

The Effect of Simultaneous Intervention of Interval Aerobic Training and Mealworm Extract on the Expression of CHOP and BIP Genes and Oxidative Stress Markers MDA and SOD in Liver Tissue of Rats with Non-alcoholic Fatty Liver Disease

Seydeh Zeinab Parandak¹ , Ali Hemmati Afif¹ , 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, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Abstract

Background and Purpose: Exhaustive exercise induces fatigue that can compromise muscle 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 electromyographic (EMG) activity amplitude of lower limb muscles during the Sargent jump in male students, hypothesizing that caffeine would enhance muscle activation post-fatigue.

Materials and Methods: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial was conducted with 30 healthy male students aged 19–25 years, randomly allocated to an experimental group (n=15) and a control group (n=15). Both groups underwent an identical exhaustive exercise protocol, consisting of high-intensity aerobic cycling until volitional exhaustion, designed to induce significant neuromuscular fatigue. Post-exercise, the experimental group received 6 mg of caffeine per kilogram of body weight, while the control group received a 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 (after caffeine/placebo administration). EMG signals were captured using surface electrodes, normalized to maximum voluntary contraction, and analyzed for amplitude changes. Data were processed using two-way repeated-measures ANOVA in SPSS version 24, with a significance threshold of 0.05.

Results: Statistical analysis revealed a significant time effect on the EMG activity amplitude of the medial gastrocnemius during the Sargent jump ($P=0.039$, $d=0.258$), with post-test amplitudes significantly lower than pre-test values, indicating fatigue-induced reductions. A significant group effect was observed for the rectus femoris ($P=0.013$, $d=0.483$) and biceps femoris ($P=0.041$, $d=0.374$), where the caffeine group exhibited significantly higher EMG amplitudes compared to the placebo group in the post-test. No significant differences were noted for the other muscles, suggesting selective effects of caffeine on specific muscle groups.

Conclusion: Caffeine consumption post-exhaustive exercise significantly enhances the EMG activity amplitude of 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 varied exercise modalities to further elucidate its ergogenic benefits.

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

How to cite this article: Parandak, S. Z., Hemmati Afif, A., Hormati Oughoulbaig, A. The Effect of Caffeine on Enhancing Muscle Activity After Fatigue in Explosive Exercises: A Study on Sports Performance with an Electromyographic Approach. *J Sport Exerc Physiol.* 2026;19(1):1-?.

*Corresponding Author's E-mail: amirhosseinhormati@uma.ac.ir

<https://doi.org/10.48308/joeppa.2025.240723.1380>

نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی
۱۴۰۵، دوره ۱۹، شماره ۱، صفحه‌های ۹-۲

مقاله پژوهشی

تأثیر کافئین بر بهبود فعالیت عضلانی پس از خستگی در تمرینات انفجاری: بررسی عملکرد ورزشی با رویکرد فعالیت الکتریکی عضلانی

سیده زینب پرندهک^۱، علی همتی عقیف^۱، امیرحسین حرمتی اوغول بیگ*^۲

^۱گروه علوم ورزشی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه بین المللی قزوین، قزوین، ایران

^۲گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده 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 به‌عنوان یک مکمل ارگونومیک شناخته شده است که ممکن است بر عملکرد عضلانی پس از خستگی اثر مثبت داشته باشد. هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر مصرف کافئین پس از خستگی وامانده‌ساز بر دامنه فعالیت الکتریکی عضلات اندام تحتانی طی اجرای پرش سارجنت در دانشجویان پسر بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه کارآزمایی تصادفی دوسوکور و کنترل‌شده با دارونما، ۳۰ دانشجوی پسر سالم در بازه سنی ۱۹ تا ۲۵ سال به‌صورت تصادفی به دو گروه آزمایش (۱۵ نفر) و کنترل (۱۵ نفر) تقسیم شدند. هر دو گروه یک پروتکل فعالیت ورزشی وامانده‌ساز یکسان را اجرا کردند که شامل فعالیت هوازی شدید تا رسیدن به آستانه خستگی بود. پس از فعالیت وامانده‌ساز، گروه آزمایش به ازای هر کیلوگرم وزن بدن ۶ میلی‌گرم کافئین دریافت کرد، در حالی که گروه کنترل دارونما (محلول بدون کافئین) دریافت نمود. فعالیت الکتریکی (الکترومیوگرافی) هشت عضله 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 نسخه ۲۴ تحلیل شدند. سطح معنی‌داری ≥ 0.05 در نظر گرفته شد.

