Journal of Sport and Exercise Physiology
2023,16(3):76-86

Original Article

Evaluation of heart rate index equations for prediction of maximal oxygen uptake in healthy adolescent boys: Cross-validation by respiratory gas analysis method

Elahe Shadab Nik, Farzad Nazem*, Majid Jalili

Department of Sport Physiology, Faculty of Sports Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Abstract

Background and Purpose: Accurate measurement of cardiorespiratory fitness (VO_2max) is very important in sport sciences. The direct measurement of VO_2max using a respiratory gas analysis device cannot be very operational and comprehensive due to the high cost, time-consuming, need for an expert, and the possibility of some cardio-respiratory risks during the performance of an increasing exercise test. Estimating VO_2max using equations based on heart rate index (HRindex) is one of the most widely used methods in sports fields, which can estimate an individual's VO_2max without needing breath gas analysis. However, this requires accurate measurements of resting and maximal heart rates with the least error. In the present study we aimed to evaluate the validity of VO_2max equations based on heart rate index in adolescent boys.
Material and Methods: One hundred and fifty-seven healthy adolescent boys (Mean±SD; age, 14.92±1.35 years; BMI, 21.39 ± 4.50 kg/m2 and VO2max: 41.80 ± 6.67 ml/kg/min) from middle and high schools in Hamadan city voluntarily participated in this cross-sectional study. Initially, the resting heart rate and body composition of the subjects were measured. The subjects' VO_2max and maximal heart rate were measured by the respiratory gas analysis method by using modified Bruce incremental exercise test (criterion method). Moreover, the subjects' VO2max were estimated using HRindex-based equations. Pearson correlation, pair sample t-test, and Bland and Altman agreement were used to evaluate the validity of heart rate index based on VO_2max equations.
Results: A significant correlation was observed between the criterion method of VO_2max and HRindex-based VO_2max equations (R=0.328, P<0.05). A significant difference (P<0.05) was observed between measured and HRindex-based VO2max equations (Mean difference = 3.34 - 5.45 ml/kg/min). In healthy adolescent boys, both estimation equations led to underestimation of VO_2max by 11.36 ± 17.93% and 5.84 ± 16.39%, respectively. In addition, the Bland and Altman plot showed low agreement between measured and HRindex-based VO2max equations.
Conclusions: HRindex-based VO_2max equations do not have sufficient validity to be used in healthy adolescent boys and they led to the underestimation of VO_2max. Therefore, it is recommended to employ HRindex-based VO_2max equations for healthy adolescent boys.

Keywords: Cardio-Respiratory Fitness, Resting and Maximal Heart Rate, Heart Rate Index-Based VO_2max Equations

How to cite this article: Shadab Nik E, Nazem F, Jalili M. Evaluation of heart rate index equations for prediction of maximal oxygen uptake in healthy adolescent boys: Cross-validation by respiratory gas analysis method. J Sport Exerc Physiol. 2023;16(3):76-86.

*Corresponding Author's E-mail: f.nazem@basu.ac.ir
https://doi.org/10.48308/joeppa.2023.103910
Received: 24/06/2023 Revised: 22/07/2023 Accepted: 12/08/2023

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی
۱۴۰۲/ دوره ۱۶/ شماره ۳/ صفحه‌های ۷۶-۸۶

مقاله پژوهشی

ارزیابی معادلات اکسیژن مصرفی بیشینهٔ مبتنی بر شاخص ضربان قلب در پسران سالم نوجوان: سنجش روایی به روش تجزیه‌وتحلیل گازهای تنفسی

الهه شاداب نیک، فرزاد ناظم*، مجید جلیلی
گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکدهٔ علوم ورزشی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

زمینه و هدف: اندازه‌گیری دقیق آمادگی قلبی-تنفسی (VO_2max) از اهمیت زیادی در علوم ورزشی برخوردار است. اندازه‌گیری مستقیم VO_2max با استفاده از دستگاه تجزیه‌وتحلیل گازهای تنفسی به‌دلیل هزینهٔ زیاد، زمان‌بر بودن، نیاز به کارشناس و احتمال بروز برخی مخاطرات قلبی-تنفسی حین اجرای آزمون ورزشی فزاینده نمی‌تواند چندان عملیاتی و فراگیر باشد. برآورد VO_2max با استفاده از معادلات مبتنی بر شاخص ضربان قلب (HRindex) یکی از روش‌های پرکاربرد در میادین ورزشی است که می‌تواند VO_2max افراد را بدون نیاز به تحلیل گازهای تنفسی برآورد کند. با این همه، این کار نیازمند آن است که ضربان قلب استراحت و بیشینه به‌طور دقیق و با کمترین خطا اندازه‌گیری شود. هدف از پژوهش حاضر سنجش روایی معادلات VO_2max مبتنی بر شاخص ضربان قلب در پسران نوجوان است.

مواد و روش‌ها: در پژوهش مقطعی حاضر ۱۵۷ پسر سالم نوجوان با میانگین سنی ۱/۳۵±۱۴/۹۲ سال، شاخص تودهٔ بدن ۴/۵±۲۱/۳۹ کیلوگرم/متر مربع و VO_2max معادل ۶/۶۷±۴۱/۸۰ میلی‌لیتر/کیلوگرم/ دقیقه از مدارس متوسطهٔ اول و دوم در سطح شهر همدان داوطلبانه شرکت کردند. ابتدا ضربان قلب استراحت و متغیرهای ترکیب بدن آزمودنی‌ها به روش استاندارد اندازه‌گیری شد. ضربان قلب بیشینه و VO_2max آزمودنی‌ها (روش معیار) در آزمون ورزشی فزایندهٔ بروس تعدیل‌شده روی نوار گردان مجهز به دستگاه تجزیه‌وتحلیل گازهای تنفسی اندازه‌گیری شد. همچنین VO_2max آزمودنی‌ها با استفاده از معادلات منتخب شاخص ضربان قلب، برآورد شد. به‌منظور ارزیابی روایی معادلات شاخص ضربان قلب در برآورد VO_2max، از روش‌های آماری ضریب همبستگی پیرسون، آزمون t همبسته و توافق بلاند - آلتمن استفاده شد.

نتایج: همبستگی معناداری بین VO_2max اندازه‌گیری‌شده به روش معیار و روش معادلات شاخص ضربان قلب مشاهده شد (P< ۰/۰۵، R = ۰/۳۲۸). با این همه، اختلاف معناداری (P<۰/۰۱) بین VO_2max روش معیار و معادلات شاخص ضربان قلب (میلی‌لیتر/کیلوگرم/دقیقه ۵/۴۵- ۳/۳۴ = میانگین اختلاف) دیده شد. به‌طوری‌که هر دو معادلهٔ برآوردی به کم‌تخمینی VO_2max به‌ترتیب به مقدار ۱۷/۹۳±۱۱/۳۶ و ۱۶/۳۹±۵/۸۴ درصد در پسران نوجوان منجر شد. همچنین نتایج نمودار بلاند - آلتمن حاکی از توافق ضعیف معادلات رگرسیونی غیربومی با روش معیار بود.

