Journal of Arak University of Medical Sciences

August & September 2021. Vol 24. Issue 3

Research Paper

The Effect of Exercise Timing on Elevated Postprandial Glucose in Women With Obesity

Fateme Dehghani Yunarti[1], *Vazgen Minasian[1]

1. Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation: Dehghani Yunarti F, Minasian V. [The Effect of Exercise Timing on Elevated Postprandial Glucose in Women With Obesity (Persian)]. Journal of Arak University of Medical Sciences (JAMS). 2021; 24(3):334-347. https://doi.org/10.32598/JAMS.24.3.5445.2

https://doi.org/10.32598/JAMS.24.3.5445.2

CC BY NC

Article Info:

Received: 31 Oct 2020

Accepted: 15 May 2021

Available Online: 01 Aug 2021

Key words:
Exercise, Postprandial Glucose, Obesity

ABSTRACT

Background and Aim This study aimed to investigate the effect of exercise timing on elevated postprandial glucose and after brief interval exercises in women with obesity.

Methods & Materials Ten women with obesity (Mean±SD age = 40.41±3.97 years; weight = 86.66±7.26 kg; and BMI = 33.22±2.20 kg/m^2) participated in a crossover design exercise intervention: 1) postprandial aerobic exercise, 2) pre-prandial aerobic exercise, 3) brief periodic exercise, and 4) control. Pre- and postprandial exercise included 30 min of moderate-intensity walking on the treadmill before and after each main meal (1 minute of exercise -30 seconds rest). The brief periodic exercise had three one-minute reps of activity every 30 min for 20 times during the day. Twelve-hour continuous glucose monitoring and two-hour postprandial glucose levels were calculated to examine changes in blood glucose levels.

Ethical Considerations This study was approved by the institutional review board of the University of Isfahan (Ethics Code: IR.UI.REC.1397.119) and conducted in agreement with the ethical principles for biomedical research involving human subjects outlined in the declaration of Helsinki.

Results The findings of this study suggested that brief periodic exercise resulted in a significant decrease in continuous glucose monitoring levels and postprandial glucose compared to the control group as well as pre-prandial exercise ($P<0.05$). However, pre- and postprandial exercise did not result in significant changes in continuous glucose monitoring ($P>0.05$). In addition, postprandial exercise led to a significant decrease in postprandial glucose compared to the control group ($P<0.05$).

Conclusion It seems that brief periodic exercise can have more beneficial effects on postprandial glucose levels, probably due to improved glucose metabolism in skeletal muscle.

Extended Abstract

1. Introduction

Postprandial Hypertension (PPG) is one of the significant risk factors for many metabolic-cardiac disorders in diabetic [1, 2] and non-diabetic [3, 4] patients. For many metabolic disorders, including obesity and Type 2 Diabetes (T2D), the main focus of treatment is to reduce postprandial hyperglycemia. Endothelial dysfunction increased oxidative stress, and the risk of cardiovascular disease have been reported with increased PPG [5-7]. Regular exercise can be a good strategy for treating many metabolic disorders [8] and is a potential safety and appropriate strategy for reducing postprandial blood hyperglycemia due to repetitive muscle contractions [9, 10]. These changes may be due to the acute increase in skeletal muscle insulin sensitivity for 24-48 hours after each exercise [11].

* *Corresponding Author:*
Vazgen Minasian, PhD.
Address: Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
Tel: +98 (913) 2020396
E-mail: v.minasian@spr.ui.ac.ir

Table 1. Some measured variables in participants

Variables	Mean±SD
Age (y)	40.41±3.09
Weight (kg)	86.67.26
Height (cm)	161.40±3.56
Body mass index (kg/m^2)	33.22±2.20
Body Fat Percentage (%)	35.70±3.36
Basal Metabolic Rate (Kcal)	1574.05±68.94
Aerobic Endurance (ml/kg-1/min-1)	25.60±1.89

Journal of Arak University of Medical Sciences

Therefore, this study aimed to investigate the effect of exercise training scheduling (before meals, after meals, and periodically throughout the day) on increased postprandial glucose levels in middle-aged obese women.

2. Materials and Methods

Ten women with obesity (Mean±SD age = 40.41±3.97 years; weight = 86.66±7.26 kg; and BMI = 33.22±2.20 kg/m^2) participated in a crossover design. The interventions consist of 1) postprandial aerobic exercise, 2) pre-prandial aerobic exercise, 3) brief periodic exercise, and 4) control performed in 4 full days with 5 days rest between each training session. Pre- and postprandial exercise included 30 min of moderate-intensity walking on the treadmill before and after each main meal (1 min of exercise -30 sec rest). Brief periodic exercise had three one-minute of activity every 30 min for 20 times during the day. The twelve-hour continuous glucose monitoring and two-hour postprandial glucose levels were measured to examine changes in blood glucose levels. The exercise interventions were performed randomly; all participants ate the same meals the day before the intervention. After 10 hours of fasting, they referred to the laboratory to take blood samples. The subjects' glucose levels were measured using the Iranian Pars test kit. The control group had daily activities without exercising, and participants' glucose levels were measured at specific periods.

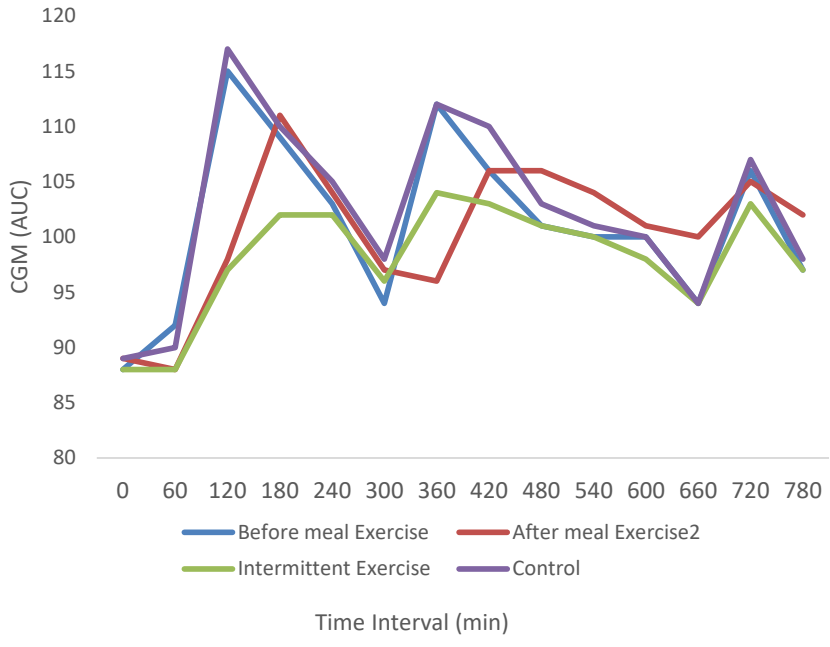
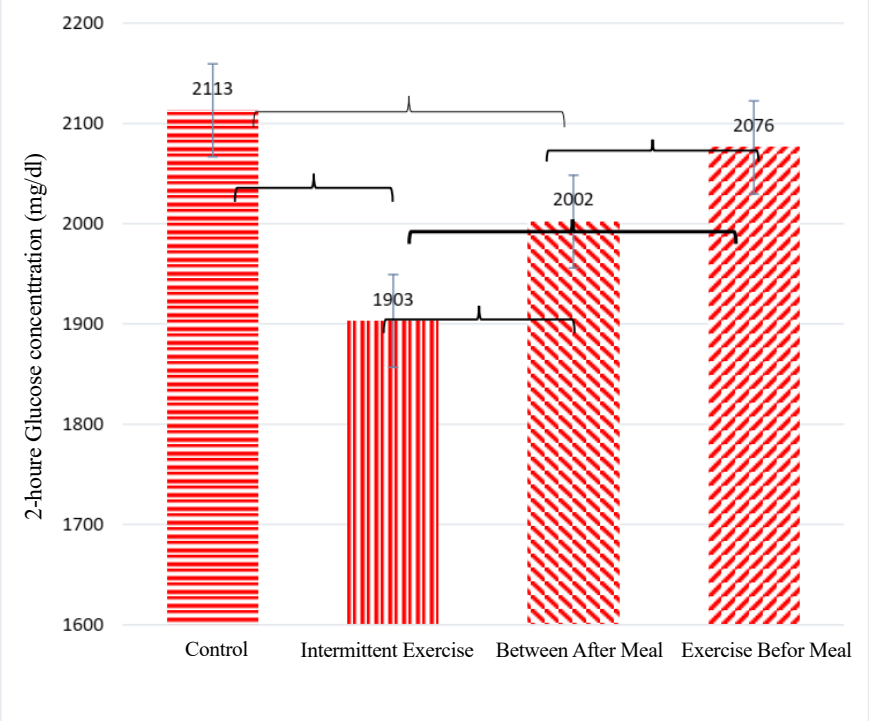


