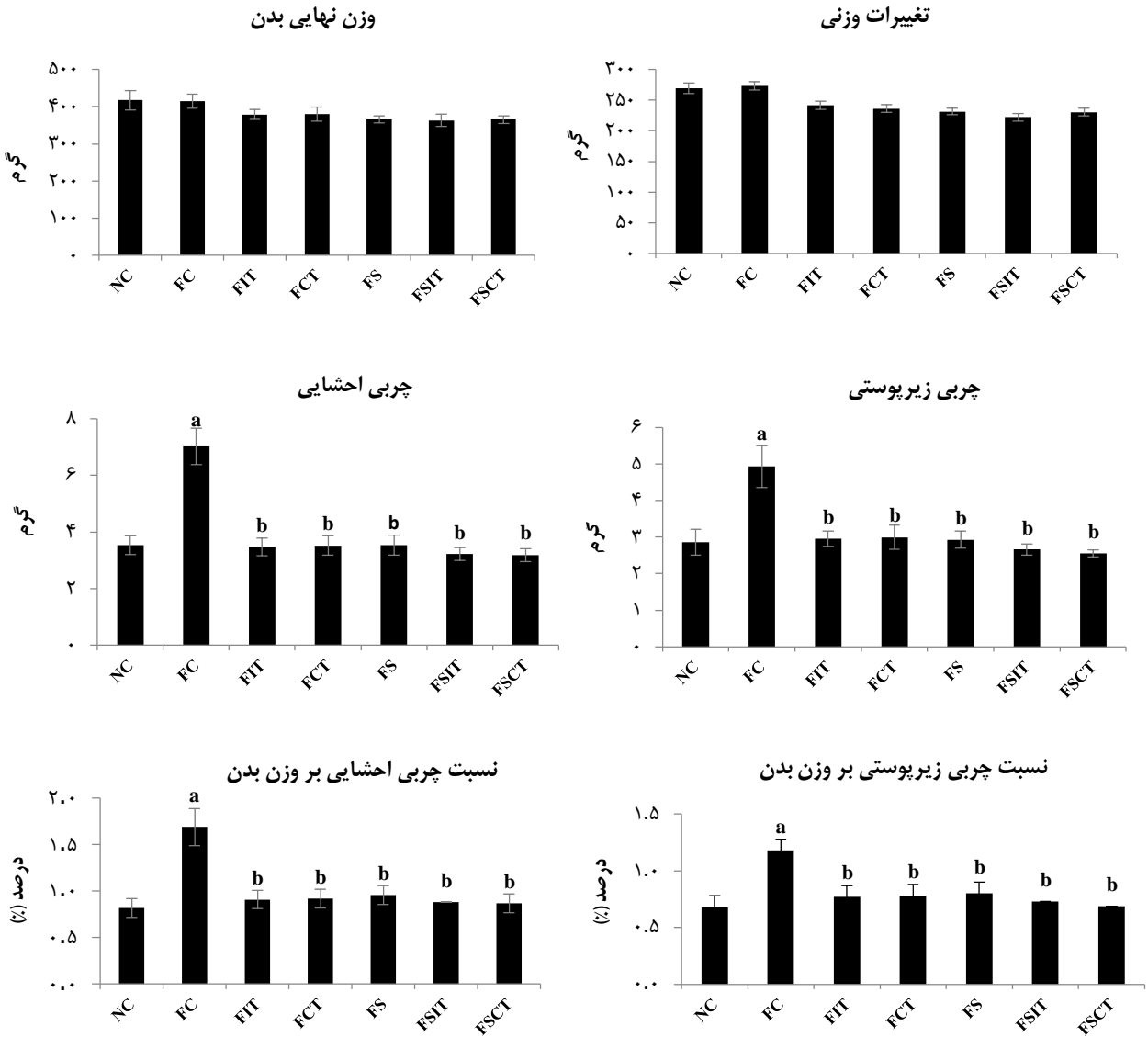
### نتایج

نتایج حاصل از مصرف HFCS، تمرین هوازی و مکمل واندایم-روی بر ترکیب بدن، پروفایل لیپیدی (LDL، HDL، کلسترول تام و تری‌گلیسیرید)، گلوکز، انسولین و شاخص HOMA-IR سرم در رت‌های صحرایی مطالعه، در این بخش آورده شده است. جدول ۲ (نسبت) وزنی بدن و بافت چربی رت‌ها را در انتهای ۱۶ هفته مداخله شربت فروکتوز و ۸ هفته تمرین و مکمل در بین گروه‌های تمرین نشان می‌دهد. در مقایسه میانگین‌های وزنی، نتایج آزمون واریانس یک طرفه نشان می‌دهد که بین شاخص‌های وزن چربی احشائی ( $P = 0.0001$ )، چربی زیرپوستی ( $P = 0.0001$ )، نسبت چربی احشائی/وزن بدن ( $P = 0.0001$ ) و نسبت چربی زیرپوستی/وزن بدن ( $P = 0.002$ ) در بین گروه‌های تمرین و مکمل، اختلاف معنی‌داری وجود دارد.

نتایج آزمون تعقیبی بنفرونی نشان داد که ۱۶ هفته مصرف HFCS منجر به افزایش وزن چربی احشائی و زیرجلدی در گروه فروکتوز کنترل نسبت به نرمال کنترل گردید، به طوری که فعالیت ورزشی (هر دو پروتکل شدت بالا و متوسط) و مکمل واندایم-روی به میزان یکسانی میزان چربی زیرجلدی و احشائی و شاخص مقاومت به انسولین را کاهش داد (نمودار ۱). از دیگر یافته‌های پژوهش حاضر، می‌توان به کاهش میزان چربی به سطح گروه کنترل تحت اثر مداخله تمرینی به همراه مکمل واندایم-روی اشاره کرد (نمودار ۱).

