Journal of Sport and Exercise Physiology
2026, 19(1): 22-35

Orginal Article

Effects of caffeine consumption following an exhaustive exercise protocol on amplitude of EMG activity muscle electrical activity during Sargent jump: An investigation of exercise performance using the muscle electrical activity approach

Seyedeh Zeinab Parandak[1], Ali Hemmati Afif[1], Amirhossein Hormati Oughoulbaig[2*]

[1] Department of Sport Sciences, Faculty of Social Sciences, Qazvin International University, Qazvin, Iran
[2] Department of Sports Physiology, Faculty of Educational Sciences and Psychology, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

Abstract

Background and Purpose: Exhaustive exercise induces fatigue that can compromise muscular performance, particularly in explosive movements such as the Sargent jump, which requires maximal power output. Caffeine, widely recognized as an ergogenic aid, may mitigate fatigue-related declines in neuromuscular function. This study aimed to evaluate the effect of caffeine consumption following exhaustive exercise on the amplitude of electromyographic (EMG) activity of lower limb muscles during the Sargent jump in male students, hypothesizing that caffeine would enhance muscle activation post-fatigue.

Materials and Methods: This randomized, double-blind, placebo-controlled trial was conducted on 30 healthy male students aged 19–25 years, who were randomly allocated to an experimental group (n=15) and a control group (n=15). Both groups performed an exhaustive exercise protocol, consisting of high-intensity aerobic cycling until volitional exhaustion, designed to induce significant neuromuscular fatigue. Immediately after exercise, the experimental group received 6 mg of caffeine per kilogram of body weight, while the control group received placebo (a tasteless, caffeine-free solution). Electromyographic activity was recorded from eight lower limb muscles (medial gastrocnemius, rectus femoris, biceps femoris, semitendinosus, semimembranosus, vastus medialis, vastus lateralis, and gluteus maximus) during the Sargent jump in two phases: pre-test (before the exhaustive exercise) and post-test (30 minutes after caffeine/placebo administration). EMG signals were captured using surface electrodes, normalized to maximum voluntary contraction, and analyzed for amplitude changes. Data were analyzed by using two-way repeated-measures ANOVA.

Results: Statistical analysis revealed a significant time effect on the amplitude of EMG activity of the medial gastrocnemius during the Sargent jump (p=0.039), with post-test amplitudes significantly lower than pre-test values, indicating fatigue-induced reductions. A significant group effect was observed for the

* Corresponding Author's E-mail: amirhosseinhormati@uma.ac.ir
https://doi.org/10.48308/joeppa.2025.240723.1380
Received: 17/07/2025 Revised: 13/08/2025 Accepted: 16/08/2025

Copyright: © 2026 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/).

rectus femoris (p=0.013) and biceps femoris (p=0.041), where the caffeine group exhibited significantly higher post-test amplitudes of EMG compared to the placebo group. No significant differences were observed for the other muscles, suggesting selective effects of caffeine on specific muscle groups.

Conclusion: Caffeine consumption post-exhaustive exercise significantly enhances the amplitude of EMG activity for the rectus femoris and biceps femoris during the Sargent jump, likely due to its stimulatory effects on the central nervous system and reduction of neuromuscular fatigue. These findings highlight caffeine's potential as an ergogenic aid for improving explosive power performance in fatigued states. Future research should investigate optimal caffeine dosages, timing of administration, and its effects across different exercise modalities.

Keywords: Electromyography, Muscle fatigue, Rehabilitation, Performance-Enhancing Substances

How to cite this article: Parandak, S. Z., Hemmati Afif, A., Hormati Oughoulbaig, A. Effects of caffeine consumption following an exhaustive exercise protocol on amplitude of EMG activity muscle electrical activity during Sargent jump: An investigation of exercise performance using the muscle electrical activity approach. J Sport Exerc Physiol. 2026;19(1):22-35.

نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی
۱۴۰۵، دوره ۱۹، شماره ۱، صفحه‌های ۲۲-۳۵

مقاله پژوهشی

تاثیر مصرف کافئین پس از فعالیت وامانده ساز بر دامنه EMG حین پرش سارجنت: بررسی عملکرد ورزشی با رویکرد فعالیت الکتریکی عضله

سیده زینب پرندک[۱]، علی همتی عفیف[۱]، امیرحسین حرمتی اوغول بیگ[۲*]

[۱] گروه علوم ورزشی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه بین‌المللی قزوین، قزوین، ایران
[۲] گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکدهٔ علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

زمینه و هدف: خستگی ناشی از فعالیت‌های ورزشی وامانده‌ساز می‌تواند عملکرد عضلانی و توانایی اجرای حرکات انفجاری مانند پرش را تحت تأثیر قرار دهد. کافئین به‌منزلهٔ یک مکمل ارگوژنیک (نیروزا) شناخته شده است که شاید بر عملکرد عضلانی پس از خستگی اثر مثبت داشته باشد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر دریافت کافئین پس از خستگی وامانده‌ساز بر دامنهٔ فعالیت الکتریکی عضلات اندام تحتانی طی اجرای پرش سارجنت در دانشجویان پسر بود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش کارآزمایی تصادفی دوسوکور و کنترل‌شده با دارونما، ۳۰ دانشجوی پسر سالم ۱۹ تا ۲۵ سال به‌صورت تصادفی به دو گروه آزمایش (۱۵ نفر) و کنترل (۱۵ نفر) تقسیم شدند. هر دو گروه یک وهله فعالیت هوازی شدید وامانده‌ساز یکسان تا رسیدن به آستانهٔ خستگی انجام دادند و پس از فعالیت وامانده‌ساز، گروه آزمایش به ازای هر کیلوگرم وزن بدن شش میلی‌گرم کافئین دریافت کرد، درحالی‌که گروه کنترل دارونما (محلول بدون کافئین) دریافت کرد. فعالیت الکتریکی (الکترومیوگرافی) هشت ماهیچهٔ اصلی اندام تحتانی شامل عضلات دوقلوی داخلی، راست رانی، دوسر رانی، نیم‌وتری، نیم‌غشایی، پهن داخلی، پهن خارجی و سرینی بزرگ در دو مرحله (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) طی اجرای پرش سارجنت اندازه‌گیری شد. داده‌ها با استفاده از آزمون تحلیل واریانس دوطرفه با اندازه‌گیری مکرر و نرم‌افزار SPSS نسخهٔ ۲۴ تحلیل شدند.

