

Original Article

A comparison of 1- repetition maximum and the number of repetitions until exhaustion during a squat movement based on two and three critical power components modeling in trained womenHedyeh Khademi[✉], Mohamad Fashi*[✉]

Department of Biological Sciences in Sports and Health, Faculty of Sports and Health Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

Background and Purpose: Resistance training is the foundation for increasing muscular strength as well as cardiorespiratory and metabolic fitness and increasing or preserving the capacity to produce power. These resistance training benefits are relevant to the health of the general population and also elite and recreational athletes; particularly those undergoing rehabilitation and as a means of protecting against sports injuries. However, the optimal relationship between resistance training intensity and subsequent physiological improvements remains to be defined. Over the past few decades, the 'Critical Power' (CP) concept exemplifies the link between fatigue or exhaustion and performance. In this regard, sports scientists and human physiologists have always used this concept as a link between the development of fatigue/exhaustion (and its mechanistic portents) and exercise performance as a means to prescribe efficient training programs and monitor progress. The present study aimed to a comparison of 1- repetition maximum and the number of repetitions until exhaustion during a squat movement based on two and three critical power components modeling in trained women.

Materials and Methods: Seven trained women (age: 20.11 ± 1.15 years, body mass index: 19.6 ± 0.93) Performed Six sets of barbell squats at different intensities based on the percentage of 1-repetition maximum, On six separate days with a rest of at least 24 hours. The weights were selected so the activity lasted about 3-12 minutes. Total activity time to exhaustion and movement rate was estimated using a Stopwatch and distance using Kinovea software.

Results: A linear two-parameter model of CP was accurately able to model exhaustive squatting data based on the plotting total work accomplished versus time-to-exhaustion ($r^2=0.89 \pm 0.09$) and paired samples t-tests demonstrated that the actual number of repetitions to failure was not different from the predicted values ($P > 0.05$). The hyperbolic three-parameter model of CP was also able to model these data based on plotting time-to-exhaustion against total output power (0.90 ± 0.06) and there was also no considerable difference between the actual number of repetitions to failure and those predicted by this model ($P > 0.05$). Additionally, there weren't any significant differences between the measured one-repetition maximum and those predicted by the hyperbolic model ($P > 0.05$). However, the linear two-parameter model was not able to predict one repetition maximum ($p < 0.05$). There was no significant difference between the predicted values of 1-repetition maximum based on hyperbolic modeling and the values measured using the Brzycki method ($p < 0.05$). However, the two-component linear model was not able to predict this variable ($P < 0.05$).

Conclusion: The two-component linear and three-component hyperbolic models can be generalized to the squat movement to exhaustion. These models also have a high ability to predict the number of repetitions to the exhaustion in squat movement. However, 1 repetition maximum was predictable only with the hyperbolic three-component model.

Keywords: Resistance Training, Exhaustion, Critical Power, Energy Storage Component, Critical Resistance.

How to cite this article: Khademi H, Fashi M. A comparison of 1- repetition maximum and the number of repetitions until exhaustion during a squat movement based on two and three critical power components modeling in trained women. Journal of Sport and Exercise Physiology 2023;16(2):58-66.

*Corresponding Author; E-mail: m_fashi@sbu.ac.ir
<https://doi.org/10.48308/joepa.2023.103564>

Received: 19/02/2023

Revised: 20/04/2023

Accepted: 24/04/2023



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/>).

مقاله پژوهشی

مقایسه یک تکرار بیشینه و تعداد تکرارهای تا حد واماندگی در حرکت اسکوات بر اساس الگوسازی دو و سه مؤلفه‌ای توان بحرانی در زنان تمرین‌کرده

هدیه خادمی^a، محمد فشی*^b

گروه علوم زیستی ورزش و تندرستی، دانشکده علوم ورزشی و تندرستی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران

چکیده

زمینه و هدف: در سال‌های گذشته تمرین مقاومتی و فعالیت‌های با وزنه به دلیل تأثیرات مفید و انکارناپذیر آن در بهبود قدرت و حفظ و افزایش توده عضلانی، سازگاری‌های مثبت در دستگاه‌های گوناگون بدن اعم از دستگاه قلبی-عروقی و عصبی-عضلانی و دیگر سازگاری‌های سوخت‌وسازی شایان توجه و در نهایت پیشگیری از آسیب‌های مرتبط با ورزش‌های تفریحی و حرفه‌ای، محبوبیت بسیاری در بین اقشار گوناگون جامعه شامل افراد سالم و بیمار و همچنین ورزشکاران تفریحی و نخبه کسب کرده است. همچنین مفهوم توان بحرانی چارچوب بسیار مفید و کاربردی را به منظور درک مفهوم خستگی و سازوکارهای مرتبط با آن و متعاقباً، بهبود کیفیت برنامه‌های تمرینی و پایش پیشرفت ورزشکاران، فراهم می‌آورد. با توجه به اینکه الگوسازی در این مفهوم از دو روش دو مؤلفه‌ای و سه مؤلفه‌ای انجام می‌پذیرد، هدف پژوهش حاضر مقایسه تأثیر یک تکرار بیشینه و تکرارهای تا واماندگی حرکت اسکوات بر اساس الگوسازی دو و سه مؤلفه‌ای توان بحرانی در زنان تمرین‌کرده بود.

مواد و روش‌ها: به این منظور هفت نفر از زنان تمرین‌کرده (سن ۲۰/۱۱±۱/۱۵ سال، شاخص توده بدن ۱۹/۶±۰/۹۳ کیلوگرم بر مترمربع) در شش روز جداگانه به صورت تصادفی، شش وهله حرکت اسکوات با هالتر تا واماندگی در شدت‌های گوناگون بر اساس درصدی از یک تکرار بیشینه، با دست‌کم ۲۴ ساعت استراحت را انجام دادند. وزنه‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که زمان فعالیت حدود ۳-۱۲ دقیقه طول بکشد. کل زمان فعالیت تا واماندگی و آهنگ حرکت با استفاده از زمان سنج کنترل و مسافت با استفاده از نرم‌افزار کینوا برآورد شد.