Figure 1. Changes in CGM in intervention groups

Journal of Arak University of Medical Sciences



*: significant changes between control group (P≥0.0.5)

#: significant changes between after meal group (P≥0.0.5)

£: significant changes between pre-meal group (P≥0.0.5)

¥: significant changes between intermittent exercise group (P≥0.0.5)

Figure 2. Two-hour gluccose changes in experimental groupe

Journal of
Arak University of Medical Sciences

3. Results

Descriptive characteristics of the participants are presented in Table 1. The results of data analysis showed that short-term intermittent activities led to a significant reduction in CGM compared to the control group and exercise before meals (~5%, P=0.001). On the other hand, there was a significant difference between changes in CGM levels of exercise before and after meals (P<0.05) (Figure 1). In addition, the results showed that post-meal exercise and intermittent exercise resulted in a further decrease in PPG compared to the control group (6 and~10%, respectively) (P=0.01). In contrast, a decrease in PPG in the pre-meal exercise was insignificant compared to the control group (P>0.05). Also, intermittent exercise training was more effective in reducing PPG levels (~9% vs 5%, respectively) compared to exercise interventions before and after meals (P=0.004). Post-meal exercise also had more significant effects on post-meal glucose-lowering than pre-meal exercise (4%) (P=0.01) (Figure 2).

4. Discussion and Conclusion

The exercise after a meal led to an improvement in PPG levels. It has already been reported that exercising after a meal (45 min) lowers blood glucose and insulin levels in patients with diabetes. One of the mechanisms affecting the reduction of blood glucose is probably more skeletal muscle metabolism involved in the activity [34]. The effects of exercise after a meal may be due to the regulatory impact of exercise on glucose metabolism in the liver and skeletal muscle, maintained in obese individuals for 2 hours after exercise training. In contrast, the pre-meal exercise did not significantly affect PPG and CGM in women with obesity.

Previous studies indicated the effectiveness of intense exercise training and high lactate threshold before a meal PPG level. Still, on the other hand, due to the high intensity of exercise in overweight and obese people, they need much more motivation [41, 42]. Furthermore, the intermittent periodic exercise had significant effects on the improvement of CGM and PPG, which were more than the effects of exercise before and after meals. In this regard, recent studies

have investigated the effect of walking on PPG levels in fasting status in obese and healthy individuals, which reduces CGM by 5 min of activity every 20 min for 5 hours [34, 36]. Also, previous studies reported that different short-term intermittent exercises could reduce post-meal CGM levels [16, 25, 38].

Few studies have directly compared the glycemic responses between pre-and post-diet exercise interventions, and more research is needed in the future. One of the limitations of this study was the small sample size and the impossibility of studying 24-hour blood glucose levels using laboratory methods.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This study was approved by the Institutional Review Board of the University of Isfahan (Ethics Code: IR.UI.REC.1397.119) and conducted in agreement with the ethical principles for biomedical research involving human subjects outlined in the declaration of Helsinki.

Funding

This study was extracted from the MSc thesis of the first author at the Department of Exercise Physiology, Faculty of Sport Sciences, University of Isfahan, Isfahan. Also, this study was supported by the Chancellor for Research and Technology of the University of Isfahan for postgraduate students.

Authors' contributions

Both authors equally contributed to preparing this article.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

This Page Intentionally Left Blank

مقاله پژوهشی

اثر زمان‌بندی فعالیت ورزشی بر مقادیر گلوکز بعد از وعده‌های غذایی در زنان چاق

فاطمه دهقانی یونارتی[۱]، *وازگن میناسیان[۱]

۱. گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۰ آبان ۱۳۹۹
تاریخ پذیرش: ۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۰
تاریخ انتشار: ۱۰ مرداد ۱۴۰۰

چکیده

زمینه و هدف هدف کلی پژوهش حاضر بررسی اثر زمان‌بندی فعالیت ورزشی بر سطوح افزایش‌یافته گلوکز بعد از وعده غذایی، قبل از وعده غذایی و متعاقب تمرینات تناوبی کوتاه‌مدت در زنان چاق بود.

مواد و روش‌ها تعداد ۱۰ زن مبتلا به چاقی (میانگین±انحراف معیار سن: ۳/۹۷±۴۰/۴۱ سال، وزن: ۷/۲۶±۸۶/۶۰ کیلوگرم و شاخص توده بدن: ۲/۲۰±۳۳/۲۲ کیلوگرم/مترمربع) به شکل متقاطع در چهار گروه شامل: ۱. فعالیت ورزشی قبل از وعده غذایی؛ ۲. فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی؛ ۳. فعالیت ورزشی تناوبی؛ ۴. کنترل شرکت داشتند. فعالیت ورزشی قبل و بعد از وعده غذایی شامل ۳۰ دقیقه راه رفتن با شدت متوسط روی نوارگردان قبل و بعد از هر وعده غذایی اصلی (یک دقیقه تمرین، ۳۰ ثانیه استراحت) و فعالیت ورزشی تناوبی کوتاه‌مدت شامل سه تکرار یک دقیقه‌ای فعالیت، هر ۳۰ دقیقه برای ۲۰ مرتبه طی روز بود. مقادیر ۱۲ ساعته پایش مداوم قندخون و غلظت قندخون پس از وعده غذایی دوساعته برای بررسی تغییرات گلوکز خون ثبت شد.

ملاحظات اخلاقی این مطالعه با اخذ مجوز و دریافت کد اخلاق پژوهشی IR.UI.REC.1397.119 از کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه اصفهان شروع و اجرا شد. استانداردهای اصول اخلاق در پژوهش‌های پزشکی شامل موضوعات انسانی که در اعلامیه هلسینکی مشخص شده است رعایت شد.

یافته‌ها نتایج نشان داد که فعالیت ورزشی تناوبی منجر به کاهش معنی‌دار پایش مداوم قندخون و غلظت قندخون پس از وعده غذایی، نسبت به گروه کنترل و همچنین فعالیت ورزشی قبل از وعده غذایی شد (P<۰/۰۵). در حالی که بین اثر فعالیت ورزشی قبل و بعد از وعده غذایی تفاوت معنی‌داری در پایش مداوم قندخون مشاهده نشد (P<۰/۰۵). همچنین، فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی، منجر به کاهش قندخون پس از وعده غذایی نسبت به گروه کنترل شد (P<۰/۰۵).

نتیجه‌گیری به نظر می‌رسد اجرای فعالیت ورزشی تناوبی می‌تواند اثرات مفیدی بر سطوح گلوکز خون بعد از وعده غذایی داشته باشد که احتمالاً به واسطه بهبود متابولیسم گلوکز در نتیجه تمرین ورزشی است.

کلیدواژه‌ها:
تمرین ورزشی، گلوکز بعد از وعده غذایی، چاقی

مقدمه

غلظت زیاد قندخون پس از وعده غذایی[1] یکی از عوامل خطرزای اصلی برای بسیاری از اختلالات متابولیکی قلبی در بیماران دیابتی [۱، ۲] و غیردیابتی [۳، ۴] است. برای بسیاری از اختلالات متابولیکی از جمله چاقی و دیابت نوع۲ [2]، تمرکز اصلی درمان کاهش میزان هیپرگلیسمی پس از وعده غذایی است؛ به طوری که اختلال عملکرد اندوتلیال، افزایش استرس اکسیداتیو و خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی عروقی با افزایش PPG گزارش شده است [۵-۷]. از سوی دیگر، فعالیت ورزشی منظم می‌تواند استراتژی مناسبی برای درمان بسیاری ازاختلال‌های متابولیکی از جمله مقاومت انسولینی و چاقی باشد [۸]، به طوری که بخشی از آثار مهم تمرین‌های ورزشی به واسطه غدد درون‌ریز و عضله اسکلتی نمایان می‌شود که نقش مهمی در تنظیم متابولیسم انرژی، ترکیب بدنی و مقاومت انسولینی ایفا می‌کنند [۹]. نشان داده شده است که فعالیت ورزشی راهبرد بالقوه ایمنی و مناسب برای کاهش هیپرگلیسمی خون بعد از وعده غذای به واسطه انقباض‌های عضلانی تکرارشونده است [۱۰]؛ بخشی از این تاثیر می‌تواند به دلیل افزایش حاد حساسیت به انسولین عضلات اسکلتی به مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت بعد از هر دوره فعالیت ورزشی باشد [۱۱].

