

اثر فعالیت بی‌هوای در دماهای متفاوت محیط بر تغییرپذیری ضربان قلب و عوامل گازی اسیدوز خون در افراد تمرین‌کرده

سحر زارع^۱، جواد مهربانی^۲، ابوالفضل رحمانی^۳

چکیده

اهداف: دمای محیط می‌تواند فعالیت دستگاه عصبی خودمختار و بار متابولیکی فعالیت‌های شدید را تحت‌تأثیر قرار دهد. هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر یک جلسه فعالیت بی‌هوای در سه دمای متفاوت بر شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب (HRV) و وضعیت اسید-باز خون در افراد تمرین‌کرده بود.

روش مطالعه: این مطالعه نیمه‌تجربی با طرح متقاطع و کانتربالانس روی ۱۲ ورزشکار تمرین‌کرده انجام شد. هر آزمودنی آزمون بی‌هوای وینگیت را در دماهای بالا (۴۰°C)، نرمال (۲۰°C) و پایین (۸-۱۵°C) با فاصله یک‌هفته اجرا کرد. ضربان قلب طی فعالیت ثبت و شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب (LF، HF، RMSSD)، نسبت LF/HF با نرم‌افزار Kubios تحلیل شد. نمونه خون قبل و بلافاصله پس از فعالیت برای اندازه‌گیری لاکتات، pH و بی‌کربنات جمع‌آوری شد. داده‌ها با آنوا با اندازه‌گیری مکرر تحلیل شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از آزمون تحلیل واریانس نشان داد در مقدار RMSSD ($P=0.001$)، LF ($P=0.036$)، HF ($P=0.001$) و نسبت LF/HF ($P=0.001$) بین دماهای مختلف تفاوت معناداری وجود دارد. همچنین در مقدار لاکتات نیز در بین سه دما تفاوت معناداری مشاهده شد ($P=0.017$) اما در مقدار PH و یون بیکربنات تفاوت معناداری مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد دمای محیط موجب تفاوت معنادار در شاخص‌های HRV طی فعالیت بی‌هوای می‌شود و نشان می‌دهد شدت پاسخ خودمختار قلبی وابسته به شرایط حرارتی تغییر می‌کند. دما بر بار متابولیکی اثر می‌گذارد، اما در این مدت کوتاه تغییری در وضعیت اسید-باز خون ایجاد نمی‌کند. به عبارتی دما می‌تواند پاسخ‌های خودمختار قلبی و متابولیکی را تعدیل کند و در تفسیر HRV مدیریت بار بی‌هوای در محیط‌های حرارتی مختلف باید مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: فعالیت بی‌هوای، دما، سیستم عصبی خودکار، تغییرپذیری ضربان قلب، اسیدوز خون

^۱ کارشناس ارشد فیزیولوژی ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

^۲ دانشیار گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. نویسنده مسئول: mehrabanij@guilan.ac.ir

^۳ استادیار گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشکده فنی و علوم پایه، دانشگاه امام جواد، یزد، ایران.

مقدمه

گرما از مهم‌ترین عوامل افت عملکرد، افزایش خطر آسیب‌دیدگی و حتی مرگ‌ومیر در ورزش است. فشار گرمایی ناشی از دمای بالا با اختلال در هموستاز و تحمیل بار حرارتی بر سیستم‌های قلبی-عروقی، عصبی و متابولیک، توان بدن را کاهش می‌دهد؛ این اثر در ورزشکاران حرفه‌ای طی رویدادهای بزرگ و در شرایط اقلیمی گرم و مرطوب تشدید می‌شود. پیامدهای فیزیولوژیک شامل افزایش ضربان قلب، کاهش حجم ضربه‌ای، افت فشار خون مرکزی و اختلال در تعادل آب و الکترولیت‌هاست که عملکرد عضلانی و تصمیم‌گیری را مختل می‌کند. مدیریت این خطر نیازمند برنامه‌ریزی، پایش شاخص‌های فشار گرمایی و استفاده از راهبردهای پیشگیرانه مانند سازگارسازی حرارتی، هیدراتاسیون مناسب و خنک‌سازی فعال است (Périard, Racinais, & Sawka, 2015). طی سال‌های اخیر، شواهد علمی گسترده نشان داده‌اند که نوسانات دمای محیط می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بروز عوارض و افزایش نرخ مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی را تشدید کنند. ارتباط میان شرایط محیطی و سازوکارهای پاتوفیزیولوژیک قلب، از طریق چندین مسیر بیولوژیکی قابل‌تبیین است؛ از جمله اختلال در هموستاز حرارتی، افزایش بار همودینامیک، و تغییر در پاسخ‌های عصبی-هورمونی. در این میان، دگرگونی در عملکرد سیستم عصبی خودکار قلب^۱ به‌عنوان یکی از مکانیزم‌های کلیدی، توجه ویژه پژوهشگران را جلب کرده است؛ زیرا تغییرات در تعادل فعالیت‌های سمپاتیک و پاراسمپاتیک می‌تواند ریتم قلبی، پایداری همودینامیک و ظرفیت واکنش بدن به تنش‌های محیطی را تحت‌تأثیر قرار دهد (Menzies et al., 2025). سیستم تنظیم حرارت بدن و عملکرد قلبی-عروقی، پیوندی تنگاتنگ و پیوسته از طریق سامانه عصبی خودکار^۲ (ANS) دارند، به‌طوری‌که تغییرات آنی در تنظیم دمای بدن می‌تواند واکنش‌های همودینامیک قلب را تحت‌تأثیر قرار دهد. واکنش‌های هموستاتیک قلب، در طول پاسخ‌های ANS نسبت به انواع استرس‌های فیزیولوژیک، دستخوش نوساناتی می‌شود که در قالب تغییرپذیری ضربان قلب^۳ (HRV) یعنی الگوی تغییر در زمان بین دو ضربان متوالی قابل اندازه‌گیری است (Rahmani & Mehrabani, 2025; Zali & Arefian, 2012). شواهد اخیر نشان می‌دهد که فشارهای فیزیولوژیک ناشی از ورزش، به‌ویژه فعالیت‌های با شدت بالا یا در شرایط محیطی خاص، می‌تواند تعادل عملکرد خودکار قلب را تغییر دهد. بر این اساس، HRV به‌عنوان یک شاخص غیرتهاجمی و حساس، نه‌تنها برای مطالعه سازوکارهای تنظیم قلب، بلکه در کنترل بار تمرینی، ارزیابی بهبودی و پیش‌بینی عملکرد قلبی-عروقی ورزشکاران مورد استفاده قرار گرفته است (Stanley, Peake, & Buchheit, 2013). دمای محیطی بالا و رطوبت نسبی زیاد، با ایجاد فشار حرارتی قابل‌توجه، کارایی سیستم‌های فیزیولوژیک ورزشکار را کاهش می‌دهد. افزایش دمای مرکزی بدن موجب فعال‌شدن مکانیسم‌های تعادل گرمایی همچون جریان خون پوستی و تعریق می‌شود؛ واکنش‌هایی که بار کاری قلب و نیاز اکسیژنی آن را افزایش می‌دهند. پاسخ‌های قلبی-عروقی به گرما، نقشی کلیدی در تنظیم دمای بدن دارند و بسته به ماهیت، شدت و حجم تمرین، سازگاری‌های همودینامیک متفاوتی ایجاد می‌کنند. پایش این واکنش‌ها در شرایط حرارتی سخت برای حفظ عملکرد و پیشگیری از خطرات فیزیولوژیک ضروری است (Fan, Zhang, Wang, & Wu, 2024; Souissi, Dergaa, Hajri, Chamari, & Saad, 2024). در تمرینات با شدت متوسط، تنظیم اولیه عملکرد قلبی-عروقی عمدتاً تحت کنترل سامانه ANS است، که با افزایش فعالیت