نتیجه‌گیری: معادلات مبتنی بر شاخص ضربان قلب منتخب به‌منظور برآورد VO_2max پسران نوجوان سالم از اعتبار کافی برخوردار نیست، به‌طوری‌که هر دو معادله به‌طوری معناداری به کم‌تخمینی VO_2max منجر شد. بنابراین طراحی معادلات شاخص ضربان قلب ویژهٔ نوجوانان جهت برآورد VO_2max توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آمادگی قلبی - تنفسی، ضربان قلب استراحت و بیشینه، معادلات مبتنی بر شاخص ضربان قلب

نحوه استناد به این مقاله: شاداب نیک ا، ناظم ف، جلیلی م. ارزیابی معادلات اکسیژن مصرفی بیشینهٔ مبتنی بر شاخص ضربان قلب در پسران سالم نوجوان: سنجش روایی به روش تجزیه‌وتحلیل گازهای تنفسی.نشریهٔ فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی.۱۴۰۲؛۱۶(۳):۷۶-۸۶.

* رایانامهٔ نویسندهٔ مسئول: f.nazem@basu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱

مقدمه

آمادگی قلبی-تنفسی (Cardio-Respiratory Fitness: CRF) مهم‌ترین جزء از آمادگی بدنی است که همبستگی تنگاتنگی با تندرستی عمومی بدن دارد (۱). بر پایهٔ منابع علمی، CRF یک شاخص طلایی در سنجش وضعیت تندرستی و نیز شاخص مؤثر پیشگو در بیماری‌های قلبی-عروقی در جمعیت‌های کودک تا بزرگسال گزارش شده است (۲). به همین دلیل ارزیابی معتبر CRF از اهمیت زیادی در حیطه‌های ورزش، تندرستی و بهداشت برخوردار است (۳، ۴).

در بیشتر منابع علمی برای بیان کمی آمادگی قلبی-تنفسی از شاخص اکسیژن مصرفی بیشینه (VO_2max) استفاده می‌شود. استاندارد طلایی اندازه‌گیری آمادگی قلبی-تنفسی، اندازه‌گیری مستقیم VO_2max به‌وسیلهٔ دستگاه تجزیه‌وتحلیل گازهای تنفسی در آزمون ورزشی فزاینده (GXT) است (۵). این روش به دلایل هزینهٔ زیاد، زمان‌بر بودن، نیاز به کارکنان متخصص و احتمال بروز برخی مخاطرات قلبی-تنفسی حین اجرای آزمون ورزشی فزاینده نمی‌تواند چندان عملیاتی و فراگیر باشد. به‌دلیل مشکلات اجرایی در اندازه‌گیری آزمایشگاهی VO_2max، متخصصان علوم ورزشی و بهداشت روش‌های جایگزین متنوعی به‌منظور اندازه‌گیری VO_2max معرفی کرده‌اند. در این روش‌ها، با استفاده از معادلات رگرسیونی، VO_2max به‌وسیلهٔ متغیرهای فیزیولوژیکی یا عملکردی (مانند ضربان قلب پایان آزمون ورزش، ضربان قلب بازیافت، ضربان قلب استراحت، زمان آزمون و مسافت طی‌شده در آزمون) در جریان آزمون‌های استاندارد ورزشی برآورد می‌شود (۶، ۷). در این بین، برآورد VO_2max با استفاده از معادلات رگرسیونی مبتنی بر شاخص ضربان قلب (HR_{index}: Heart Rate index) یکی از روش‌های پرکاربرد است. در معادلات مبتنی بر شاخص ضربان قلب از دو متغیر ملاک ضربان‌های قلب استراحت و بیشینه برای برآورد VO_2max استفاده می‌شود. در این روش نخست شاخص ضربان قلب از نسبت بین ضربان‌های قلب بیشینه و استراحت بر پایهٔ رابطهٔ ($HR_{index} = HR_{max}/HR_{rest}$) و سپس VO_2max بر مبنای این شاخص فیزیولوژیک طبق معادلات خاصی برآورد می‌شود (۸، ۹).

در این زمینه آث و همکاران (۲۰۰۴) با مطالعهٔ مردان سالم تمرین‌کردهٔ ۱۳ تا ۴۷ سال یک معادلهٔ رگرسیونی مبتنی بر شاخص ضربان قلب طراحی کردند که VO_2max از رابطهٔ $VO_2max\ (ml/kg/min) = HR_{index} \times ۱۵$ قابل برآورد بود (۹). همچنین ویکس و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های ۲۲۰ مقاله (شامل ۱۱۲۵۷ آزمودنی زن و مرد با دامنهٔ سنی ۱۰ تا ۷۳)، معادلهٔ جدید برآورد VO_2max مبتنی بر شاخص ضربان قلب را طراحی کردند که معادلهٔ آن به‌صورت $VO_2max = ((HR_{index} \times ۶) - ۵) \times ۳/۵$ (ml/kg/min) بود (۸).

پس از طراحی معادلات شاخص ضربان قلب، پژوهشگران به ارزیابی روایی این دو معادله در دیگر جمعیت‌ها پرداختند. برخی پژوهش‌ها حاکی از روایی معادلات مبتنی بر شاخص ضربان قلب جهت برآورد VO_2max در زنان و مردان فعال و غیرفعال بود (۱۰-۱۲). با این همه، برخی مطالعات روایی این معادلات را در برآورد VO_2max تأیید نکرده‌اند (۱۳-۱۵). بنابراین یافته‌های در دسترس دربارهٔ روایی معادلات برآورد VO_2max مبتنی بر شاخص ضربان قلب متنوع و ناهمگون است. در نتیجه، ارزیابی اعتبار این دو معادله در دیگر جمعیت‌های انسانی ضروری خواهد بود.

باید اذعان کرد که معادلات برآورد VO_2max مبتنی بر شاخص ضربان قلب، در خارج از ایران طراحی شده که آزمودنی‌های آن دارای ویژگی‌های نژاد، جغرافیای زندگی، ترکیب بدن، سطح آمادگی بدنی، سبک زندگی و فرهنگ متفاوت از جمعیت ایران هستند. با بررسی‌های انجام‌گرفته در منابع داخلی، ارزیابی روایی معادلات VO_2max مبتنی بر شاخص ضربان قلب در جمعیت پسران نوجوان ایرانی هنوز ارزیابی نشده است. بنابراین هدف این پژوهش سنجش روایی معادلات VO_2max مبتنی بر شاخص ضربان قلب در پسران نوجوان است.

روش پژوهش

نمونه‌های پژوهش: در این تحقیق کاربردی ۱۵۷ پسر سالم ۱۳ تا ۱۷ ساله از مدارس شهر همدان، به‌طور داوطلبانه شرکت کردند. در این میان تلاش شد که از سوگیری در زمینهٔ نقش عواملی مانند تنوع جغرافیایی، فرهنگی و اقتصادی و تأثیری که این عوامل بر سبک زندگی، آمادگی قلبی تنفسی و ویژگی‌های آنتروپومتریکی متفاوت بر جامعهٔ آماری مورد بررسی دارند، جلوگیری شود. به همین منظور مدارس آزمودنی‌ها از نقاط مختلف در شهر همدان انتخاب شد، در نتیجه تنوع آزمودنی‌ها به‌گونه‌ای بود که دانش‌آموزان از نقاط

مختلف شهر با وضعیت‌های متنوع سبک زندگی، ترکیب بدنی، سطح رفاه خانواده، سطح آمادگی قلبی-تنفسی و ترکیب بدنی در پژوهش شرکت کردند.