جدول ۲. نسبت‌های وزنی (بافت‌های مختلف چربی) رت‌ها

معنی‌داری	تمرین تداومی با شدت متوسط +وانادایم-روی	تمرین تداومی با شدت بالا +وانادایم-روی	مکمل واندایم-روی	تمرین تداومی با شدت متوسط	تمرین تناوبی با شدت بالا	کنترل فروکتوز	کنترل نرمال	
۰/۱۲	۱۰/۹۹ $\pm$ ۳۶۵	۱۶/۸۵ $\pm$ ۳۶۳	۹/۲ $\pm$ ۳۶۵/۵	۱۹/۱۴ $\pm$ ۳۷۹/۵	۱۳/۵۶ $\pm$ ۳۷۹	۱۸/۸۵ $\pm$ ۴۱۵/۳۳	۲۶/۲۱ $\pm$ ۴۱۷/۳۳	وزن نهایی بدن (گرم)
۰/۳۱	۶/۵۲ $\pm$ ۲۳۰/۳	۶/۰۴ $\pm$ ۲۳۲/۱۹	۵/۲۴ $\pm$ ۲۳۱/۵۴	۵/۹۶ $\pm$ ۲۳۶/۳۳	۶/۴۸ $\pm$ ۲۴۱/۲	۶/۷۶ $\pm$ ۲۷۳/۲۴	۸/۷۲ $\pm$ ۲۶۹/۸۴	تغییرات وزنی (گرم)
**۰/۰۰۰۱	۰/۲۳ $\pm$ ۳/۱۹	۰/۲۳ $\pm$ ۳/۲۲	۰/۳۶ $\pm$ ۳/۵۴	۰/۳۴ $\pm$ ۳/۵۲	۰/۳۱ $\pm$ ۳/۴۷	۰/۶۴ $\pm$ ۷/۰۲	۰/۳۳ $\pm$ ۳/۴۵	چربی احشائی (گرم)
**۰/۰۰۰۱	۰/۱ $\pm$ ۲/۵۵	۰/۱۵ $\pm$ ۲/۶۶	۰/۲۳ $\pm$ ۲/۹۳	۰/۳۳ $\pm$ ۲/۹۹	۰/۲۱ $\pm$ ۲/۹۵	۰/۵۷ $\pm$ ۴/۹۳	۰/۳۵ $\pm$ ۲/۸۶	چربی زیرپوستی (گرم)
**۰/۰۰۰۱	۰/۱ $\pm$ ۰/۸۷	۰/۰ $\pm$ ۰/۸۸	۰/۱ $\pm$ ۰/۹۶	۰/۱ $\pm$ ۰/۹۲	۰/۱ $\pm$ ۰/۹۱	۰/۲ $\pm$ ۱/۶۹	۰/۱ $\pm$ ۰/۸۲	چربی احشائی /وزن بدن (%)
**۰/۰۰۲	۰/۰ $\pm$ ۰/۶۹	۰/۰ $\pm$ ۰/۷۳	۰/۱ $\pm$ ۰/۸	۰/۱ $\pm$ ۰/۷۸	۰/۱ $\pm$ ۰/۷۷	۰/۱ $\pm$ ۱/۱۸	۰/۱ $\pm$ ۰/۶۸	چربی زیرپوستی /وزن بدن (%)

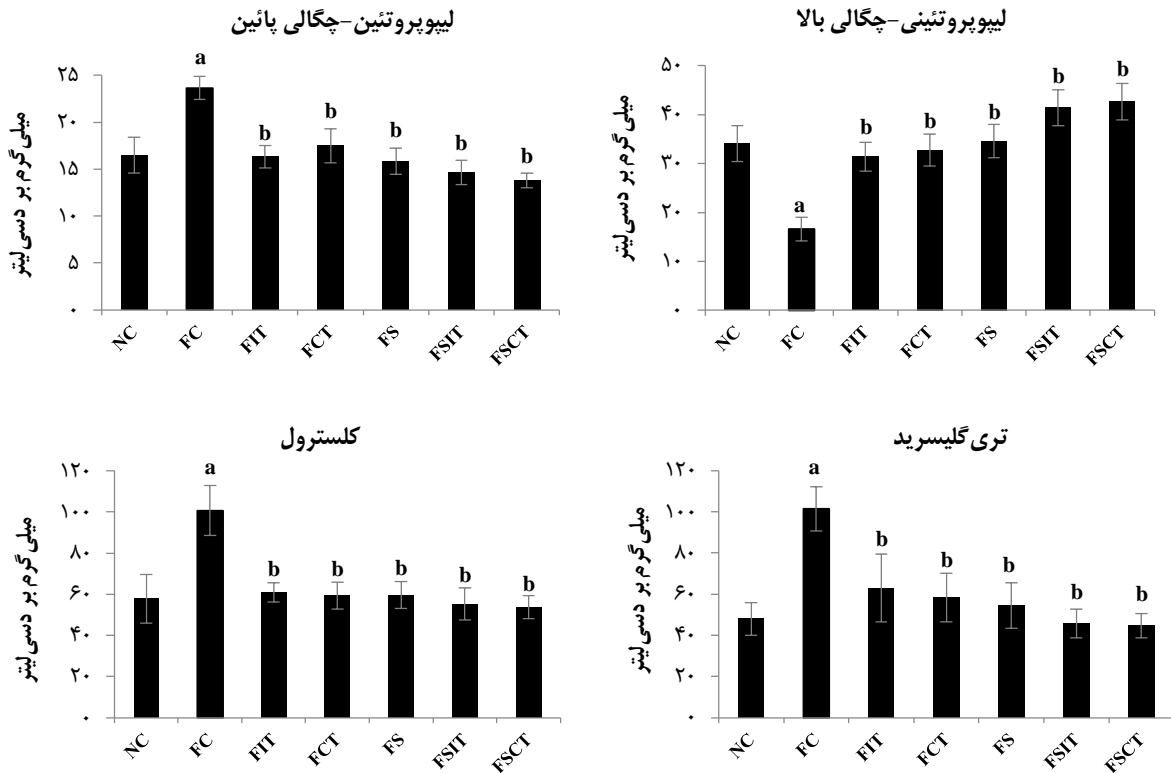


نمودار-۱. نتایج آزمون بنفرونی جهت بررسی اثر فعالیت ورزشی و کمپلکس وانادیم-روی بر نسبت وزنی (بافت‌های مختلف چربی) رت‌ها. داده‌ها به صورت میانگین  $\pm$  انحراف از استاندارد گزارش شده است. سطح معنی داری  $\geq 0.05$  گزارش شده است. NC: نرمال کنترل؛ FC: فروکتوز کنترل؛ FIT: فروکتوز+تمرینات هوازی با شدت بالا؛ FCT: فروکتوز+تمرینات هوازی با شدت متوسط؛ FS: فروکتوز+مکمل وانادیم-روی؛ FSIT: فروکتوز+مکمل وانادیم-روی+تمرین هوازی با شدت بالا؛ FSCT: فروکتوز+مکمل وانادیم-روی+تمرین هوازی با شدت متوسط. <sup>a</sup> در مقایسه با گروه NC، <sup>b</sup> در مقایسه با گروه FC، <sup>c</sup> در مقایسه بین گروه FIT و FCT، <sup>d</sup> در مقایسه بین دو گروه FIST و FSCT.