^۱ Cardiac Autonomic Function^۲ Autonomic Nervous System^۳ Heart Rate Variability

سمپاتیک و مهار عملکرد پاراسمپاتیکی همراه می‌شود. این واکنش‌ها، تحت تأثیر فاکتورهای شیمیایی موضعی و تغییرات همودینامیک وابسته به شدت ورزش، سازگاری‌های حیاتی قلبی-عروقی را شکل می‌دهند (Wada, Mahbub, Yamaguchi, Hase, & Tanabe, 2024).

فعالیت ورزشی در محیط گرم با افزایش دمای مرکزی و مصرف شدید گلیکوژن عضلانی، ذخایر انرژی را کاهش و تجمع لاکتات را افزایش می‌دهد؛ عاملی که می‌تواند بر سرعت و پایداری تولید انقباض در دماهای بالا اثرگذار باشد. این تجمع، به دلیل مشارکت بیشتر سیستم بی‌هوازی، بر فعالیت اتونومیک قلب نیز تأثیر می‌گذارد. قرارگیری مزمن در شرایط حرارتی شدید عملکرد قلبی-عروقی را تضعیف کرده و خطر حمله قلبی، آریتمی‌های بدخیم و شوک گرمایی را افزایش می‌دهد؛ مکانیزمی که از طریق افزایش فشار خون، ویسکوزیته و ضربان قلب، و کاهش ذخیره‌سازی ATP تقویت می‌شود (Moghadamnia et al., 2017; Naghibi, Ravasi, Maleki, & Soori, 2012). همچنین، شواهد نشان می‌دهد قرارگیری در محیط سرد با تغییرات پیچیده در پاسخ‌های فیزیولوژیک و هورمونی همراه است که از طریق تحریک لرزش عضلانی، مصرف اکسیژن را برای تولید گرما و انرژی افزایش می‌دهد. این واکنش‌ها، با ترشح بیشتر کاتکولامین‌ها، نرخ سوخت‌وساز پایه را بالا برده و مصرف کربوهیدرات‌ها را شدت می‌بخشند؛ سازوکاری که نقش حیاتی در حفظ تعادل حرارتی و بقاء عملکردی در شرایط سرمای شدید ایفا می‌کند (Castellani & Young, 2016; Zhou et al., 2024). هنگامی که نرخ هیدرولیز ATP و آزادسازی یون هیدروژن از ظرفیت بافری خون فراتر رود، اسیدوز متابولیک ناشی از ورزش رخ می‌دهد؛ وضعیتی که با افت pH شریانی و کاهش چشمگیر سطوح بی‌کربنات خارج‌سلولی به‌منظور خنثی‌سازی یون‌های هیدروژن مشخص می‌شود (Roberts, Ghasvand, & Parker, 2004). به‌طور خلاصه، استرس‌هایی نظیر فعالیت بدنی شدید، دماهای محیطی متفاوت و تنش‌های ناشی از ورزش، تعادل هموستاتیک و پایداری محیط داخلی بدن را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهند. این محرک‌ها با فعال‌سازی سیستم عصبی خودمختار، موجب تغییرات قابل توجه در HRV می‌شوند. از سوی دیگر، افزایش غلظت لاکتات خون و بروز اسیدوز متابولیک در پی فعالیت‌های بی‌هوازی شدید، پیامدهایی عمیق بر عملکرد فیزیولوژیک و جسمانی ورزشکار دارد. با توجه به تأثیر هم‌زمان بار تمرین و شرایط حرارتی بر سامانه عصبی خودکار و نقش این اثر فعالیت بی‌هوازی در دماهای متفاوت بر شاخص‌هایی چون HRV، سطح لاکتات و شدت اسیدوز بافتی، ضرورتی انکارناپذیر دارد. به‌طور خلاصه، استرس‌هایی نظیر فعالیت بدنی شدید، دماهای محیطی متفاوت و تنش‌های ناشی از ورزش، تعادل هموستاتیک و پایداری محیط داخلی بدن را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهند. این محرک‌ها با فعال‌سازی سیستم عصبی خودمختار، موجب تغییرات قابل توجه در HRV می‌شوند. از سوی دیگر، افزایش غلظت لاکتات خون و بروز اسیدوز متابولیک در پی فعالیت‌های بی‌هوازی شدید، پیامدهایی عمیق بر عملکرد فیزیولوژیک و جسمانی ورزشکار دارد. با توجه به تأثیر هم‌زمان بار تمرین و شرایط حرارتی بر سامانه عصبی خودکار و نقش این سامانه در پاسخ‌های قلبی-تنفسی، بررسی اثر فعالیت بی‌هوازی در دماهای متفاوت بر شاخص‌هایی چون HRV، سطح لاکتات و شدت اسیدوز بافتی، ضرورتی انکارناپذیر دارد.

