Journal of Sport and Exercise Physiology
2023, 16(2): 58-66

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 women

Hedyeh 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 popular among general population of athletes for increasing muscular strength as well as cardiorespiratory and metabolic fitness and increasing or preserving the capacity to produce power. These benefits are important to the health of the general population as well as preventing injuries elite and recreational athletes. The 'Critical Power' (CP) concept exemplifies the link between fatigue or exhaustion and performance, and has been used as a means to prescribe efficient training programs and monitor progress. The present study aimed to compare 1- repetition maximum and the number of repetitions until exhaustion for squat exercise 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 kg/m2) performed six sets of barbell squats at different intensities based on the percentages of 1-repetition maximum, in six separate days with at least 24 hours rest. The weights were selected in a way that the activity lasted for 3-12 minutes. Total activity time to exhaustion and movement tempo was controlled by using a stopwatch and distance was estimated by 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 (r2=0.89±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 (r2=0.90±0.06) and there was also no significant difference between the actual number of repetitions to failure and those predicted by this model (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 exercise to exhaustion. These models also have a high ability to predict the number of repetitions to the exhaustion in squat exercise. However, 1-repetition maximum was predictable only with the hyperbolic three-component model.

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

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

*Corresponding Author; E-mail: m_fashi@sbu.ac.ir
https://doi.org/10.48308/joeppa.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/).

نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی
۱۴۰۲/ دوره ۱۶/ شماره ۲/ صفحه‌های ۵۸-۶۶

مقاله پژوهشی

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

هدیه خادمی، محمد فشی*

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

چکیده

زمینه و هدف: در سال‌های گذشته تمرین مقاومتی و فعالیت‌های با وزنه به‌دلیل تأثیرات مفید و انکارناپذیر آن در بهبود قدرت و حفظ و افزایش تودهٔ 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 به‌منظور 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 دومؤلفه‌ای و سه‌مؤلفه‌ای انجام می‌پذیرد، هدف پژوهش حاضر مقایسهٔ تأثیر یک تکرار بیشینه و تکرارهای تا واماندگی حرکت اسکوات بر اساس الگوسازی دو و سه‌مؤلفه‌ای توان بحرانی در زنان تمرین‌کرده بود.

مواد و روش‌ها: به این منظور هفت نفر از زنان تمرین‌کرده (سن ۱/۱۵±۲۰/۱۱ سال، شاخص تودهٔ بدن ۰/۹۳±۱۹/۶ کیلوگرم بر مترمربع) در شش روز جداگانه به‌صورت 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 به‌گونه‌ای انتخاب شد که زمان فعالیت حدود ۳-۱۲ دقیقه طول بکشد. کل زمان فعالیت تا واماندگی و آهنگ حرکت با استفاده از زمان‌سنج کنترل و مسافت با استفاده از نرم‌افزار کینوا برآورد شد.

نتایج: مقدار کار انجام‌گرفته در هر وهله فعالیت تا واماندگی (حاصل‌ضرب میزان وزنهٔ جابه‌جاشده در میزان مسافت طی‌شده توسط هالتر تا واماندگی) در مقابل مدت زمان کل فعالیت تا واماندگی با دقت زیادی (۰/۰۹ ± ۰/۸۹ =۲r) بر اساس الگوی خطی دومؤلفه‌ای توان بحرانی، الگوسازی شد و بین مقادیر تعداد تکرارهای تا واماندگی پیش‌بینی‌شده بر اساس این الگو و مقادیر اندازه‌گیری‌شده تفاوت معناداری وجود نداشت (P>۰/۰۵). همچنین 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 (۰/۰۶ ± ۰/۹۰ =r۲) بر اساس الگوی هذلولی سه‌مؤلفه‌ای توان بحرانی الگوسازی شد و بین مقادیر تعداد تکرارهای تا واماندگی پیش‌بینی‌شده بر اساس این الگو و مقادیر اندازه‌گیری‌شده تفاوت معناداری وجود نداشت (P>۰/۰۵). بین مقادیر پیش‌بینی‌شده برای یک تکرار بیشینه بر اساس الگوسازی هذلولی و مقادیر اندازه گیری شده با استفاده از روش Brzycki تفاوت معناداری وجود نداشت (P>۰/۰۵)، هرچند الگوی خطی دومؤلفه‌ای قادر به پیش‌بینی این متغیر نبود (P<۰/۰۵).

