University of Birjand

Journal of Practical Studies of Biosciences in Sport Research Paper

Summer 2021, 9(18), 72-83

Received: Jan 14, 2020 Accepted: Feb 22, 2020

Journal of Practical Studies of Biosciences in Sport

The effect of simultaneous physical and brain endurance training on fatigue and exercise tolerance in active people

Hamidreza Barzegarpoor[1], Hamid Rajabi[2], Duane Button[3], Rana Fayazmilani[4]*

1. Ph.D Student, Department of Biological Science in Sport, Faculty of Sport Sciences and Health, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. Full Professor, Department of Exercise physiology, Faculty of Sport Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.
3. Full Professor, School of Human Kinetics and Recreational, Memorial University, Newfounland, Canada.
4. Assistant Professor, Department of Biological Science in Sport, Faculty of Sport Sciences and Health, Shahid Beheshti University,

Abstract

Background and Aim: It seems that the combination of brain endurance training and physical endurance training can increases endurance exercise performance throughout reducing rating of perceived exertion more than solely physical endurance training. The aim of this research was to study the effect of physical endurance training, and brain endurance training on fatigue and exercise tolerance in active people. **Materials and Methods:** 20 healthy volunteers (14 men and 6 women) were assigned into two groups as: physical endurance training + brain endurance training and physical endurance training. Both groups trained on a cycle ergometer for 60 minutes at 60-75 heart rate reserve. Whilst cycling, the brain endurance training group performed a mental exertion on a computer. Both groups trained 3-4 times a week for 24 sessions. Maximal oxygen consumption during an incremental test and exercise tolerance with constant load exhausting test were measured at pre and post training. Rating of perceived exertion and heart rate were recorded every two minutes during time to exhaustion test. Data were analyzed using mixed model analyze of variance and significant level was set as $p<0.05$. **Results:** Maximal oxygen consumption increased in both groups (p=0.01); however, for time to exhaustion variable it showed more increasing in the brain endurance training and physical endurance training group than in the physical endurance training group (p=0.01). Brain endurance training and physical endurance training group compared to the physical endurance training group indicated significantly reduction on the rating of perceived exertion during time to exhaustion test (p=0.01). **Conclusion:** The results of this study provide evidence that the combination of the brain endurance training and physical endurance training than physical endurance training can increased more endurance exercise performance throughout decrease rating of perceived exertion.

Key words: Brain training, Rating of perceived exertion, Time to exhaustion, Mental fatigue.

Cite this article:

Barzegarpoor, H. R., Rajabi, H., Button, D., & Fayazmilani, R. (2021). The effect of simultaneous physical and brain endurance training on fatigue and exercise tolerance in active people. *Journal of Practical Studies of Biosciences in Sport, 9***(18), 72-83.**

***Corresponding Author, Address: Department Biological Science in sport, Faculty of Sport Sciences and Health, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran;**

Email: r_milani@sbu.ac.ir

https://doi.org/10.22077/JPSBS.2020.3110.1540

نشریه مطالعات کاربردی علوم زیستی در ورزش مقاله پژوهشی
تابستان ۱۴۰۰، دوره ۹، شماره ۱۸، ص ۸۳-۷۲
تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۰۳
نشریه مطالعات کاربردی علوم زیستی در ورزش
دانشگاه بیرجند

تاثیر هم‌زمان تمرین استقامتی جسمانی و مغزی بر میزان خستگی و تحمل ورزشی افراد فعال

حمیدرضا برزگرپور[۱]، حمید رجبی[۲]، دوئن باتون[۳]، رعنا فیاض میلانی[۴*]