نتایج: نتایج تحلیل داده‌ها نشان داد که اثر عامل زمان بر دامنه فعالیت الکتریکی عضله دوقلوی داخلی در حین پرش سارجنت معنی‌دار بود ($d=0.258$, $P=0.039$). میانگین داده‌ها حاکی از کاهش معنی‌دار دامنه فعالیت الکتریکی عضله دوقلوی داخلی در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون بود. همچنین، اثر عامل گروه بر دامنه فعالیت الکتریکی عضله راست رانی ($d=0.483$, $P=0.13$) و عضله دوسر رانی ($d=0.374$, $P=0.041$) اختلاف معنی‌داری نشان داد. در این دو عضله، دامنه فعالیت الکتریکی در گروه آزمایش (دریافت‌کننده کافئین) به‌طور معنی‌داری بیشتر از گروه کنترل بود. سایر عضلات مورد بررسی تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها یا در طول زمان نشان ندادند.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مصرف کافئین پس از یک جلسه فعالیت وامانده‌ساز می‌تواند دامنه فعالیت الکتریکی عضلات راست رانی و دوسر رانی را طی اجرای پرش سارجنت به‌طور معنی‌داری بهبود بخشد. این اثر احتمالاً به دلیل تأثیر کافئین بر کاهش خستگی عصبی-عضلانی و افزایش تحریک‌پذیری عضلانی است. بنابراین، کافئین می‌تواند به‌عنوان یک مکمل مؤثر برای بهبود عملکرد حرکات انفجاری توانی پس از خستگی در نظر گرفته شود.

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

نحوه استناد به این مقاله: پرندک، سیده زینب، همتی عقیف، علی، حرمتی اوغول بیگ، امیرحسین. تأثیر کافئین بر بهبود فعالیت عضلانی پس از خستگی در تمرینات انفجاری: بررسی عملکرد ورزشی با رویکرد فعالیت الکتریکی عضلانی. نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی. نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی. ۱۴۰۵؛ ۱۹(۱): ۴-۴.

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

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

مقدمه

فعالیت‌های انفجاری-توانی مانند پرش عمودی، دوی سرعت و وزنه‌برداری، به دلیل نیاز به تولید سریع انرژی در بازه‌های زمانی کوتاه، وابستگی زیادی به سیستم‌های انرژی غیرهوازی دارند. در این فعالیت‌ها، سیستم فسفاژن و گلیکولیز به عنوان منابع اصلی بازسازی ATP عمل می‌کنند (۱، ۲). با این حال، 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 باعث کاهش دامنه و فرکانس سیگنال‌های الکترومایوگرافی (EMG) می‌شود (۴)، که نشان‌دهنده افت توانایی عضلات در حفظ تولید نیروی انفجاری است، افت سیگنال‌های الکترومایوگرافی به این معنی است که فرد از آستانه‌ی خستگی عبور کرده و وارد مرحله‌ی خستگی وامانده‌ساز شده است (۴، ۵). کاهش دامنه و فرکانس EMG در طول تولید نیروی انفجاری نشان‌دهنده کاهش در فعال‌سازی عضلات 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 منجر به کاهش دامنه و فرکانس سیگنال EMG می‌شود (۴، ۵).

کافئین به عنوان یک مکمل ارگوژنیک مطرح، با تحریک سیستم عصبی مرکزی و افزایش تحریک‌پذیری نورون‌ها، می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات خستگی ایفا کند (۶). این ماده از طریق تقویت بازده عصبی-عضلانی و بهبود انتقال سیگنال‌ها در عضلات، می‌تواند دامنه فعالیت الکتریکی عضلات را افزایش دهد (۷). همچنین، مطالعات 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 داده 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 مکانیسم‌ها منجر به افزایش دامنه فعالیت الکتریکی (EMG) و بهبود عملکرد انفجاری پس از خستگی می‌شود (۱۰). پرش سارجنت به دلیل حساسیت بالا به خستگی عصبی-عضلانی و درگیری همزمان عضلات چهارسر، همسترینگ و ساق پا به‌عنوان معیار عملکرد انتخاب شد. این حرکت وابسته به سیستم فسفاژن است که سریع‌تر تحت تأثیر خستگی قرار می‌گیرد و امکان ارزیابی دقیق اثرات کافئین بر عملکرد انفجاری را فراهم می‌کند (۱۱). همچنین، استاندارد بودن پروتکل اجرا و قابلیت ثبت همزمان پارامترهای EMG و توان مکانیکی، آن را به مدلی ایده‌آل برای این مطالعه تبدیل کرده است.