علاوه‌براین، انتخاب سه سطح دمایی مشخص (سرد، معتدل و گرم) در این مطالعه، با هدف تبیین الگوی پاسخ‌های فیزیولوژیک در دامنه‌های حرارتی نمایانگر محیط‌های واقعی تمرین و رقابت انجام شده است؛ زیرا مقایسه میان این سطوح می‌تواند تفاوت در شدت بار حرارتی، الگوی تنظیم قلبی-عروقی و مکانیسم‌های تولید و جبران اسیدوز را

آشکار سازد. تحلیل این تغییرات در سطوح دمایی متمایز، نه تنها به درک دقیق‌تر سازوکارهای تطابق فیزیولوژیکی کمک می‌کند بلکه مبنایی علمی برای طراحی و مدیریت تمرینات در شرایط اقلیمی متفاوت فراهم می‌آورد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر یک جلسه فعالیت بی‌هوای در دماهای محیطی مختلف بر این شاخص‌های کلیدی، در جمعیت ورزشکاران تمرین‌کرده انجام شد.

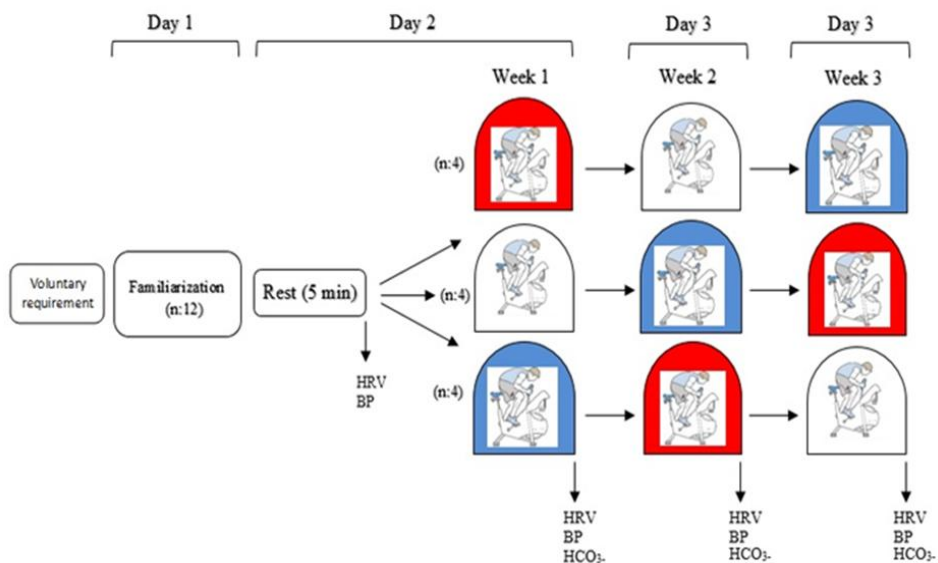
روش‌شناسی تحقیق

پژوهش حاضر به‌عنوان یک مطالعه نیمه‌تجربی-کاربردی با طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون و با روش متقاطع و کانتربالانس انجام شد. جامعه آماری شامل ۱۲ فرد تمرین‌کرده از دانشجویان دانشگاه گیلان (جدول ۱) بود که حجم نمونه بر اساس نرم‌افزار G-Power، با اندازه اثر ۰/۵۵، توان آماری ۰/۸۵ و سطح معناداری ۰/۰۵ تعیین گردید (Rahmani & Mehrabani, 2024). انتخاب آزمودنی‌ها بر پایه معیارهای ورود مشخص شامل داشتن سابقه تمرین بیش از سه ماه، عدم مصرف داروهای مؤثر بر عملکرد، فقدان بیماری‌های قلبی، عضلانی یا اختلالات متابولیک انجام پذیرفت. تمامی شرکت‌کنندگان پس از اطلاع کامل از مراحل و اهداف پژوهش، رضایت‌نامه کتبی ارائه نمودند. پروتکل مطالعه، در آزمایشگاه فیزیولوژی ورزشی دانشگاه گیلان و مطابق مقررات بیانیه هلسینکی اجرا شد. به‌منظور کنترل متغیرهای مخدوش‌کننده، از آزمودنی‌ها خواسته شد طی هفته اجرای پروتکل از انجام فعالیت‌های شدید پرهیز کنند، رژیم غذایی معمول خود را حفظ نمایند و در سه روز پیش از هر جلسه آزمایش از مصرف هرگونه منبع کافئین از جمله چای، قهوه، نوشابه‌های انرژی‌زا و شکلات‌های کافئین‌دار خودداری کنند (Chan et al., 2015).

جدول ۱. شاخص‌های آنتروپومتریک و سن آزمودنی‌ها	
متغیر	میانگین انحراف $\pm$ استاندارد
سن (سال)	$24/41 \pm 4/01$
وزن (کیلوگرم)	$70/65 \pm 11/16$
قد (سانتی‌متر)	$171/2 \pm 7/16$
BMI (کیلوگرم بر متر مربع)	$24/03 \pm 2/79$