ارزیابی پایش گلوکز پس از وعده‌های غذایی در شرایط زندگی عادی اهمیت دارد، زیرا مطالعات اخیر نشان می‌دهند که روش‌های آزمایشگاهی معمول مانند آزمون تحمل گلوکز

1. Post Prandial Glucose (PPG)
2. Type 2 Diabetes (T2D)

* نویسنده مسئول:
دکتر وازگن میناسیان
نشانی: اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم ورزشی، گروه فیزیولوژی ورزشی.
تلفن: ۲۰۲۰۳۹۶ (۹۱۳) ۹۸+
پست الکترونیکی: v.minasian@spr.ui.ac.ir

خوراکی[3] به طور دقیق نمی‌توانند تأثیر فعالیت بدنی بر تنظیم گلیسمی را نشان دهند [۱۴-۱۲]. در همین رابطه، نشان داده شده است که متابولیسم گلوکز با پایش مدام قندخون[4] تا بیش از ۲۴ ساعت پس از فعالیت ورزشی حاد مقاومتی و فعالیت‌های تداومی با شدت متوسط در افراد مبتلا به T2D بهبود می‌یابد [۱۵]. در ارتباط با آثار فعالیت ورزشی حاد بر CGM در افراد بدون ابتلا به دیابت نوع ۲ اطلاعات محدودی وجود دارد. گزارش شده است که یک جلسه فعالیت ورزشی مقاومتی و همچنین تداومی منجر به بهبود تنظیم گلیسمی در افراد مبتلا به اختلال تحمل گلوکز می‌شود [۱۵]. بنابراین CGM به عنوان یک ابزار ارزشمند برای ارزیابی تأثیر فعالیت ورزشی بر روند پایش قند خون در افراد مبتلا به T2D یا در معرض خطر T2D و در نتیجه کاهش بیماری‌های قلبی عروقی مطرح شده است [۱۶].

بر اساس مطالعات انجام‌شده، پیاده‌روی با شدت کم یا متوسط باعث کاهش غلظت گلوکز بعد از وعده غذایی به واسطه فعال‌سازی مسیر سیگنالینگ برداشت گلوکز و همچنین تعدیل مسیر سیگنالینگ انسولین در ارتباط با افزایش ظرفیت انتقال گلوکز می‌شود [۱۷]، اما نکته مهمی که وجود دارد، زمان اجرای فعالیت ورزشی است. بر این اساس، اجرای فعالیت ورزشی قبل از وعده غذایی نیز یکی از استراتژی‌های مؤثر برای پایش گلوکزخون بعد از وعده غذایی شناخته شده است. برخی مطالعات اثربخشی بیشتر فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی نسبت به فعالیت ورزشی قبل از غذا و یا بدون مداخله تمرینی را در کاهش سطوح گلایسمیک ناشی از وعده غذایی در افراد مبتلا به دیابت نوع ۲ را گزارش کردند [۱۸]، که البته تناقض موجود به نوعی ممکن است به دلیل فاصله دوره زمانی انجام فعالیت نیز باشد [۱۹]. پارکر و همکاران اثر دو شیوه تمرین تناوبی شدید و کم حجم در مقابل تمرین تداومی با شدت کم و حجم زیاد را روی تغییرات شاخص گلیسمی در زنان چاق بررسی و اظهار کردند که با وجود افزایش فشار اکسیداتیو پس از وعده غذایی (صبحانه) متعاقب تمرینات تناوبی شدید در مقایسه با تمرینات تداوم، طی یک دوره ۲۴ ساعته پس از تمرین، اثرات هر دو شیوه تمرینی در بهبود و کنترل گلایسمی در افراد بزرگسال چاق یکسان بود. به طور کلی تمرینات تناوبی شدید با حجم فعالیت و دوره زمانی کمتر نسبت به تمرینات تداومی طولانی‌مدت، شیوه تمرینی مناسبی برای بهبود کنترل گلیسمی در افراد دارای اضافه وزن / چاق و یا دارای مقاومت انسولینی زیاد محسوب می‌شوند [۲۰]. از سولومون و همکاران نیز گزارش کردند که یک جلسه تمرین ورزشی با شدت متوسط مستقل از زمان انجام آن (قبل یا بعد از غذا خوردن) باعث کاهش سطوح هایپرگلیسمی بعد از غذا در یک رژیم غذایی پرچرب نیز می‌شود [۲۱، ۲۲].

مهم‌تر اینکه گزارش شده است که اجرای فعالیت ورزشی حاد در طول روز صرف نظر از زمان اجرا (پیش از وعده غذایی، پس از وعده غذایی و به صورت تناوبی در طول روز) می‌تواند آثار مثبتی بر گلوکز بعد از وعده غذایی و CGM داشته باشد [۲۲]. سولومون و همکاران در مطالعه خود نشان دادند که انجام تمرینات سبک متوسط بلافاصله پس از صبحانه می‌تواند در کنترل گلوکز خون مؤثر باشد و نوع تمرین اهمیت کمتری دارد [۲۳]. از سوی دیگر هدن و همکاران نیز در پژوهش خود گزارش کردند که اجرای تمرینات مقاومتی قبل و بعد از وعده غذایی منجر به کنترل قند خون می‌شود، اما اجرای تمرین بعد از وعده غذایی ضمن کنترل قند خون، موجب تقلیل سطوح تری‌گلیسریدهای خون و بنابراین بهبود این دو عامل خطرزای بیماری‌های قلبی عروقی می‌شود [۲۴]. زی هانگ و همکاران مطالعه‌ای با هدف بررسی اثر زمان‌بندی تمرین با یک رویکرد فردی روی سطوح گلوکز پس از وعده غذایی در مردان دارای اضافه وزن و چاق انجام و نشان دادند که ۲۰ دقیقه پیاده‌روی قبل از اوج سطوح گلوکز پس از وعده غذایی[5]، موجب کاهش گلوکز و انسولین پلاسما، غلظت پپتید C در مردان چاق و به‌ویژه در افراد دارای شاخص توده بدن زیاد در وضعیت نشسته شده است. کاهش در غلظت پپتید C و انسولین پلاسما هنگام شروع فعالیت در دوره زمانی اوج گلوکز پس از وعده غذایی بیشتر و اثربخشی چشمگیری مشاهده شد [۲۵]. مارا و همکاران در مقاله مروری خود درباره وعده‌های غذایی و زمان‌بندی تمرینات با بررسی تعداد بیست مقاله نشان داده‌اند که انجام تمرین پس از وعده غذایی بدون توجه به ساعات روز می‌تواند اثرات سودمندی روی کنترل قند خون افرد تندرست و دارای اضافه وزن / چاق یا بیماران دیابتی داشته باشد؛ همچنین به دلیل تفاوت‌های ذاتی بین مطالعات انجام‌شده، شواهد کافی در حمایت از انجام تمرین قبل از وعده غذایی یا برعکس در بهبود گلیسمی وجود ندارد و به مطالعات بیشتری نیاز است [۲۶].