با توجه به اهمیت حفظ عملکرد انفجاری-توانی در ورزشکاران حرفه‌ای، شناخت راهکارهای مؤثر برای مقابله با خستگی و افزایش کارایی عضلات ضروری است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مربیان و ورزشکاران در بهینه‌سازی مصرف کافئین در تمرینات و مسابقات کاربردی باشد. این پژوهش با تحلیل دقیق فعالیت الکتریکی هشت عضله اندام تحتانی طی اجرای پرش سارجنت، اطلاعات جدیدی در مورد اثرات کافئین بر عملکرد عضلانی و انفجاری ارائه می‌دهد و زمینه‌ساز درک بهتر از مکانیسم‌های عصبی-عضلانی مرتبط با خستگی و توان‌بخشی آن خواهد بود. بنابراین هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر مصرف کافئین بعد از خستگی و آماده‌سازی بر دامنه فعالیت الکتریکی عضلات اندام تحتانی طی پرش سارجنت در دانشجویان پسر بود.

روش پژوهش

نمونه‌های پژوهش: این مطالعه از نوع نیمه‌تجربی با طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون با گروه کنترل بود. جامعه آماری پژوهش شامل دانشجویان پسر سالم و فعال در بازه سنی ۱۹ تا ۲۵ سال بود. به منظور تعیین حجم نمونه مورد نیاز، از نرم‌افزار G*Power نسخه ۳/۱ استفاده شد. تحلیل توان آماری به صورت پیشینی و در خانواده آزمون‌های آماری F برای آزمون آنالیز واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر صورت گرفت. متغیرهای ورودی شامل سطح خطای نوع اول $\alpha = 0/05$ ، خطای نوع دوم $\beta = 0/2$ ، معادل توان آماری ۸۰٪، و دو مرحله اندازه‌گیری (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) بودند.

با فرض اندازه اثر متوسط $f = 0/25$ که بر اساس مطالعات مشابه گزارش شده بود، و در نظر گرفتن دو گروه (آزمایش و کنترل)، حجم نمونه کل مورد نیاز برای دستیابی به توان آماری ۸۰٪ برابر با ۲۴ نفر محاسبه شد (۱۲ نفر در هر گروه). با این حال، برای افزایش دقت و کنترل ریزش نمونه، ۳۰ نفر به روش نمونه‌گیری هدفمند از بین دانشجویان تربیت بدنی دانشگاه ... که در ۶ ماه گذشته از نظر فعالیت بدنی فعال بودند انتخاب و به صورت تصادفی در دو گروه ۱۵ نفره تقسیم شدند.

شرکت‌کنندگان می‌بایست از سلامت عمومی برخوردار بوده، حداقل سه جلسه تمرین هفتگی در شش ماه گذشته داشته‌اند، فاقد هرگونه حساسیت به کافئین، بیماری‌های مزمن، اختلالات عصبی، آسیب‌های اندام تحتانی یا ستون فقرات، ناهنجاری‌های اسکلتی-حرکتی، و مصرف مواد مؤثر بر عملکرد ورزشی (شامل داروها، مکمل‌ها، دخانیات، الکل و مواد مخدر) باشند. معیارهای خروج شامل مصرف کافئین در ۲۴ ساعت قبل از آزمون، خستگی شدید ناشی از فعالیت ورزشی در ۴۸ ساعت گذشته، و انصراف از ادامه همکاری بود.

اطلاعات مربوط به سلامت عمومی و تاریخچه پزشکی شرکت‌کنندگان با استفاده از پرسشنامه استاندارد (10) ACSM گردآوری شد. معیار استعمال دخانیات به این صورت تعریف شد که فرد در حال حاضر یا در شش ماه گذشته، به مدت حداقل سه ماه متوالی، روزانه سیگار مصرف کرده باشد.

روش اجرای پژوهش: در مرحله اول، جلسه آشنایی با فرآیند پژوهش و ارزیابی اولیه تن‌سنجی برگزار شد. آزمودنی‌ها ابتدا به مدت ۲۰ دقیقه گرم‌کردن عمومی و اختصاصی شامل حرکات کششی دینامیک و پیاده‌روی سبک انجام دادند.

سپس در مرحله پیش‌آزمون، فعالیت الکتریکی عضلات منتخب اندام تحتانی (دوقلو، سولئوس، نازک‌نی طویل، درشت‌نی قدامی، پهن داخلی، پهن خارجی، راست‌رانی و سرینی میانی) با استفاده از دستگاه الکترومایوگرافی هشت‌کاناله در حین اجرای پرش سارجنت ثبت شد. هر آزمودنی سه پرش انجام داد و میانگین آن به عنوان ارزیابی اولیه ثبت شد. در ادامه، آزمودنی‌ها پروتکل بروس را تا سرحد واماندگی روی نوارگردان اجرا کردند. معیار خستگی، رسیدن به ضربان قلب حداکثر بر اساس فرمول کارونن (سن - ۲۲۰) (۱۱) و رسیدن به سطح خستگی ≤ 18 در مقیاس بورگ (RPE) بود (12).