نتایج: نتایج تحلیل داده‌ها نشان داد که اثر عامل زمان بر دامنهٔ فعالیت الکتریکی ماهیچهٔ دوقلوی داخلی هنگام پرش سارجنت معنادار بود (P=۰/۰۳۹، d=۰/۲۵۸). میانگین داده‌ها حاکی از کاهش معنادار دامنهٔ فعالیت الکتریکی ماهیچهٔ دوقلوی داخلی در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون بود. همچنین اثر عامل گروه بر دامنهٔ فعالیت الکتریکی ماهیچهٔ راست رانی (P=۰/۰۱۳، d=۰/۴۸۳) و ماهیچهٔ دوسر رانی (P=۰/۰۴۱، d=۰/۳۷۴) اختلاف معناداری را نشان داد. در این دو عضله، دامنهٔ فعالیت الکتریکی در گروه آزمایش (دریافت‌کنندهٔ کافئین) به‌طور معناداری بیشتر از گروه کنترل بود. سایر عضلات مورد بررسی تفاوت معناداری بین گروه‌ها یا در طول زمان نشان ندادند.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که دریافت کافئین پس از یک جلسه فعالیت وامانده‌ساز می‌تواند دامنهٔ فعالیت الکتریکی عضلات راست رانی و دوسر رانی را طی اجرای پرش سارجنت به‌طور معناداری بهبود بخشد. این اثر شاید به‌دلیل تأثیر کافئین بر کاهش خستگی عصبی-عضلانی و افزایش تحریک‌پذیری عضلانی است. بنابراین، کافئین می‌تواند به‌عنوان مکمل مؤثری برای بهبود عملکرد حرکات انفجاری‌توانی پس از خستگی در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: الکترومایوگرافی، خستگی عضلانی، توانبخشی، داروهای نیروزا

* رایانامه نویسنده مسئول: amirhosseinhormati@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

نحوه استناد به این مقاله: پرندک، س ز، همتی عفیف، ع، حرمتی اوغول بیگ، ا. تاثیر مصرف کافئین پس از فعالیت وامانده ساز بر دامنه EMG حین پرش سارجنت: بررسی عملکرد ورزشی با رویکرد فعالیت الکتریکی عضله. نشریهٔ فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی. ۱۴۰۵؛۱۹(۱):۲۲-۳۵.

مقدمه

فعالیت‌های انفجاری-توانی مانند پرش عمودی، دوی سرعت و وزنه‌برداری، به‌دلیل نیاز به تولید سریع انرژی در بازه‌های زمانی کوتاه، وابستگی زیادی به دستگاه‌های انرژی غیرهوازی دارند. در این فعالیت‌ها، دستگاه فسفاژن و گلیکولیز به‌عنوان منابع اصلی بازسازی ATP عمل می‌کنند (۱، ۲). با این همه، خستگی وامانده‌ساز که ناشی از کاهش ذخایر فسفاژن و انباشت متابولیت‌هایی مانند یون‌های هیدروژن است، می‌تواند عملکرد عضلانی را محدود کند (۲، ۳). این خستگی سبب کاهش دامنه و بسامد نشانک‌های (فرکانس سیگنال‌های) الکترومایوگرافی (EMG) می‌شود (۴)، که نشان‌دهندهٔ افت توانایی عضلات در حفظ تولید نیروی انفجاری است، افت نشانک‌های الکترومیوگرافی به این معناست که فرد از آستانهٔ خستگی عبور کرده و وارد مرحلهٔ خستگی وامانده‌ساز شده است (۴، ۵). کاهش دامنه و بسامد EMG در طول تولید نیروی انفجاری نشان‌دهندهٔ کاهش در فعال‌سازی عضلانی و کاهش توانایی تولید و حفظ نیرو است. این کاهش اغلب با خستگی همراه است، جایی که عضلات برای جذب و حفظ واحدهای حرکتی تلاش می‌کنند که به کاهش دامنه و بسامد نشانک EMG منجر می‌شود (۴، ۵).

کافئین به‌عنوان یک مکمل ارگوژنیک (نیروزا) مطرح، با تحریک دستگاه عصبی مرکزی و افزایش تحریک‌پذیری نورون‌ها، می‌تواند نقش مهمی در کاهش آثار خستگی ایفا کند (۶). این ماده از طریق تقویت بازده عصبی-عضلانی و بهبود انتقال نشانک‌ها در عضلات، می‌تواند دامنهٔ فعالیت الکتریکی عضلانی را افزایش دهد (۷). همچنین یافته‌های پیشین نشان داده‌اند که کافئین در فعالیت‌های انفجاری-توانی، از جمله پرش عمودی و دوی سرعت، عملکرد ورزشکاران را بهبود می‌بخشد (۸، ۹). کافئین با مهار گیرنده‌های آدنوزین (A1/A2A)، تحریک‌پذیری عصبی را افزایش و احساس خستگی را کاهش می‌دهد. همچنین با تقویت آزادسازی کلسیم از رتیکولوم سارکوپلاسمی (از طریق گیرنده‌های ریانودین)، انقباض عضلات سریع‌انقباض (نوع II) مانند راست رانی و دوسر رانی را بهبود می‌بخشد. این سازوکارها به افزایش دامنهٔ فعالیت الکتریکی (EMG) و بهبود عملکرد انفجاری پس از خستگی منجر می‌شود (۱۰). پرش سارجنت به‌دلیل حساسیت بالا به خستگی عصبی-عضلانی و درگیری همزمان عضلات چهارسر، همسترینگ و ساق پا به‌عنوان معیار عملکرد انتخاب شد. این حرکت به دستگاه فسفاژن وابسته است که سریع‌تر تحت تأثیر خستگی قرار می‌گیرد و امکان ارزیابی دقیق تأثیرات کافئین بر عملکرد انفجاری را فراهم می‌کند (۱۱). همچنین استاندارد بودن روش اجرا و قابلیت ثبت همزمان شاخص‌های EMG و توان مکانیکی، آن را به الگوی بهینه و دلخواه برای این پژوهش تبدیل کرده است.