از آنجایی که مطالعات بسیار محدود و متناقضی در این رابطه وجود دارد و کسب دانش بیشتر در این خصوص می‌تواند به افراد چاق و به‌ویژه مبتلا به دیابت نوع ۲ در کنترل این عارضه و بیماری‌های قلبی عروقی ناشی از آن بسیار کمک کند انجام تحقیقات بیشتر در این خصوص ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر زمان‌بندی تمرین ورزشی (پیش از وعده غذایی، پس از وعده غذایی و به شکل تناوبی در طول روز) بر سطوح افزایش‌یافته گلوکز بعد از وعده‌های غذایی در زنان میان‌سال و چاق انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نوع نیمه‌تجربی با طرح متقاطع بوده و جامعه آماری مطالعه را زنان چاق شهر اصفهان تشکیل می‌دادند که به شکل در دسترس و هدفمند انتخاب شدند. برای این منظور

3. Oral Glucose Tolerance Test (OGT)
4. Continuous Glucose Monitoring (CGM)
5. Postprandial Glucose Peak (PPGP)

پس از فراخوان اولیه در سطح شهر اصفهان در نهایت ۱۰ نفر (میانگین±انحراف معیار سن: ۳/۹۷±۴۰/۴۱، وزن: ۷/۲۶±۸۶/۶۰، BMI: ۲/۲۰±۳۳/۲۲) با توجه به معیارهای پژوهش، پس از تکمیل پرسش‌نامه سلامت، پرسش‌نامه فعالیت بدنی و اخذ رضایت‌نامه کتبی برای نمونه انتخاب شدند. معیارهای ورود به پژوهش حاضر شامل: سلامت جسمانی لازم برای اجرای فعالیت ورزشی هوازی، نداشتن فعالیت ورزشی منظم در یک سال اخیر، چرخه قاعدگی منظم، نداشتن رژیم غذایی خاص، مبتلا نبودن به دیابت نوع ۲ و بیماری‌های قلبی عروقی، مصرف نکردن داروهای کاهش وزن، استفاده نکردن از دخانیات و الکل، قرار گرفتن در محدوده ۳۵ تا ۴۵ سال، داشتن شاخص توده بدنی بیشتر از ۳۰ و یائسه نبودن بود. معیارهای خروج از تحقیق شامل خروج داوطلبانه از روند تحقیق و بروز آسیب بود. پس از انتخاب آزمودنی‌ها در چهار مداخله فعالیت ورزشی قبل از وعده غذایی، فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی، فعالیت ورزشی تناوبی و کنترل به فاصله ۵ روز شرکت داشتند. همه آزمودنی‌ها در یک جلسه آشنایی قبل از شروع تحقیق، از شیوه اجرای آزمون آگاهی کامل یافته و اندازه‌گیری‌های ترکیب بدنی (شاخص‌های قد، وزن، BMI و درصد چربی) آن‌ها انجام شد. آزمودنی‌های پژوهش حاضر، طی دوره تحقیق در هیچ نوع فعالیت ورزشی شرکت نکردند و رژیم غذایی خود را تغییر ندادند.

پروتکل مداخلات ورزشی

در این مطالعه مداخلات ورزشی به شکل تصادفی انجام شدند، به این ترتیب که تمام شرکت‌کنندگان در روز قبل از مداخلات، وعده‌های غذایی یکسانی را مصرف کردند و بعد از ۱۰ ساعت ناشتا به آزمایشگاه مراجعه کردند و خون‌گیری از آن‌ها انجام شد. سطوح گلوکز آزمودنی‌ها با استفاده از کیت پارس آزمون ایران اندازه‌گیری شد.

مداخلات در ۴ روز کامل و با ۵ روز استراحت بین هر جلسه تمرینی انجام شد، به این ترتیب که در هر روز آزمودنی‌ها به شکل تصادفی در چهار گروه: ۱. کنترل (بدون تمرین)؛ ۲. گروه تمرین قبل از وعده غذایی؛ ۳. گروه تمرین بعد از وعده غذایی؛ و ۴. گروه تمرین تناوبی تقسیم و به شرح زیر در مداخلات شرکت داشتند. گروه کنترل دارای فعالیت روزانه بدون اجرای فعالیت ورزشی بود، و در دوره‌های زمانی معین سطوح گلوکز شرکت‌کنندگان اندازه‌گیری شد (تصویر شماره ۱).

مداخله فعالیت ورزشی قبل از وعده غذایی شامل ۲۰ وهله فعالیت ورزشی ۱ دقیقه‌ای با دوره‌های استراحتی ۳۰ ثانیه بود که در طول روز ۳ بار و ۳۰ دقیقه قبل از هر وعده غذایی (صبحانه، ناهار و شام) انجام شد. فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی شامل ۲۰ وهله فعالیت ورزشی ۱ دقیقه‌ای با دوره‌های استراحت ۳۰ ثانیه‌ای بود که در طول روز ۳ بار و ۳۰ دقیقه بعد از هر وعده غذایی (صبحانه، ناهار و شام) انجام شد. همچنین، فعالیت ورزشی تناوبی شامل ۳ دوره فعالیت ورزشی ۱ دقیقه‌ای با استراحت ۳۰ ثانیه‌ای بود که در طول روز هر ۳۰ دقیقه یک مرتبه تکرار و انجام شد. تمامی فعالیت‌های ورزشی هوازی برای همه مداخلات شامل دویدن آرام و سبک بود. شرکت‌کنندگان با استفاده از یک نوارگردان با شدت زیرآستانه لاکتات به فعالیت پرداختند که مدت کل آزمون برای تمامی مداخلات درمجموع ۶۰ دقیقه بود.

پایش مداوم گلوکز: سطوح گلوکز با استفاده از یک دستگاه گلوکومتر (مدل ۰۱ ساخت کشور ژاپن) اندازه‌گیری شد. برای این کار طی ۱۲ ساعت پس از حضور آزمودنی‌ها به ازای هر یک ساعت یک مرتبه اندازه‌گیری گلوکز خون انجام و مساحت زیرمنحنی (AUC) محاسبه شد.

ارزیابی گلوکز خون بعد از وعده غذایی: سطوح PPG از ابتدای هر وعده غذایی تا ۱۲۰ دقیقه پس از آن محاسبه شد. برای این کار گلوکز خون در زمان‌های صفر، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه با استفاده از گلوکومتر اندازه‌گیری و مساحت زیر منحنی (AUC) محاسبه شد.

ارزیابی ترکیب بدن و استقامت قلبی تنفسی

برای اندازه‌گیری ترکیب بدن شامل شاخص توده بدن، درصد چربی بدن و متابولیسم پایه شرکت‌کنندگان از دستگاه سنجش ترکیب بدن (In Body ۲۷۰) ساخت کشور کره جنوبی استفاده شد. برای تعیین استقامت قلبی تنفسی شرکت‌کنندگان ۳ روز قبل از اجرای پروتکل‌های مداخله‌ای از طریق آزمون چند مرحله‌ای دویدن/ راه رفتن روی نوارگردان با افزایش ۴دقیقه‌ای سرعت نوارگردان (۱۰ متر/دقیقه) و ۱ دقیقه استراحت اقدام شد. همچنین برای تعیین آستانه لاکتات و شدت تمرینی، اندازه‌گیری سطوح لاکتات خون با استفاده از یک لاکتومتر (Lactate Pro) ساخت کشور ژاپن انجام شد [۲۷، ۲۸].

ارزیابی حجم غذای روزانه استاندارد در روز مداخله

در ابتدا از شرکت‌کنندگان درخواست شد تا در دو روز مقادیر و نوع غذای مصرفی خود را به طور دقیق یادداشت و ارائه کنند، و بر اساس نوع و کیفیت مواد غذایی مصرفی روزانه جیره غذایی آزمودنی‌ها مشخص شد. مقادیر متابولیسم پایه آزمودنی‌ها با استفاده از دستگاه ترکیب بدن و معادله‌های معتبر موجود برآورد و سپس انرژی دریافتی روزانه بر اساس مقادیر متابولیسم پایه و ضریب فعالیت هر فرد تعیین شد [۲۹]. به طور میانگین مقادیر انرژی دریافتی روزانه ۱۰۳/۴۱±۲۳۶۱/۰۸ کیلوکالری شامل حدود ۵۵ درصد کربوهیدرات، ۳۰ درصد چربی و ۱۵ درصد پروتئین (انرژی صبحانه: حدود ۷/۲۶±۶۲۵/۶۰ کیلوکالری؛ انرژی ناهار: حدود ۳/۵۶±۸۹۰/۴۰ و انرژی شام: حدود ۲/۲۰±۸۴۵/۰ کیلوکالری) بود. مدت‌زمان وعده غذایی در میان تمام آزمایش‌ها یکسان بود و از

شرکت‌کنندگان خواسته شد طی مدت ۱۵ دقیقه غذای خود را میل کنند و تنها مجاز به نوشیدنی آب در طول روز مداخله بودند. برای کنترل اثر مواد غذایی مصرفی در این چهار روز اجرای مداخلات، همه آزمودنی‌ها در روز مداخله جیره غذایی یکسانی دریافت کردند.

روش‌های آماری: داده‌های آماری به شکل میانگین و انحراف معیار ارائه شدند. پس از بررسی توزیع طبیعی داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو ویلک، از آزمون تحلیل واریانس اندازه‌گیری‌های تکراری برای مقایسه بین مداخلات و همچنین بررسی اثر زمان استفاده شد. در صورت معنی‌داری، آزمون تعقیبی بونفرونی به کار گرفته شد. محاسبات آماری در سطح معنی‌داری P<۰/۰۵ انجام و برای تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ و برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ استفاده شد.