بلافاصله پس از آزمون بروس، به گروه آزمایش مکمل کافئین با دوز ۶ 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 بازه زمانی بر اساس یافته‌های پژوهش‌های قبلی (۱۲-۱۴) که اوج اثر کافئین را بین ۴۵-۶۰ دقیقه پس از مصرف 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 (مدل Seca متعلق به کشور آلمان) اندازه‌گیری شد. شاخص توده بدن (BMI) از طریق فرمول وزن (کیلوگرم) بر قد به توان دو (متر مربع) محاسبه شد. درصد چربی بدن با استفاده از کالیپر دستی (مدل Skinfold Caliper که توسط شرکت سازنده Slim Guide تولید می‌شود) اندازه‌گیری شد. و بر اساس فرمول سه‌نقطه‌ای جکسون-پولاک (نقاط: سه سر بازویی، سینه‌ای و تحت‌کتفی) اندازه‌گیری شد. بر این اساس، توده چربی و توده بدون چربی نیز محاسبه گردید. (۱۰) ب) ثبت فعالیت الکتریکی عضلات (الکترومایوگرافی با فعالیت الکتریکی ۸ عضله اندام تحتانی با استفاده از دستگاه الکترومایوگرافی ۸ کاناله بیومتریک (Biometrics Ltd, UK) با الکترودهای سطحی دوقطبی ثبت شد. محل قرارگیری الکترودها مطابق پروتکل استاندارد (13) SENIAM انتخاب شد. فاصله مرکز تا مرکز الکترودها برابر با ۲ سانتی‌متر بود و سطح تماس ضد حساسیت داشت. سیگنال‌های خام با فرکانس 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 نرمال‌سازی داده‌ها، از روش نرمال‌سازی دینامیکی) درصد (MVC استفاده گردید که یکی از معتبرترین روش‌ها در تحلیل حرکات انتقالی عضلات است. (۱۴) ج) اجرای آزمون بروس با پروتکل بروس شامل ۷ مرحله سه‌دقیقه‌ای با افزایش تدریجی سرعت و شیب تردمیل بود. مرحله اول: ۲٫۷ km/h با شیب ۱٪؛ مرحله دوم: ۴ km/h با شیب ۱۲٪؛ مرحله سوم: ۵٫۵ km/h با شیب ۱۴٪؛ مرحله چهارم: ۶٫۸ km/h با شیب ۱۶٪؛ مرحله پنجم: ۸ km/h با شیب ۱۸٪؛ مرحله ششم: ۸٫۹ km/h با شیب ۲۰٪؛ مرحله هفتم: ۹٫۶ km/h با شیب ۲۲٪. آزمون تا رسیدن به واماندگی یا ظهور علائم غیرطبیعی متوقف می‌شد. پس از پایان آزمون، مرحله سرد کردن شامل پیاده‌روی آرام و حرکات کششی ایستا به مدت ۵ دقیقه انجام شد. (د) آزمون پرش سارجنت برای سنجش توان انفجاری عضلات پایین‌تنه، از آزمون پرش سارجنت استفاده شد (۱۷). ارتفاع پایه با ثبت حداکثر دست‌رسی در حالت ایستاده مشخص شد. سپس، شرکت‌کننده با حداکثر توان پرش عمودی انجام داد و بالاترین نقطه تماس ثبت شد. اختلاف این دو ارتفاع به‌عنوان ارتفاع پرش در نظر گرفته شد. آزمون سه بار تکرار شد و بهترین مقدار ثبت گردید.

تحلیل آماری: ابتدا داده‌های جمعیت‌شناختی و ویژگی‌های پایه (سن، جنس، قد، وزن، شاخص توده بدنی، و درصد چربی بدن) برای دو گروه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه 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 نرمال 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 مصرف کافئین، ۵۰ دقیقه پس از فعالیت و مصرف کافئین) و بین دو گروه آزمایشی (مصرف کافئین) و کنترل (دارونما)، از آزمون آنالیز واریانس دوسویه با اندازه‌های تکراری (Two-Way Repeated Measures ANOVA) استفاده شد. این آزمون اثرات 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 درجه آزادی استفاده شد. در صورت مشاهده اثر معنادار در عامل زمان یا تعامل زمان و گروه، مقایسه‌های جفتی با استفاده از آزمون‌های مقایسه‌ای جفتی (pairwise comparisons) با استفاده از آزمون تعقیبی بونفرونی انجام شد (برای کنترل خطای نوع اول، از

تصحیح بونفرونی استفاده شد). نتایج به صورت میانگین \pm انحراف معیار ارائه شد. مقدار p کمتر از ≥ 0.05 به عنوان سطح معنی داری در نظر گرفته شد. تمام تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۴ انجام شد.

