

Original Article

The Acute Effect of Beetroot Juice, L-arginine and L-citrulline Supplementation on Serum Nitric Oxide and Exercise Performance in Trained Individuals

Asma Hasani¹ , Farhad Gholami^{*1} , Parasto Zamani¹ , Mohadeseh Iranpour¹ , Babak Ebadi³ 

1. Faculty of Physical Education, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2. Department of Physical Education and Sport Sciences, Faculty of Humanities, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

Abstract

Background and Purpose Nitric oxide (NO) precursor supplements have garnered significant interest among athletes and are commonly incorporated into the formulation of many pre-workout supplements. It is believed that these supplements may enhance athletic performance by increasing nitric oxide levels through both enzymatic and non-enzymatic pathways. Therefore, the synergistic effect of combining the supplements that elevate nitric oxide levels may have a significant impact on exercise performance. This study aimed to investigate the acute effect of a combination of NO precursors, comprising beetroot juice, L-arginine, and L-citrulline, on serum nitric oxide levels and exercise performance in trained men

Materials and Methods: In a double-blind, placebo-controlled, crossover trial, 13 trained male athletes were recruited. Participants were randomly assigned to receive either the supplement (300 ml beetroot juice containing 210 mmol nitrate, 3 g L-arginine, and 3 g L-citrulline) or placebo before an exhaustive exercise test on separate sessions. Blood samples were collected at three time points from antecubital vein immediately before supplementation, before the exercise, and after the exhaustive exercise. Serum levels of nitric oxide and lactate in addition to some measures of exercise performance were assessed. Data were analyzed using repeated measures analysis of variance (ANOVA) and paired t-tests at a significance level of $p < 0.05$

Results: Plasma nitric oxide levels increased significantly following supplementation with the combination of NO precursors compared to the placebo ($p = 0.001$) and remained significantly elevated after the exhaustive exercise ($p = 0.001$). Serum lactate levels also increased following the exhaustive exercise; however, supplementation had no significant effect on lactate response to exercise ($p > 0.05$). Average heart rate and rate of perceived exertion increased by exercise protocol ($p = 0.001$). Regarding performance measures, average heart rate and ratings of perceived exertion (RPE) were significantly lower with the supplement condition compared to the placebo ($p = 0.001$). However, no significant difference was observed in the time to exhaustion ($p > 0.05$).

Conclusion: Acute supplementation with a combination of NO precursors remarkably increased serum nitric oxide concentration and slightly reduced the subjective perception of fatigue during exhaustive exercise. Nevertheless, it had no significant effect on time to exhaustion during the exhaustive exercise test. Therefore, although an increase in nitric oxide concentration is often associated with improved vascular function and oxygen delivery, this physiological change does not necessarily guarantee a corresponding enhancement in physical performance, as multiple other factors may influence the overall outcome.

Keywords: Nitric Oxide, Beetroot Juice, Arginine, Citrulline, Exhaustive Exercise

How to cite this article: Hasani, A., Gholami, F., Zamani, P., Iranpour, M., Ebadi B. The Acute Effect of Beetroot Juice, L-arginine and L-citrulline Supplementation on Serum Nitric Oxide and Exercise Performance in Trained Individuals.

J Sport Exerc Physiol. 2026;19(3):?-?.

*Corresponding Author's E-mail: gholami-fa@shahroodut.ac.ir

<https://doi.org/10.48308/joeppa.2026.242960.1422>

Received: 21/12/2025

Revised: 26/02/2026

Accepted: 06/05/2026

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/>).

نسخه پیش انتشار

نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی

۱۴۰۵، دوره ۱۹، شماره ۳، صفحه‌های ۹-۹

مقاله پژوهشی

تاثیر حاد مکمل‌های آب چغندر، ال-آرژنین و ال-سیتروالین بر نیتریک اکساید سرم و عملکرد ورزشی در افراد تمرین کرده

اسما حسینی^۱، فرهاد غلامی^{۱*}، پرستو زمانی^۱، محدثه ایران پور^۱، بابک عبادی^۳

۱. دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۱. گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: مکمل‌های پیش ساز نیتریک اکساید امروزه مورد توجه ورزشکاران قرار گرفته‌اند و در فرمولاسیون بسیاری از مکمل‌های پیش از تمرین استفاده می‌شود. تصور بر این است که این مکمل‌های با افزایش نیتریک اکساید از مسیرهای آنزیمی و غیر آنزیمی می‌تواند عملکرد ورزشی را بهبود بخشد. لذا، اثر هم افزایی ترکیب مکمل‌ها در افزایش نیتریک اکساید ممکن است تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد ورزشی داشته باشد. هدف این مطالعه بررسی اثر حاد مصرف ترکیب مکمل‌های پیش‌ساز نیتریک اکساید شامل آب چغندر، آرژنین و سیتروالین بر نیتریک اکساید سرم و عملکرد ورزشی در مردان تمرین کرده بود

مواد و روش‌ها: در یک کارآزمایی متقاطع دو سوکور و کنترل شده با دارونما، ۱۳ مرد ورزشکار شرکت کردند و در جلسات مجزای حضور در آزمایشگاه، به‌طور تصادفی مکمل ترکیبی (۳۰۰ میلی لیتر آب چغندر حاوی ۲۱۰ میلی مول نیترات، ۳ گرم ال-آرژنین، ۳ گرم ال-سیتروالین) یا دارونما دریافت کردند و پس از آن یک آزمون ورزشی وامانده ساز انجام دادند. نمونه‌های خون در سه مرحله (پیش از مصرف مکمل، قبل از فعالیت ورزشی، و پس از فعالیت ورزشی) جمع آوری شد. شاخص‌های نیتریک اکساید و لاکتات سرم به همراه شاخص‌های عملکردی اندازه‌گیری شد. داده‌های به دست آمده با استفاده از آزمون‌های تحلیل واریانس مکرر و t همبسته در سطح معناداری ۰/۰۵ تحلیل شدند.

نتایج: سطح نیتریک اکساید پلاسما بعد از مصرف مکمل در مقایسه با دارونما ($p = ۰/۰۰۱$) و بعد از فعالیت وامانده‌ساز به طور معنادار افزایش یافت ($p = ۰/۰۰۱$). لاکتات سرم نیز بعد از فعالیت ورزشی وامانده‌ساز افزایش یافت و مصرف مکمل تاثیر معناداری بر این تغییرات نداشت ($p > ۰/۰۵$). با انجام فعالیت ورزشی متوسط ضربان قلب و درک فشار بطور معنادار افزایش

یافت ($p = 0/001$). در بین شاخص‌های عملکردی متوسط ضربان قلب و درک فشار با مصرف مکمل در مقایسه با دارونما به طور معنادار کاهش یافت ($p = 0/001$) اما تفاوت معناداری در زمان رسیدن به واماندگی مشاهده نشد ($p > 0/05$).

نتیجه‌گیری: با مصرف حاد ترکیب مکمل‌های پیش‌ساز نیتریک اکساید سطح نیتریک اکساید سرم به طور چشمگیر افزایش یافت و درک ذهنی خستگی در فعالیت ورزشی وامانده‌ساز تا حدودی تعدیل شد اما تاثیر محسوسی بر زمان اجرای فعالیت ورزشی وامانده‌ساز مشاهده نشد. بنابراین، اگرچه افزایش غلظت نیتریک اکساید معمولاً با بهبود عملکرد عروقی و افزایش انتقال اکسیژن همراه است، اما این تغییر فیزیولوژیکی لزوماً به معنای بهبود عملکرد جسمانی نیست، چرا که عوامل متعدد دیگری نیز می‌توانند بر نتیجه نهایی تاثیر بگذارند.

واژه‌های کلیدی: نیتریک اکساید، آب چغندر، آرژنین، سیترونین، فعالیت ورزشی وامانده‌ساز

نحوه استناد به این مقاله: حسینی، ا.، غلامی، ف.، زمانی، پ.، ایرانپور، م.، عبادی، ب. تاثیر حاد مکمل‌های آب چغندر، ال-آرژنین و ال-سیترونین بر نیتریک اکساید سرم و عملکرد ورزشی در افراد تمرین کرده. نشریه فیزیولوژی ورزش و فعالیت بدنی. ۱۴۰۵؛ ۱۹(۳): ۴-۹.