۱. دانشجوی دکتری فیزیولوژی ورزش، گروه علوم زیستی در ورزش، دانشکده علوم ورزشی و تندرستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲. استاد گروه فیزیولوژی ورزش، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۳. استاد گروه فیزیولوژی ورزش، دانشکده حرکت و تفریحات انسانی، دانشگاه مموریال، نیوفونلاند، کانادا.
۴. استادیار گروه علوم زیستی در ورزش، دانشکده علوم ورزشی ورزشی و تندرستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: به نظر می رسد ترکیب تمرین مغزی و تمرین جسمانی بدلیل کاهش میزان درک تلاش در حین عملکرد استقامتی، از تمرین جسمانی تنها موثرتر است. بر همین اساس هدف از تحقیق حاضر بررسی تاثیر تمرین استقامتی جسمانی به همراه تمرین مغزی بر میزان خستگی و تحمل ورزشی افراد فعال بود. **روش تحقیق:** تعداد ۲۰ داوطلب سالم (۱۴ مرد و ۶ زن) به دو گروه تمرین استقامتی جسمانی+تمرین استقامتی مغزی و تمرین استقامتی جسمانی تقسیم شدند. دو گروه در هر جلسه ۶۰ دقیقه با شدت ۷۵-۶۰ درصد ضربان قلب ذخیره روی چرخ کارسنج رکاب زدند. گروه تمرین مغزی در حین رکاب زدن یک تلاش ذهنی با کامپیوتر را نیز انجام دادند. دو گروه هر هفته ۳ تا ۴ جلسه به مدت ۲۴ جلسه تمرین کردند. حداکثر اکسیژن مصرفی با استفاده از یک آزمون فزآینده و تحمل ورزشی افراد با استفاده از یک آزمون وامانده‌ساز با بار ثابت، قبل و بعد از دوره تمرین اندازه‌گیری شد. درک تلاش و ضربان قلب در طول آزمون زمان رسیدن به واماندگی ثبت شد. داده‌ها با روش آماری تحلیل واریانس با عامل بین گروهی در سطح معنی داری ۰/۰۵ >p مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. **یافته‌ها:** حداکثر اکسیژن مصرفی در هر دو گروه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (p=۰/۰۱). با این وجود، زمان رسیدن به واماندگی در گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی نسبت به گروه تمرین استقامتی جسمانی افزایش معنی‌دار بیشتری پیدا کرد (p=۰/۰۱). به علاوه، تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی نسبت به تمرین استقامتی جسمانی تنها، میزان درک تلاش در آزمون وامانده‌ساز را به‌طور معنی‌داری کاهش داد (p=۰/۰۱). **نتیجه گیری:** نتایج این تحقیق نشان می‌دهد ترکیب تمرین مغزی و جسمانی از طریق کاهش درک تلاش بیشتر، کارآیی بهتری برای افزایش عملکرد استقامتی نسبت به تمرین جسمانی دارد.

واژهای کلیدی: تمرین مغزی، درک تلاش، زمان رسیدن به واماندگی، خستگی ذهنی.

*نویسنده مسئول، آدرس: تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم ورزشی ورزشی و تندرستی، گروه علوم زیستی در ورزش؛
پست الکترونیک: r_milani@sbu.ac.ir
https://doi.org/10.22077/JPSBS.2020.3110.1540

مقدمه

محدودیت در عملکرد هنگام انجام فعالیت‌های ورزشی به عوامل متعدد فیزیولوژیکی و روانی وابسته است. یکی از این عوامل مهم، خستگی است که پدیده‌ای روانی- فیزیولوژیکی[1] است (انوکا[2] و دیگران، ۲۰۱۶). دانشمندان علوم ورزشی خستگی را به عنوان کاهش در توانایی و کارآیی جسمانی و ذهنی تعریف می‌کنند که به دو دسته خستگی جسمانی و ذهنی تقسیم می‌شود (تاناکا[3] و دیگران، ۲۰۱۲). انجام فعالیت‌های ورزشی منجر به خستگی جسمانی (تاناکا و دیگران، ۲۰۱۲) و انجام تلاش‌ذهنی طولانی مدت، موجب خستگی ذهنی می‌شود که با احساس بی حالی و کاهش سطح انرژی همراه است (بکسم[4] و دیگران، ۲۰۰۸).