با توجه به اهمیت حفظ عملکرد انفجاری-توانی در ورزشکاران حرفه‌ای، شناخت راهکارهای مؤثر برای مقابله با خستگی و افزایش کارایی عضلانی ضروری است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مربیان و ورزشکاران در بهینه‌سازی دریافت کافئین در تمرین و مسابقات کاربردی باشد. این پژوهش با تحلیل دقیق فعالیت الکتریکی هشت ماهیچهٔ اندام تحتانی طی اجرای پرش سارجنت، دانش و دیدگاه تازه‌ای را دربارهٔ تأثیرات کافئین بر عملکرد عضلانی و انفجاری ارائه می‌دهد و زمینه‌ساز درک بهتر از سازوکارهای عصبی-عضلانی مرتبط با خستگی و توانبخشی آن خواهد بود. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر دریافت کافئین پس از خستگی وامانده‌ساز بر دامنهٔ فعالیت الکتریکی عضلات اندام تحتانی طی پرش

سارجنت در دانشجویان پسر بود.

روش پژوهش

نمونه‌های پژوهش: این پژوهش از نوع نیمه‌تجربی با طرح پیش‌آزمون–پس‌آزمون با گروه کنترل بود. جامعهٔ آماری پژوهش شامل دانشجویان پسر سالم و فعال ۱۹ تا ۲۵ سال بود. به‌منظور تعیین حجم نمونه مورد نیاز، از نرم‌افزار G*Power نسخهٔ ۳/۱ استفاده شد. تحلیل توان آماری به‌صورت پیشینی و در خانوادهٔ آزمون‌های آماری F برای آزمون تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر صورت گرفت. متغیرهای ورودی شامل سطح خطای نوع اول $\alpha = ۰/۰۵$، خطای نوع دوم $\beta = ۰/۲$، معادل توان آماری ٪۸۰، و دو مرحلهٔ اندازه‌گیری (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) بود.

با فرض اندازهٔ اثر متوسط $f = ۰/۲۵$ که بر اساس پژوهش‌های مشابه گزارش شده بود و در نظر گرفتن دو گروه (آزمایش و کنترل)، حجم نمونهٔ کل مورد نیاز برای دستیابی به توان آماری ۸۰ درصد برابر با ۲۴ نفر محاسبه شد (۱۲ نفر در هر گروه). با این همه، برای افزایش دقت و کنترل ریزش نمونه، ۳۰ نفر به روش نمونه‌گیری هدفمند از بین دانشجویان تربیت بدنی که در شش ماه گذشته از دید فعالیت بدنی فعال بودند، انتخاب و به‌صورت تصادفی به دو گروه ۱۵ نفره تقسیم شدند.

شرکت‌کنندگان از سلامت عمومی برخوردار بودند و طی دورهٔ شش‌ماههٔ پیش از شرکت در پژوهش، هفته‌ای سه جلسه تمرین داشتند؛ هیچ‌گونه حساسیت به کافئین، بیماری‌های مزمن، اختلالات عصبی، آسیب‌های اندام تحتانی یا ستون فقرات، ناهنجاری‌های اسکلتی-حرکتی نداشتند؛ افزون بر این، هیچ‌یک از آن‌ها از مواد مؤثر بر عملکرد ورزشی (شامل داروها، مکمل‌ها، دخانیات، الکل و مواد مخدر) طی شش ماه پیش از پژوهش دریافت نکرده بودند. معیارهای خروج شامل دریافت کافئین در ۲۴ ساعت پیش از آزمون، خستگی شدید ناشی از فعالیت ورزشی در ۴۸ ساعت گذشته و انصراف از ادامهٔ همکاری بود.

داده‌های سلامت عمومی و پیشینهٔ پزشکی شرکت‌کنندگان با استفاده از پرسشنامهٔ استاندارد ACSM (10) گردآوری شد. معیار استعمال دخانیات به این صورت تعریف شد که فرد هنگام شرکت در پژوهش یا دورهٔ شش ماه پیش از آن، به مدت دست‌کم سه ماه پیاپی، روزانه سیگار مصرف کرده باشد.

روش اجرای پژوهش: در مرحلهٔ اول، جلسهٔ آشنایی با فرایند پژوهش و ارزیابی اولیهٔ تن‌سنجی برگزار شد. آزمودنی‌ها ابتدا به مدت ۲۰ دقیقه گرم کردن عمومی و اختصاصی شامل حرکات کششی دینامیک و پیاده‌روی سبک انجام دادند.

سپس در مرحلهٔ پیش‌آزمون، فعالیت الکتریکی عضلات برگزیدهٔ اندام تحتانی (دوقلو، نعلی، نازک‌نی طویل، درشت‌نی قدامی، پهن داخلی، پهن خارجی، راست‌رانی و سرینی میانی) با استفاده از دستگاه الکترومایوگرافی هشت‌کاناله هنگام اجرای پرش سارجنت ثبت شد. هر آزمودنی سه پرش انجام داد و میانگین آن به‌عنوان ارزیابی اولیه ثبت شد. در ادامه، آزمودنی‌ها آزمون بروس را تا سر حد واماندگی روی نوار گردان اجرا کردند. معیار خستگی، رسیدن به ضربان قلب بیشینه بر اساس فرمول کارونن (سن - ۲۲۰) (۱۱) و رسیدن به سطح خستگی ≤ ۱۸ در مقیاس بورگ (RPE) بود (۱۲).

بلافاصله پس از آزمون بروس، به گروه آزمایش مکمل کافئین با دوز شش میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن داده شد. گروه کنترل دارونما دریافت کردند. پس از ۳۰ دقیقه، آزمون‌های الکترومایوگرافی

و پرش سارجنت مجدداً اجرا شد. این بازهٔ زمانی بر اساس یافته‌های پژوهش‌های پیشین (۱۲-۱۴) که اوج اثر کافئین را بین ۴۵–۶۰ دقیقه پس از دریافت گزارش کرده‌اند، تنظیم شده بود. پس‌آزمون نیز عیناً مانند پیش‌آزمون اجرا شد.