* رایانامه نویسنده مسئول: mirzaee@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

مقدمه

امروزه استفاده از مکمل‌های غذایی برای بهبود عملکرد و افزایش سازگاری‌های تمرینی روز به روز در حال افزایش است (۱). دسته جدیدی از مکمل‌های غذایی که به عنوان مکمل‌های چند عنصری قبل از تمرین (MIPS) شناخته می‌شوند، توجه ورزشکاران، علاقه‌مندان به تناسب اندام و حتی محققان را نیز به خود جلب کرده است (۲). این محصولات معمولاً حاوی ترکیبی از مواد مختلف از جمله محرک‌ها (مانند کافئین)، عوامل تولید انرژی (مانند کراتین)، و بافر یون هیدروژن (مانند بتا آلانین)، و برخی ریزمغذی‌ها و اسیدهای آمینه، آنتی اکسیدان‌ها، و پیش‌سازهای نیتریک اکساید هستند (۳). با توجه به ترکیبات موجود، این مکمل‌ها پتانسیل افزایش نیتریک اکساید را نیز دارند که برخی از تاثیرات مکمل‌ها به آن نسبت داده می‌شود. (۴)

بر اساس تحقیقات نیتریک اکساید بر عملکرد عروق، تنفس میتوکندریایی، و زمان رسیدن به خستگی موثر است (۵). همچنین سطوح فیزیولوژیکی NO باعث تحریک جذب و اکسیداسیون گلوکز و همچنین اکسیداسیون اسیدهای چرب در بافت‌های مختلف (عضله، قلب، کبد و بافت چربی) می‌شود (۶). ورزشکاران، نیترات را عمدتاً از چغندر یا آب چغندر و همچنین مکمل‌هایی مانند سدیم نیترات دریافت می‌کنند. با دریافت نیترات، سنتز نیتریک اکساید از طریق مسیر غیر وابسته به آنزیم افزایش می‌یابد (۷) که می‌تواند باعث افزایش جریان خون در عضله هنگام فعالیت ورزشی شود و احتمالاً عملکرد ورزشی را افزایش دهد. طبق تحقیقات مصرف حاد و بلندمدت مکمل‌های حاوی نیترات باعث افزایش فراهمی زیستی NO، کاهش فشارخون، کاهش هزینه اکسیژن فعالیت ورزشی با شدت متوسط و بهبود آستانه خستگی فعالیت ورزشی شدید می‌شوند

(۸). جونز و همکارانش (۲۰۲۳) تأثیر مکمل‌دهی حاد آب چغندر (به عنوان منبع نیترات) بر عملکرد ورزشی تناوبی شدید، میزان درک فشار، شاخص‌های متابولیک شامل نسبت تبادل تنفسی و اکسیداسیون چربی بررسی و مشاهده کردند درک فشار در ورزشکاران کاهش یافت، متابولیسم انرژی به سمت اکسیداسیون چربی سوق یافت که این اثرات به افزایش تولید نیتریک اکساید و بهبود کارایی میتوکندری نسبت داده شد. (۹)

اگرچه نیترات و آب چغندر مکمل‌های گشادکننده عروقی هستند و بیشترین مطالعه را در این زمینه به خود اختصاص داده اند؛ آرژنین (Arg) نیز یک اسید آمینه با اثر گشادکنندگی عروق است زیرا در سنتز و فراهمی زیستی نیتریک اکساید نقش دارد (۱۰). نشان داده شده است آرژنین سنتز NO را افزایش می‌دهد و NO به عنوان یک مولکول سیگنال دهنده سلولی آثار فیزیولوژیک متعددی دارد که می‌توان به افزایش جریان خون و بهبود انقباض عضلانی، تبادل گاز، سینتیک اکسیژن و بیوژنر میتوکندری اشاره کرد؛ نیتریک اکساید از طریق دو مسیر اصلی در بدن سنتز می‌شود: مسیر وابسته به آنزیم نیتریک اکساید سنتاز (NOS) و مسیر غیروابسته به این آنزیم (۱۱، ۱۲). در مسیر غیرآنزیمی، دریافت نیترات رژیمی (عمدتاً از طریق آب چغندر) موجب افزایش فراهمی زیستی نیتریک اکساید، بهبود جریان خون و کاهش هزینه اکسیژن مصرفی هنگام فعالیت ورزشی می‌شود (۱۳، ۱۴). بررسی‌های سیستماتیک نشان می‌دهند دوز استاندارد و اثربخش نیترات برای بهبود عملکرد ورزشی در مطالعات انسانی معمولاً در محدوده ۴ تا ۱۱ میلی‌مول قرار دارد (۱۴، ۱۵). از سوی دیگر، در مسیر وابسته به آنزیم NOS، اسیدهای آمینه ال-آرژنین و ال-سیترونین نقش پیش‌ساز را ایفا می‌کنند (۱۰، ۱۶). ال-آرژنین پیش‌ساز مستقیم تولید نیتریک اکساید است و ال-سیترونین نیز با عبور ایمن از متابولیسم کبدی، به طور موثری در کلیه‌ها به ال-آرژنین تبدیل شده و سطح پلاسمایی آن را افزایش می‌دهد. در مطالعات کارآزمایی بالینی، مکمل‌دهی با این اسیدهای آمینه معمولاً با دوزهای ایمن و رایج ۳ تا ۶ گرم برای هر کدام صورت می‌گیرد که می‌تواند اکسیژن‌رسانی و کارایی عضلانی را بهبود بخشد (۱۷). رویکردهای نوین در تغذیه ورزشی، به جای استفاده از دوزهای حداکثری و بسیار بالای یک مکمل منفرد که ممکن است با عوارض گوارشی یا محدودیت‌های جذب همراه باشد، به سمت بهره‌گیری از دوزهای متوسط و ایمن در قالب مکمل‌های چندعنصری (MIPS) سوق یافته است (۲، ۳). در این رویکرد، انتظار می‌رود ترکیب دوزهای استاندارد از پیش‌سازهای مختلف، پاسخ‌های فیزیولوژیک را بهینه‌سازی کند، که برای آزمون این رویکردها می‌توان ترکیب ایمن این مکمل‌ها با مقادیر توصیه شده حداقلی را در نظر گرفت.

با وجود شناخت مسیرهای تولید نیتریک اکساید، مرور انتقادی ادبیات پیشین نشان‌دهنده تناقضات قابل‌توجهی در نتایج است که اثربخشی این پیش‌سازها را تحت تأثیر عوامل تعدیل‌کننده‌ای چون سطح آمادگی جسمانی، نوع پروتکل ورزشی و استراتژی مکمل‌دهی قرار می‌دهد. نخست، سطح تمرین شرکت‌کنندگان یک عامل محدودکننده کلیدی است؛ در حالی که مطالعات متعددی اثرات ارگوژنیک این مکمل‌ها (مانند کاهش هزینه اکسیژن و بهبود تحمل تمرین) را در افراد سالم و غیرورزشکار گزارش کرده‌اند (۱۸)، شواهد در زمینه تأثیرات بیوشیمیایی و عملکردی در ورزشکاران تمرین‌کرده و نخبه اغلب متناقض است (۱۹، ۲۰). این پدیده احتمالاً به دلیل سازگاری‌های فیزیولوژیک پایه در ورزشکاران تمرین‌کرده، نظیر فعالیت بالاتر و بهینه‌تر آنزیم نیتریک اکساید سنتاز (NOS) و خون‌رسانی درون‌زای قوی‌تر است که باعث می‌شود مصرف حاد مکمل‌های منفرد برای غلبه بر این سقف فیزیولوژیک کافی نباشد. دوم، ماهیت پروتکل ورزشی و استراتژی مکمل‌دهی (دوز و مدت‌زمان مصرف) نیز به نتایج متناقضی منجر شده است. تأثیر مکمل‌دهی در آزمون‌های تایم‌تریل و تناوبی لزوماً با پاسخ‌های فیزیولوژیک در آزمون‌های فزاینده وامانده‌ساز یکسان نیست (۲۱). علاوه بر این، با وجود گرایش اخیر به سمت مکمل‌های چندعنصری پیش از تمرین، تحقیقات در زمینه ترکیب هم‌زمان پیش‌سازهای نیتریک اکساید چندان گسترده نیست و هنوز

مشخص نیست آیا تحریک هم‌زمان و حاد مسیرهای وابسته به NOS (آرژنین و سیترولین) و مسیرهای غیروابسته به NOS (نیترات آب جغندر) پیش از فعالیت ورزشی، می‌تواند پتانسیل هم‌افزایی برای افزایش تولید نیتریک اکساید و بهبود عملکرد ورزشی داشته باشد. از این‌رو، مطالعه حاضر به منظور پاسخ به این سوال طراحی شده است تا مشخص سازد آیا تجمیع این ترکیبات با دوزهای ایمن در حد پایین مقادیر توصیه شده در یک فرمولاسیون واحد، ظرفیت لازم برای ارتقای نیتریک اکساید سرم و بهینه‌سازی عملکرد در یک آزمون ورزشی فزاینده و امانده‌ساز را دارد یا خیر. بر این اساس، در این تحقیق فرض بر این بود که مصرف این ترکیب سه‌گانه، از طریق هم‌افزایی مسیرهای آنزیمی و غیرآنزیمی، موجب افزایش معنادار غلظت نیتریک اکساید سرم و همچنین افزایش معنادار زمان رسیدن به واماندگی در مقایسه با دارونما خواهد شد.