انجام فعالیت‌های ذهنی و جسمانی مسیرهای مشترک عصبی را درگیر می‌کنند (مهتا و پاراسورامان[5] ، ۲۰۱۴). هم‌چنین مسیرهای مشترک عصبی بین خستگی ذهنی و جسمانی هم وجود دارد که شامل مدارهای عصبی تسهیلی[6] و مهاری[7] می‌شوند و انجام هم‌زمان این دو فعالیت، ممکن است شاخص‌ها را افزایش دهد. مسیر تسهیلی شامل بخش‌های سیستم لیمبیک، عقده‌های قاعده‌ای[8] ، قشر اربیتوفرونتال[9] و قشر کمربند قدامی[10] (ACC)؛ و مدار مهاری متشکل از قشر اینسولار[11] (IC) و قشر کمربند خلفی[12] (PCC) است (ایشی[13] و دیگران، ۲۰۱۴؛ تاناکا و دیگران، ۲۰۱۲). تحقیقات نشان می‌دهند که انجام فعالیت جسمانی (جوآنین[14] و دیگران، ۲۰۰۹) و ذهنی (کوک[15] و دیگران، ۲۰۰۷) خسته کننده باعث افزایش فعالیت این مسیرها می‌شود که همراه با افزایش گزارش خستگی توسط آزمودنی بوده است (ایشی و دیگران، ۲۰۱۴). بر اساس گزارش ها، انجام ۴۵ دقیقه فعالیت ذهنی به‌صورت هم‌زمان با پروتکل جسمانی رکاب زدن به مدت ۴۵ دقیقه با شدت ۶۵ درصد حداکثر توان خروجی، باعث افزایش معنی‌دار شاخص هایی همچون درک تلاش در حین فعالیت، کورتیزول، پرولاکتین و شاخص‌های پرسشنامه ناسا[16] بعد از فعالیت نسبت به یک جلسه فعالیت جسمانی رکاب زدن تنها (کنترل) می‌شود (آموزی، ۲۰۱۸). هم‌چنین مهاتا و پاراسورامان (۲۰۱۴) نشان داده اند که انجام یک فعالیت ذهنی هم‌زمان با یک انقباض زیربیشینه عضلات دست، باعث کاهش اکسیژن رسانی لوب پیشانی و افزایش شاخص‌های خستگی (کورتیزول و شاخص‌های پرسشنامه ناسا)، نسبت به زمانی می شود که فقط یک انقباض زیربیشینه عضلات دست انجام شود. چاتین[17] و دیگران (۲۰۱۸) نیز نشان داده اند که انجام فعالیت ذهنی با بار ذهنی زیاد و کم در طول انقباض عضلات چهارسر ران (با شدت ۱۵ درصد حداکثر نیروی بیشینه)، موجب کاهش تحمل ورزشی نسبت به جلسه انقباض عضلات چهارسر ران (حالت کنترل) می‌شود. همه این تحقیقات نشان از آن دارند که انجام فعالیت ذهنی و جسمی به‌صورت هم‌زمان، به دلیل وجود مسیرهای مشترک عصبی، باعث فشار بیشتر در یک جلسه فعالیت و بهبود شاخص‌های خستگی نسبت به انجام فعالیت جسمانی تنها می‌شود.

دانشمندان علوم ورزشی همواره به دنبال شیوه‌های نوین تمرینی برای بهبود بیشتر عملکرد ورزشکاران در مدت زمان کوتاه هستند. تمرینات استقامتی مغزی شیوه نوینی از تمرینات است که می‌تواند با ایجاد خستگی ذهنی[18] بیشتر در هر جلسه و سازگاری ناشی از آن، میزان مقاومت افراد به خستگی را در طی یک فعالیت جسمانی یا شناختی افزایش دهد (مارکورا[19] و دیگران، ۲۰۱۵). خستگی ذهنی با انجام یک تکلیف ذهنی پیچیده[20] ایجاد می‌شود و مشخصه‌های آن بیان احساس[21]، خستگی[22] و کمبود انرژی است (بکسم و دیگران، ۲۰۰۸). هم‌چنین تلاش‌های ذهنی که خستگی ذهنی را ایجاد می‌کنند، باعث افزایش میزان فعالیت ناحیه ACC (مسئول تعیین درک تلاش در حین فعالیت‌های استقامتی می‌شوند (ویلیامسون[23] و دیگران، ۲۰۰۱) و در نتیجه، میزان درک تلاش در حین فعالیت ورزشی استقامتی نسبت به شرایط کنترل، بیشتر افزایش می‌یابد و عملکرد استقامتی افت می‌کند (پیجاوو[24] و دیگران، ۲۰۱۴).

بر اساس نظریه‌های گوناگون عملکرد استقامتی تحت تاثیر عوامل فیزیولوژیک ضربان قلب، حجم ضربه‌ای و سطح انرژی عضله[25] و عوامل روانی-زیستی[26] درک تلاش و انگیزش قرار می‌گیرد (مارکورا و دیگران، ۲۰۰۸؛ نوواکس[27] ، ۲۰۰۰). با توجه به این که انجام یک تلاش ذهنی در حین فعالیت ورزشی استقامتی، باعث افزایش فعالیت ناحیه ACC و در نتیجه افزایش میزان درک تلاش و افزایش شاخص‌های خستگی در هر جلسه نسبت به انجام یک جلسه فعالیت ورزشی استقامتی تنها می‌شود و بنا بر اصل سندرم سازگاری عمومی[28] که تکرار این جلسات در یک دوره تمرینی ممکن است