نتیجه‌گیری: الگوی خطی دومؤلفه‌ای و هذلولی سه‌مؤلفه‌ای 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 سه‌مؤلفه‌ای قابل پیش‌بینی بود.

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

نحوه استناد به این مقاله: خادمی ه، فشی م. مقایسهٔ یک تکرار بیشینه و تعداد تکرارهای تا حد واماندگی در حرکت اسکوات بر اساس الگوسازی دو و سه‌مؤلفه‌ای توان بحرانی در زنان تمرین‌کرده. نشریهٔ فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی. ۱۴۰۲؛۱۶(۲):۵۸-۶۶.

* رایانامهٔ نویسندهٔ مسئول: m_fashi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۱/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

مقدمه

فیزیولوژیست‌ها و دانشمندان حیطهٔ علوم ورزشی همواره در جست‌وجوی رابطهٔ بین عملکرد ورزشی و گسترش خستگی بوده‌اند. با اینکه شاخص‌هایی مانند آستانهٔ لاکتات و آستانهٔ 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 به‌نظر می‌رسد (۲). رابطهٔ 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 رابطهٔ هذلولی بین توان خروجی و زمان تا پایان فعالیت تعریف می‌شود که الگوهای دو و سه‌پارامتری 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 رابطهٔ توان-زمان با معادلهٔ $t=W'/(P-CP)$ شامل دو متغیر به شرح زیر است: مجانب توان که تحت عنوان توان بحرانی (CP) شناخته می‌شود و ثابت منحنی که مؤلفهٔ ذخیرهٔ 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 درون‌عضلانی) انجام دهد. این ویژگی در ورزش‌هایی مانند بسکتبال، هندبال و راگبی که وهله‌های تناوبی شدید را شامل می‌شوند، اهمیت پیدا می‌کند (۵).

توان بحرانی متمایزکنندهٔ مرز بین فعالیت سنگین (پایداری محیط سوخت‌وسازی درون‌سلولی و اکسیژن مصرفی و لاکتات خون) از فعالیت شدید (کاهش فسفوکراتین، افزایش فسفات آلی و لاکتات، افزایش مصرف اکسیژن درون‌عضلانی و اکسیژن ریوی) است (۶). این مفهوم کاربردهای بسیار زیادی در دامنهٔ 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 به‌وسیلهٔ 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 پیش‌بینی‌کنندهٔ 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 (حاصل‌ضرب 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 نفرهٔ 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 (حاصل‌ضرب میزان وزنه در تعداد تکرارهای تا واماندگی در مسافت طی‌شده توسط وزنه در یک تکرار) در مقابل کل مسافت طی‌شده توسط وزنه، همان‌طورکه پیش‌بینی می‌شد، مقدار مقاومت بحرانی را برای همهٔ آزمودنی‌ها بالاتر از صفر برآورد کردند (۱۶).