شرکت‌کنندگان در نخستین جلسه با هدف آشنایی با پروتکل و انجام سنجش‌های پایه شامل قد، وزن و شاخص توده بدن در آزمایشگاه فیزیولوژی ورزشی حاضر شدند. پس از آن، گروه‌بندی بر اساس شرایط دمایی مورد نظر در طرح انجام گرفت و آزمودنی‌ها در سه وضعیت حرارتی مشخص شامل دمای بالا (40° سانتی‌گراد)، دمای نرمال (20° سانتی‌گراد) و دمای پایین (18° تا 15° سانتی‌گراد) قرار داده شدند (BP, 2022; Castellani & Young, 2016; Medicine, 2018). اجرای پروتکل در هر وضعیت حرارتی با فاصله‌ی یک هفته استراحت بین جلسات متوالی انجام شد (Koster et al., 2016). برای ثبت داده‌های ضربان قلب و محاسبه تغییرپذیری ضربان قلب (HRV) در حین فعالیت، از ضربان‌سنج پولار مدل H10 ساخت کشور فنلاند استفاده گردید. داده‌های ثبت شده با نرم‌افزار Kubios HRV تحلیل شدند. این نرم‌افزار ابزار استاندارد برای پردازش سیگنال‌های RR و محاسبه شاخص‌های زمانی و فرکانسی HRV است و از الگوریتم‌های حذف نویز و فیلتر روند بهره می‌برد. تا شاخص‌های فرکانس محور شامل امواج با فرکانس بالا (HF: $0/15-0/5$ هرتز؛ عمدتاً بازتاب‌دهنده فعالیت عصب پاراسمپاتیک)، امواج با فرکانس پایین (LF: $0/04-0/15$ هرتز؛ نشان‌دهنده فعالیت عصب سمپاتیک و کاهش تون پاراسمپاتیک)،

و نسبت LF/HF به‌عنوان سنجح تعادل اتونوم محاسبه شوند. همچنین شاخص‌های زمان‌محور مانند جذر میانگین مربع اختلافات متوالی (RMSSD) برای برآورد تغییرات کوتاه‌مدت تون واگ محاسبه گردید. نمونه‌گیری خونی در هر جلسه پروتکل در دو زمان - پیش از فعالیت و بلافاصله پس از آن - انجام شد. برای این منظور، ۵ سی‌سی خون از ورید براکوردیالیس دست چپ آزمودنی‌ها در حالت نشسته توسط تکنسین آزمایشگاه برداشت و در لوله‌های هپارینه تخلیه شد. نمونه‌ها جهت آنالیز غلظت لاکتات و یون بی‌کربنات به آزمایشگاه تخصصی منتقل گردید. تعیین غلظت لاکتات خون با استفاده از کیت تجاری بایرکس فارس (کد BXC0622) ساخت ایران و به کمک دستگاه آنالیز بیوشیمیایی BT3000 با دقت و حساسیت اندازه‌گیری معادل ۲ میلی گرم بر دسی‌لیتر انجام شد. سنجش یون بی‌کربنات نیز در محدوده فیزیولوژیک ۲۲ تا ۲۶ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، همراه با اندازه‌گیری pH در محدوده دقت ۷/۰۱ واحد pH، توسط دستگاه Gastat ۷۲۰ ساخت شرکت تکنومدیا ژاپن در شرایط محیطی کنترل‌شده آزمایشگاه صورت پذیرفت. همچنین، آزمودنی‌ها پیش از آغاز پروتکل اصلی، به مدت ۱۰ دقیقه به گرم‌کردن پرداختند که شامل ۵ دقیقه دویدن بر روی تردمیل و انجام مجموعه‌ای از حرکات کششی عمومی برای آماده‌سازی عضلات و مفاصل بود. پس از تکمیل مرحله گرم‌کردن، هر شرکت‌کننده بر اساس شرایط آزمایشی تعریف‌شده، به اجرای فعالیت بی‌هوازی شدید پرداخت. فعالیت اصلی شامل آزمون ۳۰ ثانیه وینگیت با بارگذاری معادل ۷۵ گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن بر روی دستگاه چرخ‌کارسنج موناک مدل E894 ساخت کشور سوئد بود. این آزمون به دلیل ماهیت حداکثرشدت و توانایی آن در ارزیابی ظرفیت بی‌هوازی و توان اوج عضلانی، یکی از معتبرترین سنجش‌ها در پژوهش‌های فیزیولوژی ورزشی به‌شمار می‌رود (Leithäuser, & Hütler, 2002) (شکل ۱). این پژوهش با تأییدیه اخلاقی کارگروه تخصصی پژوهشگاه تربیت بدنی و علوم ورزشی (SSRI.REC-2207-1740) انجام شد.