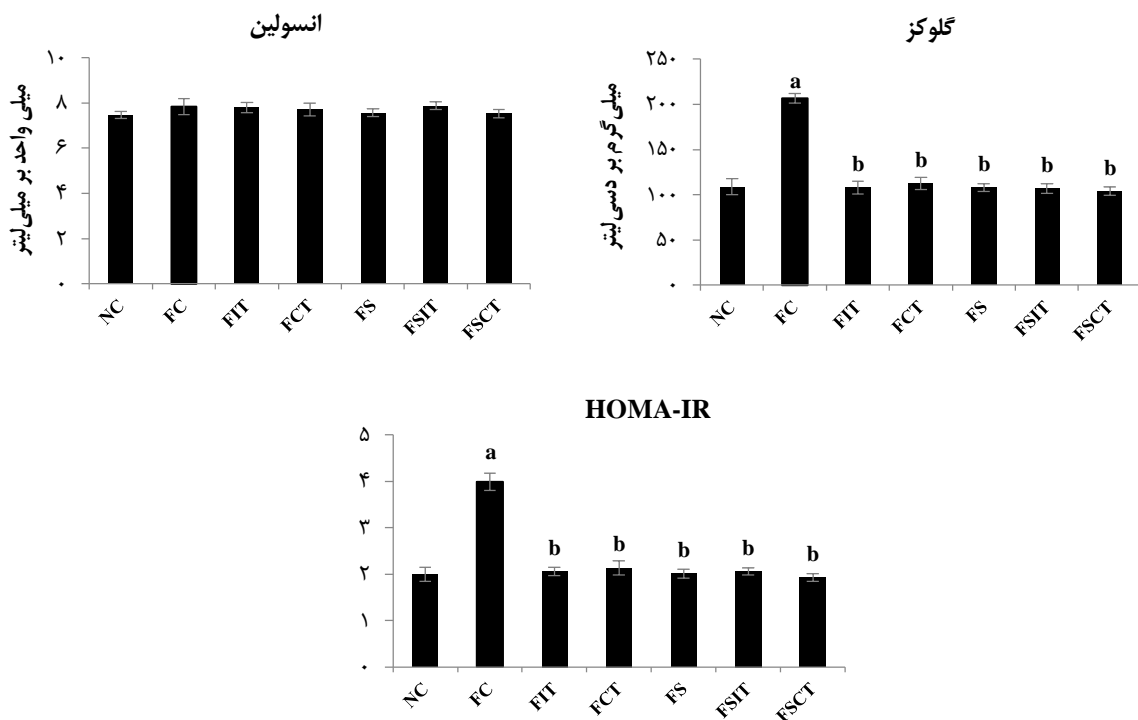
مکمل وانادیم-روی به میزان برابری ( $P < 0.0001$ ) اثر تعدیل‌کنندگی را بر HDL، Cholesterol، Triglyceride و LDL سرم نسبت به گروه کنترل فروکتوز داشتند. در مقایسه اثر هم‌افزایی بین دو گروه تمرین و مکمل نیز، تمرین تناوبی با شدت متوسط، بیشترین اثر را بر تعدیل LDL، Cholesterol، Triglyceride و HDL نسبت به گروه کنترل فروکتوز داشت (نمودار ۲).

نمودار ۳ تغییرات گلوکز، انسولین و HOMA-IR رت‌ها را در انتهای ۱۶ هفته مداخله شربت فروکتوز و ۸ هفته تمرین و مکمل بین گروه‌های مطالعه نشان می‌دهد. نتایج آزمون واریانس یک طرفه نشان می‌دهد که بین شاخص‌های گلوکز ( $P = 0.0001$ ) و HOMA-IR ( $P = 0.0001$ ) در گروه‌های تمرین، اختلاف

نمودار ۲ تغییرات پروفایل چربی رت‌ها را در طول مدت ۱۶ هفته مداخله شربت فروکتوز و ۸ هفته تمرین و مکمل بین گروه‌های مطالعه نشان می‌دهد. نتایج آزمون واریانس یک طرفه نشان می‌دهد که بین شاخص‌های لیپوپروتئین با چگالی کم ( $P = 0.0007$ )، لیپوپروتئین با چگالی بالا ( $P = 0.0001$ )، کلسترول تام ( $P = 0.0044$ ) و تری‌گلیسیرید ( $P = 0.0091$ ) در گروه‌های تمرین، اختلاف معنی‌داری وجود دارد. از طرفی، نتایج آزمون تعقیبی بنفرونی نشان داد که ۱۶ هفته مصرف HFCS منجر به افزایش عوامل خطر ساز پروفایل لیپید (LDL، Cholesterol، Triglyceride) و کاهش HDL در سرم گردید (نمودار ۲). همچنین، پروتکل تمرین تناوبی با شدت بالا، تداومی با شدت متوسط و



**نمودار ۲.** نتایج آزمون بنفرونی جهت بررسی اثر فعالیت ورزشی و کمپلکس وانادیم-روی بر پروفایل لیپیدی سرم. داده‌ها به صورت میانگین  $\pm$  انحراف از استاندارد گزارش شده است. سطح معنی داری  $\geq 0.05$  گزارش شده است. NC: نرمال کنترل؛ FC: فروکتوز کنترل؛ FIT: فروکتوز+تمرینات هوازی با شدت بالا؛ FCT: فروکتوز+تمرینات هوازی با شدت متوسط؛ FS: فروکتوز+مکمل وانادیم-روی؛ FSIT: فروکتوز+مکمل وانادیم-روی+تمرینات هوازی با شدت بالا؛ FSCT: فروکتوز+مکمل وانادیم-روی+تمرینات هوازی با شدت متوسط. <sup>a</sup> در مقایسه با گروه NC، <sup>b</sup> در مقایسه با گروه FC، <sup>c</sup> در مقایسه بین گروه FIT و FCT، <sup>d</sup> در مقایسه بین FSIT و FSCT.



**نمودار ۳.** نتایج آزمون بنفرونی جهت بررسی اثر فعالیت ورزشی و کمپلکس وانادیم-روی بر شاخص‌های مقاومت به انسولین. داده‌ها به صورت میانگین  $\pm$  انحراف از استاندارد گزارش شده است. سطح معنی داری  $\geq 0.05$  گزارش شده است. NC: نرمال کنترل؛ FC: فروکتوز کنترل؛ FIT: فروکتوز+تمرینات هوازی با شدت بالا؛ FCT: فروکتوز+تمرینات هوازی با شدت متوسط؛ FS: فروکتوز+مکمل وانادیم-روی؛ FSIT: فروکتوز+مکمل وانادیم-روی+تمرینات هوازی با شدت بالا؛ FSCT: فروکتوز+مکمل وانادیم-روی+تمرینات هوازی با شدت متوسط. <sup>a</sup> در مقایسه با گروه NC، <sup>b</sup> در مقایسه با گروه FC، <sup>c</sup> در مقایسه بین گروه FIT و FCT، <sup>d</sup> در مقایسه بین FSIT و FSCT.