روش پژوهش

نمونه‌های پژوهش:

این پژوهش یک کارآزمایی مقطعی تصادفی کنترل شده با دارونما و دوسوکور بود که کلیه مراحل پژوهش زیر نظر فیزیولوژیست‌های ورزشی انجام شد. پژوهش حاضر با شناسه REC.1403.014 در کمیته اخلاق دانشگاه ... ثبت و مجوز کمیته اخلاق برای اجرای پژوهش دریافت شد.

در این تحقیق ۱۶ مرد ورزشکار بر اساس معیارهای ورود، داوطلب شرکت در تحقیق شدند. معیارهای ورود شامل سن بالای ۱۸ سال، فعالیت ورزشی منظم حداقل ۳ جلسه در هفته، حداکثر اکسیژن مصرفی برابر با ۵۰ میلی‌لیتر به ازای هر کیلوگرم وزن بدن یا بیشتر، عدم استعمال دخانیات و استفاده از مکمل‌های ورزشی و دارو در طی دوره پژوهش بود. افرادی که مکمل‌های ورزشی، دارو و دخانیات در طی دوره مصرف کردند یا تمایل به ادامه تحقیق نداشتند، از تحقیق خارج شدند. در جلسه اول حضور در آزمایشگاه فیزیولوژی ورزشی، آزمودنی‌ها با طرح پژوهش آشنا شدند و رضایت شخصی از آن‌ها کسب شد و سپس آزمودنی‌های برای ارزیابی ترکیب بدن و سنجش حداکثر اکسیژن مصرفی در آزمایشگاه حاضر شدند. پس از آن آزمودنی‌ها به طور تصادفی به ۲ حالت، مکمل و دارونما تقسیم شدند بطوریکه در جلسه اول آزمون قبل از فعالیت ورزشی و امانده‌ساز نیمی از آزمودنی‌ها مکمل دریافت کردند و نیمی دیگر دارونما و پس از یک هفته دوره پاکسازی، در جلسه دوم افراد دریافت‌کننده مکمل و دارونما جابجا شدند.

روش اجرای پژوهش:

در این پژوهش، ابتدا حداکثر اکسیژن مصرفی (VO_{2max}) با استفاده از یک آزمون ورزشی و امانده‌ساز به صورت اندازه‌گیری مستقیم و با استفاده از دستگاه آنالیز گازهای تنفسی با استفاده از تردمیل (h/p/cosmos 30000va08)، جیومد/آلمان (مجهز به دستگاه آنالیز گازهای تنفسی MetaMax 3B)، Cortex، CPET (آلمان) اندازه‌گیری شد. این آزمون با راه رفتن به مدت ۳ دقیقه و با سرعت ۳ کیلومتر در ساعت آغاز شد و سپس سرعت به ۶ کیلومتر در ساعت افزایش یافت و برای مدت ۳ دقیقه ادامه داشت. در ادامه، سرعت در هر دقیقه به میزان ۱ کیلومتر در ساعت افزایش یافت تا به ۱۴ کیلومتر در ساعت برسد. پس از آن، شیب تردمیل در هر دقیقه ۲ درصد افزایش یافت و آزمون تا رسیدن آزمودنی به نقطه‌ی واماندگی ادامه پیدا کرد (۲۲). برای اطمینان از رسیدن آزمودنی‌ها به اکسیژن مصرفی بیشینه، از معیارهای استاندارد فیزیولوژیک استفاده شد. آزمون در صورتی بیشینه و معتبر تلقی می‌گردد که حداقل سه مورد از چهار معیار زیر را محقق می‌شد: (۱) مشاهده کفه (Plateau) در اکسیژن مصرفی، (۲) نسبت تبادل تنفسی (RER) مساوی یا بزرگتر از ۱/۱، (۳) ضربان قلب بیشینه پیش‌بینی‌شده بیش از ۹۰٪ و (۴) رسیدن به مرحله واماندگی ارادی (عدم توانایی در حفظ سرعت تردمیل با وجود تشویق کلامی) به همراه شاخص درک فشار (RPE) بیش از ۱۸.

در جلسات آزمون اصلی به همراه مصرف مکمل یا دارونما، پروتکل ورزشی استاندارد معرفی شده توسط ونابلس و همکاران (۲۰۰۵) و آختن و همکاران (۲۰۰۲) برای بررسی شاخص‌های عملکردی و متغیرهای بیوشیمیایی اجرا شد (۲۳، ۲۴). این آزمون ورزشی با راه رفتن به مدت ۳ دقیقه با سرعت ۴ کیلومتر در ساعت آغاز شد و سپس آزمودنی‌ها به مدت ۳ دقیقه با سرعت ۶ کیلومتر در ساعت نرم‌دوی انجام دادند. در ادامه، در هر دوره ۳ دقیقه‌ای، سرعت به میزان ۱ کیلومتر در ساعت افزایش یافت تا آزمودنی‌ها به واماندگی برسند. در طول اجرای آزمون و در هر مرحله ۳ دقیقه‌ای شاخص درک فشار (بورگ) و متوسط ضربان قلب ثبت شد و در پایان فعالیت ورزشی زمان رسیدن به واماندگی نیز ثبت شد. در طول اجرای آزمون‌های ورزشی، ضربان قلب به صورت پیوسته توسط نوار قلب تله‌متری (Polar H10, Finland) پایش شد. آزمون تا رسیدن آزمودنی‌ها به مرحله واماندگی ادامه یافت. در طول اجرای آزمون و در هر مرحله ۳ دقیقه‌ای شاخص درک فشار (بورگ) و متوسط ضربان قلب ثبت شد و در پایان فعالیت ورزشی زمان رسیدن به واماندگی نیز ثبت شد.

به منظور کنترل ملاحظات تغذیه‌ای، فهرستی از مواد غذایی غنی از نیترات، آرژنین و سیترونین در اختیار شرکت‌کنندگان قرار گرفت تا حداقل ۲۴ ساعت پیش از هر آزمون از مصرف آن‌ها خودداری کنند یا در صورت امکان به حداقل برسانند. همچنین رژیم غذایی شامل صبحانه، ناهار و شام روز قبل از آزمون ثبت شد و پیش از هر جلسه فعالیت ورزشی تکرار شد. به شرکت‌کنندگان توصیه شد در ۲۴ ساعت پیش از مداخله از مصرف هرگونه مکمل، کافئین و انجام فعالیت ورزشی شدید خودداری کنند. در این مطالعه، مداخله شامل مصرف یک مکمل ترکیبی سه‌گانه پیش از فعالیت ورزشی بود. بر اساس تحقیقات پیشین (۱۳-۱۵، ۱۷، ۱۹، ۲۱) عموماً توصیه به دریافت ۳-۶ گرم آرژنین یا سیترونین و ۴-۱۱ میلی‌مول نیترات غذایی قبل از تمرین است که بر این اساس دوز ترکیبی ۳ گرم ال-آرژنین، ۳ گرم ال-سیترونین (مجموعاً ۶ گرم) و ۴ میلی‌مول نیترات غذایی انتخاب شد. برخی تحقیقات گذشته نشان داده‌اند مصرف هم‌زمان این دو اسید آمینه با دوز کم موجب افزایش هم‌افزا و پایدارتر سطح آرژنین و نیتریک اکساید پلاسما در مقایسه با مصرف مقادیر بالاتر هر یک به صورت مجزا می‌شود، در حالی که از بروز ناراحتی‌های گوارشی ناشی از دوزهای بالای آرژنین نیز جلوگیری می‌کند. (۱۷)

پودرهای ال-آرژنین و ال-سیترونین متعلق به شرکت USN و نوترابایو در این تحقیق استفاده شد و آب چغندر مصرفی نیز از برند تجاری (گیاه کالا) تهیه شد که محتوای نیترات آن بر اساس آنالیز استاندارد شرکت سازنده، در حدود ۷۷۰ میلی‌گرم در لیتر برآورد شده بود. برای اطمینان از یکنواختی دوزها، مقادیر دقیق پودرها برای هر آزمودنی توسط یک محقق مستقل (که در فرآیند ارزیابی عملکرد و جمع‌آوری داده‌ها دخالتی نداشت) با استفاده از ترازوی دیجیتال حساس آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۱ گرم (مدل ME54، ساخت شرکت Mettler Toledo، سوئیس) وزن‌کشی شد. پودرها به منظور جلوگیری از افت پایداری شیمیایی، دقیقاً ۱۰ دقیقه پیش از زمان مقرر برای مصرف، در آب چغندر حل شده و جهت رقیق‌سازی با ۲۰۰ میلی‌لیتر آب ترکیبی شد و به صورت کاملاً یکنواخت در اختیار آزمودنی‌ها قرار گرفتند. دارونما نیز شامل مقدار حجمی معادل آب بود که ۱۰٪ از مکمل آب چغندر برای ایجاد تشابه طعمی و ظاهری اضافه شد. هر دو مکمل نوشیدنی در بطری با شکل ظاهری مشابه در اختیار آزمودنی‌ها قرار گرفت و از آزمودنی‌ها درخواست شد در فاصله نیم ساعت مصرف کنند. پس از گذشت ۶۰ دقیقه اتمام مصرف مکمل، آزمون ورزشی وامانده‌ساز بر روی تردمیل اجرا شد. مکمل اصلی و دارونما به صورت دوسو کور در اختیار شرکت‌کنندگان قرار گرفت.