نتایج: مقدار کار انجام‌گرفته در هر وهله فعالیت تا واماندگی (حاصل ضرب میزان وزنه جابه‌جاشده در میزان مسافت طی شده توسط هالتر تا واماندگی) در مقابل مدت زمان کل فعالیت تا واماندگی با دقت زیادی ($P < 0/09$) پیش‌بینی شده بر اساس الگوی خطی دو مؤلفه‌ای توان بحرانی، الگوسازی شد و بین مقادیر تعداد تکرارهای تا واماندگی توان تولیدشده (حاصل تقسیم کل کار انجام‌گرفته در هر وهله بر کل زمان فعالیت تا واماندگی) در مقابل کل زمان فعالیت تا واماندگی با دقت زیادی ($P < 0/06 \pm 0/09$) بر اساس الگوی هذلولی سه مؤلفه‌ای توان بحرانی الگوسازی شد و بین مقادیر تعداد تکرارهای تا واماندگی پیش‌بینی شده بر اساس این الگو و مقادیر اندازه‌گیری شده تفاوت معناداری وجود نداشت ($P > 0/05$). همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از روش Brzycki تفاوت معناداری وجود نداشت ($P > 0/05$), هرچند الگوی خطی دو مؤلفه‌ای قادر به پیش‌بینی این متغیر نبود ($P < 0/05$).

نتیجه‌گیری: الگوی خطی دو مؤلفه‌ای و هذلولی سه مؤلفه‌ای قابلیت تعمیم به حرکت اسکوات تا واماندگی را دارند. همچنین این الگوها قابلیت زیادی در پیش‌بینی تعداد تکرار تا واماندگی حرکت اسکوات دارند، اگرچه یک تکرار بیشینه تنها با الگوی هذلولی سه مؤلفه‌ای قابل پیش‌بینی بود.

واژه‌های کلیدی: تمرین مقاومتی، توان بحرانی، مؤلفه ذخیره انرژی، مقاومت بحرانی، واماندگی.

* نویسنده مسئول: رایانامه: m.fashi@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۱/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

مقدمه

فیزیولوژیست‌ها و دانشمندان حیطة علوم ورزشی همواره در جست‌وجوی رابطه بین عملکرد ورزشی و گسترش خستگی بوده‌اند. با اینکه شاخص‌هایی مانند آستانه لاکتات و آستانه تبادل گازی همواره به درک بهتر این مسئله کمک کرده‌اند (۱)، شناسایی شاخصی که بتواند به‌طور دقیق‌تر میزان عملکرد و زمان رسیدن تا خستگی در شدت‌های گوناگون تمرین را پیش‌بینی کند، ضروری به نظر می‌رسد (۲). رابطه بین عملکرد و زمان رسیدن تا خستگی در سال‌های اخیر تحت عنوان مفهومی به نام توان بحرانی توصیف شده است. توان بحرانی (CP) از نظر ریاضی به‌عنوان رابطه هذلولی بین توان خروجی و زمان تا پایان فعالیت تعریف می‌شود که الگوهای دو و سه پارامتری را در برمی‌گیرد. الگوی دوپارامتری توان بحرانی در ابتدا به‌عنوان شیب نمودار بین کل کار انجام‌گرفته در مقابل زمان تا واماندگی برای سه تا هفت یا بیشتر وهله فعالیت در شدت‌های گوناگون فعالیت مطرح شد (۳). به‌طور ویژه اگر زمان تا واماندگی در فعالیت‌های با شدت بالا و ثابت در مقابل توان خروجی رسم شود، منحنی هذلولی‌واری تولید خواهد شد که در آن زمان تا واماندگی با دقت و کیفیت بسیار زیادی قابل پیش‌بینی است. از نظر ریاضی رابطه توان-زمان با معادله $t=W'/(P-CP)$ شامل دو متغیر به شرح زیر است: مجانب توان که تحت عنوان توان بحرانی (CP) شناخته می‌شود و ثابت منحنی که مؤلفه ذخیره انرژی (W) است، که بر حسب ژول اندازه‌گیری می‌شود (۴).

از دیدگاه نظری، توان بحرانی شدتی از تمرین است که فرد می‌تواند آن را برای مدت زمان نامحدودی بدون خستگی تحمل کند (۲) و بیانگر مقدار کل کاری است که فرد می‌تواند با استفاده از ذخایر انرژی درون عضله (شامل کراتین فسفات، اکسیژن چسبیده به میوگلوبین، ATP و گلیکوژن درون عضلانی) انجام دهد. این ویژگی در ورزش‌هایی مانند بسکتبال، هندبال و راگبی که وهله‌های تناوبی شدید را شامل می‌شوند، اهمیت پیدا می‌کند (۵). توان بحرانی متمایزکننده مرز بین فعالیت سنگین (پایداری محیط سوخت‌وسازی درون سلولی و اکسیژن مصرفی و لاکتات خون) از فعالیت شدید (کاهش فسفوکراتین، افزایش فسفات آلی و لاکتات، افزایش مصرف اکسیژن درون عضلانی و اکسیژن ریوی) است (۶). این مفهوم کاربردهای بسیار زیادی در دامنه وسیعی از