و به طور مستقل از انسولین انجام می‌گیرد که در نهایت منجر به افزایش سنتز نوپدید چربی و تجمع آن در بخش‌های مختلف بدن شده (۹) و باعث تولید اسیدهای چرب سرمی از جمله تری‌گلیسرید می‌گردد (۳)، به طوری که کاهش پاکسازی و برداشت تری‌گلیسرید در رت‌های تغذیه شده با فروکتوز نیز به کاهش فعالیت لیپوپروتئین لیپاز موجود در سلول‌های اندوتلیال نسبت داده شده است (۱) که همسو با نتایج حاصل از گزارشات این پژوهش است. از طرفی، نتایج پژوهش حاضر نشان داده که مقاومت به انسولین در سرم رت‌های پژوهش، با افزایش سطوح گلوکز سرمی القا شده صورت گرفت؛ از دلایل احتمالی این هاپیرگلیسمی، می‌توان به مکانیسم اثر احتمالی کاهش حساسیت آنزیم لیپوپروتئین لیپاز اشاره کرد که موجب کاهش حساسیت به انسولین شده و متعاقباً موجب افزایش مقاومت به انسولین و همچنین افزایش تجمع چربی زیرجلدی و احشائی می‌گردد (۶،۷). در پژوهش حاضر، القای مقاومت به انسولین بدون تغییرات معنی‌داری در سطوح انسولین صورت گرفت که این امر می‌تواند به دلایل متعددی همچون (۱) سازگاری مسیر سیگنال‌دهی انسولین به دریافت طولانی مدت فروکتوز (۱۶ هفته)، (۲) آنروفی پانکراس به دلیل باز خورد منفی از سطح بالای انسولین موجود در گردش خون و (۳) عملکرد مستقل فروکتوز از انسولین اشاره کرد. نسبت وزنی بافت چربی احشایی به بدن در مقایسه با بافت چربی زیرجلدی به وزن بدن تحت اثر مصرف بلندمدت (۱۶ هفته) شربت فروکتوز افزایش معنی‌دارتری را نسبت به گروه کنترل نرمال نشان داد که از دلایل احتمالی آن، حساسیت بالای بافت چربی زیرجلدی نسبت به بافت چربی احشائی نسبت به اثرات انسولین در فعال کردن آنزیم لیپوپروتئین لیپاز است (۵). افزایش سطوح سرمی LDL و کلسترول در کنار تجمع چربی احشائی و زیرجلدی نیز از یافته‌های مهم این پژوهش است. پیشنهاد شده است که مصرف فروکتوز از طریق افزایش پروفایل لیپیدی سرم از طریق سیاهرگ پورتال و تجمع بافت چربی احشایی و زیرجلدی، منجر به ایجاد مقاومت به انسولین شده که متعاقباً موجب القای سندرم متابولیک می‌شود (۲،۳). از مکانیسم‌های اثر احتمالی آن، می‌توان به افزایش دی‌اسیل گلیسرول مشتق شده از بافت چربی اشاره کرد که به نوبه خود منجر به فعال‌سازی پروتئین کیناز C و مسیرهای پائین دست می‌شود (۴). فعال‌سازی همزمان دی‌اسیل گلیسرول و پروتئین کیناز C منجر به القای مقاومت به انسولین ناشی از تجمع چربی می‌گردد (۱،۵) که همسو با نتایج پژوهش حاضر است.

بر اساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر، ۸ هفته فعالیت ورزشی هوازی (هر دو شدت بالا و متوسط) منجر به تعدیل وضعیت مقاومت به انسولین و کاهش بافت چربی زیرپوستی و احشایی به سطوح گروه کنترل گردید که با نتایج پژوهش امیدوی فر و همکاران (۲۰۲۱) و Gollisch و همکاران (۲۰۰۹) هم‌سو است (۱۰،۱۱). یکی از عوامل مرتبط با مقاومت به انسولین، اختلال در عملکرد

معنی‌داری وجود دارد. از طرفی، نتایج آزمون تعقیبی بنفرونی نشان داد که ۱۶ هفته مصرف HFCS منجر به افزایش سطوح گلوکز و HOMA-IR گردید (نمودار ۳). همچنین، پروتکل تمرین تناوبی با شدت بالا، تداومی با شدت متوسط و مکمل وانادیم-روی به میزان برابری (۰/۰۰۱/P) اثر تعدیل‌کنندگی را بر گلوکز و HOMA-IR نسبت به گروه کنترل فروکتوز داشتند (نمودار ۳).

## بحث

مقاومت انسولینی یک ناهنجاری متابولیکی است که با ایجاد التهاب سیستمی، موجب القای استرس اکسایشی در بافت‌های متابولیکی بدن از قبیل بافت عضله اسکلتی، کبد و چربی می‌گردد. در مقابل، احتمالاً تمرینات ورزشی و مکمل وانادیم-روی اثرات تعدیل‌کنندگی بر التهاب ناشی از مقاومت به انسولین و التهاب داشته باشد. یافته‌های اصلی ما نشان داد که ۱۶ هفته نوشیدن اختیاری شربت ذرت فروکتوز-۵۵ (رقیق شده به ۲۰٪)، موجب القای مقاومت به انسولین و افزایش معنی‌دار سطوح سرمی پروفایل لیپیدی، بافت چربی احشایی و زیرپوستی می‌گردد، که با نتایج پژوهش Ter Horst و همکاران (۲۰۱۶) و Sadowska و همکاران (۲۰۱۹) هم‌سو است (۱،۷). فروکتوز با منشا غذایی، پس از اولین گذر از متابولیسم کبد، وارد گردش خون سیستمیک شده (۳۵) و از روده به داخل سیاهرگ باب جذب شده و به طور مستقیم به کبد می‌رسد (۳۶)؛ به همین سبب، متابولیسم فروکتوز سریع‌تر از گلوکز یا سایر کربوهیدرات‌ها انجام می‌گیرد، زیرا علی‌رغم سایر کربوهیدرات‌ها که در بافت‌های خارج کبدی متابولیزه می‌شود، عمدتاً متابولیسم فروکتوز در داخل سلول‌های کبد انجام می‌گیرد (۳۷) که احتمالاً دلیل اصلی اختلال در هموستاز گلوکز سرمی و ایجاد مقاومت به انسولین در رت‌های تغذیه شده با فروکتوز در پژوهش حاضر بوده است. از سایر مکانیسم‌های اثر القای مقاومت به انسولین ناشی از مصرف بلندمدت فروکتوز در پژوهش حاضر می‌توان به متابولیسم فروکتوز در کبد اشاره کرد که به گلوکز (حدود ۵۰٪) و لاکتات (حدود ۲۵٪) تبدیل شده (۲۲) و در کنار آن اسید اوریک فراوانی در بدن تولید می‌کند (۴)؛ اوره و لاکتات تولید شده ناشی از مصرف فروکتوز دارای اثر دفع رقابتی بوده و بنابراین در بدن تجمع می‌گردد (۷)؛ به طوری که افزایش سطوح اوره در خون رابطه مستقیمی با اختلال عملکرد اندوتلیالی و بروز مقاومت به انسولین دارد (۷،۸). از طرفی، مشاهده افزایش سطوح پروفایل لیپیدی همراه با تجمع چربی احشائی و زیرجلدی تحت اثر ۱۶ هفته مصرف شربت فروکتوز در پژوهش حاضر را می‌توان به مسیر سوخت و سازی فروکتوز نسبت داد که فاقد آنزیم‌های اولیه گلیکولیتیک از جمله فسفوفروکتوکیناز بوده و استیل کوآنزیم-آ فراوانی را برای سنتز نوپدید چربی‌ها در بدن فراهم می‌کند (۳۸)؛ این فرآیند با عملکرد فروکتوز بر تنظیم افزایشی آنزیم-SREBP-1c (Sterol Regulatory Element-Binding Protein-1)lc