در هر دوی این پژوهش‌ها مقاومت بحرانی به‌عنوان جایگزینی برای توان بحرانی در نظر گرفته شده است. بر اساس تعریف فیزیکی کار (ژول) به‌صورت حاصل‌ضرب نیروی واردشده در میزان جابه‌جایی شیء توسط آن نیرو و توان (وات) به‌صورت آهنگ انجام کار تعریف می‌شود. افزون‌بر این نیرو (نیوتن) حاصل‌ضرب میزان وزنه در شتاب است (۱۷). بنابراین اگر میزان وزنهٔ مشخصی در زمان مشخص و در میزان مسافت مشخص جابه‌جا شود، متعاقباً میزان کار و میزان توان مشخصی تولید خواهد شد که به‌صورت 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 حاصل‌ضرب جرم (m) در شتاب جاذبه (g)، کار (W) برابر با حاصل‌ضرب نیروی واردشده در میزان جابه‌جایی انجام‌گرفته توسط آن نیرو (d) و توان تولیدی (P) برابر با حاصل تقسیم کار انجام‌گرفته به واحد زمان (t) باشد، هنگام جابه‌جا کردن یک وزنهٔ 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 محاسبهٔ 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، به‌دلیل محدود شدن توانایی تولید توان آنی و عملکرد انقباضی، استفاده نشده است.

با بررسی پیشینه، تاکنون مطالعه‌ای مفهوم توان بحرانی را به‌عنوان تابعی از مقاومت بحرانی در تمرینات مقاومتی با محاسبهٔ مسافت طی‌شده وزنه بررسی نکرده است. بنابراین هدف تحقیق حاضر تعمیم مفهوم توان بحرانی به‌عنوان تابعی از مقاومت بحرانی به تمرین مقاومتی بر اساس الگوی خطی و هذلولی توان بحرانی در حرکت اسکوات در زنان با سابقهٔ تمرین مقاومتی است.

روش پژوهش

نمونه‌های پژوهش: هفت نفر از آمودنی‌های زن با سابقهٔ تمرین مقاومتی (سن ۱/۱۵±۲۰/۱۱ سال، وزن ۴/۴۷±۶۰ کیلوگرم، قد ۴/۴۲±۱۶۳/۱۶سانتی‌متر و شاخص تودهٔ بدن ۰/۹۳±۶/ ۱۹ کیلوگرم بر مترمربع) برای این تحقیق داوطلب شدند. همهٔ افراد سه بار در هفته و دست‌کم یک سال پیش از شروع جمع‌آوری اطلاعات آزمون سابقهٔ تمرین مقاومتی داشتند و حرکت اسکوات را دست‌کم یک‌بار در طول ماه گذشته انجام داده بودند. آزمودنی‌های با هرگونه سابقهٔ بیماری‌های ریوی، قلبی-عروقی، سوخت‌وسازی و عضلانی-اسکلتی از تحقیق خارج شدند. پیش از شروع تحقیق همهٔ آزمودنی‌ها از تمامی خطرهای احتمالی آزمون مطلع شدند و رضایت‌نامهٔ کتبی مبنی بر شرکت داوطلبانه در آزمون را امضا کردند. همچنین روند مطالعه توسط کمیتهٔ اخلاق دانشگاه شهید بهشتی تأیید شد (کد اخلاق: IR.SBU.REC.1398.050).

روش اجرای پژوهش: این تحقیق شامل یک جلسهٔ آشنایی با شرایط آزمون، یک جلسه حضور در سالن بدنسازی باشگاه دانشکدهٔ علوم ورزشی دانشگاه شهید بهشتی و شش جلسه حضور در آزمایشگاه فیزیولوژی این دانشکده بود. همهٔ جلسات با فاصلهٔ زمانی دست‌کم ۲۴ ساعت برگزار شدند. در جلسهٔ آشنایی در سالن بدنسازی همهٔ شرایط و ضوابط آزمون شامل نحوهٔ صحیح اجرای حرکت اسکوات، روند اجرای حرکت، گرم کردن و ... به آزمودنی‌ها توضیح داده شد. جلسهٔ اول در سالن بدنسازی شامل اجرای آزمون یک تکرار بیشینه (1RM) به روش برزسکی و شش جلسهٔ بعدی شامل اجرای حرکت اسکوات تا واماندگی، در میزان وزنه‌های گوناگون به‌صورت تصادفی بر اساس 1RM اندازه‌گیری‌شده از آزمودنی‌ها بود.