فعالیت‌هایی که در آن‌ها عضلات بدن درگیرند (دویدن، دوچرخه‌سواری، قایقرانی و شنا) و فعالیت‌های تک‌عضله یا تک‌مفصله (حرکات دو سربازو، جلو پا، پشت پا و دیگر حرکات بدنسازی) دارد (۷، ۸). این شاخص می‌تواند در پیش‌بینی عملکرد در تمرینات با شدت بالا، ارزیابی آمادگی جسمانی و تجویز برنامه‌های تمرینی بسیار مفید واقع شود (۶). جونز و همکاران (۲۰۱۰) قابلیت پیش‌بینی اکسیژن مصرفی بیشینه و تحمل تمرین به‌وسیله توان بحرانی را نشان دادند (۸). در پژوهش لیزنکو و همکاران (۲۰۰۹) توان بحرانی برای ارزیابی آمادگی هوازی و بی‌هوازی بازیکنان بسکتبال استفاده شد (۹). در دوچرخه‌سواران نیز توان بحرانی به‌عنوان یک آزمون عملکردی و پیش‌بینی‌کننده ظرفیت هوازی و بی‌هوازی بسیار مورد توجه است (۱۰).

پژوهش‌های بسیار محدودی در خصوص تعمیم مفهوم توان بحرانی به تمرینات مقاومتی انجام گرفته است (۸، ۱۱، ۱۲). مورتون و همکاران (۱۳) با رسم نمودار کار انجام‌گرفته (حاصل ضرب میزان وزنه در تعداد تکرارهای انجام‌گرفته تا واماندگی) در مقابل تعداد تکرارهای تا واماندگی در چهار وهله فعالیت با میزان وزنه‌های متفاوت، بر اساس الگوی هذلولی توان بحرانی توانستند میزان مقاومت بحرانی مقدار مقاومتی را که فرد می‌تواند آن را برای تعداد نامحدود تکرار کند، برای حرکت پرس سینه برآورد کنند. مقدار این پارامتر برای ۱۲ نفر از کل گروه ۱۶ نفره آزمون صفر یا بسیار نزدیک به صفر برآورد شد که بیانگر عدم مشارکت دستگاه انرژی هوازی در انجام وهله‌های آزمون بود. با توجه به اینکه بر اساس نتایج تعدادی از تحقیقات (۱۴، ۱۵) الگوی هذلولی توان بحرانی در مقایسه با الگوی خطی آن مقدار این متغیر را در فعالیت‌هایی مانند دویدن و دوچرخه‌سواری اندکی کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌کند، برگستروم و همکاران به‌منظور برآورد مقاومت بحرانی در مقادیر بالاتر از صفر و تفسیر فیزیولوژیک این متغیر در تمرینات مقاومتی از الگوی خطی توان بحرانی در حرکت لیفت مرده استفاده کردند. آن‌ها با رسم کار انجام‌گرفته (حاصل ضرب میزان وزنه در تعداد تکرارهای تا واماندگی در مسافت طی شده توسط وزنه در یک تکرار) در مقابل کل مسافت طی شده توسط وزنه، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، مقدار مقاومت بحرانی را برای همه آزمودنی‌ها بالاتر از صفر برآورد کردند (۱۶).

در هر دوی این پژوهش‌ها مقاومت بحرانی به عنوان جایگزینی برای توان بحرانی در نظر گرفته شده است. بر اساس تعریف فیزیکی کار (ژول) به صورت حاصل ضرب نیروی وارد شده در میزان جابه‌جایی شیء توسط آن نیرو و توان (وات) به صورت انجام کار تعریف می‌شود. افزون بر این نیرو (نیوتن) حاصل ضرب میزان وزنه در شتاب است (۱۷). بنابراین اگر میزان وزنه مشخصی در زمان مشخص و در میزان مسافت مشخص جابه‌جا شود، متعاقباً میزان کار و میزان توان مشخصی تولید خواهد شد که به صورت ریاضی کاملاً قابل محاسبه است. در نتیجه در صورت وجود چند وهله فعالیت با میزان وزنه‌های متفاوت، مقدار توان بحرانی و مقدار مقاومت بحرانی متناظر با آن قابل محاسبه خواهد بود (۶). طبق تعاریف پایه‌ای فیزیک، اگر نیرو ($F=mg$) برابر با حاصل ضرب جرم (m) در شتاب جاذبه (g)، کار (W) برابر با حاصل ضرب نیروی وارد شده در میزان جابه‌جایی انجام گرفته توسط آن نیرو (d) و توان تولیدی (P) برابر با حاصل تقسیم کار انجام گرفته به واحد زمان (t) باشد، هنگام جابه‌جا کردن یک وزنه مشخص (m) بر حسب کیلوگرم در مسافت مشخص (d) بر حسب متر در تمرینات مقاومتی، میزان مشخصی از کار ($W=m.d$) بر حسب کیلوگرم متر و توان ($P=m.d.t^{-1}$) بر حسب کیلوگرم متر بر ثانیه تولید خواهد شد. بنابراین می‌توان با محاسبه توان بحرانی در این حالت، میزان مقاومت بحرانی متناظر با آن را حساب کرد و در این حالت توان بحرانی تابعی از مقاومت بحرانی خواهد بود. از طرفی مفهوم CP تاکنون نوعاً برای بررسی عملکرد در فعالیت‌هایی که کمتر از ۱-۲ دقیقه طول می‌کشند، به دلیل محدود شدن توانایی تولید توان آنی و عملکرد انقباضی، استفاده نشده است. با بررسی پیشینه، تاکنون مطالعه‌ای مفهوم توان بحرانی را به عنوان تابعی از مقاومت بحرانی در تمرینات مقاومتی با محاسبه مسافت طی شده وزنه بررسی نکرده است. بنابراین هدف تحقیق حاضر تعمیم مفهوم توان بحرانی به عنوان تابعی از مقاومت بحرانی به تمرین مقاومتی بر اساس الگوی خطی و هذلولی توان بحرانی در حرکت اسکوات در زنان با سابقه تمرین مقاومتی است.