سوپراکسیداز دیسموتاز) را در بدن افزایش داده‌اند. همچنین گزارش شده است که با بهبود عملکرد سلول‌های بتا پانکراس، افزایش گیرنده‌های انسولینی و افزایش آنزیم‌های گلیکوژن سنتتاز و هگزوکیناز موجب تعدیل وضعیت مقاومت به انسولین می‌گردند (۱۹،۴۲). فعالیت ورزشی مستقل از تقویت عملکرد انسولین، با افزایش گیرنده‌های GLUT-4 باعث افزایش برداشت گلوکز از گردش خون می‌گردد (۱۹،۴۲).

نتایج حاصل از پژوهش ما نشان داد که مصرف کمپلکس وانادیم-روی، چربی زیرجلدی، احشائی و غلظت گلوکز خون را تا سطح گروه کنترل کاهش داد و برای تعدیل مقاومت انسولینی در رت‌های تغذیه شده با شربت ذرت فروکتوز-۵۵ (رقیق شده به ۲۰٪) بسیار موثر است. همسو با این نتایج مطالعات مختلفی گزارش کردند که کمپلکس وانادیم-روی سبب کاهش قندخون و جلوگیری از مقاومت به انسولین می‌شود (۲۷،۳۳). عنصر روی در سنتز، ذخیره و ترشح انسولین توسط سلول‌های  $\beta$  پانکراس نقش دارد (۲۵،۲۷). تحقیقات نشان داده است که مکمل روی باعث بهبود حساسیت به انسولین در بیماران دیابتی چاق می‌شود (۲۵،۲۷،۳۴)؛ این اثرات با مکانیسم فعال‌سازی مسیر پروتئین کیناز B موجب افزایش بیان انتقال دهنده‌های گلوکز گردیده و برداشت گلوکز از سرم و انتقال آن به بافت‌ها را تسهیل می‌کند (۲۵،۲۷،۳۴). همچنین، از آنجایی که عنصر روی به عنوان پیش‌ساز در ساختار آنزیم گلوکوتاتیون پراکسیداز نقش دارد، به نظر می‌رسد که مکمل‌یاری آن موجب کاهش التهاب ناشی از مقاومت به انسولین در رت‌های پژوهش حاضر گردیده است (۲۸،۳۴). از طرفی، طبق نتایج حاصل از پژوهش‌های مختلف، وانادیم مستقل از اثر بر روی انسولین درون‌زاد و با اثر مستقیم بر گیرنده‌های انسولینی موجب تعدیل وضعیت مقاومت انسولینی در رت‌های دیابتی شده توسط streptozotocin شد (۴۵). وانادیم در اشکال مختلفی از جمله: وانادات، وانیدیل و ... وجود دارای که دارای پتانسیل شبه انسولینی بوده و با فعال‌سازی فسفاتیدیل اینوزیتول کیناز-۳ موجب افزایش حامل‌های گلوکز شده و نقش ضد دیابتی را ایفا می‌کند (۴۶،۴۷). Semiz و همکاران (۲۰۲۲) اثر مکمل‌یاری وانادیم را با افزایش حساسیت انسولین در رت‌های نژاد زوکر چاق گزارش کردند (۴۸). همچنین نشان داده شده است که وانادیم با مکانیسم مهار پروتئین تیروزین فسفاتاز ۱-بتا (PTB) و STAT موجب بهبود مقاومت به انسولین می‌گردد (۴۸،۴۷). اگرچه در پژوهش حاضر مقدار و فعالیت این آنزیم اندازه‌گیری نشد، اما این یافته‌ها با نتایج گزارش حاضر همسو است. آن‌ها چنین تغییراتی را ناشی از افزایش آنزیم گلیکوژن سنتتاز گزارش کردند (۴۷،۴۸). طبق یافته‌های حاصل از این پژوهش، مصرف کمپلکس وانادیم-روی به همراه تمرین هوازی (هر دو شدت) موجب کاهش سطوح گلوکز سرمی، پروفایل لیپیدی و حجم توده چربی به کمتر از سطوح گروه نرمال کنترل شد. به نظر می‌رسد اثر هم‌افزایی فعالیت ورزشی هوازی و کمپلکس وانادیم-روی