1. Psychophysiological
2. Enoka
3. Tanaka
4. Boksem
5. Mehta & Parasuraman
6. Facilitation
7. Inhibition
8. Basal ganglia
9. Orbitofrontal cortex
10. Anterior cingulate cortex
11. Insular cortex
12. Posterior cingulate cortex
13. Ishii
14. Jouanin
15. Cook
16. NASA questionnaire
17. Chatain
18. Brain fatigue
19. Marcora
20. Demanding cognitive task
21. Subjective feeling
22. Tiredness
23. Williamson
24. Pageaux
25. Musculoenergetic
26. Psychobiologic
27. Noakes
28. General adaptation syndrome

باعث ایجاد سازگاری بیشتر شود؛ هدف از مطالعه حاضر بررسی و مقایسه اثر همزمان یک دوره تمرین استقامتی جسمانی و مغزی به‌صورت هم‌زمان با اثر تمرین استقامتی جسمانی تنها بر عملکرد استقامتی افراد فعال است. فرضیه این تحقیق بر این اساس بنا شده است که انجام یک دوره تمرین استقامتی جسمانی با بهبود در توان هوازی و شاخص‌های سیستم قلبی- عروقی عملکرد استقامتی را توسعه می‌دهد (باجراموویچ[1] و دیگران، ۲۰۱۸)، و از آنجا که ساختار و عملکرد مغز در پاسخ به تمرین هوازی (کلکمب[2] و دیگران، ۲۰۰۶) و تمرین مغزی تنها تغییر می‌کند (دنگ[3] و دیگران، ۲۰۱۹)؛ احتمال می رود ترکیب تمرین جسمانی استقامتی و مغزی بتواند میزان تحمل ورزشی را از طریق کاهش میزان درک تلاش و خستگی ذهنی، بیشتر توسعه دهد.

روش تحقیق

تحقیق حاضر از نوع نیمه تجربی و با طرح پیش آزمون و پس آزمون بود. آزمودنی‌های این تحقیق شامل ۲۰ نفر (۱۴ مرد و ۶ زن) دانشجوی تربیت بدنی دانشگاه شهید بهشتی تهران با میانگین سنی ۲±۲۰ سال، قد ۸±۱۷۱ سانتی‌متر، وزن ۱۰±۷۱ کیلوگرم و اکسیژن مصرفی ۴ ± ۳۳ میلی‌لیتر در دقیقه بر کیلوگرم بودند که به‌صورت داوطلبانه به عنوان آزمودنی در این تحقیق شرکت‌کردند. ابتدا آزمودنی‌ها از لحاظ جسمی و روانی توسط پزشک معاینه شدند و مشخص شد هیچ‌کدام بیماری خاصی ندارند. برای آزمودنی‌ها همه مراحل تحقیق، پروتکل‌ها و طرح تحقیق به‌صورت شفاهی و کتبی شرح داده شد و از فواید و خطرات اجرای آزمون‌ها آگاه شدند و در نهایت، رضایت نامه کتبی را امضا کردند.. این تحقیق همه موارد اخلاق در تحقیق را رعایت کرده است و دارای کد اخلاق 97IR.SBU.ICBS/1033 از دانشگاه شهیدبهشتی تهران است. هم‌چنین به‌منظور طراحی پیشنهاد تحقیق مطالعه حاضر، مطالعات راهنمای (پایلوت[4]) زیادی انجام شد.

یک هفته قبل از آغاز دوره تمرینی، آزمودنی‌ها در دو جلسه مجزا با فاصله ۷۲ ساعت به آزمایشگاه فراخوانده شدند. در جلسه اول، شاخص‌های آنتروپومتری شامل قد و وزن با قدسنج و ترازو مدل سکا[5] اندازه گیری شد. حداکثر توان خروجی[6] و حداکثر اکسیژن مصرفی[7] بر روی چرخ کارسنج تعیین شدند. در جلسه دوم، زمان رسیدن به واماندگی طی یک آزمون با بار ثابت ۷۵ درصد حداکثر توان خروجی بر روی چرخ کارسنج، مورد سنجش قرار گرفت. سپس بر مبنای همگن سازی، آزمودنی‌ها بر اساس زمان رسیدن به واماندگی، به دو گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی و تمرین استقامتی جسمانی تنها تقسیم شدند. هر دو گروه به مدت ۲۴ جلسه با فاصله استراحتی حداقل یک روز تمرین کردند و ۷۲ ساعت پس از آخرین جلسه تمرینی، ارزیابی‌ها در شرایطی مشابه با پیش از تمرین، تکرار شد.