نتایج

ویژگی‌های پایه شرکت‌کنندگان در دو گروه تجربی و کنترل در جدول ۱ گزارش شده است، نتایج بدست آمده نشان داد بین میانگین قد، وزن و سن آزمودنی‌های دو گروه از نظر آماری اختلاف معنی داری وجود نداشت. همچنین نرمال بودن داده‌های با آزمون شاپیروویلک مورد بررسی قرار گرفت و تمامی داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کردند ($P \leq 0.05$).

جدول ۱. ویژگی‌های پایه گروه‌های مورد مطالعه

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

*سطح معنی داری ≥ 0.05 در نظر گرفته شد * که نشان‌دهنده تفاوت معنی دار است.

یافته‌های مربوط به تغییرات دامنه فعالیت الکتریکی در هشت عضله اندام تحتانی حین اجرای فعالیت توانی انفجاری پرس سارجنت در جدول ۲ نشان داده شده است، یافته‌ها حاکی از آن بود که اثر مستقل زمان تغییرات معنی داری را در میانگین فعالیت الکتریکی عضله دوقلوی داخلی در حین پرس سارجنت نشان داد ($d=0.258$; $P=0.039$). میانگین‌ها نشان داد به طور معنی داری فعالیت الکتریکی این عضله بعد از خستگی و امانده‌ساز کاهش یافته است. از طرفی اثر مستقل گروه اختلاف معنی داری برای دامنه فعالیت الکتریکی عضله راست رانی طی مرحله پرس داشت ($d=0.483$; $P=0.013$). به طور دقیق‌تر میانگین داده‌ها نشان داد گروه تجربی افزایش معنی داری را بعد از خستگی در دامنه فعالیت الکتریکی عضله راست رانی نسبت به تغییرات گروه کنترل داشت. همچنین برای اثر مستقل گروه، اختلاف معنی داری در دامنه فعالیت الکتریکی عضله دوسر رانی طی پرس گزارش شد ($d=0.374$; $P=0.041$). طبق میانگین داده‌ها، دامنه فعالیت الکتریکی در گروه تجربی نسبت به گروه کنترل به طور معنی داری بیشتر بود که افزایش دامنه الکتریکی عضله به دنبال مصرف کافئین مشاهده شده است. اثر تعاملی زمان-گروه هیچ‌گونه تغییرات معنی داری را در فعالیت الکتریکی هیچ یک از عضلات مورد بررسی نشان نداد ($p < 0.05$). (جدول ۱).

جدول ۲. مقایسه مقادیر مؤلفه‌های دامنه فعالیت الکتریکی عضلات اندام تحتانی حین پرس سارجنت در دو گروه تجربی و کنترل

حرکت	عضلات	گروه تجربی	گروه کنترل	سطح معنی داری
	قبل خستگی	بعد خستگی	قبل خستگی	بعد خستگی
	اثر متقابل	اثر عامل گروه	اثر عامل زمان	اثر عامل گروه
				زمان* گروه