اندوتلیالی با رویکرد کاهش نیتریک اکسید مترشحه از سلول‌های اندوتلیوم معرفی شده است، زیرا انسولین با عملکرد وابسته به نیتریک اکسید، موجب برداشت گلوکز در عضله اسکلتی می‌گردد (۱)؛ به نظر می‌رسد اجرای پروتکل فعالیت ورزشی هوازی با شدت بالا در پژوهش حاضر با مکانیسم اثر احتمالی تنش برشی، آنزیم eNOS (Endothelial nitric oxide synthase) را فعال‌سازی کرده و منجر به افزایش عملکرد اندوتلیالی شده است. این امر به نوبه خود منجر به کاهش عوامل التهاب عروقی، از جمله iNOS (Inducible nitric oxide synthase) ناشی از القای مقاومت به انسولین شده و وضعیت التهابی را تعدیل کرده است (۳۹). همچنین نشان داده شده است که افزایش iNOS ناشی از مقاومت به انسولین در گردش خون موجب تنظیم کاهشی گیرنده انسولین از جمله IRS1,2 می‌گردد و از اتصال انسولین به گیرنده خود جلوگیری می‌کند. مطالعات دیگر رابطه مستقیمی بین سطوح iNOS در گردش خون و افزایش تجمع چربی گزارش کرده‌اند (۴۰). از سایر سازگاری‌های ناشی از اجرای فعالیت ورزشی هوازی بر تنظیم کاهشی پروفایل لیپیدی و بافت چربی و تعدیل مقاومت به انسولین سرم در پژوهش حاضر، می‌توان به سه مکانیسم اثر احتمالی: ۱) افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در لیپولیز، ۲) افزایش سطح لیپتین و القای حس سیری (کاهش اشتها) و ۳) افزایش سطح انرژی متابولیسم پایه و متعاقباً فعال‌سازی توامان لیپاز حساس به هورمون (High sensitive lipase) و زیرواحد  $\beta$  پروتئین کیناز فعال‌کننده AMP (AMP-activated protein kinase) اشاره کرد که منجر به افزایش مشارکت لیپیدها در فرآیند سوخت و ساز شده و ترکیب بدن را بهبود بخشیده است (۴۱). اکسیداسیون اسیدهای چرب در مراحل برداشت و متابولیسم فروکتوز توسط کبد و تبدیل آن به توده بافت چربی، از طریق تولید مالونیل کوآ (Malonyl-CoA) محدود شده و ورود اسیدهای چرب به میتوکندری را کاهش می‌دهد (۴)؛ در مقابل، فعالیت ورزشی هوازی با افزایش تراکم میتوکندریایی، منجر به افزایش میزان بیوژنز میتوکندریایی از طریق پروتئین میانجی PGC1alpha می‌گردد. پروتئین PGC1alpha دارای اعمال پلیوتروپیک در بدن است که از بین آن‌ها می‌توان به افزایش مشارکت چربی‌های زنجیره کوتاه و بلند در متابولیسم بدن اشاره کرد. PGC1alpha از طریق فعال‌سازی آنزیم‌های اکسیداسیون اسیدچرب همچون آنزیم آستیل کوآنزیم-آ دهیدروژناز زنجیره بلند و کوتاه، اکسیداسیون اسیدهای چرب را افزایش می‌دهد و در بهبود ترکیب بدن ایفای نقش دارد (۱۰،۱۹،۳۹). بین شدت‌های مختلف فعالیت در تعدیل وضعیت مقاومت به انسولین، چربی بافتی و پروفایل لیپیدی در پژوهش حاضر، ارتباط معنی‌داری یافت نشد. دلایل فیزیولوژیکی این نتایج را چنین می‌توان بیان کرد که هر دو پروتکل تمرینات تناوبی با شدت بالا و تداومی با شدت متوسط دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی بوده و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، گلوکوتاتیون پراکسیداز،

بدن رت‌های مبتلا به مقاومت انسولینی می‌گردد. بنابراین اجرای تمرین هوازی به همراه مصرف مکمل وانادیم-روی در برنامه روزانه، احتمالاً می‌تواند تاثیر مثبتی را بر بهبود وضعیت متابولیکی و ترکیب بدن افراد داشته باشد.

#### نکات بالینی کاربردی برای جوامع نظامی

- از آنجایی که درصد قابل توجهی از نوشیدنی‌ها و غذاهای آماده دارای مقادیر فراوانی از شربت فروکتوز پنهان (به عنوان شیرین کننده) در ترکیب خود می‌باشند، لذا مصرف بی‌رویه این مواد توام با بی‌حرکی، زمینه ابتلا به بیماری‌های متابولیک را فراهم می‌کند؛ از این رو بهره‌مندی از برنامه غذایی کنترل شده در کنار فعالیت ورزشی هوازی برای حفظ سلامتی پایوران نظامی توصیه می‌گردد.
- طبق نتایج به دست آمده در این پژوهش، تمرینات هوازی (هر دو شدت) به همراه مکمل وانادیم-روی موجب افزایش متابولیسم (بافت) چربی و تعدیل مقاومت به انسولین می‌گردد که می‌توان از این پروتکل به منظور افزایش کارایی سیستم متابولیکی و بهبود ترکیب بدن در پایوران نظامی استفاده کرد.

**تشکر و قدردانی:** بدین وسیله از تمامی افرادی که همکاری خالصانه‌ای در جهت اجرای این پروژه داشتند، صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین پژوهشگران از داوران محترم به خاطر مطالعه و ارائه نظرهای ارزشمند جهت ارتقای متن مقاله حاضر سپاسگزاری می‌نمایند.

**تضاد منافع:** نویسندگان تصریح می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

#### منابع

1. Ter Horst KW, Schene MR, Holman R, Romijn JA, Serlie MJ. Effect of fructose consumption on insulin sensitivity in nondiabetic subjects: a systematic review and meta-analysis of diet-intervention trials. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2016;104(6):1562-76. doi:10.3945/ajcn.116.137786
2. Taskinen MR, Packard CJ, Borén J. Dietary fructose and the metabolic syndrome. *Nutrients*. 2019;11(9):1987. doi:10.3390/nu11091987
3. Cioffi F, Senese R, Lasala P, Ziello A, Mazzoli A, Crescenzo R, et al. Fructose-rich diet affects mitochondrial DNA damage and repair in rats. *Nutrients*. 2017;9(4):323. doi:10.3390/nu9040323
4. Baena M, Sangüesa G, Dávalos A, Latasa MJ, Sala-Vila A, Sánchez RM, et al. Fructose, but not glucose, impairs insulin signaling in the three major insulin-sensitive tissues. *Scientific Reports*.

حداقل با ۳ مکانیسم اثر پیشنهادی موجب تعدیل التهاب ناشی از مقاومت به انسولین در سرم رت‌های تغذیه شده با شربت فروکتوز شده است: ویژگی لیپولیتیکی فعالیت ورزشی هوازی بر کاهش اندازه بافت چربی (به عنوان یک غده اندوکراین ترشح‌کننده عوامل التهابی)، افزایش برداشت گلوکز سرمی و انتقال بر بافت‌های فعال ناشی از انقباض حین فعالیت (۲۰،۱۳،۱۰) و افزایش تعداد گیرنده‌های انسولینی و حساسیت انسولینی در پاسخ به فعالیت ورزشی (۱۳،۱۷،۱۸،۲۰) شده است. این مطالعه هم‌سو با سایر مطالعات، اهمیت دریافت مکمل وانادیم-روی را برای تعدیل وضعیت مقاومت به انسولین برجسته می‌کند، و از عوارض احتمالی ناشی از مقاومت به انسولین، از جمله سندرم متابولیک جلوگیری کرده یا به تاخیر بیندازد. از نقاط قوت این پژوهش می‌توان به ارزیابی همزمان پروفایل لیپیدی در سرم و بافت چربی اشاره کرد که می‌توان با قوت بیشتری ورود چربی‌ها به چرخه متابولیسم را در پاسخ به مدل‌ته تمرین و مکمل‌یاری وانادیم-روی گزارش کرد؛ و از محدودیت‌های پژوهش حاضر، می‌توان به عدم اندازه‌گیری شاخص‌های استرس اکسایشی و پاسخ‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در بافت‌های متابولیکی یا گردش خون رت‌های تغذیه شده با فروکتوز اشاره کرد که می‌توانست بر تعمیم‌پذیری نتایج حاصل از پژوهش بیافزاید. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد که شاخص‌های اکسایشی و ضداکسایشی در داخل بافت‌های سوخت و سازی نظیر کبد، عضله و چربی نیز مورد بررسی قرار بگیرند.