روش پژوهش

نمونه‌های پژوهش: هفت نفر از آمودنی‌های زن با سابقه تمرین مقاومتی (سن 20.11 ± 1.15 سال، وزن

60.4 ± 4.4 کیلوگرم، قد 163.16 ± 4.42 سانتی‌متر و شاخص توده بدن 19.6 ± 0.93 کیلوگرم بر مترمربع) برای این تحقیق داوطلب شدند. همه افراد سه بار در هفته و دست‌کم یک سال پیش از شروع جمع‌آوری اطلاعات آزمون سابقه تمرین مقاومتی داشتند و حرکت اسکوات را دست‌کم یک بار در طول ماه گذشته انجام داده بودند. آمودنی‌های با هرگونه سابقه بیماری‌های ریوی، قلبی-عروقی، سوخت‌وسازی و عضلانی-اسکلتی از تحقیق خارج شدند. پیش از شروع تحقیق همه آمودنی‌ها از تمامی خطرهای احتمالی آزمون مطلع شدند و رضایت‌نامه کتبی مبنی بر شرکت داوطلبانه در آزمون را امضا کردند. همچنین روند مطالعه توسط کمیته اخلاق دانشگاه شهید بهشتی تأیید شد (کد اخلاق: IR.SBU.REC.1398.050).

روش اجرای پژوهش: این تحقیق شامل یک جلسه آشنایی با شرایط آزمون، یک جلسه حضور در سالن بدنسازی باشگاه دانشکده علوم ورزشی دانشگاه شهید بهشتی و شش جلسه حضور در آزمایشگاه فیزیولوژی این دانشکده بود. همه جلسات با فاصله زمانی دست‌کم ۲۴ ساعت برگزار شدند. در جلسه آشنایی در سالن بدنسازی همه شرایط و ضوابط آزمون شامل نحوه صحیح اجرای حرکت اسکوات، روند اجرای حرکت، گرم کردن و ... به آمودنی‌ها توضیح داده شد. جلسه اول در سالن بدنسازی شامل اجرای آزمون یک تکرار بیشینه (IRM) به روش برزسکی و شش جلسه بعدی شامل اجرای حرکت اسکوات تا واماندگی، در میزان وزنه‌های گوناگون به صورت تصادفی بر اساس IRM اندازه‌گیری شده از آمودنی‌ها بود.

یک تکرار بیشینه: آزمون یک تکرار بیشینه برای تعیین میزان مقاومت‌ها در جلسات بعدی آزمون بر اساس توانایی خود افراد اجرا شد. آمودنی‌ها پیش از شروع آزمون گرم کردن استاندارد شامل پنج دقیقه دوچرخه‌سواری و ۱۵ تکرار با مقاومت ۱۰ تکرار بیشینه تقریبی خودشان اجرا کردند. در همه جلسات از هالتر استاندارد ۱۲ کیلوگرمی استفاده شد. برای برآورد یک تکرار بیشینه به روش Brzycki مقدار وزنه‌ای انتخاب شد که آمودنی‌ها بتوانند آن را کمتر از ۱۰ بار بلند کنند و مقدار IRM با استفاده از فرمول برزسکی برآورد شد (۱۶). هالتر بر پایین‌ترین بخش گردن و روی عضله دلتوئید خلفی قرار گرفت. فاصله بین پاها تقریباً برابر با عرض شانه و پنجه پاها کمی متمایل به خارج بود. یک تکرار قابل

بحرانی می‌تواند بر اساس فرمول $CR=(CP)\div(d\div t)$ قابل محاسبه باشد. با اینکه ما مقدار دقیق مسافت و زمانی را که توان بحرانی در آن اتفاق می‌افتد، نداریم، می‌توانیم از مقدار میانگین آن‌ها برای هر تکرار استفاده کنیم، زیرا در نهایت نسبت آن‌ها در هر نقطه عدد ثابتی است. مقدار W با استفاده از مقدار توان بحرانی و ظرفیت کار بی‌هوازی برآوردی و زمان‌های واقعی از طریق فرمول $W=CP\times actual\ t + AWC$ و در نهایت مقدار مسافت و تعداد تکرارهای تا واماندگی با استفاده‌های از فرمول‌های زیر برآورد می‌شود:

$$d = \frac{W}{actual\ m}$$

$$n = \frac{Predicted\ d}{average\ of\ d\ for\ each\ rep}$$

برآورد مقاومت بحرانی و پیش‌بینی تکرارهای تا واماندگی با استفاده از الگو هذلولی توان بحرانی: مقدار توان بحرانی و ظرفیت کار بی‌هوازی با رسم زمان در مقابل میزان توان تولیدشده براساس الگو هذلولی توان بحرانی برآورد شد (۱۹). مقدار d ، P ، CR ، n براساس روش محاسباتی توضیح داده شده در بخش قبل و با استفاده از فرمول‌های زیر برآورد شد:

$$CR = \frac{CP}{d/t}$$

$$P = \frac{AWC}{Actual\ t + CP} - k$$

$$d = \frac{Predicted\ p \times actual\ t}{actual\ m}$$

$$n = \frac{predicted\ d}{Average\ of\ d\ for\ each\ rep}$$

تحلیل آماری: نتایج با استفاده از میانگین و انحراف معیار به صورت خلاصه بیان شدند. همه نمودارهای خطی با استفاده از نرم‌افزار Excel ۲۰۱۶ تولید شدند که میزان همخوانی رگرسیون با داده‌ها با عدد r^2 نشان داده شد. تحلیل اطلاعات آماری با استفاده از SPSS software

قبول شامل حرکت از حالت ایستاده به سمت خم شدن زانو و لگن تا جایی که ران موازی با زمین گردد و برگشت به حالت ایستاده تعریف شد.