یک تکرار بیشینه: آزمون یک تکرار بیشینه برای تعیین میزان مقاومت‌ها در جلسات بعدی آزمون بر اساس توانایی خود افراد اجرا شد. آزمودنی‌ها پیش از شروع آزمون گرم کردن استاندارد شامل پنج دقیقه دوچرخه‌سواری و ۱۵ تکرار با مقاومت ۱۰ تکرار بیشینهٔ تقریبی خودشان اجرا کردند. در همهٔ جلسات از هالتر استاندارد ۱۲ کیلوگرمی استفاده شد. برای برآورد یک تکرار بیشینه به روش Brzycki مقدار وزنه‌ای انتخاب شد که آزمودنی‌ها بتوانند آن را کمتر از ۱۰ بار بلند کنند و مقدار 1RM با استفاده از فرمول برزسکی برآورد شد (۱۶). هالتر بر پایین‌ترین بخش گردن و روی عضلهٔ دلتوئید خلفی قرار گرفت. فاصلهٔ بین پاها تقریباً برابر با عرض شانه و پنجهٔ پاها کمی متمایل به خارج بود. یک تکرار قابل

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 به‌صورت تصادفی با فاصلهٔ 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. به‌عبارت دیگر درصدی از یک تکرار بیشینه برای هر آزمودنی انتخاب شد که بتواند در بازهٔ زمانی مشخص‌شده حرکت را تکرار کند (۱۸). همهٔ وهله‌های فعالیت توسط آزمودنی‌ها تا وقوع واماندگی کامل اجرا شدند و آهنگ حرکت اسکوات در همهٔ تکرارها به میزان ۱/۳ ثانیه در مرحلهٔ درون‌گرا و ۱/۳ ثانیه در مرحلهٔ برون‌گرا بود. پیش از شروع هر وهله آزمودنی‌ها گرم کردن استاندارد مشابه آنچه در جلسهٔ آزمون یک تکرار بیشینه توصیف شد را اجرا کردند. برای اندازه‌گیری مسافت طی‌شده توسط هالتر کل حرکت با دوربین فیلم‌برداری ضبط شد و مسافت طی‌شده با استفاده از نرم‌افزار تحلیل حرکت Kinova 0.8.15 برآورد شد. افزون‌بر 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×t+AWC) و هذلولی (t=(AWC÷(P+CP))-k) برآورد شد. W (kg.m) (کل کار انجام‌گرفته) برابر با حاصل‌ضرب d (m) (کل مسافت طی‌شده با هالتر که با استفاده از نرم‌افزار تحلیل حرکت محاسبه شد) در m (kg) (کل وزنهٔ جابه‌جاشده شامل وزن هالتر به‌همراه وزنه‌های متصل به آن، از تبدیل جرم به نیرو به‌وسیلهٔ ضرب میزان وزنه در شتاب $g=۹٫۸۱ m/s^2$ به‌دلیل تأثیر خنثی در محاسبات نهایی صرف‌نظر شده است) و P (watt) حاصل‌ضرب W در t (s) (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 بر اساس الگوی خطی توان بحرانی در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد. همان‌طورکه توضیح داده شد P=W÷t و W=m×d است. با جایگزینی W در فرمول توان P=(m×d)÷t مقدار مقاومت بحرانی می‌تواند بر اساس فرمول CR=(CP)÷(d÷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×actual t + AWC و در نهایت مقدار مسافت و تعداد تکرارهای تا واماندگی با استفاده‌های از فرمول‌های زیر برآورد می‌شود:

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

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

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 بر اساس الگو هذلولی توان بحرانی برآورد شد (۱۹). مقدار CR، P، d و n بر اساس روش محاسباتی توضیح داده‌شده در بخش قبل و با استفاده از فرمول‌های زیر برآورد شد:

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

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

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

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

تحلیل آماری: نتایج با استفاده از میانگین و انحراف معیار به‌صورت خلاصه بیان شدند. همهٔ 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

(IBM SPSS Inc, Chicago, IL, USA ;23.0) انجام گرفت و به‌منظور 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. همهٔ عملیات آماری در سطح آلفای کمتر از ۰/۰۵ بررسی شد.