روش‌های آزمایشگاهی: الف) تن‌سنجی و ارزیابی ترکیب بدن: قد و وزن با دستگاه وزن‌سنج و قدسنج دیجیتال سکا (ساخت آلمان) اندازه‌گیری شد. نمایهٔ تودهٔ بدن[1] (BMI) از طریق فرمول وزن (کیلوگرم) بر قد به توان دو (متر مربع) محاسبه شد. درصد چربی بدن با استفاده از کالیپر دستی Slim Guide و بر اساس فرمول سه‌نقطه‌ای جکسون–پولاک (نقاط: سه سر بازویی، سینه‌ای و تحت‌کتفی) اندازه‌گیری شد. بر این اساس، تودهٔ چربی و تودهٔ بدون چربی نیز محاسبه شد (۱۰)؛ ب) ثبت فعالیت الکتریکی عضلات (الکترومایوگرافی با فعالیت الکتریکی هشت ماهیچهٔ اندام تحتانی با استفاده از دستگاه الکترومایوگرافی هشت‌کانالهٔ بایومتریک (Biometrics Ltd, UK) با الکترودهای سطحی دوقطبی ثبت شد. محل قرارگیری الکترودها بر پایهٔ روش استاندارد SENIAM(۱۳) انتخاب شد. فاصلهٔ مرکز تا مرکز الکترودها برابر با دو سانتی‌متر بود و سطح تماس ضدحساسیت داشت. نشانک‌های خام با بسامد نمونه‌برداری ۱۰۰۰ هرتز ثبت شدند. فیلتر بالاگذر ۲۰ هرتز، فیلتر پایین‌گذر ۵۰۰ هرتز و ناچ فیلتر ۶۰ هرتز برای حذف نویز برق شهری استفاده شد. برای هنجارسازی داده‌ها، از روش هنجارسازی دینامیکی درصدMVC) استفاده شد که یکی از معتبرترین روش‌ها در تحلیل حرکات انتقالی عضلات است (۱۴)؛ ج) اجرای آزمون بروس با آزمون بروس شامل هفت مرحلهٔ سه‌دقیقه‌ای با افزایش تدریجی سرعت و شیب تردمیل بود. مرحلهٔ اول: ۲/۷ km/h با شیب ۱۰ درصد؛ مرحلهٔ دوم: ۴ km/h با شیب ۱۲ درصد؛ مرحلهٔ سوم: ۵/۵ km/h با شیب ۱۴ درصد؛ مرحلهٔ چهارم: ۶/۸ km/h با شیب ۱۶ درصد؛ مرحلهٔ پنجم: ۸ km/h با شیب ۱۸ درصد؛ مرحلهٔ ششم: ۸/۹ km/h با شیب ۲۰ درصد؛ مرحلهٔ هفتم: ۹/۶ km/h با شیب ۲۲ درصد. آزمون تا رسیدن به واماندگی یا ظهور علائم غیرطبیعی متوقف می‌شد. پس از پایان آزمون، مرحلهٔ سرد کردن شامل پیاده‌روی آرام و حرکات کششی ایستا به مدت پنج دقیقه انجام شد؛ د) آزمون پرش سارجنت: برای سنجش توان انفجاری عضلات پایین‌تنه، از آزمون پرش سارجنت استفاده شد (۱۷). ارتفاع پایه با ثبت بیشینهٔ دسترسی در حالت ایستاده مشخص شد. سپس شرکت‌کننده با بیشینهٔ توان پرش عمودی انجام داد و بالاترین نقطهٔ تماس ثبت شد. اختلاف این دو ارتفاع به‌عنوان ارتفاع پرش در نظر گرفته شد. آزمون سه بار تکرار و بهترین مقدار ثبت شد.

تحلیل آماری: ابتدا داده‌های جمعیت‌شناختی و ویژگی‌های پایه (سن، جنس، قد، وزن، نمایهٔ تودهٔ بدنی و درصد چربی بدن) برای دو گروه تجزیه‌وتحلیل شد. مقایسهٔ این داده‌ها بین گروه‌ها با استفاده از آزمون t مستقل برای متغیرهای پیوسته و آزمون کای-دو (Chi-Square) برای متغیرهای دسته‌ای انجام شد. توزیع هنجار داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. برای بررسی تغییرات فعالیت الکتریکی عضلات (متغیر وابسته) در سه زمان (پیش از فعالیت، ۱۰ دقیقه پس از فعالیت ورزشی و دریافت کافئین، ۵۰ دقیقه پس از فعالیت و دریافت کافئین و بین دو گروه آزمایشی (دریافت کافئین) و کنترل (دارونما)، از آزمون تحلیل واریانس دوسویه با اندازه‌های تکراری (Two-Way Repeated Measures ANOVA) استفاده شد. این آزمون تأثیرات اصلی عامل زمان و گروه و همچنین تعامل این دو عامل را تحلیل کرد. پیش‌فرض کرویت با

استفاده از آزمون ماچلی (Mauchly's Test of Sphericity) ارزیابی شد. در صورت نقض این پیش‌فرض، از اصلاحات گرین‌هاوس-گایزر برای اصلاح درجهٔ آزادی استفاده شد. در صورت مشاهدهٔ اثر معنادار در عامل زمان یا تعامل زمان و گروه، مقایسه‌های جفتی با استفاده از آزمون‌های مقایسه‌ای جفتی (pairwise comparisons) و آزمون تعقیبی بونفرونی انجام شد (برای کنترل خطای نوع اول، از تصحیح بونفرونی استفاده شد). نتایج به‌صورت میانگین ± انحراف معیار ارائه شد. مقدار p کمتر از ۰/۰۵ به‌عنوان سطح معناداری در نظر گرفته شد. تمام تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخهٔ ۲۴ انجام شد.

نتایج

ویژگی‌های پایهٔ شرکت‌کنندگان در دو گروه تجربی و کنترل در جدول ۱ گزارش شده است، نتایج نشان داد بین میانگین قد، وزن و سن آزمودنی‌های دو گروه از نظر آماری اختلاف معناداری وجود نداشت. همچنین وضعیت توزیع هنجار داده‌ها با آزمون شاپیروویلک بررسی شد و همهٔ داده‌ها از توزیع هنجار پیروی می‌کردند (P≤۰/۰۵).

جدول ۱. ویژگی‌های پایهٔ گروه‌های مورد بررسی

متغیر	تجربی	کنترل
سن (سال)	۲۳/۳ ± ۴/۴	۲۳/۸ ± ۴/۳
قد (سانتی‌متر)	۱۷۶/۲ ± ۷/۲	۱۷۷/۵ ± ۸/۲
وزن (کیلوگرم)	۷۲/۸ ± ۶/۵	۷۳/۸ ± ۶/۲

*سطح معناداری ≤ ۰/۰۵ در نظر گرفته شد * که نشان‌دهندهٔ تفاوت معنادار است.