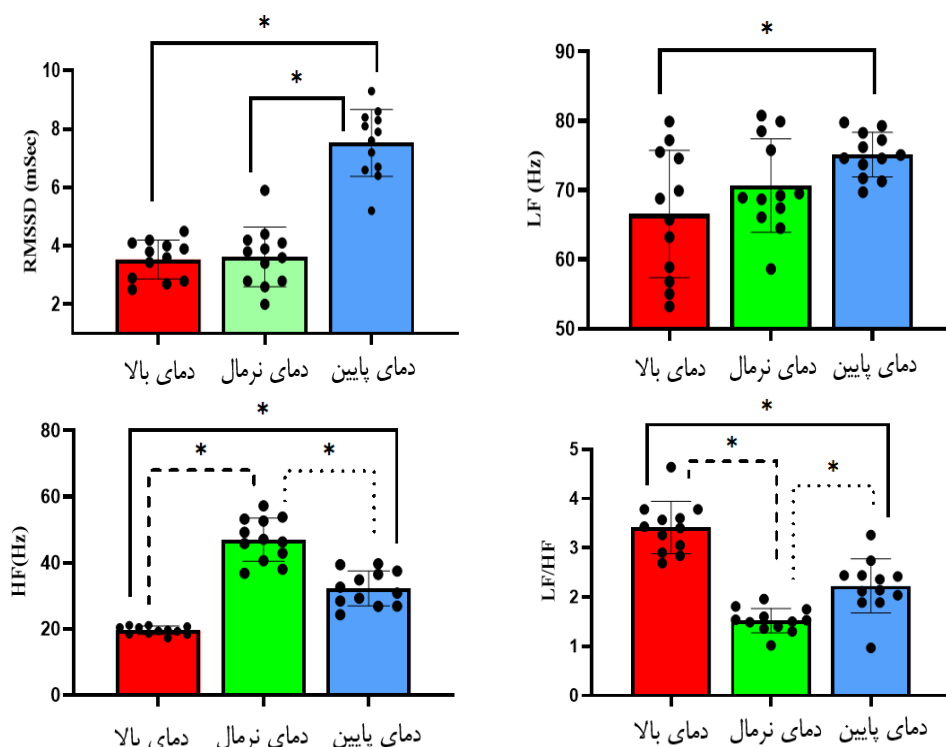
شکل ۱: شکل شماتیک شیوه روش پژوهش

آزمودنی‌ها ابتدا مرحله آشناسازی را انجام دادند. پس از ۵ دقیقه استراحت، شرکت‌کنندگان ($n=12$) در قالب سه دسته چهار نفره وارد سه وضعیت حرارتی گرم $\approx 40^{\circ}\text{C}$ ، نرمال $\approx 20^{\circ}\text{C}$ و سرد $\approx 15-8^{\circ}\text{C}$ شدند. هر فرد در سه هفته متوالی تمام شرایط حرارتی را تجربه کرد. در پایان هر جلسه شاخص‌های HRV، فشار خون و بیکرنات اندازه‌گیری شد.

برای ارزیابی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون شاپیرو-ویلک استفاده شد. با توجه به اینکه تمامی ۱۲ شرکت‌کننده هر سه وضعیت حرارتی (40°C ، 20°C و $15-8^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد) را تجربه کردند، تحلیل فرضیه‌های پژوهش با استفاده از آنالیز واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر و عامل درون‌گروهی دما (Repeated-Measures ANOVA) انجام گرفت. در صورت مشاهده اثر اصلی معنادار، از آزمون تعقیبی بونفرونی جهت مقایسه‌های دوجه‌دو استفاده شد. سطح معنی‌داری $p \leq 0.001$ در نظر گرفته شد. تمامی تحلیل‌ها با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ انجام شد. این رویکرد آماری متناسب با طراحی مقاطع مطالعه بوده و امکان کنترل اثرات ترتیب، کاهش واریانس درون‌فردی و افزایش توان آزمون را فراهم می‌کند.

نتایج

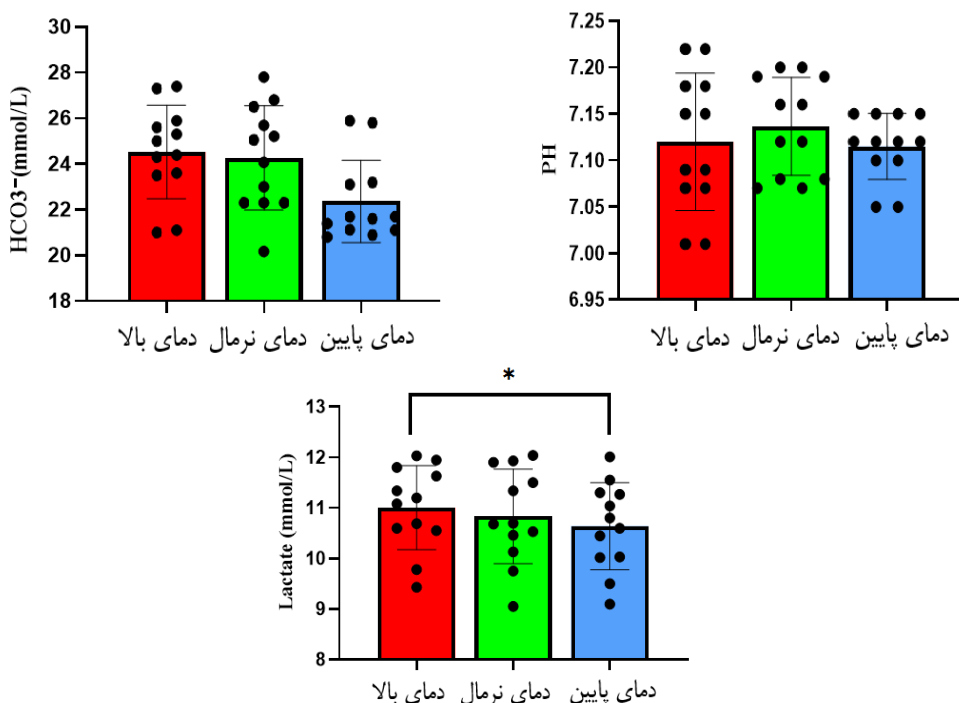
نتایج آنالیز واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر نشان داد شاخص RMSSD در دمای بالا و نرمال به‌طور معناداری پایین‌تر از دمای سرد بود ($p=0.001$). مقدار LF نیز بین دمای بالا و پایین تفاوت معنادار داشت ($p=0.036$).



شکل ۲. مقادیر RMSSD، LF، HF و نسبت LF/HF در سه دمای مختلف

* سطح معنی‌داری $p \leq 0.05$ می‌باشد.

در شاخص HF، تفاوت معناداری میان دمای بالا با نرمال و سرد، و همچنین بین دمای نرمال و سرد مشاهده شد ($p = 0.001$). نسبت LF/HF نیز در مقایسه دمای بالا با نرمال و سرد و همچنین بین نرمال و سرد اختلاف معناداری نشان داد ($p = 0.001$). این یافته‌ها نشان می‌دهد شاخص‌های HRV نسبت به تغییرات دمای محیط حساس بوده و بیانگر تعدیل پاسخ‌های اتونوم در مواجهه با استرس حرارتی هستند (شکل ۲). نتایج آنالیز واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر نشان داد مقادیر یون بی‌کربنات در میان سه شرایط دمایی تفاوت معناداری نداشت. همچنین در pH خون نیز اختلاف معناداری بین دماها مشاهده نشد. با این حال، سطح لاکتات بین دمای بالا و پایین تفاوت معناداری نشان داد ($P = 0.017$)، که بیانگر تأثیر استرس حرارتی بر پاسخ‌های متابولیک بی‌هوازی است (شکل ۳).