#### نتیجه‌گیری

در مجموع، نتایج پژوهش حاضر نشان داد تمرینات هوازی به همراه مصرف کمپلکس وانادیم-روی بیشترین اثر را بر افزایش پاسخ‌های لیپولیتیکی (چربی‌سوزی) و تعدیل مسیر برداشت گلوکز دارد، چنان‌که این تغییرات باعث بهبود هموستاز متابولیکی و ترکیب

- 2016;6(1):26149. doi:10.1038/srep26149
5. Medaglia DS, Vieira HR, da Silva Silveira S, Siervo GE, da Silva Marcon MS, de Freitas Mathias PC, et al. High-fructose diet during puberty alters the sperm parameters, testosterone concentration, and histopathology of testes and epididymis in adult Wistar rats. *Journal of Developmental Origins of Health and Disease*. 2022;13(1):20-7. doi:10.1017/S2040174420001385
6. Romić S, Djordjević A, Tepavčević S, Culafić T, Stojiljković M, Bursac B, et al. Effects of a fructose-rich diet and chronic stress on insulin signaling and regulation of glycogen synthase kinase-3 beta and the sodium-potassium pump in the hearts of male rats. *Food & Function*. 2020;11(2):1455-66. doi:10.1039/C9FO02306B
7. Sadowska J, Rygielska M. The effect of high fructose corn syrup on the plasma insulin and leptin

- concentration, body weight gain and fat accumulation in rat. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. 2019;28(7):879-84. doi:10.17219/acem/94069
8. Hsia SM, Chiang YF, Chen HY, Ali M, Wang PS, Wang KL. Effect of High-Fructose Diet-Induced Metabolic Syndrome on the Pituitary-Gonadal Axis in Male Rats. *Biomedicines*. 2022; 10(12):3009. doi:10.3390/biomedicines10123009
9. Cochran AJ, Percival ME, Tricarico S, Little JP, Cermak N, Gillen JB, et al. Intermittent and continuous high-intensity exercise training induce similar acute but different chronic muscle adaptations. *Experimental Physiology*. 2014;99(5):782-91. doi:10.1113/expphysiol.2013.077453
10. Omidifar A, Shirvani H, Taheri RA, Gorgani-Firouzjae S, Delfan M, Kalaki-Jouybari F, et al. Protective effects of HIIT vs. CET exercise training on high-fat-high-fructose diet-induced hyperglycemia, hyperlipidemia, and histopathology of liver in rats: regulation of SIRT1/PGC-1 $\alpha$ . *Sport Sciences for Health*. 2021;17:707-15. doi:10.1007/s11332-021-00736-9
11. Gollisch KS, Brandauer J, Jessen N, Toyoda T, Nayer A, Hirshman MF, et al. Effects of exercise training on subcutaneous and visceral adipose tissue in normal-and high-fat diet-fed rats. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*. 2009;297(2):E495-504. doi:10.1152/ajpendo.90424.2008
12. Ramos JS, Dalleck LC, Tjonna AE, Beetham KS, Coombes JS. The impact of high-intensity interval training versus moderate-intensity continuous training on vascular function: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*. 2015;45:679-92. doi:10.1007/s40279-015-0321-z
13. Wang N, Liu Y, Ma Y, Wen D. High-intensity interval versus moderate-intensity continuous training: Superior metabolic benefits in diet-induced obesity mice. *Life Sciences*. 2017;191:122-31. doi:10.1016/j.lfs.2017.08.023
14. Hood MS, Little JP, Tarnopolsky MA, Myslik F, Gibala MJ. Low-volume interval training improves muscle oxidative capacity in sedentary adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2011;43(10):1849-56. doi:10.1249/MSS.0b013e3182199834
15. Noorishorabi Noorishorabi Y, Talebi-Garakani E, Safarzade A, Rocha-Rodrigues S, Kolahdouzi S. Continuous and intermittent exercise training responses in liver and white adipose tissue aquaglyceroporins. *Human Movement*. 2022;23(1):105-12. doi:10.5114/hm.2022.107310
16. Little JP, Safdar A, Wilkin GP, Tarnopolsky MA, Gibala MJ. A practical model of low-volume high-intensity interval training induces mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle: potential mechanisms. *The Journal of Physiology*. 2010;588(6):1011-22. doi:10.1113/jphysiol.2009.181743
17. Marcinko K, Sikkema SR, Samaan MC, Kemp BE, Fullerton MD, Steinberg GR. High intensity interval training improves liver and adipose tissue insulin sensitivity. *Molecular Metabolism*. 2015;4(12):903-15. doi:10.1016/j.molmet.2015.09.006
18. Bahmani M, Peeri M, Azarbayjani M, Delfan M. The effect of the aerobic continues versus high-intensity interval training on IRE1 expression and its correlation with insulin resistance index of liver tissue in rats with type 2 diabetes mellitus. *Razi Journal of Medical Sciences*. 2020;26(12):67-77. [In Persian]
19. Khalafi M, Mohebbi H, Karimi P, Faridnia M, Tabari E. The effect of high intensity interval training and moderate intensity continuous training on mitochondrial content and pgc-1 $\alpha$  of subcutaneous adipose tissue in male rats with high fat diet induced obesity. *Journal of Sport Biosciences*. 2018;10(3):297-315. doi:10.22059/jsb.2018.258026.1273
20. De Nardi AT, Tolves T, Lenzi TL, Signori LU, da Silva AM. High-intensity interval training versus continuous training on physiological and metabolic variables in pre-diabetes and type 2 diabetes: a meta-analysis. *Diabetes Research and Clinical Practice*. 2018;137:149-59. doi:10.1016/j.diabres.2017.12.017
21. Wewege M, Van Den Berg R, Ward RE, Keech A. The effects of high-intensity interval training vs. moderate-intensity continuous training on body composition in overweight and obese adults: a systematic review and meta-analysis. *Obesity Reviews*. 2017;18(6):635-46. doi:10.1111/obr.12532
22. Daryanoosh F, Mehboodi M, Mortazavi M, Motesharee E. The Effect of 8 weeks of Intense Aerobic Exercise on Plasma Levels of Obestatin, Leptin, Insulin and Growth Hormones in Male Obese Sprague Dawley Rats. *Journal of Arak University of Medical Sciences*. 2014;17(9):37-45. doi:10.3007/jams.2014.17.9
23. Gibala MJ. Physiological adaptations to low-volume high-intensity interval training. *Sports Science Exchange*. 2015;28(139):1-6. doi:10.7008/jsce.2015.28.1
24. Dubey P, Thakur V, Chattopadhyay M. Role of minerals and trace elements in diabetes and insulin resistance. *Nutrients*. 2020;12(6):1864. doi:10.3390/nu12061864
25. Li YV. Zinc and insulin in pancreatic beta-cells. *Endocrine*. 2014;45:178-89. doi:10.1007/s12020-013-0032-x
26. Gu K, Xiang W, Zhang Y, Sun K, Jiang X. The association between serum zinc level and overweight/obesity: a meta-analysis. *European Journal of Nutrition*. 2019;58:2971-82. doi:10.1007/s00394-018-1876-x
27. Azam A, Raza MA, Sumrra SH. Therapeutic application of zinc and vanadium complexes against diabetes mellitus a coronary disease: A review. *Open Chemistry*. 2018;16(1):1153-65. doi:10.1515/chem-2018-0118
28. Pirmoradi L, Noorafshan A, Safaee A, Dehghani GA. Quantitative assessment of proliferative effects of oral vanadium on pancreatic islet volumes and beta cell numbers of diabetic rats. *Iranian Biomedical Journal*. 2016;20(1):18. doi:10.7508/