تعیین حداکثر توان خروجی: یک هفته قبل از شروع و ۷۲ ساعت پس از پایان دوره تمرینی، آزمودنی‌ها برای تعیین حداکثر توان خروجی، تعیین شدت آزمون وامانده‌ساز و حداکثر اکسیژن مصرفی؛ به آزمایشگاه فراخوانده شدند و پروتکل مربوطه را اجرا کردند. به‌طور خلاصه، آزمودنی‌ها پس از گرم کردن بر روی چرخ کارسنج مونارک مدل Sweden -839 به مدت ۲ دقیقه با بار کار ۵۰ وات رکاب زدند و پس از آن، به ازای هر ۲ دقیقه، ۵۰ وات به مقاومت اضافه شد تا آزمودنی‌ها به واماندگی برسند. زمانی‌که علی‌رغم تشویق کلامی آزمونگر، سرعت پدال زدن به کمتر از ۶۰ دور در دقیقه رسید، آزمون قطع شد. سپس از معادله کیوپرز[8] برای محاسبه حداکثر توان خروجی استفاده شد (کیوپرز و دیگران، ۱۹۸۵). قبل از شروع آزمون فزآینده، ارتفاع صندلی برای هر آزمودنی تنظیم و ثبت شد و در جلسات بعدی، این ارتفاع مجددا برای هر آزمودنی بکار گرفته شد. هم‌چنین برای تعیین حداکثر اکسیژن مصرفی از شیوه ثبت نفس به نفس با استفاده از دستگاه گاز آنالایزر[9] MetaLyzer3B استفاده شد و با کمک نرم‌افزار، شاخص بدست آمده در رایانه ثبت شد.

آزمون رسیدن به واماندگی: آزمودنی‌ها ۷۲ ساعت بعد از آزمون اول، مجددا به آزمایشگاه فراخوانده شدند. پس از تنظیم صندلی چرخ کارسنج به مدت سه دقیقه با بار کار ۴۰ درصد حداکثر توان خروجی، آزمودنی ها گرم کردند و در ادامه، با بار کار ثابت ۷۵ درصد حداکثر توان خروجی، رکاب زدند. چرخ کار سنج بر اساس روش هایپربولیک[10] تنظیم شد و سرعت پدال زدن به‌صورت آزادانه بین ۶۰ تا ۱۲۰ دور در دقیقه توسط آزمودنی انتخاب گردید. آزمودنی‌ها هیچ‌گونه بازخوردی از زمان سپری شده، ضربان قلب و دور رکاب‌زدن دریافت نکردند. زمان رسیدن به واماندگی از شروع رکاب زدن با بار ثابت ۷۵ درصد توان خروجی تا زمانی که سرعت پدال زنی به کمتر از ۶۰ دور در دقیقه به مدت ۵ ثانیه برسد، محاسبه شد (مارکورا و دیگران، ۲۰۰۹). حین انجام فعالیت، هر سه دقیقه میزان درک تلاش و ضربان قلب ثبت شد.

تمرین مغزی: برای انجام تمرینات مغزی از محرک خستگی ذهنی استفاده شد. خستگی ذهنی را می‌توان با انجام فعالیت شناختی (تلاش ذهنی) طولانی ایجاد کرد. در تحقیق حاضر از دو فعالیت

1. Bajramovic
2. Colcomb
3. Deng
4. Pilot study
5. Seca
6. Peak power output
7. Maximum oxygen consumption
8. Kuipers
9. Gas analyzer
10. Hyperbolic

شناختی AX-CPT[1] و فلنکر[2] برای ایجاد خستگی ذهنی در هر جلسه و انجام تمرین استقامتی مغزی استفاده شد. این دو فعالیت ذهنی باعث افزایش فعالیت ناحیه ACC مغز شده و در نتیجه، ایجاد خستگی ذهنی می‌شوند (کارتر[3] و دیگران، ۱۹۹۸؛ دارلینگ[4] و دیگران، ۲۰۱۵).