تکرارهای تا واماندگی: هر آزمودنی شش وهله فعالیت تا واماندگی را در مقاومت‌های گوناگون به صورت تصادفی با فاصله دست‌کم ۲۴ ساعت به پایان رسانید. مقاومت‌ها در هر جلسه طوری انتخاب شدند که کل مدت زمان فعالیت بین ۳ تا ۱۲ دقیقه طول بکشد. به عبارت دیگر درصدی از یک تکرار بیشینه برای هر آزمودنی انتخاب شد که بتواند در بازه زمانی مشخص شده حرکت را تکرار کند (۱۸). همه وهله‌های فعالیت توسط آزمودنی‌ها تا وقوع واماندگی کامل اجرا شدند و آهنگ حرکت اسکوات در همه تکرارها به میزان ۱/۳ ثانیه در مرحله درون‌گرا و ۱/۳ ثانیه در مرحله برون‌گرا بود. پیش از شروع هر وهله آزمودنی‌ها گرم کردن استاندارد مشابه آنچه در جلسه آزمون یک تکرار بیشینه توصیف شد را اجرا کردند. برای اندازه‌گیری مسافت طی شده توسط هالتر کل حرکت با دوربین فیلم‌برداری ضبط شد و مسافت طی شده با استفاده از نرم‌افزار تحلیل حرکت Kinova 0.8.15 برآورد شد. افزون بر این زمان کل فعالیت با مترونوم اندازه‌گیری و تعداد کل تکرارهای تا واماندگی شمارش شد.

برآورد توان و مقاومت بحرانی: توان بحرانی با استفاده از دو الگوی خطی ($W=CP\times t + AWC$) و هذلولی $(t=(AWC)\div(P+CP)) - k$ برآورد شد. W (کل کار انجام‌گرفته) برابر با حاصل ضرب d (کل مسافت طی شده با هالتر که با استفاده از نرم‌افزار تحلیل حرکت محاسبه شد) در m (کل وزن جابه‌جاشده شامل وزن هالتر به همراه وزنه‌های متصل به آن، از تبدیل جرم به نیرو به وسیله ضرب میزان وزنه در شتاب $g=9.81\ m/s^2$ به دلیل تأثیر خنثی در محاسبات نهایی صرف نظر شده است) و P (watt) حاصل ضرب W در t (کل زمان فعالیت تا واماندگی) است.

برآورد مقاومت بحرانی و پیش‌بینی تکرارهای تا واماندگی با استفاده از الگوی خطی توان بحرانی: مقدار توان بحرانی و ظرفیت کار بی‌هوازی با رسم میزان کار انجام‌گرفته در مقابل زمان تا واماندگی براساس الگوی خطی توان بحرانی در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد. همان‌طور که توضیح داده شد $P=W\div t$ و $P=W=m\times d$ است. با جایگزینی W در فرمول توان $P=(m\times d)\div t$ مقدار مقاومت

نتایج

عملکرد آزمودنی‌ها در حرکت اسکوات: میانگین و انحراف استاندارد یک تکرار بیشینه همه آزمودنی‌ها برابر با $۶۸/۱۳ \pm ۸/۶۵$ کیلوگرم بود. خلاصه‌ای از عملکرد آزمودنی‌ها در حرکت اسکوات در جدول ۱ شامل میانگین و انحراف استاندارد مقدار مقاومت‌ها، مسافت طی شده توسط هالتر، کل زمان سپری شده، تعداد تکرارهای تا واماندگی و درصد IRM که آزمودنی‌ها در آن به فعالیت پرداخته‌اند، آورده شده است.

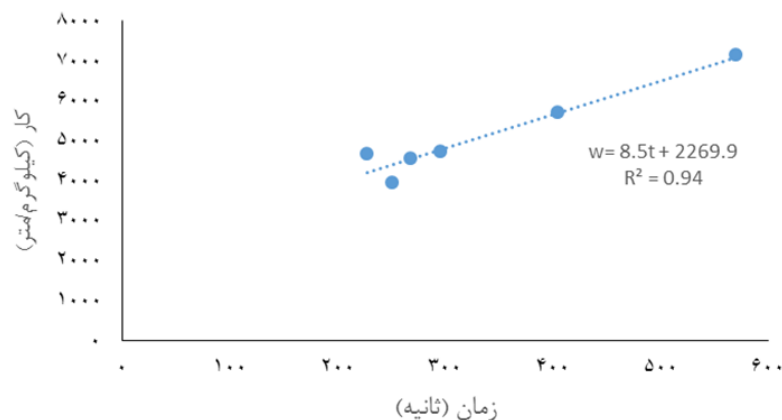
انجام گرفت (IBM SPSS Inc, Chicago, IL, USA ;23.0) و به منظور بررسی تفاوت بین مقادیر برآوردی تعداد تکرارهای تا واماندگی بر اساس الگوی خطی و الگوی هذلولی با مقادیر واقعی از آزمون تی وابسته برای هر الگو استفاده شد. همه عملیات آماری در سطح آلفای کمتر از ۰/۰۵ بررسی شد.