روش اجرای پژوهش: ابتدا پرسشنامهٔ سلامتی به دانش‌آموزان ارائه و از آنها خواسته شد آن را با مشورت والدین خود تکمیل کنند. بدین‌وسیله دانش‌آموزانی که دارای مشکلات قلبی-عروقی، تنفسی، عصبی-عضلانی، آناتومیکی و سوخت‌وسازی از تحقیق خارج شدند. فرایند پژوهش حاضر توسط کمیتهٔ اخلاق در پژوهش دانشگاه علوم پزشکی همدان تأیید شد (کد کمیتهٔ اخلاق: IR.BASU.REC.1398.006). همچنین نامهٔ کتبی به‌منظور تأیید سلامتی کامل و رضایت برای شرکت دانش‌آموزان در تحقیق از والدین دانش‌آموزان با امضا و اثر انگشت اخذ شد.

روش‌های آزمایشگاهی: در آزمایشگاه فیزیولوژی ورزشی، متغیرهای سن (۰/۱ سال)، قد (سانتی‌متر)، وزن (کیلوگرم) و شاخص تودهٔ بدن ($BMI_{kg/m2}$) به روش استاندارد اندازه‌گیری شدند. ضربان قلب استراحت آزمودنی‌ها به‌وسیلهٔ ضربان‌سنج سینه‌ای پلار (Polar Heart Rate Transmitter Model T34 Germany) پس از استراحت کمینهٔ ۱۰ دقیقه‌ای روی صندلی اندازه‌گیری شد. به‌منظور برآورد ضربان قلب بیشینه از معادلهٔ تاناکا (سن×۰/۷ - ۲۰۸) (۱۶) استفاده شد.

به‌منظور اندازه‌گیری VO_2max و ضربان قلب بیشینه به روش معیار، از آزمون ورزشی بروس تعدیل‌شده استفاده شد (۱۷). آزمون بروس تعدیل‌شده روی نوار گردان (h/p/cosmos Saturn300/125 Germany) مجهز به دستگاه سنجش و تحلیل گازهای تنفسی (PowerCube, GanshornMedizin Electronic GmbH, Germany) انجام گرفت. در طول اجرای آزمون ضربان قلب آزمودنی‌ها به‌طور پیوسته به‌وسیلهٔ ضربان‌سنجی (Polar Heart Rate Transmitter Model T34 Germany) که روی قفسهٔ سینهٔ آزمودنی‌ها بسته شده بود، اندازه‌گیری شد. ضربان قلب در صفحهٔ نمایش رایانهٔ متصل به نوار گردان به‌منظور پایش شدت فعالیت آزمودنی‌ها قابل مشاهده بود. گازهای تنفسی حین اجرای آزمون ورزشی بروس تعدیل‌شده به‌وسیلهٔ ماسک لاستیکی (HansRudolph, Kansas City, MS, USA) متناسب با اندازهٔ سر و صورت آزمودنی‌ها، جمع‌آوری و به‌وسیلهٔ دستگاه گازآنالایزر تجزیه‌وتحلیل می‌شد. به‌طوری‌که در هر ده ثانیه، متغیرهای تنفسی و ضربان قلب در نمایشگر دستگاه قابل مشاهده بود و ذخیره می‌شد. زمان پایان آزمون فزاینده و تعیین VO_2max معیار، هنگامی مشخص می‌شد که در هر آزمودنی دست‌کم دو گزینه از چهار ملاک ذیل، مشاهده می‌شد: ۱. رسیدن به ضربان قلب بزرگ‌تر از ۸۵ درصد ضربان قلب بیشینه برآوردشده مطابق رابطهٔ تاناکا (۱۶)، ۲. نسبت تبادل تنفسی (RER) > ۱/۱ ، ۳) مشاهدهٔ عدم تعادل در دویدن، ۴. واماندگی ارادی آزمودنی و امتناع از ادامهٔ آزمون ورزشی با وجود تشویق‌های کلامی آزمونگر. به‌منظور تعیین VO_2max، بیشترین مقدار اکسیژن مصرفی ۲۰ ثانیهٔ انتهایی آزمون فزایندهٔ ورزشی لحاظ شد (جدول ۱). همچنین بالاترین ضربان قلب تجربه‌شده در آزمون فزاینده به‌عنوان ضربان قلب بیشینهٔ معیار لحاظ شد. از آزمودنی‌ها خواسته شده بود که پیش از اجرای آزمون آزمایشگاهی، از انجام هرگونه فعالیت بدنی نسبتاً شدید در ظرف ۴۸ ساعت پرهیز کنند. همچنین به آزمودنی‌ها گفته شد که وعدهٔ غذایی خود را سه ساعت پیش از آزمون میل کرده و سپس از خوردن مواد غذایی به استثنای آب امتناع کنند. تنظیم‌های مربوط به شرایط محیطی، حجم‌ها و نسبت گازهای کپسول اکسیژن مطابق شیوه‌نامهٔ شرکت سازندهٔ گازآنالایزر به‌طور روزانه پیش و پس از استفاده از دستگاه انجام می‌گرفت. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در دمای ۱۹ تا ۲۲ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۳۹ تا ۴۳ درصد و ارتفاع ۱۸۶۰ متر از سطح دریا در آزمایشگاه فیزیولوژی ورزشی دانشگاه بوعلی سینا انجام گرفت. برای برآورد VO_2max از دو معادلهٔ مبتنی بر شاخص ضربان قلب «ویکس» و «آث» استفاده شد. در این دو معادله، شاخص ضربان قلب از تقسیم ضربان قلب بیشینه بر ضربان قلب استراحت مطابق رابطهٔ زیر محاسبه شد:

$$\text{شاخص ضربان قلب} = \frac{\text{ضربان قلب بیشینه}}{\text{ضربان قلب استراحت}}$$

$$VO_2max\ (ml/kg/min) = ((\text{شاخص ضربان قلب} \times 6) - 5) \times 3/5$$

معادلهٔ ۱ (۸)

$$VO_2max\ (ml/kg/min) = \text{شاخص ضربان قلب} \times 15$$

معادله ۲ (۹)

تحلیل آماری: به‌منظور بررسی توزیع طبیعی داده‌ها

از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. به‌منظور ارزیابی روایی معادلات شاخص ضربان قلب، VO_2max برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده به‌وسیلهٔ روش‌های آماری همبستگی پیرسون، تی همبسته و توافق بلان-آلتمن مقایسه شدند. تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخهٔ ۲۴ در سطح معنادار P<۰/۰۵ انجام گرفت.

نتایج

در جدول ۱، مشخصات ترکیب بدنی و فیزیولوژی دانش‌آموزان ارائه شده است. با توجه به داده‌های مربوط به رتبهٔ درصدی شاخص تودهٔ بدن دانش‌آموزان، مشخص می‌شود که آزمودنی‌های این پژوهش تعدادی از دانش‌آموزان لاغر تا چاق را شامل است که میانگین دانش‌آموزان دارای وزن طبیعی بودند.