فعالیت شناختی AX-CPT: این فعالیت شناختی نیازمند هشیاری، حافظه کاری و پاسخ مهاری است و به طور موفقیت آمیزی برای ایجاد خستگی ذهنی در مطالعات ورزشی مورد استفاده قرار گرفته است (مارکورا و دیگران، ۲۰۰۹). آزمون شامل پاسخ به یک سری از حروف نشان داده شده روی صفحه کامپیوتر با استفاده از کلیک راست یا چپ موس[5] می‌باشد. عملکرد آزمون AX-CPT به صورت خودکار و بر اساس زمان عکس العمل و دقت پاسخ‌ها ثبت می شود. آزمون به صورت توالی‌هایی از ردیاب – نشانه است که در آن حرف A به عنوان نشانه[6] و حرف X به عنوان ردیاب هستند. حروف باقی مانده الفبا به عنوان نشانه‌های نامعتبر و ردیاب غیرهدف هستند، به استثنای حروف K و Y که حذف می‌شوند؛ زیرا در ظاهر به حرف X شباهت دارند. توالی حروف به صورت شبه تصادفی ارائه می‌شوند؛ به طوری که آزمایش های هدف (AX) با احتمال ۷۰% و آزمایش های غیر هدف با احتمال ۳۰% رخ می‌دهند. آزمایش های غیر هدف شامل سه تحریک هستند که به صورت مساوی (هر کدام ۱۰%) ارائه می‌شوند. ۱) BX: دارای یک نشانه نامعتبر (بدون A) قبل از هدف؛ ۲) AY: دارای یک نشانه معتبر و به دنبال آن یک ردیاب نامعتبر (بدون X)؛ و ۳) BY: دارای یک نشانه نامعتبر و به دنبال آن یک ردیاب نامعتبر (بدون A و X). برای سخت‌تر کردن آزمون، دو حرف به رنگ سفید (هر حرفی به غیر از حروف A، K، X و Y) بین نشانه و ردیاب که به رنگ قرمز هستند، نشان داده می‌شود. همه حروف (حروف بزرگ) در مرکز صفحه با پس زمینه سیاه برای مدت زمان ۳۰۰ میلی ثانیه با فونت ۲۴ (آهلوتیک[7]) ارائه می‌شوند. فاصله زمانی بین ارائه حروف ۱۲۰۰ میلی ثانیه می‌باشد. آزمودنی‌ها می‌بایست به محرک هدف، با کلیک راست و به محرک غیر هدف، با کلیک چپ موس پاسخ دهند.

فعالیت شناختی فلنکر: در روانشناسی شناختی، آزمون فلنکر مجموعه‌ای از آزمون های پاسخ مهاری[8] است که برای ارزیابی توانایی سرکوب پاسخ‌هایی که دارای یک موضوع خاص‌اند، استفاده می‌شود. هدف آزمون، می‌تواند پاسخ مستقیم به هدف (هم‌خوان)، پاسخ مخالف (ناهم‌خوان) و یا خنثی (خنثی/ فلنکر) باشد. در این آزمون‌ها، پاسخ هدف (معمولا چپ یا راست) در مرکز قرار دارد (اریکسن[9] و دیگران، ۱۹۷۴). انواع مختلف این آزمون‌ها برای اندازه‌گیری پردازش اطلاعات و توجه انتخابی مورد استفاده قرار می گیرد. محرک‌های ارائه شده در این آزمون متشکل از ۳ حالت هستند: ۱) هم‌خوان (< < < < < یا > > > > >)؛ ۲) ناهم‌خوان (> > < > > یا < < > < <)؛ و ۳) خنثی (– – < – – یا – – > – –). هر مجموعه شامل ۵ علامت نامساوی است. در این آزمون، آزمودنی‌ها باید با توجه به جهت علامت وسط که به سمت چپ یا راست است، به تحریک پاسخ دهند. این آزمون به این صورت است که هر محرک با رنگ سفید (سایز ۳۴) به مدت ۲۰۰ میلی ثانیه روی پس زمینه سیاه به نمایش درمی‌آید. فاصله بین محرک‌ها، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ یا ۱۶۰۰ میلی ثانیه است که به‌صورت متغیر و تصادفی می‌باشد. آزمودنی ها باید با سرعت و دقت به جهت مورد نظر علامت نامساوی وسط بدون توجه به دو علامت کناری، پاسخ دهند (ون کتسم[10] و دیگران، ۲۰۱۷). به منظور ارزیابی آزمون فلنکر، دقت (پاسخ های درست و اشتباه) و زمان عکس العمل مورد نظر است. به عنوان مثال، هنگامی که محرک < < < < < روی صفحه نمایش ارائه می‌شود، سمت راست به عنوان پاسخ درست، و هنگامی که محرک > > > > > ارائه شود، سمت چپ به عنوان پاسخ درست و هنگامی که محرک – – > – – ارائه شود، سمت چپ به عنوان پاسخ درست باید انتخاب می شود.