شکل ۳. مقادیر یون بی‌کربنات، pH و لاکتات در سه دمای مختلف

* سطح معنی‌داری $p \leq 0.05$ می‌باشد

بحث و بررسی

هدف این مطالعه، واکاوی پیامدهای فیزیولوژیک یک جلسه فعالیت بی‌هوازی در شرایط دمایی متفاوت بر تغییرپذیری ضربان قلب و شاخص‌های اسیدوز بافتی در افراد تمرین‌کرده بود. یافته‌ها حاکی از آن است که افزایش دمای محیط موجب کاهش معنادار RMSSD و LF و در مقابل، نسبت LF/HF را به‌طور قابل توجهی افزایش داد؛ وضعیتی که بیانگر غلبه فعالیت سمپاتیکی در گرما و تضعیف مؤلفه‌های تنظیم پاراسمپاتیکی است. در دمای پایین، مقادیر RMSSD و HF در سطحی بالاتر حفظ شدند که نشانه مقاومت و پایداری فعالیت پاراسمپاتیک در سرما محسوب می‌شود. الگوی ثبت‌شده در این تحقیق با برخی گزارش‌های پیشین همسو است، به‌ویژه مطالعات

دال بر حساسیت بالای سامانه عصبی خودکار نسبت به دما و اثرات آن بر توازن سمپاتیکی-پاراسمپاتیکی، هرچند تفاوت‌هایی در شدت و جهت تغییرات مشاهده شد که می‌تواند ناشی از ویژگی‌های نمونه، پروتکل بارگذاری و شرایط محیطی خاص پژوهش حاضر باشد. این ناهم‌سویی نسبی، ضرورت بررسی‌های تکمیلی را برای تبیین دقیق مکانیسم‌های دمایی مؤثر بر تنظیم HRV در فعالیت‌های بی‌هوای برجسته می‌سازد. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که واکنش شاخص‌های HRV به شرایط دمایی متغیر، با الگوهای متفاوتی گزارش شده است. همسو با یافته‌های پژوهش حاضر، گالت و همکاران نشان دادند که قرارگیری در محیط گرم نسبت به محیط سرد، موجب کاهش قابل توجه RMSSD می‌شود؛ شاخصی که به‌عنوان یکی از معتبرترین معیارهای ارزیابی فعالیت دستگاه عصبی خودکار مطرح است. شواهد موجود بیان می‌کنند که دماهای بالاتر، حتی در حالت استراحت، سبب افت بیشتر فعالیت پاراسمپاتیکی می‌گردند. این امر حاکی از آن است که گرما می‌تواند به‌عنوان یک عامل خارجی مؤثر، ظرفیت واقعی عملکرد و تنظیم عصبی-قلبی را تعدیل و تغییر دهد (Gullett, Zajkowska, Walsh, Harper, & Mondelli, 2023). HRV به‌عنوان شاخص معتبر برای ارزیابی عملکرد سامانه عصبی خودکار، بازتاب‌دهنده تعادل پویا میان فعالیت‌های سیستم سمپاتیکی و پاراسمپاتیکی است؛ تعادلی که در پاسخ به محرک‌های بیرونی چون استرس فیزیکی و تغییرات دمایی دچار نوسان می‌شود. مؤلفه سمپاتیکی با افزایش ضربان قلب و برانگیختگی فیزیولوژیک، سازوکارهای مقابله با فشار را فعال می‌سازد، در حالی که مؤلفه پاراسمپاتیکی با القای آرامش و بازگرداندن وضعیت پایه، کارکرد بازیابی و تثبیت هموستاز را ایفا می‌کند (Thayer & Lane, 2007). یافته‌های حاضر نشان می‌دهد که فعالیت‌های بی‌هوای، به‌ویژه در تکرارهای مکرر، می‌توانند با ایجاد سازگاری‌های عصبی-هورمونی، به حفظ HRV در سطوح بالاتر کمک کنند. تحلیل طیفی توان مؤلفه‌های فرکانس بالا (HF) و فرکانس پایین (LF) نشان داد که کاهش HF، نشانه افت فعالیت واگ و غلبه سمپاتیکی در پاسخ به افزایش بار تمرینی است. این الگو با گزارش‌های شافر و همکاران در خصوص تفسیر کمی شاخص‌های فرکانسی و نقش آن‌ها در پایش تنظیم عصبی-قلبی همسو است، هرچند شدت و دامنه تغییرات نسبت به مقادیر ذکرشده در منابع یادشده متفاوت بوده و می‌تواند ناشی از ماهیت بی‌هوای و الگوی فشارهای اعمال‌شده در این مطالعه باشد (Shaffer & Ginsberg, 2017).

از طرف دیگر، نتایج این پژوهش نشان داد که یک جلسه فعالیت بی‌هوای، بسته به دمای محیط، پاسخ‌های متفاوتی در شاخص‌های اسید-باز ایجاد می‌کند؛ به‌طوری‌که لاکتات در گرما افزایش بیشتری داشت، PH در شرایط نرمال افت کمتری نشان داد و یون بیکربنات در دمای بالا در سطح مطلوب‌تری حفظ شد، در حالی که سرمای محیط بیشترین کاهش بیکربنات را سبب گردید. این الگو با مکانیسم‌های شناخته‌شده در فعالیت‌های بی‌هوای، شامل اتکای بیشتر بر گلیکولیز و تجمع لاکتات و یون هیدروژن، همسو است. همزمان، یافته‌ها با گزارش اوبرت و همکاران درباره حساسیت شاخص‌های همودینامیک و متابولیک ورزشکاران به شرایط محیطی همخوانی کلی دارد، اما شدت و جهت تغییرات مشاهده شده تفاوت‌هایی را نسبت به مقادیر استاندارد آن مطالعه نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از ماهیت کوتاه‌مدت و حاد فشار حرارتی در این تحقیق باشد (Aubert, Seps, & Beckers, 2003). همچنین، یافته‌ها نشان داد تغییرات معنادار در شاخص‌های HRV و لاکتات تحت دماهای مختلف، بیانگر اثر مستقیم شرایط حرارتی بر تنظیم عصبی-قلبی و تعادل اسید-باز است، هرچند PH و بیکربنات تغییر محسوسی نداشتند. این نتایج با شواهد فیزیولوژیک همسو است و نقش اسیدوز در محدودسازی عملکرد عضلات را تأیید می‌کند. همسویی