جدول ۱. مشخصات آزمودنی‌ها (۱۵۷ نفر)

متغیرها	میانگین ± انحراف معیار	کرانهٔ پایین	کرانهٔ بالا
سن (سال)	۱۴/۱±۹۲/۳۵	۱۱/۵۸	۱۷/۱۷
قد (سانتی‌متر)	۱۶۷/۹±۴۹/۹۳	۱۳۷	۱۹۴
وزن (کیلوگرم)	۶۰/۱۶±۶۵/۱۷	۲۸	۱۱۳
شاخص تودهٔ بدن (کیلوگرم/متر مربع)	۲۱/۴±۳۹/۵۰	۱۲/۴۴	۳۵/۲۷
رتبهٔ درصدی شاخص تودهٔ بدن	۵۶/۲۱±۵۱/۱۶	۰/۵	۹۹/۷۲
ضربان قلب استراحت (ضربه/دقیقه)	۷۹/۹±۵۹/۶۵	۵۸	۱۰۲
اکسیژن مصرفی بیشینه (میلی‌لیتر/وزن بدن/دقیقه)	۴۱/۶±۸۰/۶۷	۲۲/۱۰	۵۵/۸۰
نسبت تبادل تنفسی	۱/۰±۲۴/۰۸۱	۱/۰۶	۱/۵۰
ضربان قلب بیشینه (ضربه/دقیقه)	۲۰۱/۶±۱۱/۱۲	۱۹۰	۲۲۱
شاخص ضربان قلب*	۲/۰±۵۶۴/۳۲۳	۱/۹۵	۳/۴۹

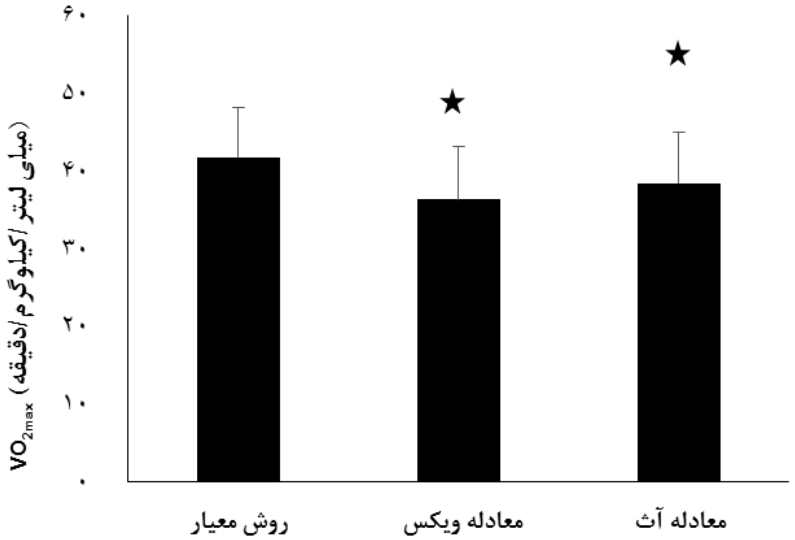
*: نشانهٔ شاخص ضربان قلب که از تقسیم ضربان قلب بیشینه بر ضربان قلب استراحت محاسبه می‌شود: (HR index = HRmax/HRrest)

همبستگی متوسط و معناداری بین VO_2max برآوردشده به‌وسیلهٔ معادلات شاخص ضربان قلب «ویکس» و «آث» با روش تحلیل گازهای تنفسی مشاهده شد (P<۰/۰۵، R = ۰/۳۲۸). با این همه، اختلاف معناداری بین VO_2max برآوردشده به‌وسیلهٔ این دو معادله و روش تحلیل گازهای تنفسی وجود داشت (میلی‌لیتر/کیلوگرم/دقیقه ۵/٤۵ - ۳/۳٤ = میانگین اختلاف) (P<۰/۰۵). به‌طوری‌که هر دو معادلهٔ برآوردی به کم‌تخمینی VO_2max به‌ترتیب به مقدار ۱۷/۹۳±۱۱/۳٦ و ۱٦/۳۹±۵/۸٤ درصد در پسران نوجوان منجر شد. به‌ویژه اینکه انحراف معیار درصد خطای برآورد بالا بود (جدول ۲ و شکل ۱). همچنین همبستگی مثبت و معناداری بین مقدار خطای برآورد و VO_2max در هر دو معادلهٔ شاخص ضربان قلب به‌دست آمد. به‌طوری‌که مقدار همبستگی بین مقدار خطا و VO_2max برای معادلهٔ «ویکس» (R=۰/۵۷) و «آث» (R=۰/۷٤) بود (P<۰/۰۵) که حاکی از افزایش خطای برآورد در آزمودنی‌های دارای VO_2max بالا بود.

جدول ۲. مقایسهٔ معادلات برآورد VO_{2max} مبتنی بر شاخص ضربان قلب با روش معیار (۱۵۷ نفر)

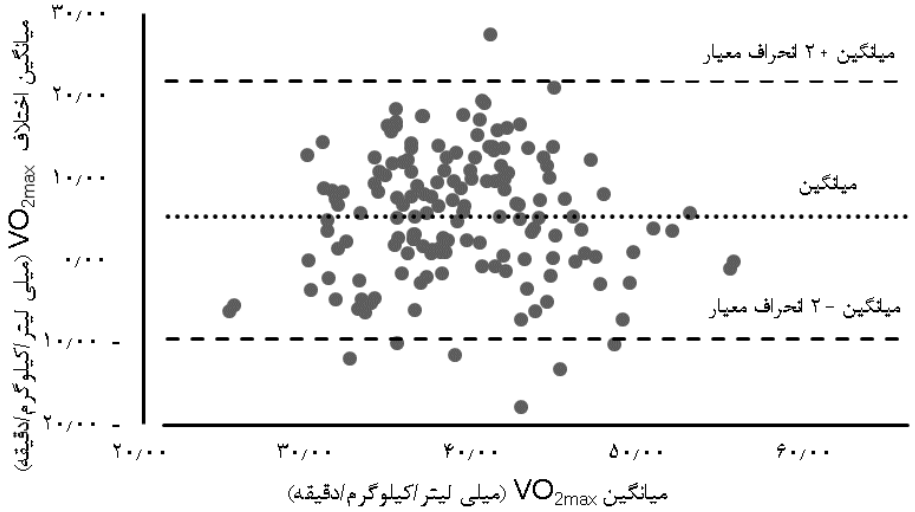
روش‌های اندازه‌گیری VO_2max (میلی‌لیتر/کیلوگرم/ دقیقه)	میانگین ± انحراف معیار	کمینه	بیشینه	همبستگی (R)	میانگین اختلاف €	خطای برآورد (٪)¥
روش معیار تحلیل گازهای تنفسی	۴۱/۶±۸۰/۶۷	۲۲/۱۰	۵۵/۸۰	--	--	--
معادلهٔ مبتنی بر شاخص ضربان قلب £	۳۶/۶±۳۴/۷۹	۲۳/۴۷	۵۵/۸۲	۰/۳۲۸*	۵/۷±۴۵/۸۰**	۱۱/۱۷±۳۶/۹۳
معادلهٔ مبتنی بر شاخص ضربان قلب β	۳۸/۴±۴۶/۸۵	۲۹/۲۶	۵۲/۳۷	۰/۳۲۸*	۳/۶±۳۴/۸۴**	۵/۱۶±۸۴/۳۹

*: نشانهٔ همبستگی معنادار VO_2max برآوردشده به روش معادلات شاخص ضربان قلب با روش معیار در سطح کمتر از P<۰/۰۵، **: اختلاف معنادار VO_2max برآوردشده به روش معادلات شاخص ضربان قلب با روش معیار در سطح کمتر از P<۰/۰۵، £: نشانهٔ VO_2max برآوردشده بر پایهٔ معادلهٔ «ویکس»، β: نشانهٔ VO_2max برآوردشده برپایهٔ معادلهٔ «آث»، €: نشانهٔ میانگین اختلاف (Mean Diff = Measure VO_2max - Predicted VO_2max)، ¥: نشانهٔ خطای برآورد که مقدار خطای برآورد را به‌صورت درصد بیان می‌کند و از رابطهٔ $Eror\ Prediction\ \% = \frac{Measure\ VO2max - Predicted\ VO2max}{Measure\ VO2max} \times 100$ به‌دست می‌آید.