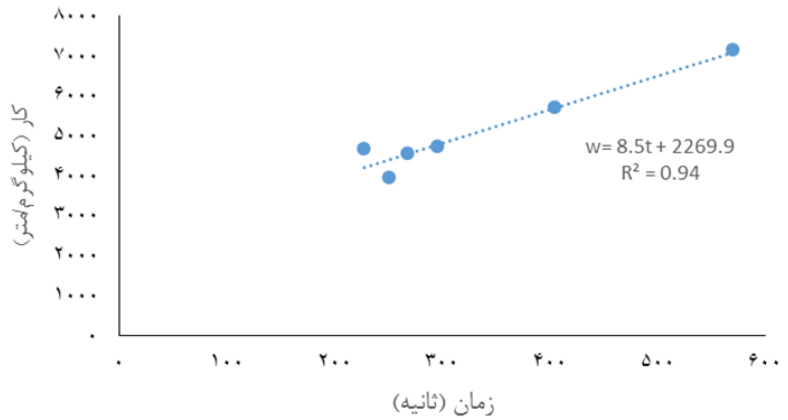
نتایج

عملکرد آزمودنی‌ها در حرکت اسکوات: میانگین و انحراف استاندارد یک تکرار بیشینهٔ همهٔ آزمودنی‌ها برابر با ۸/۶۵ ± ۶۸/۱۳ کیلوگرم بود. خلاصه‌ای از عملکرد آزمودنی‌ها در حرکت اسکوات در جدول ۱ شامل میانگین و انحراف استاندارد مقدار مقاومت‌ها، مسافت طی‌شده توسط هالتر، کل زمان سپری‌شده، تعداد تکرارهای تا واماندگی و درصد 1RM که آزمودنی‌ها در آن به فعالیت پرداخته‌اند، آورده شده است.

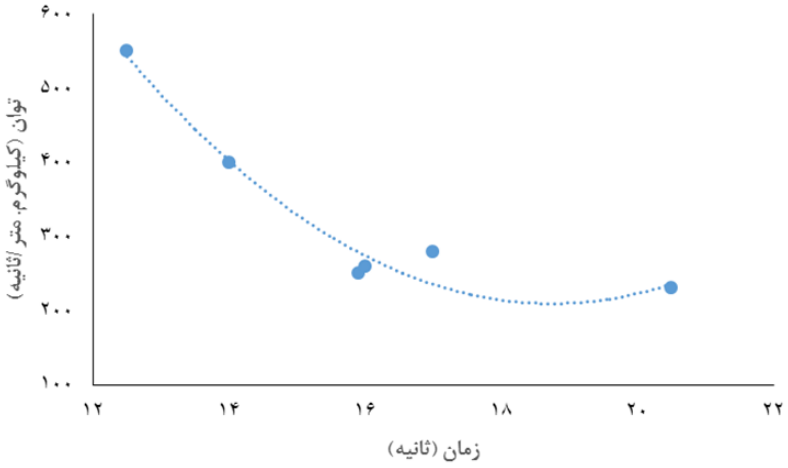
جدول ۱. عملکرد آزمودنی‌ها در حرکت اسکوات

وزنه (kg)	مسافت پیموده‌شده (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

برآورد مقاومت بحرانی و پیش‌بینی تکرارهای تا واماندگی با استفاده از الگوی خطی و هذلولی توان بحرانی: شکل‌های ۱ و ۲ نشان‌دهندهٔ نمونه‌ای از رگرسیون خطی و هذلولی الگوسازی توان بحرانی براساس رسم به‌ترتیب مقادیر کل کار انجام‌گرفته و کل توان تولیدشده در مقابل کل زمان سپری‌شده هستند.