روش‌های آزمایشگاهی:

ترکیب بدن آزمودنی‌ها با استفاده از دستگاه سنجش ترکیب بدن (ساخت کره، Inbody 230) بعد از ۸-۱۰ ساعت ناشتایی شبانه ارزیابی شد. آزمون‌های ورزشی جهت سنجش حداکثر اکسیژن مصرفی (Vo2max) با استفاده از تردمیل (h/p/cosmos 30000va08، جیوه med، آلمان) مجهز به دستگاه آنالیز گازهای تنفسی (MetaMax 3B)، Cortex،

CPET آلمان (انجام شد). در هر نوبت خونگیری، مقدار ۵ میلی لیتر خون کامل از ورید بازویی توسط پرستار حاضر در آزمایشگاه فیزیولوژی ورزشی جمع آوری شد و در لوله های استاندارد لخته نگهداری شد. به منظور حفظ پایداری متابولیت های حساس، نمونه ها ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق (۲۲ درجه سانتی گراد) قرار گرفتند تا لخته به طور کامل تشکیل شود. سپس، نمونه ها با استفاده از سانتریفیوژ یخچال دار (Eppendorf 5810R, Hamburg, Germany) با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه (معادل ۱۵۰۰ نیروی گریز از مرکز نسبی به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد سانتریفیوژ شدند تا از تخریب حرارتی شاخص ها جلوگیری شود. سرم های جدا شده بلافاصله در میکروتیوب های آلیگوات شده و تا زمان انجام آنالیزهای بیوشیمیایی در فریزر با دمای ۸۰- درجه سانتی گراد نگهداری شدند.

آنالیز بیوشیمیایی متغیرهای خونی با توجه به نیمه عمر بسیار کوتاه نیتریک اکساید در جریان خون، غلظت این مولکول به صورت غیرمستقیم و از طریق اندازه گیری مجموع متابولیت های پایدار آن، یعنی نیتريت و نیترات ارزیابی شد. برای این منظور از روش استاندارد رنگ سنجی گریس (Griess reaction) با استفاده از کیت تجاری ارزیابی نیتریک اکساید (GmbH, ZelBio, آلمان) استفاده گردید. در این روش، ابتدا نیترات موجود در نمونه ها توسط آنزیم نیترات ردوکتاز به نیتريت احیا شده و سپس با افزودن معرف گریس، جذب نوری در طول موج ۵۴۰ نانومتر توسط دستگاه میکروپلیت ریدر (BioTek, Winooski, VT, USA) خوانش شد. حساسیت این کیت معادل ۲ میکرومول بر لیتر و ضریب تغییرات درون آزمونی (Intra-assay CV) آن کمتر از ۵ درصد بود و نتایج بر حسب میکرومول بر لیتر گزارش گردید. همچنین برای اندازه گیری سطح لاکتات سرم، از روش آنزیمی-کالریمتری با استفاده از کیت تجاری دقیق (پارس آزمون، تهران، ایران) با حساسیت ۰/۱ میلی مول بر لیتر استفاده شد.

جدول ۱. میانگین و انحراف استاندارد شاخص های خون در مراحل زمانی مختلف

شاخص	مراحل اندازه گیری	مکمل (S)	دارونما (P)	مقدار P
متابولیت نیتریک اکساید	قبل از دریافت مکمل/دارونما	۴۴/۲۵ ± ۱۹/۵۱	۴۷/۸۳ ± ۱۴/۹۴	P > ۰/۰۵
سرم	قبل از فعالیت ورزشی	۱۶۳/۲۵ ± ۲۲/۹۱	۵۷/۵۰ ± ۲۴/۰۵	* P = ۰/۰۰۱
(μmol/l)	بعد از فعالیت ورزشی	۱۷۲/۰۸ ± ۲۹/۰۷	۷۰/۸۳ ± ۲۵/۲۶	* P = ۰/۰۰۱
لاکتات	قبل از دریافت مکمل/دارونما	۱۳/۶۱ ± ۵/۱۷	۹/۶۷ ± ۳/۰۴	P > ۰/۰۵
(mg/dl)	قبل از فعالیت ورزشی	۱۸/۷۶ ± ۶/۱۷	۱۳/۲۹ ± ۳/۴۰	P > ۰/۰۵
	بعد از فعالیت ورزشی	۸۳/۷۶ ± ۱۷/۸۸	۸۰/۸۴ ± ۱۴/۳۲	P > ۰/۰۵

جدول ۲. میانگین و انحراف استاندارد شاخص های عملکردی

شاخص	مکمل (S)	دارونما (P)	مقدار P
متوسط ضربان قلب فعالیت ورزشی (ضربه در دقیقه)	۱۴۵/۸۹ ± ۱۵/۲۷	۱۵۱/۶۰ ± ۱۴/۲۵	* P = ۰/۰۰۴
زمان رسیدن به واماندگی (دقیقه)	۳۱/۲۵ ± ۳/۰۴	۳۱/۲۱ ± ۲/۸۳	P > ۰/۰۵

متوسط شاخص درک فشار	$15/38 \pm 0/88$	$16/07 \pm 0/95$	$*P = 0/021$
---------------------	------------------	------------------	--------------

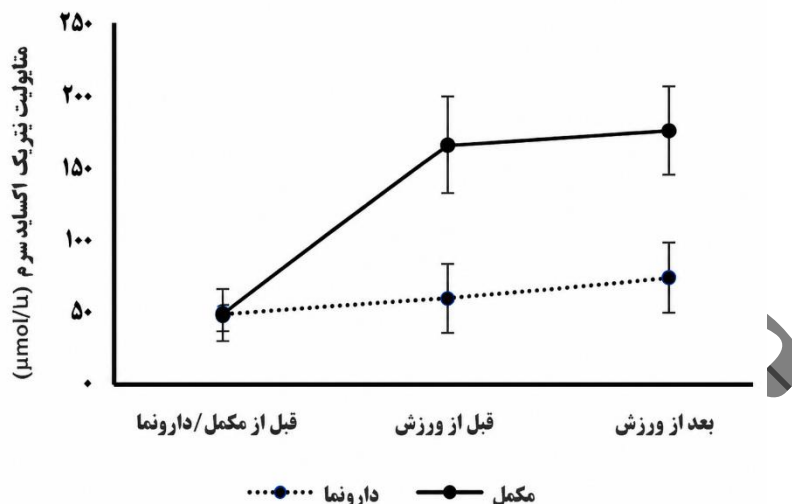
تحلیل آماری:

توصیف داده‌های تحقیق بصورت میانگین و انحراف استاندارد گزارش شده و با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۷ تحلیل شد. در ابتدا توصیف داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک انجام شد، و با توجه به طبیعی بودن توزیع داده‌ها از آمار پارامتریک تحلیل واریانس مکرر (برای متغیرهای بیوشیمیایی)، آزمون تعقیبی بونفرونی استفاده شد. برای آزمون متغیرهای عملکردی بین مکمل و دارونما نیز آزمون تی زوجی استفاده شد. سطح معناداری $p < 0/05$ برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است حجم نمونه پیش از شروع مطالعه با استفاده از نرم‌افزار آماری G Power (نسخه ۳,۱) محاسبه شد. بر اساس نتایج مطالعات پیشین، با در نظر گرفتن اندازه اثر متوسط ($< 0/6$)، توان آماری ۸۰ درصد، $0/8$ و سطح خطای آلفا $0/05$ برای مقایسه درون گروهی، حداقل حجم نمونه مورد نیاز ۱۴ نفر برآورد گردید. به منظور پوشش دادن ریزش احتمالی آزمودنی‌ها در طول جلسات متقاطع، در ابتدا ۱۶ مرد ورزشکار بر اساس معیارهای ورود، داوطلب شرکت در تحقیق شدند. لازم به ذکر است که در نهایت ۱۳ نفر آزمودنی پروتکل دریافت مکمل و دارونما را تکمیل کردند و ۳ نفر به دلایل شخصی و عدم هماهنگی برای جلسه مجدد امکان ادامه تحقیق را نداشتند.