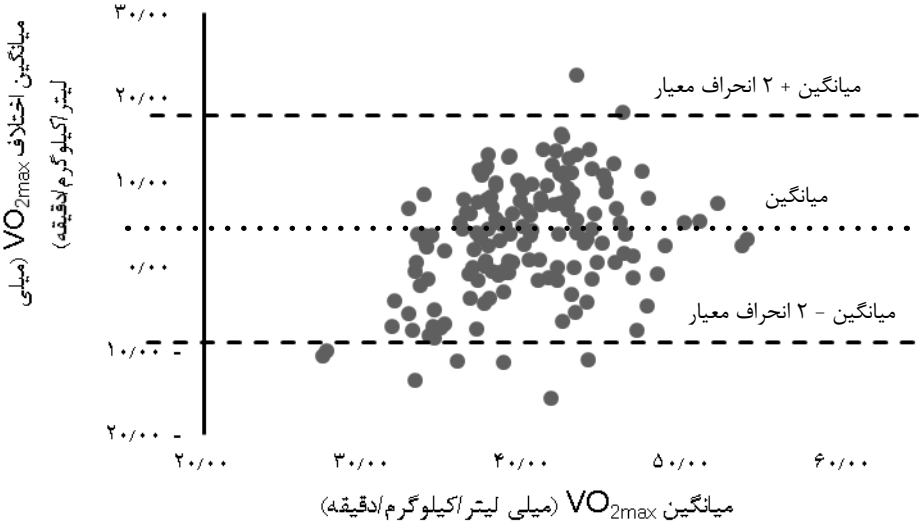


شکل ۱. مقایسهٔ میانگین VO_2max معادلات مبتنی بر شاخص ضربان قلب با روش معیار تحلیل گازهای تنفسی
*: نشانهٔ اختلاف معنادار برآورد VO_2max با روش معیار

در نمودار گرافیکی بلاند – آلتمن، میانگین VO_2max برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده (محور افقی) در برابر اختلاف VO_2max برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده (محور عمودی) ارائه شده است. میانگین اختلاف‌ها و فاصلهٔ اطمینان ۹۵ درصد به‌ترتیب به‌وسیلهٔ خطوط نقطه‌چین (...) و خط‌چین (- - -) روی نمودار مشخص شده است (شکل‌های ۲ و ۳). طبق این دو نمودار، پراکندگی اختلاف میانگین VO_2max حاصل از معادلهٔ شاخص ضربان قلب «ویکس» و «آث» با روش معیار بالا بود. به‌طوری‌که مقدار میانگین اختلاف VO_2max (خطوط نقطه‌چین در نمودار) از مقدار بهینه (صفر) فاصله داشت و انحراف معیار آن (خطوط خط‌چین نمودار) نیز بالا بود.



شکل ۲. نمودار توافق بلاند – آلتمن: میانگین VO_2max برآوردشده به روش معادلهٔ شاخص ضربان قلب «ویکس» و روش معیار (محور افقی) در برابر اختلاف VO_2max برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده (محور عمودی). میانگین اختلاف‌ها و فاصلهٔ اطمینان ۹۵ درصد به‌ترتیب به‌وسیلهٔ خطوط نقطه‌چین (...) و خط‌چین (- - -) مشخص شده است.



شکل ۳. نمودار توافق بلاند – آلتمن: میانگین VO_2max برآوردشده به روش معادلهٔ شاخص ضربان قلب «آث» و روش معیار (محور افقی) در برابر اختلاف VO_2max برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده (محور عمودی). میانگین اختلاف‌ها و فاصلهٔ اطمینان ۹۵ درصد به‌ترتیب به‌وسیلهٔ خطوط نقطه‌چین (...) و خط‌چین (- - -) مشخص شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی تفاوت‌ها، توافق و سوگیری بین VO_2max برآوردشده به روش معادلات مبتنی بر شاخص ضربان قلب «ویکس» و «آث» با روش معیار تحلیل گازهای تنفسی در پسران نوجوان سالم بود. در تحقیق حاضر همبستگی متوسط و معناداری بین VO_2max برآوردشده به‌وسیلهٔ معادلات شاخص ضربان قلب منتخب با روش تحلیل گازهای تنفسی مشاهده شد (P <۰/۰۵، R = ۰/۳۲۸). با این همه، اختلاف معناداری بین VO_2max برآوردشده به‌وسیلهٔ معادلات شاخص ضربان قلب و روش تحلیل گازهای تنفسی مشاهده شد (میلی‌لیتر/کیلوگرم/دقیقه ۵/۴۵ - ۳/۳۴ = میانگین اختلاف) (P<۰/۰۵). به‌طوری‌که دو معادله نتوانستند میانگین VO_2max را به‌دقت برآورد کنند و در نتیجه به کم‌تخمینی VO_2max در پسران نوجوان منجر شد (جدول ۲ و شکل ۱).

آمادگی قلبی-تنفسی مهم‌ترین جزء از آمادگی بدنی است که با سلامتی عمومی بدن همبستگی تنگاتنگی دارد. بنابراین اندازه‌گیری آمادگی قلبی-تنفسی اهمیت زیادی در حوزهٔ علوم ورزشی و بهداشت دارد (۱). یکی از جنبه‌های منحصربه‌فرد معادلات شاخص ضربان قلب این است که می‌تواند VO_2max فرد را بدون نیاز به تحلیل گازهای تنفسی برآورد کنند. با این همه، نیازمند آن است که ضربان قلب استراحت و بیشینه به‌طور دقیق و با کمترین خطا اندازه‌گیری شوند (۱۲، ۱۳). از سوی دیگر اعتبار این دست معادلات می‌بایست در جمعیت مورد بررسی ارزیابی شود.