دوره تمرین: هر دو گروه ۲۴ جلسه فعالیت رکاب زدن، هر جلسه ۶۰ دقیقه با فاصله استراحتی ۴۸ ساعت بین هر جلسه را به اجرا درآوردند (پروتکل محقق ساخته بوده است). شدت فعالیت در جلسات ۸-۱ با ۶۵-۶۰ درصد حداکثر ضربان قلب ذخیره[11]، در جلسات ۱۶-۹ با ۷۰-۶۵ درصد حداکثر ضربان قلب ذخیره، و در جلسات ۲۴-۱۷ با ۷۵-۷۰ درصد حداکثر ضربان قلب ذخیره در نظر گرفته شد. از فرمول کاروونن[12] (۱۹۵۷) برای محاسبه ضربان قلب هدف استفاده شد. گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی در حین فعالیت جسمانی (در بالا توضیح داده شد)، با کمک مانیتوری که روبه‌روی آنها قرار داده شده بود، به‌صورت تناوبی در هر جلسه یکی از تلاش‌های ذهنی AX-CPT و فلنکر را انجام دادند. در حین همه جلسات، میزان درک تلاش هر ۱۰ دقیقه توسط آزمونگر ثبت شد.

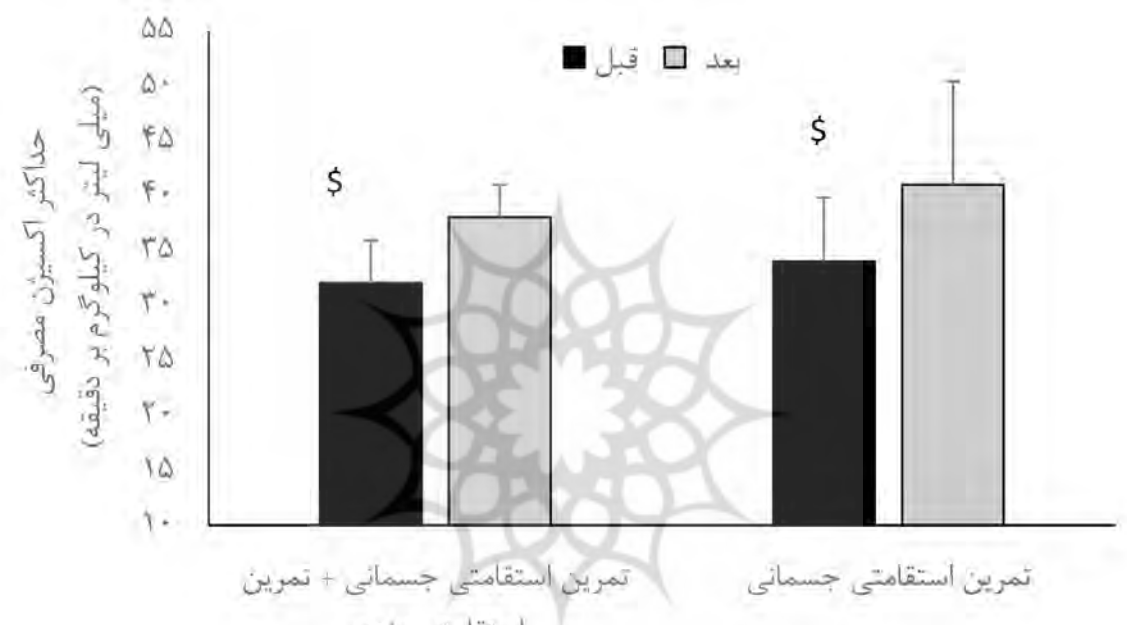
روش های آماری: داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه

1. AX- cotinuous performance test
2. Flanker
3. Carter
4. Darling
5. Mouse
6. Cue-probe
7. Ahelvetic
8. Inhibition response
9. Eriksen
10. Van Cutsem
11. Maximal reserve heart rate
12. Karvonen

۲۲ تجزیه و تحلیل شدند. ابتدا برای تعیین طبیعی بودن توزیع داده‌ها از آزمون شاپیرو-ویلک[1] استفاده شد. برای مقایسه میانگین پارامترهای زمان رسیدن به واماندگی و حداکثر اکسیژن مصرفی بین دو گروه و مقایسه تغییرات در هر گروه، از روش آماری تحلیل واریانس با اندازه های تکراری ۲*۲ با عامل بین گروهی[2] و برای پارامترهای میزان درک تلاش و ضربان قلب در جلسات آزمون، از روش آماری تحلیل واریانس با اندازه های تکراری ۲*۷ با عامل بین گروهی (با استفاده از کد نویسی) و در نهایت، برای میزان درک تلاش حین جلسات تمرین از روش آماری تحلیل واریانس اندازه های تکراری ۲*۲۴ با عامل بین گروهی استفاده گردید. سطح معنی‌داری برای تمام تحلیل‌های آماری p<۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