یافته‌ها

ویژگی‌های توصیفی آزمودنی‌های تحقیق در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

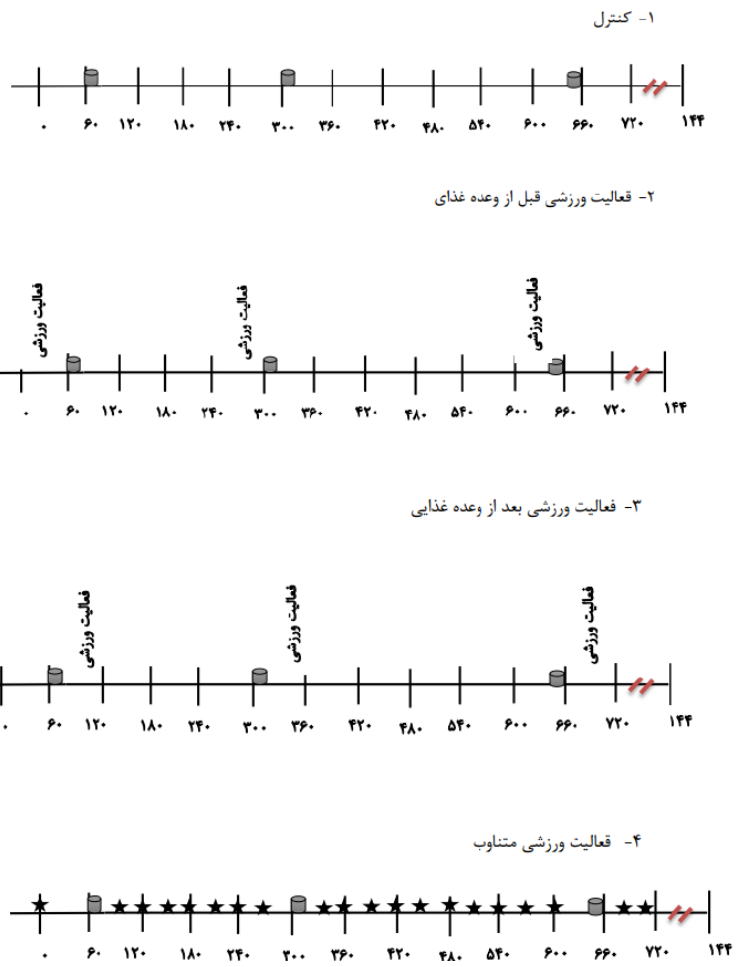
نتایج تحلیل داده‌ها نشان داد که فعالیت‌های تناوبی کوتاه‌مدت منجر به کاهش چشمگیر CGM نسبت به گروه کنترل و فعالیت ورزشی قبل از وعده غذایی شد (~۵ درصد) (P=۰/۰۰۱). از سوی دیگر بین تغییرات در سطوح CGM فعالیت ورزشی قبل و بعد از وعده غذایی تفاوت معنی‌داری مشاهده (P<۰/۰۵) (تصویر شماره ۲). علاوه بر این، نتایج مطالعه حاضر نشان داد که فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی و فعالیت ورزشی تناوبی منجر به کاهش بیشتر PPG نسبت به گروه کنترل شدند (به ترتیب ۶ و ~۱۰ درصد) (P=۰/۰۱)، ضمن این که کاهش در PPG در مداخله فعالیت ورزشی پیش از وعده غذایی نسبت به گروه کنترل معنی‌دار نبود (P>۰/۰۵). همچنین، فعالیت ورزشی تناوبی، نسبت به مداخلات ورزشی قبل و بعد از وعده غذایی اثربخشی بیشتری بر کاهش سطوح PPG نشان داد (به ترتیب ~۹ و ۵ درصد) (P=۰/۰۰۴). فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی نیز اثرات بیشتری بر کاهش گلوکز بعد از وعده غذایی نسبت به فعالیت ورزشی قبل از وعده غذایی داشت (۴ درصد) (P=۰/۰۱) (تصویر شماره ۳).

بحث

یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش حاضر این بود که انجام فعالیت‌های ورزشی تناوبی کوتاه‌مدت بیشتر منجر به کاهش معنی‌داری در CGM می‌شود، در حالی که آثار فعالیت ورزشی قبل و بعد از وعده غذایی بر CGM از لحاظ آماری معنی‌دار نبودند. به‌خوبی مشخص شده است که تمرین حاد ورزشی منجر به بهبود حساسیت انسولینی حدود ۲۴ تا ۴۸ ساعت بعد از فعالیت ورزشی می‌شود [۱۱]، با وجود این، به تأثیر زمان‌بندی فعالیت ورزشی بر CGM کمتر توجه شده است. اخیراً شامبروک و همکاران گزارش کردند که فعالیت ورزشی با شدت‌های متفاوت و ۳۰ دقیقه پس از یک وعده غذایی، نقش مؤثری در تنظیم گلیسمی بعد از وعده غذایی دارد [۳۰]. با توجه به این مسئله، در مطالعه حاضر تأثیرات معنی‌داری از فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی بر بهبود CGM مشاهده نشد که نشان می‌دهد تفاوت‌های چشمگیری بین نتایج مطالعه حاضر با نتایج شامبورک و همکاران وجود دارد. اگرچه به شکل دقیق نمی‌توان در این مورد نظر داد، با این حال تعداد، سطوح آمادگی، جنسیت و سطوح چاقی آزمودنی‌ها می‌تواند در این زمینه مؤثر باشند. از آنجایی که وضعیت متابولیکی افراد می‌تواند در پاسخ CGM به فعالیت ورزشی نقش داشته باشد، و غلظت گلوکز برای ۲۴ ساعت بعد از فعالیت ورزشی در افراد مبتلا به دیابت نوع ۲ کاهش می‌یابد، نتایج مطالعات در افراد بدون اختلال متابولیکی نشان می‌دهد که

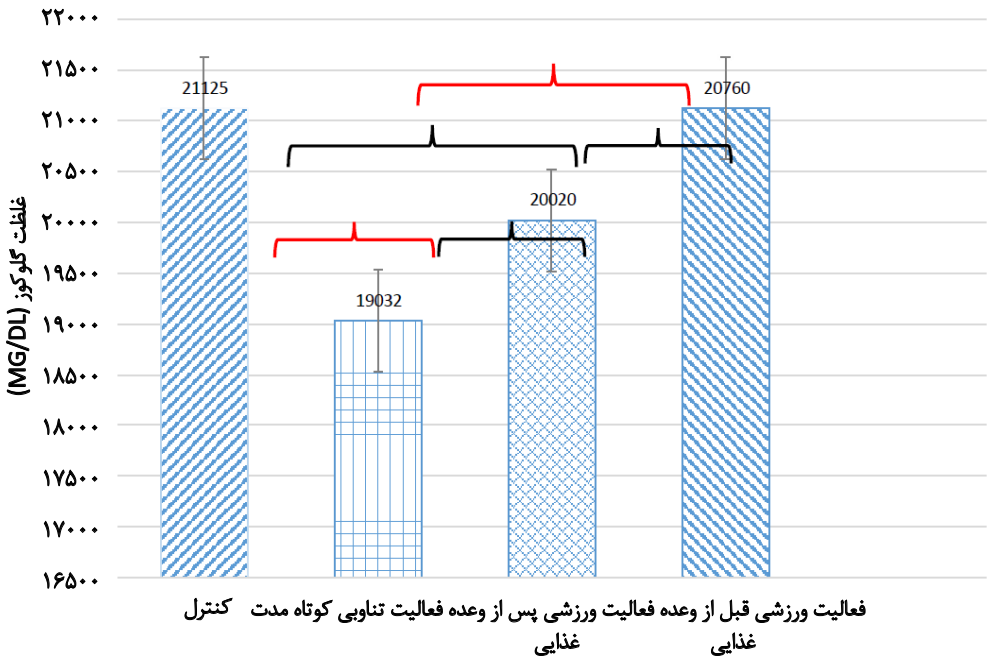
جدول ۱. میانگین و انحراف معیار ویژگی‌های فردی آزمودنی‌ها

متغیرها	میانگین±انحراف معیار
سن (سال)	۴۰/۴۱±۳/۰۹
وزن (کیلوگرم)	۸۶/۶۰±۷/۲۶
قد (سانتی‌متر)	۱۶۱/۴۰±۳/۵۶
شاخص توده بدن (کیلوگرم/ متر مربع)	۳۳/۲۲±۲/۲۰
درصد چربی	۳۵/۷۰±۳/۳۶
میزان متابولیسم پایه (کیلوکالری)	۱۵۷۴/۰۵±۶۸/۹۴
ظرفیت هوازی (میلی‌لیتر/ کیلوگرم در دقیقه)	۲۵/۶۰±۱/۸۹
سرعت نوارگردان (کیلومتر بر ساعت)	۵/۹۰±۰/۷۳



تصویر ۱. روند انجام مداخلات در گروه‌های تحقیق

تصویر ۲. تغییرات CGM گروه‌های تحقیق



تصویر ۳. تغییرات گلوکز پس از وعده غذایی در گروه گوناگون

* تفاوت معنی‌دار با گروه کنترل (P< ۰/۰۱)؛ # تفاوت معنی‌دار با گروه فعالیت پس از وعده غذایی (P< ۰/۰۱)؛ € تفاوت معنی‌دار با گروه فعالیت قبل از وعده غذایی (P< ۰/۰۱)؛ #€ تفاوت معنی‌دار با گروه فعالیت تناوبی (P< ۰/۰۱).