در تحقیق حاضر همبستگی متوسطی بین VO_2max حاصل از معادلات شاخص قلب با VO_2max روش معیار مشاهده شد (P<۰/۰۵، R = ۰/۳۲۸) (جدول ۲). طبق منابع علمی ضریب همبستگی بزرگ‌تر از ۰/۷۰ به‌عنوان همبستگی بالا، ضریب ۰/۵۰ تا ۰/۷۰ به‌عنوان همبستگی خوب، ضریب ۰/۳۰ تا ۰/۵۰ به‌عنوان همبستگی متوسط و ضریب کمتر از ۰/۳۰ به‌عنوان همبستگی ضعیف/پایین لحاظ می‌شود (۱۸). آنچه باید لحاظ شود این است که صرف وجود همبستگی معنادار بین روش جدید اندازه‌گیری با روش معیار، به معنای روایی روش جدید نبوده و ضروری است تا با روش‌های تکمیلی دیگر اعتبار ارزیابی شود. به همین دلیل از روش آماری t همبسته و توافق بلاند-آلتمن استفاده شد که این روش آماری توانایی بیان اختلاف میانگین دو روش معیار و روش جایگزین را دارند. ویژگی روش آماری t همبسته مشخص کردن میزان اختلاف میانگین بین دو روش است (شکل ۱ و جدول ۲). با این همه، آزمون آماری t همبسته نمی‌تواند پراکندگی اختلاف در دو روش را به‌صورت یک به یک آزمودنی‌ها نشان دهد. بنابراین ما در کنار

آزمون t همبسته از نمودار گرافیکی توافق بلاند - آلتمن استفاده کردیم (۱۸).

در پژوهش حاضر بین میانگین مقادیر VO_2max پیش‌بینی‌شده و VO_2max اندازه‌گیری‌شده تفاوت معناداری مشاهده شد. به‌طوری‌که معادلات شاخص ضربان قلب «ویکس» و «آث» VO_2max پسران نوجوان را به‌ترتیب به مقدار ۵/۴۵ و ۳/۳۴ میلی‌لیتر بر کیلوگرم در دقیقه کم‌تخمینی کردند (P<۰/۰۵). این اختلاف برآورد برای معادلهٔ «ویکس» معادل ۳۶/۹۳±۱۱/۱۷ درصد و برای معادلهٔ «آث» معادل ۱۶/۳۹±۵/۸۴ درصد میانگین VO_2max اندازه‌گیری‌شده در روش معیار بود. نکتهٔ حائز اهمیت این نتیجه، انحراف معیار بالای درصد اختلاف میانگین در هر دو معادله است که تردیدهایی دربارهٔ ناکارایی این دو معادلهٔ منتخب جهت برآورد VO_2max در پسران نوجوان ایجاد می‌کند. همچنین طبق نمودار توافق بلاند – آلتمن، تفاوت بارزی در پراکندگی اختلاف VO_2max بین روش تحلیل گازهای تنفسی و روش معادلات شاخص ضربان قلب مشاهده شد (شکل‌های ۲ و ۳). در نمودار بلاند – آلتمن هرچه میانگین اختلاف VO_2max به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهندهٔ این است که روش جایگزین در مقایسه با روش معیار از دقت زیادی برخوردار است. علاوه‌بر این هرچه دامنهٔ پراکندگی اختلاف برآورد کوچک‌تر باشد، حاکی از دقت بیشتر معادلات برآوردی شاخص ضربان قلب است (۱۹). با استناد به نمودارهای بلاند-آلتمن، نتایج نشان داد که میانگین و پراکندگی اختلاف VO_2max برآوردشده به‌وسیلهٔ معادلات شاخص ضربان قلب تفاوت چشمگیری با روش معیار داشت.

در تحقیق حاضر به‌دلیل تعادل نسبتاً زیاد نمونهٔ آماری (۱۵۷ نفر) شاهد دامنهٔ گسترده‌ای از متغیرهای مورد سنجش بودیم. به‌نظر می‌رسد هرچه در تحقیقی تنوع ویژگی‌های فیزیولوژیکی و ترکیب بدنی در دامنهٔ گسترده‌تری باشد، قابلیت تعمیم‌دهی نتایج افزایش می‌یابد. همچنین برای اطمینان بیشتر همهٔ روش‌های آماری اعتبارسنجی معادلات شاخص ضربان قلب در آزمودنی‌های با ترکیب بدنی طبیعی و دارای اضافه وزن به‌صورت جداگانه بررسی شد؛ یعنی با تقسیم آزمودنی‌ها به دو گروه وزن طبیعی و اضافه وزن روش‌های آماری مجدداً انجام گرفت که باز هم نتایج نشان داد معادلات برآورد VO_2max مبتنی بر شاخص ضربان قلب در بچه‌های با وزن طبیعی و اضافه وزن روایی ندارد (داده‌ها به‌دلیل زیاد شدن حجم مقاله ارائه نشد).

در زمینهٔ اعتبارسنجی معادلات شاخص ضربان قلب چندین تحقیق در جمعیت‌های مختلف انجام گرفته است. نتایج تحقیق دوچارم و همکاران روی ۲۰ مرد و زن میانسال آمریکایی نشان داد که تفاوت معناداری بین VO_2max برآوردشده به روش معادلهٔ شاخص ضربان قلب با روش معیار تحلیل گازهای تنفسی وجود ندارد. با این همه، معادلات شاخص ضربان قلب به کم‌تخمینی VO_2max در آزمودنی‌های با آمادگی قلبی-تنفسی بالا منجر شد (۱۲). ووتیلاینن و همکاران (۲۰۲۱) با تحقیق روی ٦٣٤ مرد میانسال فنلاندی نشان دادند که معادلهٔ شاخص ضربان قلب از دقت کافی در برآورد VO_2max برخوردار نیست (۱۳). ایسکو و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه روی ۱۰۹ مرد نوجوان و جوان آمریکایی نشان دادند که همبستگی معناداری بین VO_2max اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده بر مبنای معادلات شاخص ضربان قلب وجود دارد (R =۰/۳۵). با این همه خطای برآورد این معادلات بالا بود (میلی‌لیتر بر کیلوگرم در دقیقه ۷/۹ – ٦/۹۲ = خطای برآورد) (۱۰). کولاسیو و همکاران نشان دادند که معادلات شاخص ضربان به کم‌تخمینی VO_2max در پسران فوتبالیست ۱۰ تا ۳۰ سالهٔ بلژیکی منجر می‌شود. به‌طوری‌که معادلهٔ پیشگو بر حسب متغیر ملاک شاخص ضربان قلب، قابلیت برآورد VO_2max ورزشکاران را در شدت‌های زیر بیشینه و بیشینه دارد. اما در شدت‌های فوق‌بیشینه، معادلهٔ پیشگو به کم‌تخمینی VO_2max در پسران فوتبالیست منجر می‌شود (۱٤). در پژوهشی دیگر، کولاسیو و همکاران (۲۰۱۸) روی ۵۰ بازیکن مرد شاغل در لیگ راگبی ایتالیا، همبستگی معناداری (R =۰/۹٦) را بین VO_2max اندازه‌گیری‌شده به روش تحلیل گازهای تنفسی و روش معادلهٔ شاخص ضربان قلب گزارش کردند (۱۱). نتایج تحقیق کانگ و همکاران (۱۵) در سال ۲۰۲۰ روی ٦۰ زن و مرد جوان نشان داد که با وجود همبستگی معنادار (R =۰/۵۰) بین VO_2max اندازه‌گیری‌شده به روش تحلیل گازهای تنفسی با روش معادلهٔ شاخص ضربان قلب، اما مقدار برآوردشده در مدل پیشگوی VO_2max بر حسب متغیر ملاک شاخص ضربان قلب به‌طور معناداری کمتر از مقدار اندازه‌گیری‌شده گزارش شد. کم‌تخمینی VO_2max به‌طور متوسط ۵/۱ و ۵/۸ میلی‌لیتر بر کیلوگرم وزن بدن در دقیقه در مردان جوان و آماده گزارش شده است (۱۵،

۲۰). دلیل ناهمسانی نتایج را می‌توان به عواملی مانند نژاد، ترکیب بدنی، سطح آمادگی بدنی، دامنهٔ سنی و جنسیت نسبت داد. بنابراین با توجه به نتایج متنوع در پژوهش‌های صورت‌گرفته، طراحی معادلات شاخص ضربان قلب ویژهٔ دامنهٔ سنی نوجوانان جهت برآورد VO_2max بسیار کاربردی و مفید خواهد بود.