نتایج

مقادیر متغیرهای تحقیق در مراحل مختلف اندازه‌گیری در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. تحلیل آماری داده‌ها در رابطه با تغییرات نیتریک اکساید سرم نشانگر معناداری آزمون تحلیل واریانس مکرر است ($p = 0/001$) که نشان می‌دهد مصرف مکمل، نیتریک اکساید سرم را به طور معنادار افزایش داد (نمودار ۱). بررسی جداگانه تغییرات زمانی با مصرف مکمل و دارونما نشان داد با مصرف مکمل در حالت استراحتی ($p = 0/001$) و پس از فعالیت ورزشی میزان نیتریک اکساید به طور معنادار افزایش یافت ($p = 0/001$)، اما با مصرف دارونما تنها پس از فعالیت ورزشی افزایش معنادار بود ($p = 0/019$). علاوه بر این، در رابطه با تغییرات لاکتات سرم آزمون تحلیل واریانس مکرر تفاوت معناداری نشان نداد ($p = 0/727$). بررسی جداگانه تغییرات زمانی با مصرف مکمل و دارونما نشان داد در هر دو حالت پس از فعالیت ورزشی میزان لاکتات سرم به طور معنادار افزایش یافت ($p = 0/001$)، اما تفاوتی بین مکمل و دارونما مشاهده نشد. همچنین، بررسی شاخص‌های عملکردی با استفاده از آزمون تی همبسته نشان داد تغییرات متوسط ضربان قلب حین فعالیت ورزشی ($p = 0/004$)، متوسط شاخص درک فشار ($p = 0/021$) با مصرف مکمل در مقایسه با دارونما اندکی کمتر بود. در رابطه با متغیر زمان رسیدن به واماندگی، تفاوتی بین مکمل و دارونما مشاهده نشد ($p > 0/05$).

متابولیت نیتریک اکساید سرم



شکل ۱. تغییرات غلظت متابولیت‌های پایدار نیتریک اکساید سرم در سه مرحله زمان‌گیری (پایه، پیش از فعالیت ورزشی و بلافاصله پس از فعالیت وامانده‌ساز) در دو وضعیت مصرف مکمل ترکیبی و دارونما. داده‌ها به صورت (میانگین $\pm$ انحراف استاندارد) برای ۱۳ نفر از مردان تمرین کرده گزارش شده است. واحد اندازه‌گیری شاخص بر حسب میکرومول بر لیتر می‌باشد. برای ارزیابی تفاوت‌های درون‌گروهی و بین‌گروهی، از آزمون تحلیل واریانس مکرر استفاده گردید.

* نشانگر تفاوت مکمل با دارونما $p < 0.05$

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر حاد ترکیب مکمل‌های پیش‌ساز نیتریک اکساید شامل آب چغندر، ال-آرژنین، و ال-سیترولین بر شاخص‌های بیوشیمیایی و متابولیکی مرتبط با عملکرد ورزشی در مردان ورزشکار تمرین کرده انجام شد. مهم‌ترین یافته تحقیق حاضر این بود که با مصرف حاد ترکیب مکمل آب چغندر، آرژنین و سیترولین، سطح نیتریک اکساید سرم در گروه مکمل نسبت به دارونما به طور معنادار افزایش یافت که نشان‌دهنده اثربخشی ترکیب حاد این مکمل‌ها در تحریک سنتز نیتریک اکساید است. با این وجود، مصرف مکمل بر پاسخ لاکتات سرم به فعالیت ورزشی وامانده‌ساز و زمان رسیدن به واماندگی تاثیر نداشت اما بهبودی نسبی و معنادار در متوسط ضربان قلب و متوسط درک فشار هنگام فعالیت ورزشی وامانده‌ساز مشاهده شد.

مصرف هم‌زمان این سه مکمل می‌تواند از دو مسیر مستقل سنتز نیتریک اکساید را افزایش دهد که عبارتند از مسیر وابسته به آنزیم نیتریک اکساید سنتاز (NOS) که آرژنین را به نیتریک اکساید تبدیل می‌کند، و مسیر غیرآنزیمی که نیترات را به نیتريت و سپس NO تبدیل می‌کند، به‌ویژه در شرایط هایپوکسی و اسیدوز عضلانی (۱۱، ۱۲). این مکمل‌ها پیش‌ساز نیتریک اکساید هستند و از طرفی فعالیت ورزشی به طور مستقل تولید نیتریک اکساید را افزایش می‌دهد که به نظر می‌رسد این اثر وابسته به شدت است؛ لذا ممکن است پاسخ تولید نیتریک اکساید به مکمل ترکیبی در فعالیت ورزشی شدید مشهودتر باشد (۱۵). برای مثال، لانسلی و همکاران (۲۰۱۱)، نشان دادند در مردان دوچرخه‌سوار دریافت

۶/۲ میلی مول نیترات از طریق آب چغندر سبب افزایش نیتريت پلاسما شد و برون ده توان را در فعاليت ورزشي شديد افزايش داد اما بر اكسيژن مصرفي در حين آزمون تايم تریل تاثيري نداشت (۲۵). مطالعات گذشته نشان داده اند مکمل های حاوی نیترات غذایی در افزایش تولید متابولیت های نیتریک اکساید موثر است اما ممکن است بر عملکرد ورزشی موثر یا بی اثر باشد (۱۹). برای مثال، در مطالعه لین و همکاران (۲۰۱۴)، گزارش شد دریافت ۸/۲ میلی مول نیترات از طریق آب چغندر اثر ارگوژنیک در دوچرخه سواری تايم تریل نداشت (۲۶). به همین ترتیب، در مطالعه برجیسیان و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند در ورزشکاران فوتبالیست، مصرف مکمل آب چغندر اثر معناداری بر عملکرد ورزشی در فعاليت تناوبي نداشت (۲۷). این مطالعات با یافته تحقیق حاضر همسو هستند که اثر معناداری در افزایش متابولیت های نیتریک اکساید مشاهده کرده اند اما مکمل نیترات غذایی به تنهایی یا در ترکیب با پیش سازهای دیگری تاثیر معناداری بر عملکرد ورزشی نداشت. علاوه بر این، بیسکوس و همکاران (۲۰۱۲) تاثیر ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم وزن بدن مکمل نیترات سدیم را بر مقادیر پلاسمایی نیترات و نیتريت و همچنین عملکرد ورزشی در ورزشکاران استقامتی بررسی کردند. در این مطالعه نیز افزایش نیتريت و نیترات پلاسما با این مکمل گزارش شد اما تاثیر معناداری بر عملکرد دوچرخه سواری مسافت به مدت ۴۰ دقیقه نداشت (۲۸، ۲۰). در مقابل، استیون جی بیلی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند دریافت ۱۱/۲ میلی مول نیترات از طریق آب چغندر در یک دوره کوتاه ۶ روزه، هزینه اكسيژن در فعاليت ورزشي را کاهش داد (۲۹). از مهم ترین تفاوت های مطالعه بیلی و همکاران (۲۰۰۹) با تحقیق حاضر می توان به دوره مصرف مکمل (۶ روز در مقابل یک وعده) و نیز دوز مکمل صرفی (۱۱/۲ میلی مول در مقابل ۴ میلی مول) اشاره کرد. در پژوهش حاضر نیز افراد تمرین کرده با آمادگی جسمانی بالا شرکت کردند و عوامل تغذیه ای تاثیرگذار کنترل شد که بر اساس یافته ها، ترکیب دوزهای متوسط آب چغندر، ال-آرژنین و ال-سیتروآلین باعث افزایش معنادار نیتریک اکساید شد که نشان می دهد این ترکیب محرک مناسبی برای افزایش سنتز نیتریک اکساید بود، اما پیامدهای عملکردی آن عمدتاً بر درک فشار فردی و ضربان قلب بود تا شاخص عینی ظرفیت عملکردی. بر اساس مطالعات مطالعات مذکور، دوز ارگوژنیک و موثر نیترات برای بهبود عملکرد ورزشی معمولاً در محدوده ۴ تا ۱۱ میلی مول قرار دارد و در بسیاری از تحقیقات به طور متوسط دوز ۶ میلی مول به صورت منفرد استفاده شده است. در این تحقیق فرض شد استفاده از دوزهای پایین نیترات غذایی به همراه دوز متوسط ترکیب آرژنین و سیتروآلین ممکن است از طریق مسیرهای مستقل باعث تحریک بیشتر سنتز نیتریک اکساید و در نتیجه بهبود احتمالی عملکرد ورزشی شود. یافته های ما نشان داد حد پایین دوز نیترات غذایی به همراه ۶ گرم از اسیدهای آمینه، برای تحریک مسیرهای وابسته و غیروابسته به آنزیم NOS موثر است؛ اما از آنجا که این دوز در حد پایینی دامنه پیشنهادی قرار دارد، احتمالاً برای غلبه ایجاد تغییرات معناداری عملکردی در «مردان تمرین کرده» که در شاخص زمان رسید به واماندگی نمایان شود، ناکافی بوده است. ممکن است ورزشکاران تمرین کرده به دلیل سازگاری های عروقی بالا، برای تجربه اثرات بهبود عملکرد به دوزهای بیشتر نیترات و در دوره های چند روزه نیاز داشته باشند. ورزشکاران تمرین کرده معمولاً سازگاری های قلبی-عروقی، میتوکندریایی و آنزیمی توسعه یافته ای دارند. در مقایسه با افراد غیر فعال، در این افراد دامنه بهبود عملکردی ناشی از مداخلات حاد محدودتر است.