شکل ۱. الگوسازی خطی توان بحرانی



شکل ۲. الگوسازی هذلولی توان بحرانی

همچنین اطلاعات استخراج‌شده از این نمودارها در جدول ۲ نشان داده شده است.

تفاوت معناداری برای یک تکرار بیشینه حرکت اسکوات به‌وسیلهٔ الگوی هذلولی با روش برزسکی مشاهده نشد (P =۰/۸۴، t =۰/۲۱۰). هر دو الگوی خطی و هذلولی قابلیت بالایی در پیش‌بینی تعداد تکرار تا واماندگی حرکت اسکوات دارند (جدول ۲). یک تکرار بیشینه با استفاده از الگوی خطی قابل محاسبه نبود.

جدول ۲. پیش‌بینی یک تکرار بیشینه به‌وسیلهٔ الگوسازی خطی و هذلولی توان بحرانی

	معادله	توان بحرانی	ظرفیت انجام کار بی‌هوازی (kg.m)	مقاومت بحرانی (kg)	یک تکرار بیشینه واقعی (kg)	یک تکرار بیشینه پیش‌بینی‌شده (kg)	R۲
الگوسازی خطی	W = (۸٫۴۷ × t) + ۲۲۶۹٫۹	۸٫۴۷	۲۲۶۹٫۹	۱۲٫۴۴	۶۸٫۴	غیرقابل محاسبه*	۰٫۹۴
الگوسازی هذلولی	t = (۱۰۶۴۴٫۹÷(P + ۰٫۱۲)) - ۳۹۱۲	۰٫۱۲	۱۰۶۴۴٫۹	۰٫۱۸	۶۸٫۴	۶۴٫۵۴	۰٫۸۳

***: غیرقابل محاسبه**

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر اولین تحقیقی بود که در آن کاربرد توان بحرانی به‌عنوان تابعی از مقاومت بحرانی در تمرین‌های مقاومتی بررسی می‌شد. در این تحقیق مقدار توان بحرانی استفاده از هر دو الگوی خطی و هذلولی برآورد شد که برای همهٔ آزمودنی‌ها (به‌غیر از یک مورد در الگوی خطی) مقدار R^2 در دامنهٔ ۰/۹۷-۰/۸۳ قرار داشت که همسو با تحقیقات قبلی در زمینهٔ اعتبار این الگو در ورزش‌های گوناگون بود (۱۶،۲۰). همچنین مقدار توان و مقاومت بحرانی برآوردی بر اساس الگوی هذلولی توان بحرانی برای همهٔ آزمودنی‌ها نزدیک به صفر برآورد شد که مجدداً همسو با نتایج تحقیق مورتون و همکاران بود. معادله‌ای که در تحقیق مورتون و همکاران (۱۳) به‌منظور 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 (#.min-1) جابه‌جا می‌کند. کار و توان تولیدشده در این حالت در هر دقیقه به‌ترتیب برابر با W=m.g.d.c و P=m.d.g.c/60 خواهد بود.

به‌دلیل ثابت بودن مقدار g، مقدار d (برابر با طول بازوی هر فرد در حرکت پرس سینه) و مقدار c، توان تولیدی به‌طور مستقیم متناسب با میزان وزنهٔ جابه‌جاشده (m) است.

اگر آزمودنی تعداد n تکرار را تا واماندگی در آهنگ c اجرا کند، کل زمان تا واماندگی در هر وهله فعالیت برابر با t(s)=60n/c خواهد بود. همچنین به‌دلیل ثابت بودن c می‌توان نتیجه گرفت t به‌طور مستقیم با n رابطه دارد.