یافته‌های مربوط به تغییرات دامنهٔ فعالیت الکتریکی در هشت ماهیچهٔ اندام تحتانی هنگام اجرای فعالیت توانی انفجاری پرش سارجنت در جدول ۲ نشان داده شده است. یافته‌ها بیانگر اثر معنادار و مستقل زمان تغییرات بر میانگین فعالیت الکتریکی ماهیچهٔ دوقلوی داخلی هنگام پرش سارجنت بود (P=۰/۰۳۹؛ d= ۰/۲۵۸). میانگین‌ها نشان داد به‌طور معناداری فعالیت الکتریکی این عضله پس از خستگی وامانده‌ساز کاهش یافته است. از طرفی، اثر مستقل گروه اختلاف معناداری برای دامنهٔ فعالیت الکتریکی عضلهٔ راست رانی طی مرحلهٔ پرش داشت (P=۰/۰۱۳؛ d=۰/۴۸۳). به‌طور دقیق‌تر میانگین داده‌ها نشان داد گروه تجربی افزایش معناداری را پس از خستگی در دامنهٔ فعالیت الکتریکی ماهیچهٔ راست رانی نسبت به تغییرات گروه کنترل داشت. همچنین برای اثر مستقل گروه، اختلاف معناداری در دامنهٔ فعالیت الکتریکی ماهیچهٔ دوسر رانی طی پرش گزارش شد (P=۰/۰۴۱؛ d= ۰/۳۷۴). طبق میانگین داده‌ها، دامنهٔ فعالیت الکتریکی در گروه تجربی نسبت به گروه کنترل به‌طور معناداری بیشتر بود که افزایش دامنهٔ الکتریکی عضله در پی دریافت کافئین دیده شد. اثر تعاملی زمان-گروه هیچ‌گونه تغییرات معناداری را در فعالیت الکتریکی هیچ‌یک از عضلات مورد بررسی نشان نداد (جدول ۱).

جدول ۲. مقایسهٔ مقادیر مؤلفه‌های دامنهٔ فعالیت الکتریکی عضلات اندام تحتانی هنگام پرش سارجنت در دو گروه تجربی و کنترل

حرکت	عضلات	گروه تجربی		گروه کنترل		سطح معناداری		
		پیش از خستگی (µV)	پس از خستگی (µV)	پیش از خستگی (µV)	پس از خستگی (µV)	اثر عامل زمان	اثر عامل گروه	اثر متقابل زمان*گروه
پرش	درشت‌نئی قدامی	± ۲۲/۸ ۸۹/۹	± ۲۲/۱ ۱۰۱/۵	± ۲۹/۳ ۹۱/۷	± ۴۸/۲ ۱۰۱/۳	(۰/۰۵۱) ۰/۲۳۷	(۰/۰۰۱) ۰/۹۱۷	(۰/۰۰۱) ۰/۹۴۲
	دوقلو	± ۵/۵۲ ۷۹/۶۱	± ۱۷/۶۳ ۹۶/۶۵	± ۱۱/۴۲ ۷۴/۳۴	± ۱۴/۱۵ ۷۳/۶۴	(۰/۲۵۸) *۰/۰۳۹	۰/۷۳۵(۰/۰۷۳)	(۰/۲۶۱) ۰/۱۶۷
	پهن خارجی	± ۱۳/۷۹ ۶۵/۶۲	± ۱۷/۲۲ ۸۰/۹۳	± ۸/۲۳ ۷۱/۱۰	± ۹/۷۰ ۷۸/۲۶	۰/۲۳۶(۰/۳۴۴)	۰/۱۵۶(۰/۲۷۸)	۰/۳۴۶(۰/۱۸۳)
	پهن داخلی	± ۱۷/۴۸ ۸۹/۸۰	± ۱۱/۶۳ ۸۷/۴۲	± ۱۶/۲۹ ۹۱/۰۹	± ۱۷/۰۷ ۸۴/۵۱	(۰/۱۷۴) ۰/۵۸۹	(۰/۱۸۵) ۰/۳۳۷	۰/۵۸۸(۰/۱۳۰)
	راست رانی	± ۹/۲۴ ۵۷/۵۶	± ۹/۶۵ ۶۶/۸۳	± ۱۱/۲۵ ۷۷/۸۰	± ۱۷/۵۴ ۷۶/۱۵	(۰/۰۹۴) ۰/۲۱۷	(۰/۴۸۳) * ۰/۰۱۳	(۰/۰۶۹) ۰/۷۶۰
	دوسر رانی	± ۳۳/۲۳ ۹۳/۲۳	± ۳۳/۲۱ ۱۰۵/۰۲	± ۱۴/۶۶ ۸۱/۴۸	± ۱۲/۶۴ ۸۱/۱۶	۰/۷۶۵(۰/۰۰۵)	(۰/۳۷۴) *۰/۰۴۱	۰/۵۲۳(۰/۱۲۴)
	نیم وتری	± ۲۵/۰۱ ۷۵/۷۷	± ۳۴/۳۸ ۹۴/۲۶	± ۲۲/۲۴ ۷۷/۱۵	± ۹/۴۸ ۸۰/۵۹	۰/۱۴۸(۰/۱۲۵)	(۰/۱۲۳) ۰/۵۴۰	(۰/۰۹۴) ۰/۶۴۵
	سرینی میانی	± ۱۱/۷۴ ۶۴/۱۲	± ۱۹/۹۸ ۵۶/۳۲	± ۱۴/۲۴ ۶۵/۸۱	± ۱۷/۸۲ ۶۸/۱۰	(۰/۰۰۷) ۰/۴۲۵	(۰/۳۰۴) ۰/۱۲۰	(۰/۰۷۸) ۰/۷۲۰
فرود	نئی درشت قدامی	± ۱۰/۰۹ ۸۸/۰۲	± ۲۲/۰۰ ۸۶/۹۸	± ۱۲/۶۹ ۹۳/۷۴	± ۱۰/۲۴ ۹۶/۸۷	(۰/۱۲۳) ۰/۱۵۰	(۰/۲۱۸) ۰/۲۶۷	(۰/۱۸۲) ۰/۳۴۶
	دوقلو	± ۱۳/۸۲ ۹۸/۵۵	± ۳۳/۲۸ ۹۸/۵۷	± ۱۵/۸۳ ۱۱۲/۲۹	± ۲۵/۴۱ ۱۰۶/۸۲	(۰/۰۱۹) ۰/۵۸۴	(۰/۱۸۴) ۰/۳۳۹	(۰/۰۱۹) ۰/۹۲۱
	پهن خارجی	± ۸/۶۷ ۷۴/۷۴	± ۱۹/۰۳ ۷۸/۷۲	± ۲۸/۹۵ ۸۹/۷۱	± ۱۶/۸۷ ۸۶/۴۷	(۰/۰۴۴) ۰/۴۰۵	(۰/۱۰۷) ۰/۶۱۱	(۰/۰۴۴) ۰/۷۸۹
	پهن داخلی	± ۱۱/۳۳ ۷۴/۵۳	± ۱۹/۹۴ ۹۰/۴۰	± ۳۱/۹۱ ۸۷/۱۸	± ۱۸/۰۱ ۸۶/۴۷	(۰/۰۶۸) ۰/۲۴۹	(۰/۱۷۵) ۰/۳۴۶	(۰/۰۸۲) ۰/۶۹۹
	راست رانی	± ۱۵/۴۵ ۸۰/۳۳	± ۲۴/۹۲ ۹۱/۹۹	± ۴۰/۶۲ ۹۶/۵۴	± ۲۴/۴۰ ۸۳/۸۳	(۰/۰۲۰) ۰/۵۴۶	(۰/۲۰۶) ۰/۲۶۴	(۰/۱۰۹) ۰/۵۳۹
	دوسر رانی	± ۳۸/۳۴ ۱۱۱/۹۷	± ۲۵/۴۹ ۹۸/۵۶	± ۲۸/۹۴ ۱۱۲/۱۲	± ۳۰/۵۷ ۱۰۲/۶۰	(۰/۱۸۱) ۰/۰۸۱	(۰/۰۲۶) ۰/۹۳۲	(۰/۱۲۴) ۰/۵۳۵
	نیم وتری	± ۱۰/۱۳ ۱۰۸/۳۳	± ۱۴/۶۴ ۹۲/۰۸	± ۵۱/۱۸ ۱۱۱/۳۰	± ۱۷/۶۱ ۹۶/۰۸	(۰/۱۷۳) ۰/۰۸۶	(۰/۰۹۳) ۰/۶۴۸	(۰/۰۶۹) ۰/۷۶۰
	سرینی میانی	± ۱۶/۸۹ ۶۸/۶۱	± ۱۱/۶۲ ۸۲/۹۳	± ۲۶/۰۷ ۱۰۰/۶۴	± ۱۴/۱۹ ۸۵/۲۸	(۰/۰۰۸) ۰/۷۳۲	(۰/۳۶۱) ۰/۰۶۵	(۰/۳۱۲) ۰/۱۰۴