ibj.2016.01.003

29. Cohen N, Halberstam M, Shlimovich P, Chang CJ, Shamoon H, Rossetti L. Oral vanadyl sulfate improves hepatic and peripheral insulin sensitivity in patients with non-insulin-dependent diabetes mellitus. *The Journal of Clinical Investigation*. 1995;95(6):2501-9. doi:10.1172/JCI117951
30. Goldfine AB, Simonson DC, Folli F, Patti ME, Kahn CR. Metabolic effects of sodium meta-vanadate in humans with insulin-dependent and noninsulin-dependent diabetes mellitus in vivo and in vitro studies. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. 1995;80(11):3311-20. doi:10.1210/jcem.80.11.7593444
31. Council NR. Textbook of guide for the care and use of laboratory animals. National Academies Press, Washington; 2010.
32. Aslankoc R, Ozmen O. The effects of high-fructose corn syrup consumption on testis physiopathology—the ameliorative role of melatonin. *Andrologia*. 2019;51(8):e13327. doi:10.1111/and.13327
33. Kolahdouzi S, Talebi-Garakani E, Hamidian G, Safarzade A. Exercise training prevents high-fat diet-induced adipose tissue remodeling by promoting capillary density and macrophage polarization. *Life Sciences*. 2019;220:32-43. doi:10.1016/j.lfs.2019.01.037
34. Soltanpour M, Banan-Khojasteh SM, Hamidian G, Nahali S, Morovvati H. Evaluation of the Effect of Vanadium-Zinc Complex on the Changes in Histological and Stereological Structure, Functional Enzymes, and Oxidative Stress Indices of Liver Tissue. *Journal of Veterinary Research*. 2022;77(3):177-86. doi:10.22059/JVR.2022.325647.3167
35. Toop CR, Gentili S. Fructose beverage consumption induces a metabolic syndrome phenotype in the rat: a systematic review and meta-analysis. *Nutrients*. 2016;8(9):577. doi:10.3390/nu8090577
36. Nouchi Y, Munetsuna E, Yamada H, Yamazaki M, Ando Y, Mizuno G, et al. Effects of High-Fructose Corn Syrup Intake on Glucocorticoid Metabolism in Rats During Childhood, Adolescence and Adulthood. *Experimental and Clinical Endocrinology & Diabetes*. 2022;130(12):814-20. doi:10.1055/a-1936-3310
37. Stricker S, Rudloff S, Geier A, Steveling A, Roeb E, Zimmer KP. Fructose consumption—free sugars and their health effects. *Deutsches Ärzteblatt International*. 2021;118(5):71. doi:10.3238/arztebl.m2021.0010
38. Hsia SM, Chiang YF, Chen HY, Ali M, Wang PS, Wang KL. Effect of High-Fructose Diet-Induced Metabolic Syndrome on the Pituitary-Gonadal Axis in Male Rats. *Biomedicines*. 2022;10(12):3009. doi:10.3390/biomedicines10123009
39. Ghadery B, Ghazalian F, Hosseini SA, Natanzy HA, Shamsoddini A. The Effect of Six Weeks of High Intensity Interval Training on eNOS and PGC-1 $\alpha$  Gene Expression in the Heart Tissue of Male Obese Rats. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 2020;12(2):e100280. doi:10.5812/jjhs.100280
40. Noraie F, Peeri M, Azarbayjani MA, Delfan M. The effects of eight weeks high intensity interval training on the levels of endothelial nitric oxide synthase (eNOS) gene expression in left ventricle of type 2 diabetic rats. *Medical Journal of Tabriz University of Medical Sciences and Health Services*. 2021;43(1):100-7. doi:10.34172/mj.2021.034
41. Liu Y, Dong G, Zhao X, Huang Z, Li P, Zhang H. Post-exercise effects and long-term training adaptations of hormone sensitive lipase lipolysis induced by high-intensity interval training in adipose tissue of mice. *Frontiers in Physiology*. 2020;11:535722. doi:10.3389/fphys.2020.535722
42. Pengam M, Moisan C, Simon B, Guernec A, Inizan M, Amérand A. Training protocols differently affect AMPK–PGC-1 $\alpha$  signaling pathway and redox state in trout muscle. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2020;243:110673. doi:10.1016/j.cbpa.2020.110673
43. Olechnowicz J, Tinkov A, Skalny A, Suliburska J. Zinc status is associated with inflammation, oxidative stress, lipid, and glucose metabolism. *The Journal of Physiological Sciences*. 2018;68(1):19-31. doi:10.1007/s12576-017-0571-7
44. Kolahian S, Sadri H, Larijani A, Hamidian G, Davasaz A. Supplementation of diabetic rats with leucine, zinc, and chromium: effects on function and histological structure of testes. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*. 2015;85:311-21. doi:10.1024/0300-9831/a000244
45. Adachi Y, Sakurai H. Insulin-mimetic vanadyl (IV) complexes as evaluated by both glucose-uptake and inhibition of free fatty acids (FFA)-release in isolated rat adipocytes. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 2004;52(4):428-33. doi:10.1248/cpb.52.428
46. Semiz S. Vanadium as potential therapeutic agent for COVID-19: A focus on its antiviral, antiinflammatory, and antihyperglycemic effects. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2022;69:126887. doi:10.1016/j.jtemb.2021.126887
47. Vardatsikos G, Mehdi MZ, Srivastava AK. Bis (maltolato)-oxovanadium (IV)-induced phosphorylation of PKB, GSK-3 and FOXO1 contributes to its glucoregulatory responses. *International Journal of Molecular Medicine*. 2009;24(3):303-9. doi:10.1248/cpb.52.428
48. Gallardo-Vera F, Diaz D, Tapia-Rodriguez M, Fortoul van der Goes T, Masso F, Rendon-Huerta E, et al. Vanadium pentoxide prevents NK-92MI cell proliferation and IFN  $\gamma$  secretion through sustained JAK3 phosphorylation. *Journal of Immunotoxicology*. 2016;13(1):27-37. doi:10.3109/1547691X.2014.996681