جدول ۱. عملکرد آزمودنی‌ها در حرکت اسکوات

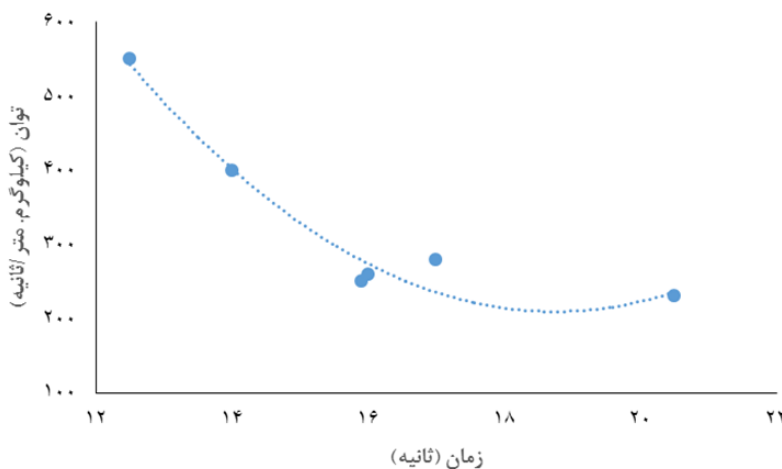
وزنه (kg)	مسافت پیموده شده (m)	زمان (s)	تعداد تکرارهای تا واماندگی	درصد یک تکرار بیشینه (%)
۲۶/۵۲±۵/۴	۳۱۶/۷۴±۱۰۵/۸۲	۴۹۰/۶۵±۱۳۰/۱	۱۸۹/۸۹±۵۹/۰۵	۳۹/۶۰±۷/۹۳

و هذلولی الگوسازی توان بحرانی براساس رسم به ترتیب مقادیر کل کار انجام گرفته و کل توان تولید شده در مقابل کل زمان سپری شده هستند.

برآورد مقاومت بحرانی و پیش‌بینی تکرارهای تا واماندگی با استفاده از الگوی خطی و هذلولی توان بحرانی؛ شکل‌های ۱ و ۲ نشان دهنده نمونه‌ای از رگرسیون خطی



شکل ۱. الگوسازی خطی توان بحرانی



شکل ۲. الگوسازی هذلولی توان بحرانی

همچنین اطلاعات استخراج شده از این نمودارها در جدول ۲ نشان داده شده است. تفاوت معناداری برای یک تکرار بیشینه حرکت اسکوات به وسیله الگوی هذلولی با روش برزسکی مشاهده نشد ($P = 0/84$, $t = 0/21$). هر دو الگوی خطی و هذلولی قابلیت بالایی در پیش بینی تعداد تکرار تا واماندگی حرکت اسکوات دارند (جدول ۲). یک تکرار بیشینه با استفاده از الگوی خطی قابل محاسبه نبود.

جدول ۲. پیش بینی یک تکرار بیشینه به وسیله الگوسازی خطی و هذلولی توان بحرانی

معادله	توان بحرانی	ظرفیت انجام کار بی هوازی (kg.m)	مقاومت بحرانی (kg)	یک تکرار بیشینه واقعی (kg)	یک تکرار بیشینه پیش بینی شده (kg)	R ²
الگوسازی خطی	۸,۴۷	۲۲۶۹,۹	۱۲,۴۴	۶۸,۴	غیرقابل محاسبه *	۰,۹۴
الگوسازی هذلولی	۰,۱۲	۱۰۶۴۴,۹	۰,۱۸	۶۸,۴	۶۴,۵۴	۰,۸۳

* غیرقابل محاسبه

بحث و نتیجه گیری

اجرا کند، کل زمان تا واماندگی در هر وهله فعالیت برابر با $t(s) = 60n/c$ خواهد بود. همچنین به دلیل ثابت بودن c می توان نتیجه گرفت t به طور مستقیم با n رابطه دارد. بر اساس مفروضات بالا می توان در معادله توان بحرانی $t = ((AWC) \div (P - CP)) + k$ و m را به ترتیب جانشین متغیرهای P و t کرد که در این حالت معادله $n = ((ARC) \div (m - CR)) + K$ حاصل خواهد شد. مقدار d در این تحقیق برابر با طول بازوی فرد در حرکت پرس سینه فرض شده است که متفاوت با مفهوم d به معنای کل مسافت جابه جاشده (برای نمونه در شنا، دویدن، دوچرخه سواری و قایقرانی) است (۲۱). همچنین حتی با فرض اینکه کل مسافت پیموده شده توسط هالتر برابر با حاصل ضرب مقدار d به عنوان طول بازو در مقدار n به عنوان تعداد تکرارهای تا واماندگی باشد، نمی توان مقدار d را در همه تکرارها به ویژه در زمان خستگی یکسان در نظر گرفت. با استناد به همین توضیح مقدار c نیز در کل زمان فعالیت در هر وهله نمی تواند مقدار ثابتی باشد. در مرحله بعدی حتی اگر P و t به ترتیب فقط به m و n بستگی داشته باشند، جایگزین کردن مستقیم آن ها در معادله به لحاظ فیزیکی صحیح نیست. مورتون از معادله بالا برای پیش بینی مقدار تکرارهای تا واماندگی استفاده کرد که با در نظر گرفتن واحد متغیرها انتظار می رود حاصل کسر، متغیر مسافت (d) باشد (۱۳).

برگستروم و همکاران با استناد به یافته های این تحقیق که اولین مطالعه در زمینه تعمیم مفهوم توان بحرانی

پژوهش حاضر اولین تحقیقی بود که در آن کاربرد توان بحرانی به عنوان تابعی از مقاومت بحرانی در تمرین های مقاومتی بررسی می شد. در این تحقیق مقدار توان بحرانی استفاده از هر دو الگوی خطی و هذلولی برآورد شد که برای همه آزمودنی ها (به غیر از یک مورد در الگوی خطی) مقدار R^2 در دامنه $0/97 - 0/83$ قرار داشت که همسو با تحقیقات قبلی در زمینه اعتبار این الگو در ورزش های گوناگون بود (۱۶، ۲۰). همچنین مقدار توان مقاومت بحرانی برآوردی بر اساس الگوی هذلولی توان بحرانی برای همه آزمودنی ها نزدیک به صفر برآورد شد که مجدداً همسو با نتایج تحقیق مورتون و همکاران بود. معادله ای که در تحقیق مورتون و همکاران (۱۳) به منظور برآورد مقاومت بحرانی استفاده شده است، شامل مفروضاتی به شرح زیر بود:

آزمودنی در هر بار بالا بردن و پایین آوردن وزنه مقدار m (kg) را در مسافت d (m) در مقابل شتاب جاذبه g ($m.s^{-1}$) و آهنگ حرکت c ($\# \cdot \min^{-1}$) جابه جا می کند. کار و توان تولید شده در این حالت در هر دقیقه به ترتیب برابر با $W = m \cdot g \cdot d \cdot c$ و $P = m \cdot d \cdot g \cdot c / 60$ خواهد بود.