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از اندازه‌گیری (EMG)، تلاش شد تا تأثیر دریافت کافئین بر عملکرد ورزشی در شرایط خستگی شدید ارزیابی شود. بر اساس یافته‌های پژوهش‌های پیشین دریافت کافئین می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد ورزشی، به‌ویژه در فعالیت‌های استقامتی و توانبخشی عضلانی، ایفا کند (۱۵، ۱۶). با این همه، تأثیر کافئین بر فعالیت‌های انفجاری‌توانی پس از خستگی وامانده‌ساز کمتر بررسی شده است.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که کافئین، پس از یک دوره خستگی وامانده‌ساز، به افزایش در دامنه فعالیت الکتریکی عضلات راست رانی و دوسر رانی منجر شد که اختلاف معناداری را بین گروه تجربی و گروه کنترل نشان داد. این افزایش در دامنهٔ فعالیت الکتریکی عضلات می‌تواند به بهبود عملکرد انفجاری-توانی در عملکرد ورزشکاران پس از خستگی وامانده‌ساز مؤثر باشد. این در حالی بود که فعالیت الکتریکی ماهیچهٔ دوقلوی داخلی تحت تأثیر دریافت کافئین قرار نگرفت و کاهش معناداری را در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون پس از اعمال فعالیت وامانده‌ساز نشان داد. سایر عضلات مورد بررسی هیچ‌گونه تغییر معناداری را چه پس از دریافت کافئین در گروه تجربی و چه ناشی از فعالیت ورزشی وامانده‌ساز نشان نداد.

در این زمینه، یافته‌های این پژوهش با یافته‌های سان جان و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر اثر چشمگیر دریافت کافئین بر نشانگرهای خستگی، فعالیت بی‌هوازی و کارایی عصبی-عضلانی ورزشکاران همسوست (۱۴). هرچند تأثیر مستقیمی بر EMG مشاهده نشد. همچنین فرانکو و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی گزارش کردند که دریافت کافئین حتی در شرایط کاهش فعالیت قشر حرکتی مغز نیز موجب افزایش عملکرد استقامتی می‌شود (۱۲). در مقابل، یافته‌های برخی از پژوهش‌های پیشین هیچ‌گونه تغییراتی را در قدرت و فعالیت الکتریکی عضلات گزارش نکردند (۱۷، ۱۸). این اختلاف‌ها شاید به نوع عضلات، ویژگی‌های تارهای عضلانی و شرایط آزمون و دوز و زمان دریافت کافئین وابسته باشد.

برای تحلیل تفاوت‌ها و تناقضات دربارهٔ پاسخ عضلات مختلف به دریافت کافئین، باید به چند عامل کلیدی توجه کرد؛ تفاوت در درصد تارهای عضلانی تند یا کندانقباض بین عضلات راست رانی و دوسر رانی با ماهیچهٔ دوقلو و همچنین با توجه به درصد و نوع تارهای عضلانی تفاوت در وابستگی به دستگاه‌های انرژی بین عضلات می‌تواند عوامل تأثیرگذاری در نوع پاسخ عضلات مختلف به کافئین پس از یک جلسه تمرین وامانده‌ساز باشد. به‌طوری‌که طبق نتایج پژوهش‌های انجام‌گرفته ماهیچهٔ راست رانی و دوسررانی دارای درصد بالایی از تارهای تندانقباض یا نوع II هستند که برای تولید نیرو در فعالیت‌های شدید و کوتاه‌مدت کارامدترند (۱۹). به‌عبارت دیگر، درصد تارهای نوع I در ماهیچهٔ دوقلوی بالاتر از ۵۰، در راست رانی و دوسر رانی کمتر از ۵۰ است (۱۹). تارهای تندانقباض یا نوع II وابستگی زیادی به سوخت‌وساز بی‌هوازی (فسفاژن و گلیکولیز) دارند و به‌دلیل مصرف سریع ATP^{2}، به‌سرعت دچار خستگی می‌شوند. کافئین از طریق بهبود آزادسازی کلسیم از رتیکولوم سارکوپلاسمی و افزایش برانگیختگی عصبی می‌تواند ظرفیت انقباضی و فعالیت الکتریکی این تارهای عضلانی را بهبود بخشد (۱۰، ۲۰). این مسئله می‌تواند توجیه‌کنندهٔ افزایش دامنهٔ فعالیت الکتریکی عضلات ذکرشده در این پژوهش باشد.