از دیگر یافته های این پژوهش تغییرات لاکتات سرم بود بطوریکه پس از فعاليت ورزشي وامانده ساز لاکتات سرم افزايش يافت. با افزايش شدت فعاليت ورزشي وابستگي به تأمين انرژي بی هوازی و در نتیجه تولید اسیدلاکتیک افزایش می یابد که در نتیجه غلظت لاکتات خون نیز بیشتر می شود. با این حال، مصرف مکمل بر پاسخ لاکتات سرم به فعاليت ورزشي تاثير نداشت. یافته های پژوهش حاضر با نتایج ویلکرسون و همکاران (۲۰۱۲) که تأثیر مصرف حاد مکمل حاوی نیترات غذایی بر شاخص لاکتات خون در دوچرخه سواری تمرین کرده را مورد بررسی قرار دادند همسو بود؛ این یافته ها بیانگر آن است که مصرف حاد مکمل تأثیر معناداری بر تجمع لاکتات خون در ورزشکاران تمرین کرده ندارد (۱۹). همچنین

در مطالعهٔ مروری جونز (۲۰۱۴) عنوان شد مکمل‌یاری نیترات غذایی بر غلظت لاکتات تاثیر معناداری ندارد (۱۵). اما برخلاف یافته‌های پژوهش حاضر در مطالعهٔ ویلی و همکاران (۲۰۱۶) مشاهده شده با مصرف ۸/۲ میلی‌مول نیترات غذایی از طریق آب چغندر در ورزشکاران تیمی، سطح لاکتات سرم در پایان آزمون در گروه دریافت‌کننده مکمل به‌طور معناداری بیشتر از گروه دارونما بود. این محققین نتیجه گرفتند مصرف حاد این مکمل می‌تواند در برخی اشکال فعالیت ورزشی تناوبی برون‌ده توان را افزایش دهد (۲۱)؛ مکانیسم احتمالی این اثر به افزایش دسترسی نیتریک اکساید و بهبود جریان خون عضلانی نسبت داده شده است. از دلایل تناقض در این یافته می‌توان به تفاوت پروتکل‌های تمرینی اشاره کرد چرا که در تحقیق ویلی و همکاران (۲۰۱۶) در روزهای مختلف پروتکل‌های ورزشی اینتروال شدید (۲۴ ست دوی سرعت ۶ ثانیه‌ای؛ ۷ ست دوی سرعت ۳۰ ثانیه‌ای؛ ۶ ست دوی شدید ۶۰ ثانیه‌ای) بکار بردند که وابستگی این نوع فعالیت ورزشی به مسیرهای گلیکولیتیک بیشتر است. علاوه‌براین، در آن تحقیق مکمل آب چغندر استفاده شده از لحاظ محتوای نیترات حدود ۲ برابر بیشتر از آب چغندر استفاده شده در تحقیق حاضر بود. به نظر می‌رسد مصرف حاد دوز پایین نیترات غذایی به همراه آرژنین و سیتروالین اثر سوخت‌وسازی معناداری در مسیرهای تولید انرژی نداشته است و پیرو آن تولید لاکتات چندان تحت تاثیر قرار نگرفته است.

در پژوهش حاضر شاخص‌های عملکردی نیز بررسی و مشاهده شد با مصرف حاد ترکیب مکمل آب چغندر و ال-آرژنین و ال-سیتروالین، زمان رسیدن به واماندگی به مقدار جزئی افزایش یافت اما این تغییرات تفاوت آماری معناداری با گروه دارونما نداشت. این یافته با مطالعه ویلکرسون و همکاران (۲۰۱۲) همسو است که نشان دادند با مصرف حاد مکمل نیترات غذایی عملکرد رکاب‌زنی تایم تریل ۵۰ کیلوکتر در دوچرخه‌سواران تمرین کرده در مقایسه با دارونما تا حدی بهتر بود اما از لحاظ آماری تفاوت معنادار نبود (۱۹). همچنین در مطالعه‌ای که توسط کتل‌هوت و همکاران (۲۰۲۵)، انجام شد؛ تاثیر ترکیب مختلف نوشیدنی‌های ورزشی شامل دکستروز، ال-آرژنین، ال-سیتروالین و عصاره چغندر بر عملکرد استقامتی و شاخص‌های فیزیولوژیک در ورزشکاران تمرین کرده مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق ۲/۶ گرم پودر چغندر، ۳/۲ گرم آرژنین و ۰/۷ گرم سیتروالین مالات استفاده شد و نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد زمان رسیدن به واماندگی در گروه دریافت‌کننده ترکیب کامل مکمل‌ها نسبت به سایر شرایط افزایش داشت، اما این تفاوت از لحاظ آماری معنادار نبود (۳۰). در مقابل در مطالعه‌ای که توسط بیلی و همکاران (۲۰۰۶)، انجام شد؛ تاثیر ۱۱/۲ میلی‌مول نیترات از مصرف مکمل آب چغندر بر هزینه اکسیژن و تحمل فعالیت ورزشی شدید در مردان سالم بررسی شد و نتایج نشان داد زمان رسیدن به واماندگی در آزمون ورزشی شدید پس از مصرف مکمل به‌طور معناداری افزایش یافت (۲۹)؛ مکانیسم احتمالی این اثر به افزایش تولید نیتریک اکساید و بهبود جریان خون عضلانی نسبت داده شده است که موجب بهینه‌سازی اکسیژن‌رسانی و کاهش فشار متابولیکی در طول فعالیت شدید می‌شود. در مطالعه مروری مک‌ماهورن و همکاران (۲۰۱۶) گزارش شد مکمل آب چغندر و نیترات غذایی ممکن است باعث بهبود عملکرد استقامتی در افراد سالم شود (۳۱)؛ با این حال، احتمالاً این اثر در آزمون‌های تایم تریل و واماندگی قابل توجه نباشد. همچنین، به نظر می‌رسد اثر مکمل‌های حاوی نیترات وابسته به دوز و سطح آمادگی اولیه افراد است و در شرایط آزمونی مختلف متفاوت است، برای مثال آیتور ویریبای و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه مروری و فراتحلیل خود نشان دادند که مکمل سیتروالین تأثیر مثبتی بر عملکرد ورزشی هوازی و پیامدهای مرتبط مانند لاکتات، سینتیک جذب اکسیژن و میزان درک فشار (RPE) دارد، که احتمالاً به دلیل ارتباط آن با تولید نیتریک اکساید درون‌زا است. راثول دومینگز و همکاران (۲۰۱۷) نیز در یک مطالعه مروری آثار مکمل آب چغندر و ترکیب آب چغندر به همراه سایر مکمل‌ها را بر استقامت قلبی تنفسی در ورزشکاران بررسی کردند و نتیجه گرفتند مکمل آب چغندر می‌تواند با افزایش کارایی، استقامت قلبی تنفسی را در ورزشکاران بهبود بخشد، که این امر باعث بهبود عملکرد در فواصل مختلف، افزایش زمان رسیدن به خستگی در شدت‌های زیربیشینه و بهبود عملکرد

قلبی تنفسی در شدت‌های آستانه بی‌هوازی و حداکثر جذب اکسیژن (VO_{2max}) می‌شود (۳۲، ۳۳). با این حال، ترکیب مکمل استفاده شده در این تحقیق با دوزهای مشخص، بر زمان رسیدن به واماندگی در آزمون بیشینه تاثیر معناداری نداشت.