غیرمستقیم با مطالعات آموزش مهارت‌های روانی نیز بر ضرورت مدیریت عوامل محدودکننده عملکرد چه فیزیولوژیک، چه ذهنی تأکید دارد (Lange-Smith, Cabot, Coffee, Gunnell, & Tod, 2024). نتایج نشان داد تغییرات شاخص‌های HRV و لاکتات در دماهای مختلف، بازتاب اثر مستقیم دما بر تنظیم عصبی-قلبی و شدت اسیدوز بافتی است؛ در حالی که PH و بیکربنات پایدار ماندند. این یافته‌ها با مبانی بیوشیمیایی اسیدوز بی‌هوازی همسو بوده و نقش تجمع یون هیدروژن و لاکتات در افت عملکرد عضلانی را تأیید می‌کند. در ورزشکاران تمرین‌کرده، سازگاری‌های متابولیکی ظرفیت تحمل اسیدوز را افزایش داده و امکان حفظ عملکرد بی‌هوازی طولانی‌تر را فراهم می‌سازد (Robergs et al., 2004). این پژوهش با دیدگاه بوجیت و همکاران در خصوص پیچیدگی پایش ورزشکار و اثر هم‌زمان عوامل فیزیولوژیک بر عملکرد، همخوانی دارد و نشان می‌دهد که کنترل فشار حرارتی بخشی از مدیریت بار تمرین است. همچنین، همسو با نتایج مطالعه کتما و همکاران نقش تعدیل‌شده محرک‌ها بر سیستم عصبی خودکار تأیید می‌شود، هرچند الگوی حاضر ناشی از محرک بی‌هوازی شدید در شرایط حرارتی است و از این منظر تفاوت ماهیتی با تمرین‌های کم‌شدتی آن پژوهش دارد. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به حجم نمونه نسبتاً کم، همگنی نسبی شرکت‌کنندگان، و عدم پایش شاخص‌های هورمونی و خودکار عصبی در دوره‌ی ریکاوری طولانی‌مدت اشاره کرد. همچنین، استفاده‌نشدن از مدل‌های ترکیبی مانند شرایط هایپوکسی-حرارتی می‌تواند دامنه تفسیر سازوکارهای فیزیولوژیک را محدود کند. برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود بررسی‌ها با نمونه بزرگ‌تر و متنوع‌تر، سنجش پاسخ‌های هورمونی و خودکار عصبی در مرحله ریکاوری طولانی‌تر، و استفاده هم‌زمان از مدل‌های هایپوکسی-حرارتی انجام گیرد تا سازوکارهای دمایی مؤثر بر تنظیم HRV، اسیدوز متابولیک و عملکرد عضلانی به‌صورت جامع‌تر تبیین شوند.

این پژوهش نشان داد که تغییرات شاخص‌های HRV و لاکتات در دماهای متفاوت، بیانگر نقش دما در تعدیل فعالیت عصبی-قلبی و شدت اسیدوز خونی است، در حالی که PH و بیکربنات تغییر محسوسی نداشتند. الگوی ثبت‌شده با شواهد فیزیولوژیک و بیوشیمیایی اسیدوز بی‌هوازی همسو بوده و غلبه سمپاتیک در گرما و پایداری نسبی پاراسمپاتیک در سرما را تأیید می‌کند. تفاوت‌های دامنه و جهت تغییرات نسبت به گزارش‌های پیشین، اهمیت بررسی‌های تکمیلی برای تبیین سازوکارهای دمایی مؤثر بر تنظیم HRV و کارایی عضلانی را برجسته می‌سازد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که شرایط حرارتی با تغییر توازن میان فعالیت سمپاتیک و پاراسمپاتیک، بر تنظیم عصبی-قلبی اثرگذار است؛ گرما موجب کاهش مؤلفه‌های پاراسمپاتیک و افزایش پاسخ‌های سمپاتیک، و سرما یا تغییرات ناگهانی دما الگوهای متفاوتی را رقم می‌زند. این واکنش‌ها، در کنار تغییرات اسیدوز خونی ناشی از فعالیت بی‌هوازی، نقش مهمی در کنترل هموستاز و عملکرد ورزشی دارند. در افراد تمرین‌کرده شدت این اثرات به‌طور محسوسی کاهش یافته که بیانگر سازگاری‌های عصبی و متابولیکی حاصل از تمرینات شدید است. یافته‌هایی که مسیر مطالعات آینده را به سمت شناسایی دقیق‌تر مکانیزم‌های این سازگاری‌ها برای ارتقای کارایی و کاهش فشارهای فیزیولوژیک هدایت می‌کند.

تضاد منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع علمی، مالی یا شخصی در ارتباط با طراحی، اجرای و انتشار نتایج این پژوهش وجود ندارد.