پاسخ گلوکز در مدت کوتاهی (۱ تا ۲ ساعت) حاصل می‌شود. بنابراین، با وجود نقش مؤثر فعالیت ورزشی در بهبود کنترل گلیسمی، مدت‌زمان بهبودی نیز ممکن است وابسته به وضعیت متابولیکی افراد با درجه‌ای از گلیسمی باشد [۳۰، ۳۱]. بنابراین، اثربخش نبودن فعالیت ورزشی قبل از وعده غذایی بر سطوح CGM ممکن است به دلیل وضعیت متابولیکی افراد باشد. زمان پایان تمرین و شروع مصرف وعده غذایی نیز اثرات بالقوه‌ای برای کنترل گلیسمی دارد، زیرا وعده‌های غذایی که در نزدیک به پایان تمرین مصرف شده‌اند، واکنش حساسیت انسولینی را تعدیل می‌کنند. در برخی مطالعات گذشته، هنگامی که اندازه‌گیری‌ها بلافاصله پس از تمرین صورت گرفته (برای مثال ~۳۰ دقیقه تا ۳ ساعت بعد از تمرین)، حساسیت انسولینی بهبود یافته است [۳۲]؛ در حالی که در اندازه‌گیری‌های دیگر حتی حساسیت انسولینی نیز در معرض تأثیر نبوده است [۳۳]. بنابراین، به نظر می‌رسد که وضعیت گلیسمی افراد و همچنین میزان اختلال متابولیکی می‌تواند در پاسخ CGM به فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی نقش داشته باشد. نتایج مطالعه حاضر نیز از نقش فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی در دوره‌های کوتاه‌تر (۱۲۰ دقیقه بعد از فعالیت ورزشی) حمایت می‌کند.

از سوی دیگر مشخص شد که فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی منجر به بهبودی در سطوح PPG شد. پیش از این نیز گزارش شده است که انجام فعالیت ورزشی پس از وعده غذای (۴۵ دقیقه) سطح گلوکز خون و انسولین را در بیماران مبتلا به دیابت کاهش می‌دهد. از سازوکارهای مؤثر بر کاهش گلوکز خون احتمالاً سوخت‌وساز بیشتر عضلات اسکلتی درگیر در فعالیت است [۳۴]. ویولت و همکاران نشان دادند که پروتئین کیناز فعال شده با AMP به دلیل افزایش نسبت AMP/ATPدر عضله اسکلتی فعال و منجر به جابه‌جایی غشایی GLUT4 می‌شود [۳۵]، اما اجرای فعالیت ورزشی در حالت ناشتا منجر به تحریک عرضه گلوکز از کبد به واسطه افزایش ترشح کاتکولامین‌ها می‌شود. علاوه بر این، روند گلیکوژنز در کبد به واسطه کاهش ترشح انسولین سرکوب می‌شود [۱۸]. بنابراین، آثار فعالیت ورزشی بعد از وعده غذایی ممکن است به دلیل اثرات تنظیمی فعالیت ورزشی بر متابولیسم گلوکز در کبد و عضله اسکلتی باشد که در افراد چاق در دوره‌های ۲ ساعته پس از فعالیت ورزشی حفظ می‌شود.

در مقابل، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که فعالیت ورزشی تناوبی اثرات چشمگیری بر بهبود CGM و PPG دارد که از اثرات فعالیت ورزشی قبل و بعد از وعده غذایی نیز بیشتر است. در همین راستا، مطالعات اخیر تأثیر پیاده‌روی بر سطوح PPG را در وضعیت ناشتایی در افراد چاق و سالم بررسی و گزارش کردند که ۲ دقیقه فعالیت در هر ۲۰ دقیقه به مدت ۵ ساعت CGM را کاهش می‌دهد [۳۴، ۳۶]. همچنین، پدی و همکاران و کاسیدی و همکاران گزارش کردند که تمرینات تناوبی متفاوت کوتاه‌مدت می‌تواند منجر به کاهش سطوح CGM پس از وعده غذایی شود [۱۶، ۳۷]. اخیراً زی هانگ و همکاران و هاتاماتو و همکاران در مطالعات خود نشان دادند که انجام فعالیت‌های

ورزشی تداومی و تناوبی بعد از وعده غذایی می‌تواند در کاهش سطوح PPG مؤثر باشند که با نتایج مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد [۲۵، ۳۸]؛ این نتایج با یافته‌های مطالعه حاضر نیز هم‌خوانی دارد. از سازوکارهای احتمالی این تغییرات اثر فعالیت ورزشی مکرر (انقباض‌های عضلانی مکرر) بر تحریک جذب گلوکز خون در عضلات اسکلتی به واسطه افزایش مستمر انتقال GLUT4 به سطح سلول و جذب مداوم گلوکز از خون ذکر شده است [۲۶]. در حقیقت، اجرای وهله‌های فعالیت ورزشی در طول روز ممکن است منجر به افزایش تعداد انقباضات عضلانی و در نتیجه افزایش جذب گلوکز شود [۳۹]، و در واقع این سازوکار مستقل از جذب گلوکز تحریکی به وسیله عمل انسولینی است [۳۹]. بنابراین، بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر، اجرای فعالیت‌های ورزشی تناوبی در طی روز به دلیل اثر بیشتر بر متابولیسم گلوکز عضلانی در نتیجه انقباض‌های متوالی، منجر به بهبود چشمگیر در سطوح PPG و CGM می‌شود [۲۳].

علاوه بر این، یافته‌های مطالعه حاضر نشان داد که فعالیت ورزشی قبل از وعده غذایی اثرات زیادی بر PPG و CGM در زنان چاق ندارد. در برخی مطالعات گذشته نیز همسو با یافته‌های مطالعه حاضر گزارش شده است که فعالیت ورزشی پس از وعده غذایی در کاهش PPG مؤثرتر از فعالیت ورزشی پیش از وعده غذایی در افراد سالم و بیماران مبتلا به دیابت است [۲۶، ۴۰]. کلبرگ و همکاران همسو با مطالعه حاضر گزارش کردند که حتی پیاده‌روی و فعالیت کم‌شدت نیز بعد از وعده غذایی باعث کاهش سطح PPG در مقایسه با گروه کنترل و فعالیت وورزشی پیش از وعده غذایی می‌شود [۱۸]. با وجود این، اغلب مطالعات نشان داده‌اند که فعالیت ورزشی از قبیل ورزش‌های هوازی پس از وعده غذایی می‌تواند موجب کاهش در سطوح PPG شود [۴۱، ۴۲]. فعالیت‌های ورزشی مقاومتی پس از وعده غذایی نیز می‌توانند در کنترل گلوکز خون بسیار مؤثر باشند [۲۴، ۲۶]. نتایج برخی مطالعات حاکی از اثربخشی تمرینات ورزشی شدید و بالای آستانه لاکتات پیش از وعده غذایی سطح PPG است، اما از سوی دیگر با توجه به شدت زیاد تمرینات اجرای آن در افراد دارای اضافه وزن و چاق نیازمند به انگیزه بسیار بیشتری است، بنابراین در خصوص انتخاب بهترین شیوه تمرینی با توجه به وضعیت فرد نیاز به مطالعات بیشتری است [۴۱، ۴۲]. در هر حال انجام فعالیت‌های ورزشی پیش از وعده غذایی نیز ممکن است تحریک‌کننده جذب گلوکز باشند [۴۳]، شدت فعالیت به واسطه افزایش و فعال‌سازی AMPK نقش مؤثری در کاهش PPG ایفا می‌کند که در نتیجه افزایش انتقال GLUT4 در عضله اسکلتی را به دنبال دارد [۴۴، ۴۵]. مطالعات اندکی وجود دارد که به طور مستقیم پاسخ‌های گلیکوزمی را بین مداخلات ورزشی قبل و بعد از رژیم غذایی مقایسه کرده‌اند و در آینده باید تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود. ازمحدودیت‌های این مطالعه می‌توان به حجم نمونه اندک و ممکن نبودن بررسی سطوح گلوکز خون ۲۴ ساعته با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی اشاره کرد. همچنین به دلیل محدودیت در هزینه‌ها امکان اندازه‌گیری برخی آنزیم‌های اکسیداتیو، انسولین و نیم‌رخ لیپیدی وجود نداشت؛ پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده به آن توجه شود.

نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که اجرای فعالیت‌های هوازی تناوبی می‌تواند اثرات چشمگیری بر متابولیسم گلوکز پس از وعده غذایی داشته باشد که میزان آن نسبت به اثرات فعالیت ورزشی قبل وعده غذایی بیشتر است. بنابراین، با توجه به اثربخشی فعالیت ورزشی تناوبی کوتاه‌مدت طی روز بر CGM و PPG، این روش تمرینی نیز می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای کنترل و پایش گلوکز خون بعد از وعده‌های غذایی در افراد دارای چاقی و احتمالاً مبتلا به بیماری‌های قلبی عروقی و دیابت نوع ۲ استفاده شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مطالعه با اخذ مجوز و دریافت کد اخلاق پژوهشی با شماره IR.UI.REC.1397.119 کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه اصفهان شروع و اجرا شد.

حامی مالی

این مقاله از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول در گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه اصفهان، اصفهان استخراج شده است. همچنین این مقاله با حمایت‌های مالی و معنوی معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه اصفهان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

هر دو نویسنده در طراحی، اجرا و نگارش همه بخش‌های پژوهش حاضر مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در انتشار این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

References

[1] O'Keefe JH, Bell DS. Postprandial hyperglycemia/hyperlipidemia (postprandial dysmetabolism) is a cardiovascular risk factor. Am J Cardiol. 2007; 100(5):899-904. [DOI:10.1016/j.amjcard.2007.03.107] [PMID]

[2] Sorkin JD, Muller DC, Fleg JL, Andres R. The relation of fasting and 2-h postchallenge plasma glucose concentrations to mortality: Data from the Baltimore Longitudinal Study of Aging with a critical review of the literature. Diabetes Care. 2005; 28(11):2626-32. [DOI:10.2337/diacare.28.11.2626] [PMID]

[3] Lin HJ, Lee BC, Ho YL, Lin YH, Chen CY, Hsu HC, et al. Postprandial glucose improves the risk prediction of cardiovascular death beyond the metabolic syndrome in the nondiabetic population. Diabetes Care. 2009; 32(9):1721-6. [DOI:10.2337/dc08-2337] [PMID] [PMCID]

[4] Ning F, Zhang L, Dekker JM, Onat A, Stehouwer CD, Yudkin JS, et al. DECODE finnish and Swedish study investigators. Development of coronary heart disease and ischemic stroke in relation to fasting and 2-hour plasma glucose levels in the normal range. Cardiovasc Diabetol. 2012; 11:76. [DOI:10.1186/1475-2840-11-76] [PMID] [PMCID]

[5] Cavalot F, Pagliarino A, Valle M, Di Martino L, Bonomo K, Massucco P, et al. Postprandial blood glucose predicts cardiovascular events and all-cause mortality in type 2 diabetes in a 14-year follow-up: Lessons from the San Luigi Gonzaga Diabetes Study. Diabetes Care. 2011; 34(10):2237-43. [DOI:10.2337/dc10-2414] [PMID] [PMCID]

[6] Ceriello A, Taboga C, Tonutti L, Quagliaro L, Piconi L, Bais B, et al. Evidence for an independent and cumulative effect of postprandial hypertriglyceridemia and hyperglycemia on endothelial dysfunction and oxidative stress generation: Effects of short- and long-term simvastatin treatment. Circulation. 2002; 106(10):1211-8. [DOI:10.1161/01.CIR.0000027569.76671.A8] [PMID]

[7] Ceriello A, Esposito K, Piconi L, Ihnat MA, Thorpe JE, Testa R, et al. Oscillating glucose is more deleterious to endothelial function and oxidative stress than mean glucose in normal and type 2 diabetic patients. Diabetes. 2008; 57(5):1349-54. [DOI:10.2337/db08-0063] [PMID]

[8] Tokmakidis SP, Zois CE, Volaklis KA, Kotsa K, Touvra AM. The effects of a combined strength and aerobic exercise program on glucose control and insulin action in women with type 2 diabetes. Eur J Appl Physiol. 2004; 92(4-5):437-42. [DOI:10.1007/s00421-004-1174-6] [PMID]

[9] Azali K, Yavari Y, Hosseinzadeh R, Rahbar Ghazi A. [Effect of aerobic training before and after a meal on serum acylated ghrelin level, daily energy intake and single exercise energy expenditure in overweight men (Persian)]. Metab Exerc. 2019; 9(1):15-25. [DOI:10.22124/JME.2020.4353]

[10] Bacchi E, Negri C, Trombetta M, Zanolin ME, Lanza M, Bonora E, et al. Differences in the acute effects of aerobic and resistance exercise in subjects with type 2 diabetes: Results from the RAED2 Randomized Trial. PLoS One. 2012; 7(12):e49937. [DOI:10.1371/journal.pone.0049937] [PMID] [PMCID]

[11] Newsom SA, Everett AC, Hinko A, Horowitz JF. A single session of low-intensity exercise is sufficient to enhance insulin sensitivity into the next day in obese adults. Diabetes Care. 2013; 36(9):2516-22. [DOI:10.2337/dc12-2606] [PMID] [PMCID]

[12] Mikus CR, Oberlin DJ, Libla J, Boyle LJ, Thyfault JP. Glycaemic control is improved by 7 days of aerobic exercise training in patients with type 2 diabetes. Diabetologia. 2012; 55(5):1417-23. [DOI:10.1007/s00125-012-2490-8] [PMID] [PMCID]

[13] Mikus CR, Oberlin DJ, Libla JL, Taylor AM, Booth FW, Thyfault JP. Lowering physical activity impairs glycemic control in healthy volunteers. Med Sci Sports Exerc. 2012; 44(2):225-31. [DOI:10.1249/MSS.0b013e31822ac0c0] [PMID] [PMCID]

[14] Mikus CR, Fairfax ST, Libla JL, Boyle LJ, Vianna LC, Oberlin DJ, et al. 7 days of aerobic exercise training improves conduit artery blood flow following glucose ingestion in patients with type 2 diabetes. J Appl Physiol. 2011; 111(3):657-64. [DOI:10.1152/japplphysiol.00489.2011] [PMID] [PMCID]

[15] van Dijk JW, Manders RJ, Tummers K, Bonomi AG, Stehouwer CD, Hartgens F, et al. Both resistance- and endurance-type exercise reduce the prevalence of hyperglycaemia in individuals with impaired glucose tolerance and in insulin-treated and non-insulin-treated type 2 diabetic patients. Diabetologia. 2012; 55(5):1273-82. [DOI:10.1007/s00125-011-2380-5] [PMID] [PMCID]

[16] Cassidy S, Thoma C, Houghton D, Trenell MI. High-intensity interval training: A review of its impact on glucose control and cardiometabolic health. Diabetologia. 2017; 60(1):7-23. [DOI:10.1007/s00125-016-4106-1] [PMID] [PMCID]

[17] Bergouignan A, Latouche C, Heywood S, Grace MS, Reddy-Luthmoodoo M, Natoli AK, et al. Frequent interruptions of sedentary time modulates contraction- and insulin-stimulated glucose uptake pathways in muscle: Ancillary analysis from randomized clinical trials. Sci Rep. 2016; 6:32044. [DOI:10.1038/srep32044] [PMID] [PMCID]

[18] Colberg SR, Zarrabi L, Bennington L, Nakave A, Thomas Somma C, Swain DP, et al. Postprandial walking is better for lowering the glycemic effect of dinner than pre-dinner exercise in type 2 diabetic individuals. J Am Med Dir Assoc. 2009; 10(6):394-7. [DOI:10.1016/j.jamda.2009.03.015] [PMID]