بر پایهٔ تحقیقات گذشته در آزمودنی‌هایی که دارای سطح آمادگی قلبی-تنفسی بالایی بودند، معادلات شاخص ضربان قلب (به‌ویژه معادلهٔ ویکس) به کم‌تخمینی VO_2max منجر می‌شود. این احتمال وجود دارد که در مراحل انتهایی آزمون ورزشی فزاینده، شیب و سرعت بالای دستگاه به پاسخ‌های نامتناسب بین اکسیژن مصرفی (VO_2) و ضربان قلب (HR) منجر شود. درحالی‌که هم‌خطی بودن رابطهٔ $HR-VO_2$ که معادلات شاخص ضربان قلب بر پایهٔ آن استوار شده است، یافته‌هایی وجود دارد که نشان می‌دهد در بارهای کاری نزدیک به بیشینه، VO_2 می‌تواند به مقدار بیشتری نسبت به افزایش HR افزایش یابد (۲۱). این پاسخ غیرخطی، در بین افراد آماده‌تر شایع‌تر است. به‌درستی، از بین رفتن رابطهٔ خطی بین HR و VO_2 در شدت‌های بالا به‌عنوان یک تنگنا و محدودیت عمده برای استفاده از معادلات شاخص ضربان قلب برای برآورد VO_2max در نظر گرفته شده است (۲۲).

از آنجایی که ضربان قلب استراحت و بیشینه تنها مقادیر فیزیولوژیکی هستند که در معادلات برآورد VO_2max مبتنی بر شاخص ضربان قلب وارد می‌شوند، بنابراین بروز خطا در اندازه‌گیری این دو متغیر مستقل، برآورد VO_2max را با خطا همراه خواهد کرد. در واقع صحت و دقت برآورد VO_2max به‌وسیلهٔ معادلات شاخص ضربان قلب فقط به ضربان قلب اندازه‌گیری‌شدهٔ بیشینه و استراحت بستگی دارد. در پژوهش حاضر با قبول این پیش‌فرض که ضربان قلب بیشینه با دقت بسیار زیاد و در شرایط کاملاً استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است، بنابراین متغیر دیگری که در معادلهٔ شاخص ضربان قلب تأثیر بسزایی در برآورد VO_2max دارد، ضربان قلب استراحت است. در نتیجه، کیفیت و چگونگی اندازه‌گیری ضربان قلب استراحت از عوامل مداخله‌گر در معادلات برآورد VO_2max مبتنی بر شاخص ضربان قلب است.

در تحقیق حاضر ضربان قلب استراحت بر پایهٔ رهنمودهای انجمن پزشکی ورزشی آمریکا (ACSM) پس از ده دقیقه استراحت روی صندلی با استفاده از ضربان‌سنج سینه‌ای اندازه‌گیری شد. میانگین ضربان قلب استراحت آزمودنی‌های حاضر ۹/۶۵±۷۹/۵۹ ضربه در دقیقه بود که در دامنهٔ طبیعی همنوعان خود قرار داشت (۲۳). پژوهشگران تحقیق حاضر از آزمودنی‌ها درخواست کردند تا مصرف وعدهٔ غذایی اصلی خود را دست‌کم سه ساعت پیش از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی میل کرده و از مصرف مواد غذایی و نوشیدنی‌های حاوی کافئین ۲۴ پیش از آزمون خودداری کنند. با این همه، این امکان وجود دارد که برخی از آزمودنی‌ها موارد خواسته‌شده را رعایت نکرده باشند که از کنترل پژوهشگر خارج بود. پژوهش‌ها حاکی از این واقعیت است که ضربان قلب استراحت اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه شاید بیانگر ضربان قلب واقعی در حال استراحت نباشد. ممکن است استدلال شود که ضربان قلب استراحت بهتر است در صبح زمانی‌که فرد به‌طور طبیعی از خواب بیدار می‌شود، اندازه‌گیری شود. اندازه‌گیری ضربان قلب استراحت در وضعیت خوابیده به پشت به‌طور معمول حدود ۵ تا ۱۰ ضربه کمتر از حالت نشسته است (۲٤). این می‌تواند برآورد مقادیر VO_2maxرا افزایش و در نتیجه سوگیری در برآورد VO_2max را کاهش دهد. بنابراین شاید یکی از دلایل کم‌تخمینی معادلات شاخص ضربان قلب این است که اگر ضربان قلب استراحت در حالت خوابیده اندازه‌گیری شده بود، مقدار شاخص ضربان قلب بزرگ‌تر شده و در نهایت به افزایش VO_2max برآوردی منجر می‌شد و اختلاف برآورد را کاهش می‌داد. علت دیگر خطای برآورد معادلات شاخص ضربان قلب را می‌توان به تغییرات روزانهٔ ضربان قلب استراحت به‌دلیل حالات روحی-روانی، کیفیت خواب، نوع تغذیه، رعایت نکردن فاصلهٔ زمانی تغذیه تا حضور در آزمایشگاه، مصرف نوشیدنی‌های حاوی کافیین و مواد تأثیرگذار بر آهنگ ضربان قلب، تنش ناشی از ورود به محیط آزمایشگاه و فضای انجام آزمون ورزشی می‌توان نسبت داد (۲٤).

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در پژوهش حاضر به‌دلیل شمار نسبتاً زیاد آزمودنی‌ها، در ساعت‌های ۱۰ تا ۱۲ ظهر یا ۵ تا ۷ عصر انجام گرفت. بنابراین تغییرپذیری متغیرهای ضربان قلب استراحت و بیشینه و VO_2max در طول روز ممکن است به تغییرپذیری در برآورد معادلات منجر شده باشد. تغییرات روزانهٔ ضربان قلب بیشینه

به مقدار ۲ تا ٤ ضربه در دقیقه گزارش شده است (۲۵). انحراف معیار ضربان قلب استراحت پسران نوجوان در تحقیق حاضر (۹/٦۵ ضربه در دقیقه)، تنوع چشمگیری را در این اندازه‌گیری نشان می‌دهد. رویه‌هایی برای محدود کردن تأثیر عوامل مؤثر بر ضربان قلب استراحت اجرا شده بود، اما عوامل کنترل‌نشدنی، مانند سطح تنش یا کیفیت خواب، ممکن است به تنوع درون شرکت‌کننده منجر شده باشد.