نقش کافئین در بهبود عملکرد عضلانی پس از خستگی

پرش	درشت	۸۹/۹ ± ۲۲/۸	± ۲۲/۱	۹۱/۷ ± ۲۹/۳	۱۰/۱/۳ ± ۴۸/۲	(۰/۰۵۱)	(۰/۰۰۰)	(۰/۰۰۰)
	نئی	۱۰/۱/۵				-۰/۲۳۷	-۰/۹۱۷	-۰/۹۴۲
	قدامی							
	دوقلو	± ۵/۵۲	± ۱۷/۶۳	± ۱۱/۴۲	± ۱۴/۱۵	(۰/۲۵۸)	-۰/۷۳۵(۰/۰۷۳)	(۰/۲۶۱)
		۷۹/۶۱	۹۶/۶۵	۷۴/۳۴	۷۳/۶۴	*۰/۰۳۹		-۰/۱۶۷
	پهن	± ۱۳/۷۹	± ۱۷/۲۲	± ۸/۲۳	۷۸/۲۶ ± ۹/۷۰			
	خارجی	۶۵/۶۲	۸۰/۹۳	۷۱/۱۰		-۰/۲۳۶(۰/۳۴۴)	-۰/۱۵۶(۰/۲۷۸)	-۰/۳۴۶(۰/۱۸۳)
	پهن	± ۱۷/۴۸	± ۱۱/۶۳	± ۱۶/۲۹	± ۱۷/۰۷	(۰/۱۷۴)	(۰/۱۸۵)	
	داخلی	۸۹/۸۰	۸۷/۴۲	۹۱/۰۹	۸۴/۵۱	-۰/۵۸۹	-۰/۳۳۷	-۰/۵۸۸(۰/۱۳۰)
	راست	± ۹/۲۴	۶۶/۸۳ ± ۹/۶۵	± ۱۱/۲۵	± ۱۷/۵۴	(۰/۰۹۴)	(۰/۴۸۳)	(۰/۰۶۹)
	رانی	۵۷/۵۶		۷۷/۸۰	۷۶/۱۵	-۰/۲۱۷	*۰/۰۱۳	-۰/۷۶۰
	دوسر	± ۳۳/۲۳	± ۳۳/۲۱	± ۱۴/۶۶	± ۱۲/۶۴	(۰/۳۷۴)		
	رانی	۹۳/۲۳	۱۰۵/۰۲	۸۱/۴۸	۸۱/۱۶	-۰/۷۶۵(۰/۰۰۵)	*۰/۰۴۱	-۰/۵۲۳(۰/۱۲۴)
	نیم	± ۲۵/۰۱	± ۳۴/۳۸	± ۲۲/۲۴	۸۰/۵۹ ± ۹/۴۸		(۰/۱۲۳)	(۰/۰۹۴)
	وتری	۷۵/۷۷	۹۴/۲۶	۷۷/۱۵		-۰/۱۴۸(۰/۱۲۵)	-۰/۵۴۰	-۰/۶۴۵
	سرینی	± ۱۱/۷۴	± ۱۹/۹۸	± ۱۴/۲۴	± ۱۷/۸۲	(۰/۰۰۷)	(۰/۳۰۴)	(۰/۰۷۸)
	میانی	۶۴/۱۲	۵۶/۳۲	۶۵/۸۱	۶۸/۱۰	-۰/۴۲۵	-۰/۱۲۰	-۰/۷۲۰
فرود	درشت	± ۱۰/۰۹	± ۲۶/۰۰	± ۱۲/۶۹	± ۱۰/۲۴	(۰/۱۲۳)	(۰/۲۱۸)	(۰/۱۸۲)
	نئی	۸۸/۰۲	۸۶/۹۸	۹۳/۷۴	۹۶/۸۷	-۰/۱۵۰	-۰/۲۶۷	-۰/۳۴۶
	قدامی							
	دوقلو	± ۱۳/۸۲	± ۳۳/۲۸	± ۱۵/۸۲	± ۲۵/۴۱	(۰/۰۱۹)	(۰/۱۸۴)	(۰/۰۱۹)
		۹۸/۵۵	۹۸/۵۷	۱۱۲/۲۹	۱۰۶/۸۲	-۰/۵۸۴	-۰/۳۳۹	-۰/۹۲۱
	پهن	± ۸/۶۷	± ۱۹/۰۳	± ۲۸/۹۵	± ۱۶/۸۷	(۰/۰۴۴)	(۰/۱۰۷)	(۰/۰۴۴)
	خارجی	۷۴/۷۴	۷۸/۷۲	۸۹/۷۱	۸۶/۴۷	-۰/۴۰۵	-۰/۶۱۱	-۰/۷۸۹
	پهن	± ۱۱/۳۳	± ۱۹/۹۴	± ۳۱/۹۱	± ۱۸/۰۱	(۰/۰۶۸)	(۰/۱۷۵)	(۰/۰۸۲)
	داخلی	۷۴/۵۳	۹۰/۴۰	۸۷/۱۸	۸۶/۴۷	-۰/۲۴۹	-۰/۳۴۶	-۰/۶۹۹
	راست	± ۱۵/۴۵	± ۲۴/۹۲	± ۴۰/۶۲	± ۲۴/۴۰	(۰/۰۲۰)	(۰/۲۰۶)	(۰/۱۰۹)
	رانی	۸۰/۳۳	۹۱/۹۹	۹۶/۵۴	۸۳/۸۳	-۰/۵۴۶	-۰/۲۶۴	-۰/۵۳۹
	دوسر	± ۳۸/۳۴	± ۲۵/۴۹	± ۲۸/۹۴	± ۳۰/۵۷	(۰/۱۸۱)	(۰/۰۲۴)	(۰/۱۲۴)
	رانی	۱۱۱/۹۷	۹۸/۵۶	۱۱۲/۱۲	۱۰۲/۶۰	-۰/۸۱	-۰/۹۳۲	-۰/۵۳۵
	نیم	± ۱۰/۱۳	± ۱۴/۶۴	± ۵۱/۱۸	± ۱۷/۶۱	(۰/۱۷۳)	(۰/۰۹۳)	(۰/۰۶۹)
	وتری	۱۰۸/۳۳	۹۲/۰۸	۱۱۱/۳۰	۹۶/۰۸	-۰/۰۸۶	-۰/۶۴۸	-۰/۷۶۰
	سرینی	± ۱۶/۸۹	± ۱۱/۶۲	± ۲۶/۰۷	± ۱۴/۱۹	(۰/۰۰۸)	(۰/۲۶۱)	(۰/۳۱۲)
	میانی	۶۸/۶۱	۸۲/۹۳	۱۰۰/۶۴	۸۵/۲۸	-۰/۷۳۲	-۰/۰۶۵	-۰/۱۰۴

بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه، با استفاده از اندازه‌گیری (EMG)، تلاش شد تا تأثیر مصرف کافئین بر عملکرد ورزشی در شرایط خستگی شدید ارزیابی شود. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مصرف کافئین می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد ورزشی، به‌ویژه در فعالیت‌های استقامتی و توان‌بخشی عضلانی، ایفا کند (۱۵، ۱۶). با این حال، تأثیر کافئین بر فعالیت‌های انفجاری توانی پس از خستگی و امانده‌ساز کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

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

در این زمینه، نتایج مطالعه حاضر با یافته‌های پژوهش سان جان و همکاران ۲۰۱۹ هم‌راستا است که نشان دادند مصرف کافئین پس از خستگی، فعالیت بی‌هوازی و کارایی عصبی-عضلانی را در بوکسورهای حرفه‌ای بهبود می‌بخشد (۱۴)، هرچند تأثیر مستقیمی بر EMG مشاهده نشد. همچنین فرانکو و همکاران در سال ۲۰۱۹ در مطالعه‌ای گزارش کردند که مصرف کافئین حتی در شرایط کاهش فعالیت قشر حرکتی مغز نیز موجب افزایش عملکرد استقامتی می‌شود (۱۲). در مقابل، برخی مطالعات هیچ‌گونه تغییراتی را در قدرت و فعالیت الکتریکی عضلات مشاهده و گزارش نکردند (۱۷، ۱۸). این اختلافات ممکن است به نوع عضلات، ویژگی‌های تارهای عضلانی و شرایط آزمون و دوز و زمان مصرف کافئین وابسته باشد.

برای تحلیل تفاوت‌های مشاهده‌شده در پاسخ عضلات مختلف به مصرف کافئین، باید به چند عامل کلیدی توجه کرد، تفاوت در درصد فیبرهای عضلانی تند یا کند انقباض بین عضلات راست رانی و دوسر رانی با عضله ی دوقلو و همچنین با توجه به درصد ونوع تارهای عضلانی تفاوت در وابستگی به سیستم‌های انرژی بین عضلات می‌تواند عوامل تأثیرگذاری در نوع پاسخ عضلات مختلف به کافئین بعد از یک جلسه تمرین و امانده‌ساز باشد. به طوری که طبق نتایج پژوهش‌های انجام شده عضله راست رانی و دوسر رانی دارای درصد بالایی از فیبرهای تند انقباض یا نوع II هستند که برای تولید نیرو در فعالیت‌های شدید و کوتاه‌مدت کارآمدتر هستند (۱۹). به عبارتی دیگر درصد فیبرهای نوع I در عضله دوقلوی بالاتر از ۵۰، در راست رانی و دو سر رانی کمتر از ۵۰ است (۱۹). فیبرهای تند انقباض یا نوع II وابستگی زیادی به متابولیسم بی‌هوازی (فسفاژن و گلیکولیز) دارند و به دلیل مصرف سریع ATP^۲ به سرعت دچار خستگی می‌شوند. کافئین از طریق بهبود آزادسازی کلسیم از رتیکولوم سارکوپلاسمی و افزایش برانگیختگی عصبی می‌تواند ظرفیت انقباضی و فعالیت الکتریکی این فیبرها را بهبود بخشد (۱۰، ۲۰). این مسئله می‌تواند توجیه‌کننده‌ی افزایش دامنه فعالیت الکتریکی عضلات ذکر شده در پژوهش حاضر باشد.

با توجه به اینکه که عضله دوقلوی داخلی دارای درصد بالاتری از فیبرهای کند انقباض است و این فیبرها بیشتر بر متابولیسم هوازی تکیه دارند و به دلیل ظرفیت بالای میتوکندری و متابولیسم پایدارتر، نسبت به خستگی مقاوم‌ترند (۲۱). مطالعات علمی نشان داده‌اند که کافئین می‌تواند از طریق تأثیر بر سیستم عصبی مرکزی، تحریک‌پذیری نورون‌های حرکتی را افزایش داده و در نتیجه فعالیت الکتریکی