علی‌رغم عدم تغییر زمان رسیدن به واماندگی، شاخص‌های متوسط ضربان قلب و درک فشار تا حدودی بهبود یافتند؛ به‌طوری‌که متوسط ضربان قلب فعالیت ورزشی با مصرف مکمل ۱۴۵ ضربه در دقیقه و با مصرف دارونما ۱۵۱ ضربه در دقیقه بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد در یک عملکرد ورزشی مشابه، درک فشار از تلاش بیشینه و افزایش ضربان قلب در اثر محرک ورزشی با مصرف مکمل تا حدی کمتر بود. این یافته‌ها با مطالعه نکتا و همکاران (۲۰۲۴) که تأثیر مصرف حاد ۶/۲ میلی‌مول نیترات از طریق مکمل آب چغندر را بر شاخص ضربان قلب و ظرفیت هوازی در ورزشکاران زن استقامتی بررسی کردند همسو بود؛ نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد ضربان قلب شرکت‌کنندگان در گروه دریافت‌کننده مکمل هنگام آزمون هوازی به‌طور معناداری کمتر از گروه دارونما بود (۳۴). این تغییرات نشان می‌دهد ممکن است ترکیب مکمل‌های پیش‌ساز نیتریک اکساید از طریق اتساع عروقی و کاهش مقاومت عروقی محیطی، جریان خون و کارایی همودینامیک را تا حدی بهبود بخشد. در این راستا بیلی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند با مصرف ۱۱/۲ میلی‌مول نیترات فشار سیستولیک به‌طور معناداری کاهش یافت (۱۸). بنابراین، ممکن است با این مکمل سه‌گانه پیش‌ساز نیتریک اکساید، در یک عملکرد ورزشی مشابه متوسط پاسخ ضربان قلب تا حدی کمتر باشد. با این حال، این یافته نیاز به بررسی تحقیقات بیشتر دارد چرا که در این زمینه نتایج متناقضی نیز گزارش شده است؛ برای مثال، در مطالعه ویریایی و همکاران (۲۰۲۵)، تأثیر مصرف کوتاه‌مدت مکمل آب چغندر (۵۰۰ میلی‌گرم نیترات) و ال-سیترولین (۶ گرم) بر شاخص‌های متابولیسم انرژی در ورزشکاران نخبه قایقران بررسی شد. نتایج نشان داد مصرف حاد آب چغندر و ال-سیترولین تأثیر معناداری بر ضربان قلب ورزشکاران نخبه نداشت (۳۵). این عدم تغییر را به سازگاری‌های قلبی-عروقی بلندمدت در ورزشکاران تمرین‌کرده نسبت دادند و بیان کردند سیستم خودکار قلبی در این افراد ممکن است مانع بروز پاسخ‌های سریع به مداخلات تغذیه‌ای کوتاه‌مدت شود. همچنین مصرف مکمل به‌صورت حاد ممکن است برای ایجاد تغییرات معنادار در شاخص‌های همودینامیک در افراد ورزشکار کافی نباشد و آن‌ها به دوز بالاتری نیاز داشته باشند؛ به‌ویژه زمانی که آزمون ورزشی با شدت بالا و کوتاه‌مدت انجام می‌شود. در بررسی شاخص درک فشار، نتایج نشان داد میزان درک فشار در گروه مکمل به‌طور معناداری نسبت به گروه دارونما کاهش یافت. این یافته با مطالعه‌ای که توسط وایلی و همکاران (۲۰۱۳)، انجام شد هم‌سو بود؛ این کاهش در RPE بیانگر آن است که شرکت‌کنندگان فعالیت شدید را با احساس تلاش کمتر انجام دادند که می‌تواند به بهبود عملکرد ذهنی و افزایش تحمل تمرین منجر شود (۳۶). ممکن است مصرف این مکمل ترکیبی بر تعامل بین پاسخ‌های محیطی و پردازش سیستم عصبی مرکزی و خستگی مرکزی اثر گذاشته باشد. بهبود اکسیژن‌رسانی، کاهش تجمع متابولیت‌های خستگی‌زا، تغییر در پیام‌رسانی عصبی عروقی و کاهش بار فیزیولوژیکی ممکن است در کاهش پیام‌های مرتبط با خستگی ادراکی و احساس فشار در حین فعالیت ورزشی بیشینه نقش داشته باشد. نیتریک اکساید با بهبود جریان خون مغزی و عضلانی، ممکن است موجب کاهش تحریک گیرنده‌های محیطی و مرکزی مرتبط با خستگی می‌شود. این کاهش تحریک، به‌ویژه در گیرنده‌های گروه III و IV عضلانی (به تغییرات متابولیکی حساس هستند)، می‌تواند موجب کاهش سیگنال‌های عصبی مرتبط با خستگی و در نتیجه کاهش RPE شود. همچنین، بهبود اکسیژن‌رسانی موجب کاهش وابستگی به مسیرهای گلیکولیتیک و کاهش تولید یون‌های هیدروژن می‌شود، که نقش مهمی در احساس خستگی دارند، حتی اگر سطح متابولیت‌هایی مانند لاکتات و یون هیدروژن تغییر مشهودی نکند. مطالعه لانسلی و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد مکمل نیترات باعث کاهش RPE در فعالیت‌های زیرآستانه واماندگی شد، بدون تغییر معنادار در لاکتات، که نشان‌دهنده نقش همودینامیک و عصبی در کاهش درک ذهنی از شدت فعالیت است.

(۳۷). همچنین، مواک و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کردند مکمل‌های حاوی نیترات ممکن است از طریق بهبود عملکرد عصبی و کاهش فشار مرکزی، حتی در غیاب تغییرات متابولیکی قابل توجه، موجب کاهش RPE شوند (۳۸). در تضاد با یافته‌های پژوهش حاضر، مطالعه‌ای که توسط نیاکیرو و همکاران (۲۰۱۷)، انجام شد که اثر مصرف مکمل آب چغندر بر عملکرد تمرین تناوبی شدید در بازیکنان فوتبال ورزیده مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد مصرف حاد آب چغندر به‌عنوان منبع نیترات، تأثیر معناداری بر شاخص درک فشار در طول فعالیت هوازی نداشت. پژوهشگران این عدم تغییر را به پایداری ادراک ذهنی در ورزشکاران حرفه‌ای نسبت دادند (۳۹). بنابراین، تأثیرات مکمل‌دهی کوتاه‌مدت ممکن است خفیف و وابسته به آمادگی جسمانی افراد باشد. علاوه‌براین باید در نظر داشت علی‌رغم کاربرد گسترده شاخص درک فشار بورگ، داده‌های آن بر گزارشات فردی استوار است که ممکن است متاثر از عواملی غیر از فشار فعالیت ورزشی باشد. لذا، در تفسیر نتایج حاصل از آن ملاحظات و احتیاط بیشتری نیاز است.

در مجموع، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که مصرف حاد یک مکمل ترکیبی پیش‌از تمرین شامل پیش‌سازهای نیتریک اکساید، به طور موثری فراهمی زیستی متابولیت‌های نیتریک اکساید د سرم را در مردان تمرین‌کرده افزایش داد و با کاهش مختصر ضربان قلب و شاخص درک ذهنی فشار در طول فعالیت همراه بود. با این وجود، این پاسخ‌های بیوشیمیایی و ادراکی، به یک مزیت عملکردی ملموس تبدیل نشده و تأثیر معناداری بر زمان رسید به واماندگی نداشت. بنابراین، به نظر می‌رسد در افراد تمرین‌کرده تحریک حاد مسیرهای تولید نیتریک اکساید برای بهبود عملکرد در آزمون‌های فزاینده وامانده‌ساز کافی نیست.

تشکر و قدردانی

از همه افرادی که در طراحی و انجام این پژوهش ما را یاری کردند، تشکر می‌شود.

حمایت مالی

پژوهش حاضر هیچ‌گونه حمایت مالی از سازمان خاصی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور یکسان در این پژوهش مشارکت داشتند.

تعارض منافع

نویسندگان پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

منابع

1. Froiland K, Koszewski W, Hingst J, Kopecky L. Nutritional supplement use among college athletes and their sources of information. International journal of sport nutrition and exercise metabolism. 2004;14(1):104-20.
<https://doi.org/10.1123/ijnsnem.14.1.104>
2. Cameron M, Camic CL, Doberstein S, Erickson JL, Jagim AR. The acute effects of a multi-ingredient pre-workout supplement on resting energy expenditure and exercise performance in recreationally active females. Journal of the International Society of Sports Nutrition. 2018;15(1):1.
<https://doi.org/10.1186/s12970-017-0206-7>