از نقاط قوت پژوهش حاضر نمونهٔ آماری نسبتاً بزرگ (۱۵۶ نفر) و اندازه‌گیری مستقیم VO_2max به روش تحلیل و بررسی گازهای تنفسی در آزمون ورزشی فزایندهٔ بروس تعدیل‌شده بود. همچنین تنوع در شاخص‌های متنوع ترکیب بدنی (قد، وزن، شاخص تودهٔ بدن و درصد چربی) و سطح VO_2max آزمودنی‌ها از نقاط قوت پژوهش است. در پژوهش حاضر همهٔ آزمودنی‌ها از مقاطع تحصیلی متوسطهٔ اول و دوم انتخاب شده بودند که در این میان ممکن بود دانش‌آموزان نابالغ هم در بین دانش‌آموزان وجود داشته باشند. این موضوع می‌تواند تا حدی نتایج را دستخوش تغییر کند. با این همه، عدم اندازه‌گیری مستقیم سطح بلوغ در آزمودنی‌ها از تنگناهای پژوهش حاضر به‌حساب می‌آید. معادلات مبتنی بر شاخص ضربان قلب «ویکس» و «آث» جهت برآورد VO_2max پسران نوجوان سالم از اعتبار کافی برخوردار نیستند. به‌طوری‌که هر دو معادله به‌طور معناداری به کم‌تخمینی VO_2max منجر شد (میلی‌لیتر/کیلوگرم/دقیقه ۵/۴۵ - ۳/۳۴ = میانگین اختلاف) ($P<0/05$). طراحی معادلات شاخص ضربان قلب ویژهٔ نوجوانان جهت برآورد VO_2max توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از شرکت دانش‌آموزان و همکاری والدین آنها در پژوهش حاضر صمیمانه قدردانی می‌شود.

حامی/ حامیان مالی

مقالهٔ حاضر حاصل رسالهٔ کارشناسی ارشد دانشگاه بوعلی سیناست و حامی مالی ندارد.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در آماده‌سازی مقاله مشارکت یکسان داشتند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در این پژوهش وجود ندارد.

منابع

1 .Raghuveer G, Hartz J, Lubans DR, Takken T, Wiltz JL, Mietus-Snyder M, et al. Cardiorespiratory Fitness in Youth: An Important Marker of Health: A Scientific Statement From the American Heart Association. Circulation. 2020;142(7):e101-e18.

2 .Al-Mallah MH, Sakr S, Al-Qunaibet A. Cardiorespiratory Fitness and Cardiovascular Disease Prevention: an Update. Current atherosclerosis reports. 2018;20(1):1.

3 .Bahreini Nejad A, Moflahi D, Abbaspour M. Evaluation of intermittent protocol at incremental laboratory test in measuring physiological indices of soccer players. Journal of Sport and Exercise Physiology. 2022;15(2):41-51.[In Persian]

4. Hozourri T, Fashi M, Hasanloei Ha. The effect of four weeks of polarized training on aerobic fitness and performance of professional rowers. Journal of Sport and Exercise Physiology. 2022;15(4):31-41. [In Persian]

5. Hawkins MN, Raven PB, Snell PG, Stray-Gundersen J, Levine BD. Maximal oxygen uptake as a parametric measure of cardiorespiratory capacity. Med Sci Sports Exerc. 2007;39(1):103-7.

6. NAZEM F, SAKI H, JALILI M. Validation of Francis Step Protocol by Respiratory Gases Analyses and Design Native Equation to Estimate Aerobic Capacity in Iranian Boys. Journal of Knowledge & Health 2017;12(1):66-72. [In Persian]

7. Jalili M, Nazem F, Sazvar A, Ranjbar K. Prediction of Maximal Oxygen Uptake by Six-Minute Walk Test and Body Mass Index in Healthy Boys. J Pediatr. 2018;200:155-9.

8. Wicks JR, Oldridge NB, Nielsen LK, Vickers CE. HR index--a simple method for the prediction of oxygen uptake. Medicine and science in sports and exercise. 2011;43(10):2005-12.

9. Uth N, Sørensen H, Overgaard K, Pedersen PK. Estimation of VO2max from the ratio between HRmax and HRrest–the heart rate ratio method. European journal of applied physiology. 2004;91(1):111-5.

10. Esco MR, Olson MS, Williford HN, Mugu EM, Bloomquist BE, McHugh AN. Crossvalidation of Two Heart Rate–based Equations for Predicting V [Combining Dot Above] O2max in White and Black Men. The Journal of Strength & Conditioning Research. 2012;26(7):1920-7.

11 .Colosio AL, Pedrinolla A, Da Lozzo G, Pogliaghi S. Heart rate-index estimates oxygen uptake, energy expenditure and aerobic fitness in rugby players. Journal of sports science & medicine. 2018;17(4):633.

12. Ducharme JB, Gibson AL. Efficacy of estimating VO2max with the Heart Rate Ratio Method in middle-aged and older adults. European Journal of

Applied Physiology. 2021;121(12):3431-6.
13. Voutilainen A, Setti MO, Tuomainen T-P. Estimating Maximal Oxygen Uptake from the Ratio of Heart Rate at Maximal Exercise to Heart Rate at Rest in Middle-Aged Men. The World Journal of Men's Health. 2021;39(4):666.
14 .Colosio AL, Lievens M, Pogliaghi S, Bourgois JG, Boone J. Heart rate-index estimates aerobic metabolism in professional soccer players. Journal of science and medicine in sport. 2020;23(12):1208-14.
15. Kang J, Ratamess NA, Faigenbaum AD, Bush JA, Roser C, Montemarano D, et al. Use of Heart Rate Index to Predict Oxygen Uptake - A Validation Study. International journal of exercise science. 2020;13(7):1705-17.
16. Tanaka H, Monahan KD, Seals DR. Age-predicted maximal heart rate revisited. Journal of the American College of Cardiology. 2001;37(1):153-6.
17. Bruce RA, Kusumi F, Hosmer D. Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. American heart journal. 1973;85(4):546-62.
18. Atkinson G, Nevill AM. Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. Sports Med. 1998;26(4):217-38.
19. Bland JM, Altman D. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. The lancet. 1986;327(8476):307-10.
20. Haller JM, Fehling PC, Barr DA, Storer TW, Cooper CB, Smith DL. Use of the HR index to predict maximal oxygen uptake during different exercise protocols .Physiological reports. 2013;1(5.(
21. Drescher U, Koschate J, Hoffmann U. Oxygen uptake and heart rate kinetics during dynamic upper and lower body exercise: an investigation by time-series analysis. European journal of applied physiology. 2015;115:1665-72.
22. Gibson AL, Wagner D, Heyward V. Advanced fitness assessment and exercise prescription, 8E: Human kinetics; 2019.
23. Fleming S, Thompson M, Stevens R, Heneghan C, Plüddemann A, Maconochie I, et al. Normal ranges of heart rate and respiratory rate in children from birth to 18 years of age: a systematic review of observational studies. The Lancet. 2011;377(9770):1011-8.
24. Lequeux B, Uzan C, Rehman MB. Does resting heart rate measured by the physician reflect the patient's true resting heart rate? White-coat heart rate. Indian Heart Journal. 2018;70(1):93-8.
25 .Achten J, Jeukendrup AE. Heart rate monitoring: applications and limitations. Sports medicine. 2003;33:517-38.