به دلیل ثابت بودن مقدار g ، مقدار d (برابر با طول بازوی هر فرد در حرکت پرس سینه) و مقدار c ، توان تولیدی به طور مستقیم متناسب با میزان وزنه جابه جاشده (m) است.

اگر آزمودنی تعداد n تکرار را تا واماندگی در آهنگ c

توان خروجی یک عدد ملموس بر حسب وات است، قدری غیرمنطقی به نظر می‌رسد اگر این مقدار مطلق در نظر گرفته شود. همه روش‌های استاندارد و پذیرفته شده در برآورد توان بحرانی با مقداری خطا همراهند که خوشبختانه مقدار خطا در این پژوهش‌ها قابل برآورد است (برای نمونه خطای استاندارد یا بازه اطمینان ۹۵ درصد). همچنین اندکی تفاوت در میزان زمان تا واماندگی و توان بحرانی برآوردی از رابطه زمان-توان در افراد ثابت در روزهای گوناگون وجود دارد (۶). بنابراین بهتر است به جای نسبت دادن مقدار مطلق و واحدی به CP، یک بازه عددی (۵-۳٪) در نظر گرفته شود.

رویکرد دیگر در این تحقیق کیفیت پیش‌بینی مقدار IRM بر اساس این الگوها بود که همان‌طور که از نتایج مشخص است، الگوی خطی توان بحرانی به‌عنوان تابعی از مقاومت بحرانی در پیش‌بینی این کمیت ناموفق است و نتایج منطقی برای آن ارائه نمی‌دهد. در حالی که الگوی هذلولی در این تحقیق توانست مقدار نزدیک‌تری به IRM واقعی را در مقایسه با الگوی هذلولی تحقیق مورتون پیش‌بینی کند (۱۳).

با وجود نتایج ارزشمند، تعداد کم آزمودنی‌ها را می‌توان محدودیت پژوهش حاضر برشمرد که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی به آن توجه شود.

این پژوهش اولین تحقیق در زمینه تعمیم مفهوم توان بحرانی به‌عنوان تابعی از مقاومت بحرانی به تمرین مقاومتی با استفاده از مقدار مسافت پیموده شده توسط هالتر بر اساس الگوهای خطی و هذلولی بود. نتایج این پژوهش نشان داد هر دو الگو در برآورد تکرارهای تا واماندگی موفق عمل کردند، با این تفاوت که الگوی هذلولی توان بحرانی به‌عنوان تابعی از مقاومت بحرانی در پیش‌بینی مقدار IRM بسیار بهتر بود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت آزمودنی‌ها در پژوهش حاضر کمال تشکر را دارند.

حامی / حامیان مالی

برای مقاله حاضر حامی مالی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان اول و دوم در طرح موضوع، طراحی مطالعه و بررسی تحقیقات مشارکت یکسان داشتند. نویسنده اول در جمع‌آوری داده‌ها، نوشتار مقاله و نویسنده دوم در ویرایش، اصلاح و ارسال مقاله نقش داشتند.

به تمرینات مقاومتی بود و بر اساس تحقیقات قبلی که حاکی از آن بود که الگوی هذلولی توان بحرانی مقدار مقاومت بحرانی را کمی کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد (۱۶)، تلاش کردند با استفاده از الگوی خطی مقدار توان بحرانی را در حرکت لیفت مرده برآورد کنند. در این تحقیق مقدار توان بحرانی برابر با شیب خط کل کار انجام شده (برابر با حاصل ضرب میزان مسافت پیموده شده در میزان وزنه جابه‌جاشده) در مقابل میزان مسافت پیموده شده بود. در این الگو مقدار مقاومت بحرانی از معادله $W(kg \cdot m) = CR(kg) \cdot d(m) + ARC(kg \cdot m)$ برآورد شد که از نظر فیزیکی همه واحدها در آن با یکدیگر مطابقت دارند، ولی مقدار تکرارهای تا واماندگی مجدداً با استناد به فرمول مشتق از تحقیق مورتون و همکاران پیش‌بینی شد (۱۳). در این معادله همان‌طور که ذکر شد، واحدها با یکدیگر همخوانی ندارند. افزون بر این در هر دوی این تحقیقات میزان وزنه در حدود ۵۰-۸۰ درصد مقدار IRM خود افراد بود، این میزان وزنه سبب می‌شود مقدار زمان فعالیت در هر وهله کوتاه باشد که در تناقض با تحقیقاتی است که در آن‌ها اکیداً توصیه شده برای برآورد مقدار دقیق‌تر CP بهتر است زمان وهله‌ها بین ۳-۱۰ دقیقه باشد (۴، ۲۲).