با توجه به اینکه ماهیچهٔ دوقلوی داخلی دارای درصد بالاتری از تارهای کندانقباض است و این تارهای عضلانی بیشتر بر سوخت‌وساز هوازی تکیه دارند و به‌دلیل ظرفیت بالای میتوکندری و سوخت‌وساز پایدارتر، نسبت به خستگی مقاوم‌ترند (۲۱). یافته‌های

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که کافئین می‌تواند از طریق تأثیر بر دستگاه عصبی مرکزی، تحریک‌پذیری نورون‌های حرکتی را افزایش دهد و در نتیجه فعالیت الکتریکی عضلاتی مانند راست رانی و دوسر رانی را که به‌ترتیب توسط اعصاب فمورال (رانی) و سیاتیک عصب‌دهی می‌شوند، تقویت کند. با توجه به نقش این عضلات در حرکات انفجاری و توان بالا در مفصل ران و زانو تأثیرات تحریکی کافئین بر اعصابی دیده می‌شد که این عضلات را عصب‌دهی می‌کنند. در این زمینه یافته‌های والتون و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که دریافت کافئین به مقدار شش میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن به افزایش ۴۳ درصدی در تحریک‌پذیری نخاعی انجامید که از طریق افزایش دامنهٔ بازتاب هافمن اندازه‌گیری شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کافئین می‌تواند تحریک‌پذیری نورون‌های حرکتی αرا افزایش دهد که به نوبهٔ خود می‌تواند فعالیت عضلات تحت عصب‌دهی این نورون‌ها را تقویت کند (۲۳). ماهیچهٔ دوقلو توسط عصب تیبیال (درشت نئی) برگرفته از شاخه‌های عصب سیاتیک، عصب‌دهی می‌شود. این عضله نقش مهمی در حرکات پایدار و تعادلی مانند حفظ وضعیت بدن و راه رفتن دارد. به‌دلیل ویژگی‌های تارهای آن و الگوی فعالیتش، تأثیرات تحریکی کافئین بر آن شاید کمتر باشد.

روی‌هم‌رفته، گمان می‌رود کافئین نقش مؤثری در بازیابی توان عضلانی و بهبود عملکرد ورزشی از طریق چندین سازوکار فیزیولوژیکی و عصبی-عضلانی ایفا می‌کند. دریافت کافئین می‌تواند احساس خستگی را کاهش دهد و موجب افزایش تمرکز ذهنی و انگیزش ورزشکاران شود (۱۳، ۲۴). این امر می‌تواند با تأثیر بر دستگاه عصبی مرکز توضیح داده شود، چراکه کافئین به‌عنوان یک آنتاگونیست (یا مهارکننده) گیرنده‌های آدنوزین عمل می‌کند و با مهار تأثیرات آدنوزین، به کاهش احساس خستگی و افزایش برانگیختگی عصبی منجر می‌شود. این امر به افزایش میزان فراخوانی واحدهای حرکتی، بهبود همزمانی فعال‌سازی تارهای عضلانی و در نتیجه افزایش خروجی توان عضلانی می‌انجامد. به‌عبارت دیگر، کافئین با کاهش اثر مهاری آدنوزین بر نورون‌های حرکتی، میزان فعالیت سیناپسی را افزایش می‌دهد و به بهبود عملکرد در فعالیت‌های با شدت بالا کمک می‌کند (۱۳، ۲۴).

در فعالیت وامانده‌ساز اجراشده در این پژوهش که به‌علت شدت بالای فعالیت دستگاه گلیکولیتیک سهم زیادی در تأمین انرژی دارد که به تولید مقادیر بالای لاکتات و یون‌های H^+ می‌انجامد. تجمع این یون‌ها سبب کاهش pH عضله (اسیدوز متابولیک یا سوخت‌وسازی) و کاهش توان عضلانی، مهار عملکرد آنزیم‌های تولیدکنندهٔ انرژی و در نهایت ایجاد خستگی و افت عملکرد شدید منجر می‌شود (۲۵، ۲۶). کافئین می‌تواند از چند طریق به کاهش آثار منفی این وضعیت کمک کند. برای نمونه کافئین می‌تواند دستگاه‌های بافری مانند بی‌کربنات را تحریک کند که این امر به خروج سریع‌تر H^+ از عضلات و در نتیجه حفظ pH در دامنهٔ مناسب کمک می‌کند (۲۷، ۲۸). در نتیجه، دریافت کافئین می‌تواند به کاهش میزان تجمع یون‌های H^+ پس از یک فعالیت وامانده‌ساز منجر شود و به بازیابی pH عضله کمک کند که این موضوع می‌تواند دلیل بهبود عملکرد در تکرارهای بعدی فعالیت‌های انفجاری-توانی مانند پرش سارجنت باشد (۲۹).

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که دریافت کافئین پس از یک دوره خستگی وامانده‌ساز می‌تواند عملکرد انفجاری-توانی را با افزایش دامنهٔ فعالیت الکتریکی عضلات راست رانی و دوسر رانی بهبود بخشد. درحالی‌که ماهیچهٔ دوقلوی داخلی به‌دلیل ساختار متفاوت تارهای عضلانی و نقش آن در تعادل و پایداری، پاسخ کمتری به کافئین نشان داده است.

به همین دلیل، دریافت کافئین می‌تواند به‌عنوان راهکار مؤثری برای ورزشکارانی که درگیر فعالیت‌های پرشدت و کوتاه‌مدت هستند، توصیه شود. البته حساسیت‌های فردی و دوز بهینهٔ مصرف باید مورد توجه قرار گیرد. پژوهش‌های آتی می‌توانند تأثیرات بلندمدت کافئین و تفاوت‌های فردی در پاسخ به آن را بررسی کنند.

تشکر و قدردانی

از همهٔ کسانی که ما را در اجرای این پژوهش یاری رساندند، نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مالی برخوردار نبوده است.

مشارکت نویسندگان

همهٔ نویسندگان به یک اندازه در این پژوهش مشارکت داشتند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ تعارض منافعی را گزارش نکردند.