فعالیت الکتریکی عضلانی^۱

آدنوزین تری فسفات^۲

عضلاتی مانند (Rectus Femoris) و (Biceps Femoris) را که به ترتیب توسط اعصاب فمورال و سیاتیک عصبدهی می‌شوند، تقویت کند. با توجه به نقش این عضلات در حرکات انفجاری و توان بالا در مفصل ران و زانو اثرات تحریکی کافئین بر اعصابی که به این عضلات عصب دهی میکنند قابل مشاهده بود. مطالعه‌ای توسط والتون و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که مصرف کافئین به میزان ۶ میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم وزن بدن منجر به افزایش ۴۳٪ در تحریک‌پذیری نخاعی شد، که از طریق افزایش دامنه رفلکس هافمن اندازه‌گیری شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کافئین می‌تواند تحریک‌پذیری نورون‌های حرکتی α را افزایش دهد، که به نوبه خود می‌تواند فعالیت عضلات تحت عصبدهی این نورون‌ها را تقویت کند (۲۳). عضله دوقلو توسط عصب تیپال که از شاخه‌های عصب سیاتیک منشأ می‌گیرد، عصبدهی می‌شود. این عضله نقش مهمی در حرکات پایدار و تعادلی مانند حفظ وضعیت بدن و راه رفتن دارد. به دلیل ویژگی‌های فیبرهای آن و الگوی فعالیتش، اثرات تحریکی کافئین بر آن ممکن است کمتر باشد.

به طور کلی به نظر می‌رسد کافئین نقش مؤثری در بازیابی توان عضلانی و بهبود عملکرد ورزشی از طریق چندین مکانیسم فیزیولوژیکی و عصبی-عضلانی ایفا می‌کند. مصرف کافئین می‌تواند احساس خستگی را کاهش داده و موجب افزایش تمرکز ذهنی و انگیزش ورزشکاران شود (۱۳، ۲۴). این امر می‌تواند با تأثیر بر سیستم عصبی مرکز توضیح داده شود، چرا که کافئین به‌عنوان یک آنتاگونیست گیرنده‌های آدنوزین عمل می‌کند و با مهار اثرات آدنوزین، منجر به کاهش احساس خستگی و افزایش برانگیختگی عصبی می‌شود. این امر به افزایش میزان فراخوانی واحدهای حرکتی، بهبود همزمانی فعال‌سازی فیبرهای عضلانی و در نتیجه افزایش خروجی توان عضلانی منجر می‌شود. به عبارت دیگر، کافئین با کاهش اثر مهار آدنوزین بر نورون‌های حرکتی، میزان فعالیت سیناپسی را افزایش داده و به بهبود عملکرد در فعالیت‌های با شدت بالا کمک می‌کند (۱۳، ۲۴).

در فعالیت وامانده ساز اجرا شده در پژوهش حاضر که به علت شدت بالای فعالیت سیستم گلیکولیتیک سهم زیادی در تامین انرژی دارد، که به تولید مقادیر بالای لاکتات و یون‌های H^+ می‌انجامد. تجمع این یون‌ها باعث کاهش pH عضله (اسیدوز متابولیکی) شده که منجر به کاهش توان عضلانی، مهار عملکرد آنزیم‌های تولیدکننده انرژی و در نهایت ایجاد خستگی و افت عملکرد شدید می‌شود (۲۵، ۲۶). کافئین می‌تواند از چند طریق به کاهش اثرات منفی این وضعیت کمک کند، برای مثال کافئین می‌تواند سیستم‌های بافری مانند بی‌کربنات را تحریک کند، که این امر به خروج سریع‌تر H^+ از عضلات و در نتیجه حفظ pH در دامنه مناسب کمک می‌کند (۲۷، ۲۸). در نتیجه، مصرف کافئین می‌تواند منجر به کاهش میزان تجمع یون‌های H^+ پس از یک فعالیت وامانده‌ساز 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).

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مصرف کافئین پس از یک دوره خستگی وامانده‌ساز می‌تواند عملکرد انفجاری-توانی را با افزایش دامنه فعالیت الکتریکی عضلات راست رانی و دوسر رانی بهبود بخشد. در حالی که عضله دوقلوی داخلی به دلیل ساختار متفاوت فیبرهای عضلانی و نقش آن در تعادل و پایداری، پاسخ کمتری به کافئین نشان داده است. به همین دلیل، مصرف کافئین می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای ورزشکارانی که درگیر فعالیت‌های پرشدت و کوتاه‌مدت هستند توصیه شود. البته حساسیت‌های فردی و دوز بهینه مصرف باید مورد توجه قرار گیرد. پژوهش‌های آتی می‌توانند تأثیرات بلندمدت کافئین و تفاوت‌های فردی در پاسخ به آن را مورد بررسی قرار دهند.

تشکر و قدردانی

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

حمایت مالی

راست‌رانی^۳

دوسررانی^۴

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.
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.
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.
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.
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.
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.
8. Lazić, A., et al., *Acute effects of caffeine on overall performance in basketball players—A systematic review*. Nutrients, 2022. **14**(9): p. 1930.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
26. Hargreaves, M. and L.L. Spriet, *Skeletal muscle energy metabolism during exercise*. Nature metabolism, 2020. **2**(9): p. 817–828.

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.
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.
29. Barcelos, R.P., et al., *Caffeine effects on systemic metabolism, oxidative-inflammatory pathways, and exercise performance*. *Nutrition research*, 2020. **80**: p. 1–17.