3. Harty PS, Zabriskie HA, Erickson JL, Molling PE, Kerksick CM, Jagim AR. Multi-ingredient pre-workout supplements, safety implications, and performance outcomes: a brief review. *Journal of the international society of sports nutrition*. 2018;15(1):41.
<https://doi.org/10.1186/s12970-018-0247-6>
4. Bloomer RJ. Nitric oxide supplements for sports. *Strength & Conditioning Journal*. 2010;32(2):14-20.
<https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181bdaf89>
5. Percival JM, Anderson KN, Huang P, Adams ME, Froehner SC. Golgi and sarcolemmal neuronal NOS differentially regulate contraction-induced fatigue and vasoconstriction in exercising mouse skeletal muscle. *The Journal of clinical investigation*. 2010;120(3):816-26.
<https://doi.org/10.1172/JCI40736>
6. Jobgen WS, Fried SK, Fu WJ, Meininger CJ, Wu G. Regulatory role for the arginine–nitric oxide pathway in metabolism of energy substrates. *The Journal of nutritional biochemistry*. 2006;17(9):571-88.
<https://DOI: 10.1016/j.jnutbio.2005.12.001>
7. d'Uniuville NM, Blake HT, Coates AM, Hill AM, Nelson MJ, Buckley JD. Effect of food sources of nitrate, polyphenols, L-arginine and L-citrulline on endurance exercise performance: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2021;18:1-28.
<https://DOI: 10.1186/s12970-021-00472-y>
8. Poon ET-C, Iu JC-K, Sum WM-K, Wong P-S, Lo KK-H, Ali A, et al. Dietary Nitrate Supplementation and Exercise Performance: An Umbrella Review of 20 Published Systematic Reviews with Meta-analyses. *Sports Medicine*. 2025;1-19.
<https://DOI: 10.1007/s40279-025-02194-6>
9. Domínguez R, Maté-Muñoz JL, Cuenca E, García-Fernández P, Mata-Ordoñez F, Lozano-Estevan MC, et al. Effects of beetroot juice supplementation on intermittent high-intensity exercise efforts. *Journal of the international society of sports nutrition*. 2018;15(1):2.
<https://doi.org/10.1186/s12970-017-0204-9>
10. Wu G, Morris Jr SM. Arginine metabolism: nitric oxide and beyond. *Biochemical Journal*. 1998;336(1):1-17.
<https://doi.org/10.1042/bj3360001>
11. Förstermann U, Sessa WC. Nitric oxide synthases: regulation and function. *European heart journal*. 2012;33(7):829-37.
<https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehr304>
12. Lundberg JO, Weitzberg E. NO-synthase independent NO generation in mammals. *Biochemical and biophysical research communications*. 2010;396(1):39-45.
<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2010.02.136>
13. Poon ET-C, Iu JC-K, Sum WM-K, Wong P-S, Lo KK-H, Ali A, et al. Dietary Nitrate Supplementation and Exercise Performance: An Umbrella Review of 20 Published Systematic Reviews with Meta-analyses: ET-C. Poon et al. *Sports Medicine*. 2025;55(5):1213-31.
<https://doi.org/10.1007/s40279-025-02194-6>
14. d'Uniuville NM, Blake HT, Coates AM, Hill AM, Nelson MJ, Buckley JD. Effect of food sources of nitrate, polyphenols, L-arginine and L-citrulline on endurance exercise performance: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2021;18(1):76.
<https://doi.org/10.1186/s12970-021-00472-y>
15. Jones AM. Dietary nitrate supplementation and exercise performance. *Sports medicine*. 2014;44(Suppl 1):35-45.
<https://doi.org/10.1007/s40279-014-0149-y>

16. Curis E, Nicolis I, Moinard C, Osowska S, Zerrouk N, Bénazeth S, et al. Almost all about citrulline in mammals. *Amino acids*. 2005;29(3):177-205.
<https://doi.org/10.1007/s00726-005-0235-4>
17. Gonzalez AM, Townsend JR, Pinzone AG, Hoffman JR. Supplementation with nitric oxide precursors for strength performance: a review of the current literature. *Nutrients*. 2023;15(3):660.
<https://doi.org/10.3390/nu15030660>
18. Bailey SJ, Winyard P, Vanhatalo A, Blackwell JR, DiMenna FJ, Wilkerson DP, et al. Dietary nitrate supplementation reduces the O₂ cost of low-intensity exercise and enhances tolerance to high-intensity exercise in humans. *Journal of applied physiology*. 2009;107(4):1144-51.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00722.2009>
19. Wilkerson DP, Hayward GM, Bailey SJ, Vanhatalo A, Blackwell JR, Jones AM. Influence of acute dietary nitrate supplementation on 50 mile time trial performance in well-trained cyclists. *European journal of applied physiology*. 2012;112(12):4134-41.
<https://doi.org/10.1007/s00421-012-2397-6>
20. Bescos R, Ferrer-Roca V, Galilea PA, Roig A, Drobnic F, Sureda A, et al. Sodium nitrate supplementation does not enhance performance of endurance athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2012;44(12):2400-9.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182687e5c>
21. Wylie LJ, Bailey SJ, Kelly J, Blackwell JR, Vanhatalo A, Jones AM. Influence of beetroot juice supplementation on intermittent exercise performance. *European journal of applied physiology*. 2016;116(2):415-25.
<https://doi.org/10.1007/s00421-015-3296-4>
22. Gholami F, Rahmani L, Amirnezhad F, Gheraghi K. High doses of sodium nitrate prior to exhaustive exercise increases plasma peroxynitrite levels in well-trained subjects: randomized, double-blinded, crossover study. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 2019;44(12):1305-10.
<https://doi.org/10.1139/apnm-2018-0820>
23. Venables MC, Achten J, Jeukendrup AE. Determinants of fat oxidation during exercise in healthy men and women: a cross-sectional study. *Journal of applied physiology*. 2005;98(1):160-7.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00662.2003>
24. Achten J, Gleeson M, Jeukendrup AE. Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2002;34(1):92-7.
<https://doi.org/10.1097/00005768-200201000-00015>
25. Lansley KE, Winyard PG, Bailey SJ, Vanhatalo A, Wilkerson DP, Blackwell JR, et al. Acute dietary nitrate supplementation improves cycling time trial performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43(6):1125-31.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31821597b4>
26. Lane SC, Hawley JA, Desbrow B, Jones AM, Blackwell JR, Ross ML, et al. Single and combined effects of beetroot juice and caffeine supplementation on cycling time trial performance. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 2015;40(9):1939-47.
<https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0336>
27. Berjisian E, McGawley K, Saunders B, Domínguez R, Koozehchian MS, de Oliveira CVC, et al. Acute effects of beetroot juice and caffeine co-ingestion during a team-sport-specific intermittent exercise test in semi-professional soccer players: A randomized, double-blind, placebo-controlled study. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*. 2022;14(1):52.
<https://doi.org/10.1186/s13102-022-00464-7>
28. Ormsbee MJ, Bach CW, Baur DA. Pre-exercise nutrition: the role of macronutrients, modified starches and supplements on metabolism and endurance performance. *Nutrients*. 2014;6(5):1782-808.
<https://doi.org/10.3390/nu6051782>
29. Bailey SJ, Winyard P, Vanhatalo A, Blackwell JR, DiMenna FJ, Wilkerson DP, et al. Dietary nitrate supplementation reduces the O₂ cost of low-intensity exercise and enhances tolerance to high-intensity

exercise in humans. Journal of applied physiology. 2009.

<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00722.2009>

30. Ketelhut S, Moehle M, Hottenrott L. Effect of different sports drink compositions on endurance performance and substrate oxidation: a randomized, double-blind, placebo-controlled crossover study in trained athletes. Journal of the International Society of Sports Nutrition. 2025;22(1):2516004.

<https://doi.org/10.1080/15502783.2025.2516004>

31. McMahon NF, Leveritt MD, Pavey TG. The effect of dietary nitrate supplementation on endurance exercise performance in healthy adults: a systematic review and meta-analysis. Sports Medicine.

2017;47(4):735-56.

<https://doi.org/10.1007/s40279-016-0617-7>

32. Domínguez R, Cuenca E, Maté-Muñoz J, García-Fernández P, Serra-Paya N, Estevan M, et al. Effects of beetroot juice supplementation on cardiorespiratory endurance in athletes. A systematic review. Nutrients, 9 (1), 43. 2017.

<https://doi.org/10.3390/nu9010043>

33. Viribay A, Fernandez-Landa J, Castaneda-Babarro A, Collado PS, Fernandez-Lazaro D, Mielgo-Ayuso J. Effects of citrulline supplementation on different aerobic exercise performance outcomes: A systematic review and meta-analysis. Nutrients. 2022;14(17):3479.

<https://doi.org/10.3390/nu14173479>

34. Neteca J, Veseta U, Liepina I, Volgemute K, Dzintare M, Babarykin D. Effect of Beetroot Juice Supplementation on Aerobic Capacity in Female Athletes: A Randomized Controlled Study. Nutrients. 2024;17:63(1).

<https://doi.org/10.3390/nu17010063>

35. Viribay A, Alcantara JM, López I, Mielgo-Ayuso J, Castañeda-Babarro A. No evidence of improvements in energy metabolism after 1 week of nitrate and citrulline co-supplementation in elite rowers. European Journal of Applied Physiology. 2025;125.(3)715-28.

<https://doi.org/10.1007/s00421-024-05636-7>

36. Wylie LJ, Kelly J, Bailey SJ, Blackwell JR, Skiba PF, Winyard PG, et al. Beetroot juice and exercise: pharmacodynamic and dose-response relationships. Journal of applied physiology. 2013.

<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00372.2013>

37. Lansley KE, Winyard PG, Fulford J, Vanhatalo A, Bailey SJ, Blackwell JR, et al. Dietary nitrate supplementation reduces the O₂ cost of walking and running: a placebo-controlled study. Journal of applied physiology. 2011;110(3):591-600.

<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01070.2010>

38. Macuh M, Knap B. Effects of nitrate supplementation on exercise performance in humans: A narrative review. Nutrients. 2021;13(9):3183.

<https://doi.org/10.3390/nu13093183>

39. Nyakayiru J, Jonvik KL, Trommelen J, Pinckaers PJ, Senden JM, Van Loon LJ, et al. Beetroot juice supplementation improves high-intensity intermittent type exercise performance in trained soccer players. Nutrients. 2017;9(3):314.

<https://doi.org/10.3390/nu9030314>