موضوعی که همیشه در حوزه توان بحرانی و به‌کارگیری این مفهوم در دامنه وسیع فعالیت‌های انسان و گونه‌های گوناگون دیگر مورد بحث است، اجرای فعالیت در شدت دقیقاً برابر با توان بحرانی به‌عنوان مرز متمایزکننده بین فعالیت سنگین و شدید است که در این حالت میزان تحمل شدت بسیار کمتر از فعالیت در توان خروجی کمتر از توان بحرانی است (۲۳). این بحث بنا به دو دلیل بر پایه تفسیر نادرست از مفهوم اولیه توان بحرانی است: دلیل مفهومی و بنیادی اول این است که الگوی دومؤلفه‌ای توان بحرانی $(t=W'/(P-CP))$ قادر به برآورد زمان تا واماندگی در شدت برابر با CP نیست (اگر $P=CP$ مخرج کسر برابر با صفر می‌شود و حاصل کسر از نظر ریاضی به بی‌نهایت میل می‌کند). بنابراین استفاده از این مفهوم در شدت فعالیت برابر با توان بحرانی قابل اعتماد نیست. دلیل دوم از منظر روش‌شناسی این بحث را به چالش می‌کشد که وقتی فعالیت در شدت توان بحرانی انجام گیرد، میزان خطای گریزناپذیر و غیرقابل برطرف شدن، در برآورد توان بحرانی در نظر گرفته نمی‌شود. وقتی یکی از مزایای رابطه زمان-

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع برای نویسندگان وجود ندارد.

منابع

13. Morton RH, Redstone MD, Laing DJ. The critical power concept and bench press: Modeling 1RM and repetitions to failure. *International Journal of Exercise Science*. 2014;7(2):6.
14. Bull AJ, Housh TJ, Johnson GO, Rana SR. Physiological responses at five estimates of critical velocity. *European journal of applied physiology*. 2008;102(6):711-20.
15. Bull AJ, Housh TJ, Johnson GO, Perry SR. Effect of mathematical modeling on the estimation of critical power. *Medicine and science in sports and exercise*. 2000;32(2):526-30.
16. Bergstrom HC, Housh TJ, Zuniga JM, Traylor DA, Lewis Jr RW, Camic CL, et al. Differences among estimates of critical power and anaerobic work capacity derived from five mathematical models and the three-minute all-out test. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2014;28(3):592-600.
17. Gaesser GA, Carnevale TJ, Garfinkel A, Walter DO, Womack CJ. Estimation of critical power with nonlinear and linear models. *Medicine and science in sports and exercise*. 1995;27(10):1430-8.
18. Dinyer TK, Byrd MT, Vesotsky AN, Succi PJ, Bergstrom HC. Applying the critical power model to a full-body resistance-training movement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2019;14(10):1364-70.
19. Muniz-Pumares D, Karsten B, Triska C, Glaister M. Methodological approaches and related challenges associated with the determination of critical power and curvature constant. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2019;33(2):584-96.
20. Jenkins DG, Quigley BM. The influence of high-intensity exercise training on the Wlim-Tlim relationship. *Medicine and science in sports and exercise*. 1993;25(2):275-82.
21. Wakayoshi K, Ikuta K, Yoshida T, Udo M, Moritani T, Mutoh Y, et al. Determination and validity of critical velocity as an index of swimming performance in the competitive swimmer. *European journal of applied physiology and occupational physiology*. 1992;64(2):153-7.
22. Vanhatalo A, Doust JH, Burnley M. Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Medicine and science in sports and exercise*. 2007;39(3):548-55.
23. Ruiz-Alias SA, Olaya-Cuartero J, Nancupil-Andrade AA, García-Pinillos F. 9/3-Minute Running Critical Power Test: Mechanical Threshold Location With Respect to Ventilatory Thresholds and Maximum Oxygen Uptake. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2022;1(aop):1-8.
1. Haji Agha Bozorgi H, Rajabi H, Barzegarpour HR, Fayyaz Milani R. The effect of simultaneous submaximal physical exercise and mental exertion on fatigue indices in active men. *Journal of Sport and Exercise Physiology*. 2021;14(2):1-10. (In Persian)
2. 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)
3. Dotan R. A critical review of critical power. *European Journal of Applied Physiology*. 2022:1-30.
4. Hill DW, Poole DC, Smith JC. The relationship between power and the time to achieve $VO_{2\sim} 2\sim m\sim a\sim x$. *Medicine and science in sports and exercise*. 2002;34(4):709-14.
5. Jones AM, Vanhatalo A. The 'critical power' concept: applications to sports performance with a focus on intermittent high-intensity exercise. *Sports Medicine*. 2017;47:65-78.
6. Craig JC, Vanhatalo A, Burnley M, Jones AM, Poole DC. Critical power: possibly the most important fatigue threshold in exercise physiology. *Muscle and exercise physiology: Elsevier*; 2019. p. 159-81.
7. Burnley M. Estimation of critical torque using intermittent isometric maximal voluntary contractions of the quadriceps in humans. *Journal of Applied Physiology*. 2009;106(3):975-83.
8. Jones AM, Vanhatalo A, Burnley M, Morton RH, Poole DC. Critical power: implications for determination of $VO_{2\max}$ and exercise tolerance. *Med Sci Sports Exerc*. 2010;42(10):1876-90.
9. Lysenko O. The features of functional capabilities of elite basketball players related to game function. *Baltic Journal of Health and Physical Activity*. 2009;1(1):42.
10. Clark B, Macdermid PW. A comparative analysis of critical power models in elite road cyclists. *Current Research in Physiology*. 2021;4:139-44.
11. Skorski S, Schimpchen J, Pfeiffer M, Ferrauti A, Kellmann M, Meyer T. Effects of postexercise sauna bathing on recovery of swim performance. *International journal of sports physiology and performance*. 2019;15(7):934-40.
12. Karsten B, Petrigna L, Klose A, Bianco A, Townsend N, Triska C. Relationship between the critical power test and a 20-min functional threshold power test in cycling. *Frontiers in physiology*. 2021;11:613151.