بر اساس مفروضات بالا می‌توان در معادلهٔ توان بحرانی t=((AWC)÷(P-CP))+k متغیرهای m و n را به‌ترتیب جانشین متغیرهای P و t کرد که در این حالت معادلهٔ n=((ARC)÷(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 جابه‌جاشده (برای نمونه در شنا، دویدن، دوچرخه‌سواری و قایقرانی) است (۲۱). همچنین حتی با فرض اینکه کل مسافت پیموده‌شده توسط هالتر برابر با حاصل‌ضرب مقدار d به‌عنوان طول بازو در مقدار n به‌عنوان تعداد تکرارهای تا واماندگی باشد، نمی‌توان مقدار d را در همهٔ تکرارها به‌ویژه در زمان خستگی یکسان در نظر گرفت. با استناد به همین توضیح مقدار c نیز در کل زمان فعالیت در هر وهله نمی‌تواند مقدار ثابتی باشد. در مرحلهٔ بعدی حتی اگر P و t به‌ترتیب فقط به m و n بستگی داشته باشند، جایگزین کردن مستقیم آن‌ها در معادله به لحاظ فیزیکی صحیح نیست. مورتون از معادلهٔ بالا برای پیش‌بینی مقدار تکرارهای تا واماندگی استفاده کرد که با در نظر گرفتن واحد متغیرها انتظار می‌رود حاصل کسر، متغیر مسافت (d) باشد (۱۳).

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

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 حاصل‌ضرب میزان مسافت پیموده شده در میزان وزنه جابه‌جاشده) در مقابل میزان مسافت پیموده‌شده بود. در این الگو مقدار مقاومت بحرانی از معادلهٔ W(kg.m)=CR(kg).d(m)+ARC(kg.m) برآورد شد که از نظر فیزیکی همهٔ 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 همان‌طورکه ذکر شد، واحدها با یکدیگر همخوانی ندارند. افزون‌بر این در هر دوی این تحقیقات میزان وزنه در حدود ۵۰-۸۰ درصد مقدار 1RM 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 حوزهٔ توان بحرانی و به‌کارگیری این مفهوم در دامنهٔ وسیع فعالیت‌های انسان و گونه‌های گوناگون دیگر مورد بحث است، اجرای فعالیت در شدت دقیقاً برابر با توان بحرانی به‌عنوان مرز متمایزکنندهٔ 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 پایهٔ تفسیر نادرست از مفهوم اولیهٔ 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-توان خروجی یک عدد ملموس بر حسب وات است، قدری غیرمنطقی به‌نظر می‌رسد اگر این مقدار مطلق در نظر گرفته شود. همهٔ روش‌های استاندارد و پذیرفته‌شده در برآورد توان بحرانی با مقداری خطا همراهند که خوشبختانه مقدار خطا در این پژوهش‌ها قابل برآورد است (برای نمونه خطای استاندارد یا بازهٔ اطمینان ۹۵ درصد). همچنین اندکی تفاوت در میزان زمان تا واماندگی و توان بحرانی برآوردی از رابطهٔ زمان-توان در افراد ثابت در روزهای گوناگون وجود دارد (۶). بنابراین بهتر است به‌جای نسبت دادن مقدار مطلق و واحدی به CP، یک بازهٔ عددی (۵-۳٪±) در نظر گرفته شود.

رویکرد دیگر در این تحقیق کیفیت پیش‌بینی مقدار 1RM بر اساس این الگوها بود که همان‌طورکه 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. درحالی‌که الگوی هذلولی در این تحقیق توانست مقدار نزدیک‌تری به 1RM 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 زمینهٔ تعمیم مفهوم توان بحرانی به‌عنوان تابعی از مقاومت بحرانی به تمرین مقاومتی با استفاده از مقدار مسافت پیموده‌شده 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 1RM بسیار بهتر بود.

تشکر و قدردانی

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

حامی/ حامیان مالی

برای مقالهٔ حاضر حامی مالی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

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

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی برای نویسندگان وجود ندارد.

منابع

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~ m~ a~ 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 VO2max 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.
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, Ñancupil-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.