منابع

- Aubert, A. E., Seps, B., & Beckers, F. (2003). Heart rate variability in athletes. *Sports Medicine*, 33(12), 889-919.
- Bar-Or, O. (1987). The Wingate anaerobic test an update on methodology, reliability and validity. *Sports Medicine*, 4(6), 381-394.
- Beneke, R., Pollmann, C., Bleif, I., Leithäuser, R., & Hütler, M. (2002). How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans? *European journal of applied physiology*, 87(4), 388-392.
- BP, S. C. M. (2022). Acute adaptations to exercise under heat stress. *Sports Medicine*, 52(8), 1851-1865.
- Castellani, J. W., & Young, A. J. (2016). Human physiological responses to cold exposure: Acute responses and acclimatization to prolonged exposure. *Autonomic Neuroscience*, 196, 63-74.
- Chan, A.-W., Tetzlaff, J. M., Altman, D. G., Laupacis, A., Gøtzsche, P. C., Krleža-Jerić, K., . . . Berlin, J. A. (2015). SPIRIT 2013 Statement: defining standard protocol items for clinical trials. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 38, 506-514.
- Fan, Y., Zhang, B., Wang, Y., & Wu, H) . (2024) .Different humidity environments do not affect the subsequent exercise ability of college football players after aerobic high-intensity interval training. *Scientific Reports*, 14(1), 16205.
- Gullett, N., Zajkowska, Z., Walsh, A., Harper, R., & Mondelli, V. (2023). Heart rate variability (HRV) as a way to understand associations between the autonomic nervous system (ANS) and affective states: A critical review of the literature. *International Journal of Psychophysiology*, 192, 35-42.
- Koster, A., Shiroma, E. J., Caserotti, P., Matthews, C. E., Chen, K. Y., Glynn, N. W., & Harris, T. B. (2016). Comparison of sedentary estimates between activPAL and hip-and wrist-worn ActiGraph. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(8), 1514.
- Lange-Smith, S ,Cabot, J., Coffee, P., Gunnell, K., & Tod, D. (2024). The efficacy of psychological skills training for enhancing performance in sport: a review of reviews. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 22(4), 1012-1029.
- Medicine, A. C. o. S .(2018) .ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription.
- Menzies, C., Clarke, N. D., Pugh, C. J., Steward, C. J., Thake, C. D., & Cullen, T. (2025). Passive heating in sport: context-specific benefits, detriments, and considerations. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 50, 1-15 .
- Moghadamnia, M. T., Ardalan, A., Mesdaghinia, A., Keshtkar, A., Naddafi, K., & Yekaninejad, M. S. (2017). Ambient temperature and cardiovascular mortality: a systematic review and meta-analysis. *PeerJ*, 5, e3574.
- Naghibi, S., Ravasi, A. A., Maleki, J., & Soori, R. (2012). The effect of exercise-based cardiac rehabilitation program on anaerobic threshold and hemodynamic indexes in patients with coronary artery disease. *Journal of Sport Biosciences*, 4(12), 23-41.

- Périard, J. D., Racinais, S., & Sawka, M. N. (2015). Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: applications for competitive athletes and sports. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25, 20-38.
- Rahmani, A. and Mehrabani, J. (2025). Cardiovascular responses (HRV, BP, and RPP) following a resistance exercise session with a training mask and blood flow restriction in In young male athletes. *Journal of Applied Health Studies in Sport Physiology*, 12(1), 95-108.
- Robergs, R. A., Ghiasvand, F & ,Parker, D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*.
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms .*Frontiers in public health*, 5, 258.
- Souissi, A., Dergaa, I., Hajri, S. E., Chamari, K., & Saad, H. B. (2024). A new perspective on cardiovascular function and dysfunction during endurance exercise: identifying the primary cause of cardiovascular risk. *Biology of Sport*, 41(4), 131-144.
- Stanley, J., Peake, J. M., & Buchheit, M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports Medicine*, 43(12), 1259-1277.
- Thayer, J. F., & Lane, R. D .(2007).The role of vagal function in the risk for cardiovascular disease and mortality. *Biological psychology*, 74(2), 224-242 .
- Wada, S., Mahbub, M., Yamaguchi, N., Hase, R., & Tanabe, T. (2024). Influence of Ambient Temperature on Autonomic Nerve Function and Peripheral Sensation from Moderate-Intensity Treadmill Exercise. *International journal of exercise science*, 17(2), 491.
- Zali, A., & Arefian, N. (2012). Heart rate variability. *Research in Medicine*, 36(3), 163-166.
- Zhou, E., Zhang, L., He, L., Xiao, Y., Zhang, K., & Luo, B. (2024). Cold exposure, gut microbiota and health implications: a narrative review. *Science of The Total Environment*, 916, 170060.

The Effect of a Single Session of Anaerobic Exercise at Different Environmental Temperatures on Heart Rate Variability (HRV) and Blood Acidosis in Trained Individuals

Sahar Zaree¹, Javad Mehrabani^{1*}, Abolfazl Rahmani²

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

2 Department of Physical Education and Sports Science, Faculty of Basic Sciences, University of Imam Javad, Yazd, Iran

*Corresponding author: mehrabanij@guilan.ac.ir

Abstract

Objectives: Ambient temperature can alter the activity of the autonomic nervous system, leading to changes in heart rate and influencing tissue acidosis in the blood, which affects athletic performance. Therefore, the present study aimed to investigate the effect of a single session of anaerobic exercise at different environmental temperatures on heart rate variability (HRV) and blood acidosis in trained individuals.

Methods: This study was a semi-experimental and applied research conducted in a crossover and counterbalanced design. A total of 12 athletes voluntarily participated in the study, with a mean age of (24.41 ± 4.01 years), height of (171.2 ± 7.16 cm), and weight of (70.65 ± 11.16 kg). The participants underwent three trials in different temperature conditions: high (40°C), normal (20°C), and low ($8-15^{\circ}\text{C}$). Each trial was separated by a one-week rest period. During each session, they performed the Wingate anaerobic test. Heart rate data were recorded using a heart rate monitor to assess heart rate variability (HRV) during activity. The recorded data were analyzed using Kubios software to calculate HRV parameters, including high-frequency (HF) and low-frequency (LF) waves, the LF/HF ratio, and RMSSD. Blood samples (5 cc) were collected from the brachial vein before and immediately after exercise and were subsequently transferred to a laboratory for lactate and bicarbonate ion analysis. Additionally, a one-way ANOVA test was used to analyze the research variables at a significance level of $p \leq 0.05$.

Results: Results indicated a significant difference between different temperatures in RMSSD ($p = 0.001$), LF ($p = 0.036$), HF ($p = 0.001$), and LF/HF ratio ($p = 0.001$). Additionally, a significant difference in lactate levels was observed among the three temperature conditions ($p = 0.017$). However, there was no significant difference in pH levels and bicarbonate ion concentration.

Conclusion: The findings suggest that performing anaerobic activity in different thermal environments affects heart rate variability and tissue acidosis, potentially influencing athletic performance. Moreover, the results of this study can be useful for assessing disturbances in acid-base balance and providing clinical guidelines to maintain athletes' physiological function.

Key words: Anaerobic Exercise, Temperature, Autonomic Nervous System, Heart Rate Variability, Blood Acidosis