پی‌نوشت‌ها

[1] Body mass index

[۲] آدنوزین تری فسفات

منابع

1. Sahlin, K., Muscle energetics during explosive activities and potential effects of nutrition and training. Sports medicine, 2014. 44(Suppl 2): p. 167–173. https://doi.org/10.1007/s40279-014-0256-9

2. McArdle, W.D., F.I. Katch, and V.L. Katch, Essentials of exercise physiology. 2006: Lippincott Williams & Wilkins.

3. Di Domenico, F. and G. Raiola, Effects of training fatigue on performance. 2021. https://doi.org/10.14198/jhse.2021.16.Proc2.63

4. Buckthorpe, M., M.T. Pain, and J.P. Folland, Central fatigue contributes to the greater reductions in explosive than maximal strength with high-intensity fatigue. Experimental Physiology, 2014. 99(7): p. 964–973. https://doi.org/10.1113/expphysiol.2013.075614

5. Galen, S.S., et al., Determining the electromyographic fatigue threshold following a single visit exercise test. Journal of visualized experiments: JoVE, 2015(101): p. 52729. https://doi:10.3791/52729

6. Goldstein, E.R., et al., International society of sports nutrition position stand: caffeine and performance. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2010. 7: p. 1–15. https://doi.org/10.1186/1550-2783-7-5

7. Mesquita, R.N., et al., Effects of caffeine on neuromuscular function in a non-fatigued state and during fatiguing exercise. Experimental Physiology, 2020. 105(4): p. 690–706. https://doi.org/10.1113/EP088265

8. Lazić, A., et al., Acute effects of caffeine on overall performance in basketball players—A systematic review. Nutrients, 2022. 14(9): p. 1930. https://doi.org/10.3390/nu14091930

9. Matsumura, T., et al., Acute effect of caffeine supplementation on 100-m sprint running performance: A field test. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2022. 55(3): p. 525. https://doi: 10.1249/MSS.0000000000003057

10. Reggiani, C., Caffeine as a tool to investigate sarcoplasmic reticulum and intracellular calcium dynamics in human skeletal muscles. Journal of muscle research and cell motility, 2021. 42(2): p. 281–289. https://doi.org/10.1007/s10974-020-09574-7

11. Harman, E.A., et al., Estimation of human power output from vertical jump. The Journal of Strength & Conditioning Research, 1991. 5(3): p. 116–120. https://doi.org/10.1519/00124278-199108000-00002

12. Franco-Alvarenga, P.E., et al., Caffeine increased muscle endurance performance despite reduced cortical activation and unchanged neuromuscular efficiency and corticomuscular coherence. Nutrients, 2019. 11(10): p. 2471. https://doi.org/10.3390/nu11102471

13. Guest, N.S., et al., International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2021. 18(1): p. 1. https://doi.org/10.1186/s12970-020-00383-4

14. San Juan, A.F., et al., Caffeine supplementation improves anaerobic performance and neuromuscular efficiency and fatigue in olympic-level boxers. Nutrients, 2019. 11(9): p. 2120. https://doi.org/10.3390/nu11092120

15. Ganio, M.S., et al., Effect of caffeine on sport-specific endurance performance: a systematic review. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2009. 23(1): p. 315–324. https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e31818b979a

16. Szerej, K., et al., The role of caffeine in enhancing physical performance: from metabolism to muscle function. Journal of Education, Health and Sport, 2024. 59: p. 158–165. https://doi.org/10.12775/jehs.2024.59.010

17. Astorino, T.A., R.L. Rohmann, and K. Firth, Effect of caffeine ingestion on one-repetition maximum muscular strength. European journal of applied physiology, 2008. 102(2): p. 127–132. https://doi.org/10.1007/s00421-007-0557-x

18. Trevino, M.A., et al., Acute effects of caffeine on strength and muscle activation of the elbow flexors. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2015. 29(2): p. 513–520. https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000000625

19. Jennekens, F., B. Tomlinson, and J. Walton, Data on the distribution of fibre types in five human limb muscles An autopsy study. Journal of the neurological sciences, 1971. 14(3): p. 245–257. https://doi.org/10.1016/0022-510x(71)90215-2

20. Domaszewski, P., et al., Caffeine-induced effects on human skeletal muscle contraction time and maximal displacement measured by tensiomyography. Nutrients, 2021. 13(3): p. 815. https://doi.org/10.3390/nu13030815

21. Westerblad, H., J.D. Bruton, and A. Katz, Skeletal muscle: energy metabolism, fiber types, fatigue and adaptability. Experimental cell research, 2010. 316(18): p. 3093–3099. https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2010.05.019

22. Tallis, J., M.J. Duncan, and R.S. James, What can isolated skeletal muscle experiments tell us about the effects of

caffeine on exercise performance? British journal of pharmacology, 2015. 172(15): p. 3703–3713. https://doi.org/10.1111/bph.13187

23. Walton, C., J. Kalmar, and E. Cafarelli, Caffeine increases spinal excitability in humans. Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine, 2003. 28(3): p. 359–364. https://doi.org/10.1002/mus.10457

24. Mielgo-Ayuso, J., et al., Caffeine supplementation and physical performance, muscle damage and perception of fatigue in soccer players: A systematic review. Nutrients, 2019. 11(2): p. 440. https://doi.org/10.3390/nu11020440

25. Nelson, C.R. and R.H. Fitts, Effects of low cell pH and elevated inorganic phosphate on the pCa-force relationship in single muscle fibers at near-physiological temperatures. American Journal of Physiology-Cell Physiology, 2014. 306(7): p. C670–C678. https://doi.org/10.1152/ajpcell.00347.2013

26. Hargreaves, M. and L.L. Spriet, Skeletal muscle energy metabolism during exercise. Nature metabolism, 2020. 2(9): p. 817–828. https://doi.org/10.1038/s42255-020-0251-4

27. Higgins, M.F., et al., Evaluating the effects of caffeine and sodium bicarbonate, ingested individually or in combination, and a taste-matched placebo on high-intensity cycling capacity in healthy males. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 2016. 41(4): p. 354–361. https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0371

28. Christensen, P.M., et al., Caffeine, but not bicarbonate, improves 6 min maximal performance in elite rowers. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 2014. 39(9): p. 1058–1063. https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0577

29. Barcelos, R.P., et al., Caffeine effects on systemic metabolism, oxidative-inflammatory pathways, and exercise performance. Nutrition research, 2020. 80: p. 1–17. https://doi.org/10.1016/j.nutres.2020.05.005