[19] Terada T, Wilson BJ, Myette-Côté E, Kuzik N, Bell GJ, McCargar LJ, et al. Targeting specific interstitial glycemic parameters with high-intensity interval exercise and fasted-state exercise in type 2 diabetes. Metabolism. 2016; 65(5):599-608. [DOI:10.1016/j.metabol.2016.01.003] [PMID]

[20] Parker L, Shaw CS, Banting L, Levinger I, Hill KM, McAinch AJ, et al. Acute low-volume high-intensity interval exercise and continuous moderate-intensity exercise elicit a similar improvement in 24-h glycemic control in overweight and obese adults. Front Physiol. 2017; 7:661. [DOI:10.3389/fphys.2016.00661] [PMID] [PMCID]

[21] Katsanos CS, Moffatt RJ. Acute effects of premeal versus postmeal exercise on postprandial hypertriglyceridemia. Clin J Sport Med. 2004; 14(1):33-9. [DOI:10.1097/00042752-200401000-00006] [PMID]

[22] Solomon TPJ. Sources of inter-individual variability in the therapeutic response of blood glucose control to exercise in type 2 diabetes: Going beyond exercise dose. Front Physiol. 2018; 9:896. [DOI:10.3389/fphys.2018.00896] [PMID] [PMCID]

[23] Solomon TPJ, Tarry E, Hudson CO, Fitt AI, Laye MJ. Immediate post-breakfast physical activity improves interstitial postprandial glycemia: A comparison of different activity-meal timings. Pflugers Arch. 2020; 472(2):271-80. [DOI:10.1007/s00424-019-02300-4] [PMID] [PMCID]

[24] Heden TD, Winn NC, Mari A, Booth FW, Rector RS, Thyfault JP, et al. Postdinner resistance exercise improves postprandial risk factors more effectively than predinner resistance exercise in patients with type 2 diabetes. J Appl Physiol (1985). 2015; 118(5):624-34. [DOI:10.1152/japplphysiol.00917.2014] [PMID] [PMCID]

[25] Zhang X, Wongpipit W, Sun F, Sheridan S, Huang WYJ, Sit CHP, et al. Walking initiated 20 minutes before the time of individual postprandial glucose peak reduces the glucose response in young men with overweight or obesity: A randomized crossover study. J Nutr. 2021; 151(4):866-75. [DOI:10.1093/jn/nxaa420] [PMID]

[26] Aqeel M, Forster A, Richards EA, Hennessy E, McGowan B, Bhadra A, et al. The effect of timing of exercise and eating on postprandial response in adults: A systematic review. Nutrients. 2020; 12(1):221. [DOI:10.3390/nu12010221] [PMID] [PMCID]

[27] Wicks JR, Oldridge N B. How accurate is the prediction of maximal oxygen uptake with treadmill testing? PLoS One. 2016; 11(11):e0166608. [DOI:10.1371/journal.pone.0166608] [PMID] [PMCID]

[28] Christle JW, Arena R. Cardiopulmonary exercise testing and prescription of exercise. In: Pressler A, Niebauer J, editors. Textbook of Sports and exercise cardiology. Germany: Springer, Cham; 2020. [DOI:10.1007/978-3-030-35374-2_43]

[29] Xue J, Li S, Zhang Y, Hong P. Accuracy of predictive resting-metabolic-rate equations in Chinese mainland adults. Int J Environ Res Public Health. 2019; 16(15):2747. [DOI:10.3390/ijerph16152747] [PMID] [PMCID]

[30] Shambrook P, Kingsley MI, Wundersitz DW, Xanthos PD, Wyckelsma VL, Gordon BA. Glucose response to exercise in the post-prandial period is independent of exercise intensity. Scand J Med Sci Sports. 2018; 28(3):939-46. [DOI:10.1111/sms.12999] [PMID]

[31] Manders RJ, Van Dijk JW, van Loon LJ. Low-intensity exercise reduces the prevalence of hyperglycemia in type 2 diabetes. Med Sci Sports Exerc. 2010; 42(2):219-25. [DOI:10.1249/MSS.0b013e3181b3b16d] [PMID]

[32] Holtz KA, Stephens BR, Sharoff CG, Chipkin SR, Braun B. The effect of carbohydrate availability following exercise on whole-body insulin action. Appl Physiol Nutr Metab. 2008; 33(5):946-56. [DOI:10.1139/H08-077] [PMID]

[33] Weltman NY, Rynders CA, Gaesser G, Weltman JY, Barrett EJ, Arthur W. Exercise intensity does not affect glucose disposal in euglycemic abdominally obese adults. Obe Metab. 2010; 6(4):86-93. https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/exercise-intensity-does-not-affect-glucose-disposal-in-euglycemic

[34] Larsen JJ, Dela F, Kjaer M, Galbo H. The effect of moderate exercise on postprandial glucose homeostasis in NIDDM patients. Diabetologia. 1997; 40(4):447-53. [DOI:10.1007/s001250050699] [PMID]

[35] Viollet B, Lantier L, Devin-Leclerc J, Hebrard S, Amouyal C, Mounier R, et al. Targeting the AMPK pathway for the treatment of type 2 diabetes. Front Biosci (Landmark Ed). 2009; 14:3380-400. [DOI:10.2741/3460] [PMID]

[36] Bailey DP, Locke CD. Breaking up prolonged sitting with light-intensity walking improves postprandial glycemia, but breaking up sitting with standing does not. J Sci Med Sport. 2015; 18(3):294-8. [DOI:10.1016/j.jsams.2014.03.008] [PMID]

[37] Peddie MC, Bone JL, Rehrer NJ, Skeaff CM, Gray AR, Perry TL. Breaking prolonged sitting reduces postprandial glycemia in healthy, normal-weight adults: A randomized crossover trial. Am J Clin Nutr. 2013; 98(2):358-66. [DOI:10.3945/ajcn.112.051763] [PMID]

[38] Hatamoto Y, Goya R, Yamada Y, Yoshimura E, Nishimura S, Higaki Y, et al. Effect of exercise timing on elevated postprandial glucose levels. J Appl Physiol (1985). 2017; 123(2):278-84. [DOI:10.1152/japplphysiol.00608.2016] [PMID]

[39] Sylow L, Kleinert M, Richter EA, Jensen TE. Exercise-stimulated glucose uptake- regulation and implications for glycaemic control. Nat Rev Endocrinol. 2017; 13(3):133-48. [DOI:10.1038/nrendo.2016.162] [PMID]

[40] Haxhi J, Scotto di Palumbo A, Sacchetti M. Exercising for metabolic control: Is timing important? Ann Nutr Metab. 2013; 62(1):14-25. [DOI:10.1159/000343788] [PMID]

[41] Francois ME, Baldi JC, Manning PJ, Lucas SJ, Hawley JA, Williams MJ, et al. 'Exercise snacks' before meals: A novel strategy to improve glycaemic control in individuals with insulin resistance. Diabetologia. 2014; 57(7):1437-45. [DOI:10.1007/s00125-014-3244-6] [PMID]

[42] Rynders CA, Weltman JY, Jiang B, Breton M, Patrie J, Barrett EJ, et al. Effects of exercise intensity on postprandial improvement in glucose disposal and insulin sensitivity in prediabetic adults. J Clin Endocrinol Metab. 2014; 99(1):220-8. [DOI:10.1210/jc.2013-2687] [PMID] [PMCID]

[43] Garetto LP, Richter EA, Goodman MN, Ruderman NB. Enhanced muscle glucose metabolism after exercise in the rat: The two phases. Am J Physiol. 1984; 246(6 Pt 1):E471-5. [DOI:10.1152/ajpendo.1984.246.6.E471] [PMID]

[44] Chen ZP, Stephens TJ, Murthy S, Canny BJ, Hargreaves M, Witters LA, et al. Effect of exercise intensity on skeletal muscle AMPK signaling in humans. Diabetes. 2003; 52(9):2205-12. [DOI:10.2337/diabetes.52.9.2205] [PMID]

[45] Fujii N, Hayashi T, Hirshman MF, Smith JT, Habinowski SA, Kaijser L, et al. Exercise induces isoform-specific increase in 5'AMP-activated protein kinase activity in human skeletal muscle. Biochem Biophys Res Commun. 2000; 273(3):1150-5. [DOI:10.1006/bbrc.2000.3073] [PMID]