یافته ها

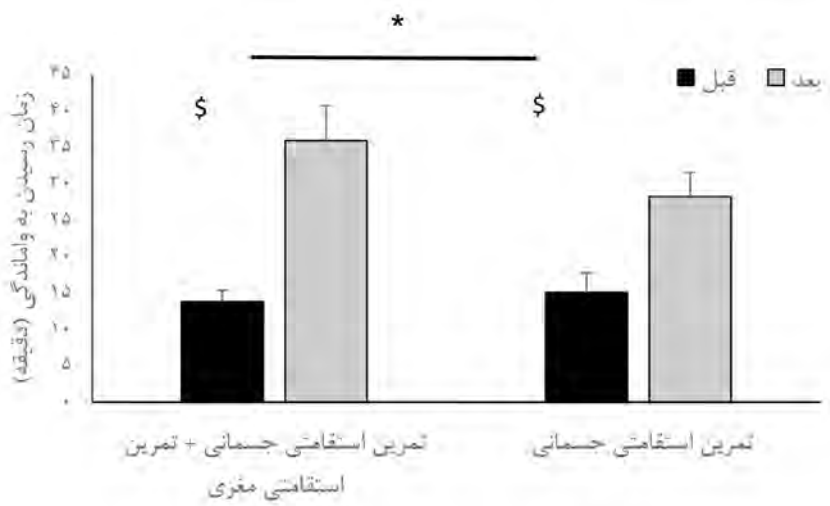
بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس با اندازه های تکراری ۲*۲ با عامل بین گروهی، میزان حداکثر اکسیژن مصرفی بعد از دوره مداخله نسبت به قبل آن به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت (p=۰/۰۱) اما این تفاوت بین دو گروه معنی‌دار (p=۰/۰۱، $F_{۲,۱۸}$=۰/۶۶) نبود (شکل ۱).



شکل ۱. مقایسه حداکثر اکسیژن مصرفی در وضعیت قبل از تمرین نسبت به بعد از تمرین در دو گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی و گروه تمرین استقامتی جسمانی $نشانه اختلاف معنی دار دو گروه در سطح p=۰/۰۱

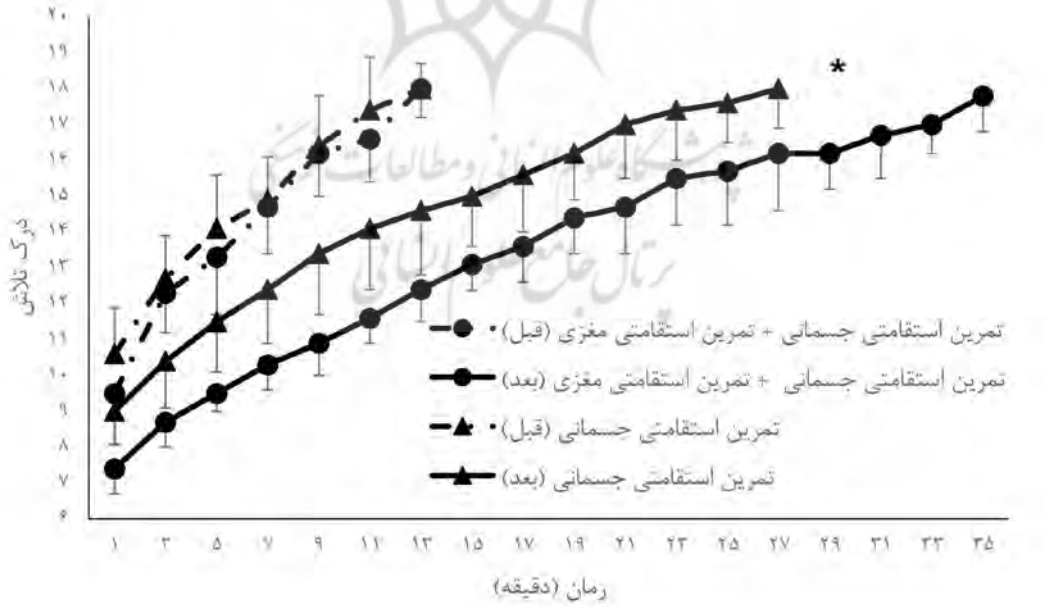
بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس با اندازه های تکراری ۲*۲ با عامل بین گروهی، میزان زمان رسیدن به واماندگی بعد از دوره مداخله نسبت به قبل آن، به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت؛ اما میزان تاثیر تمرین ورزشی در گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی (۱۷۶ درصد) نسبت به گروه تمرین استقامتی جسمانی (۸۶ درصد)، به طور معنی دار (p=۰/۰۰۱، $F_{۲,۱۸}$=۲۴/۳۰) بیشتر بود (شکل ۲).

1. Shapiro-Wilk
2. Mixed ANOVA



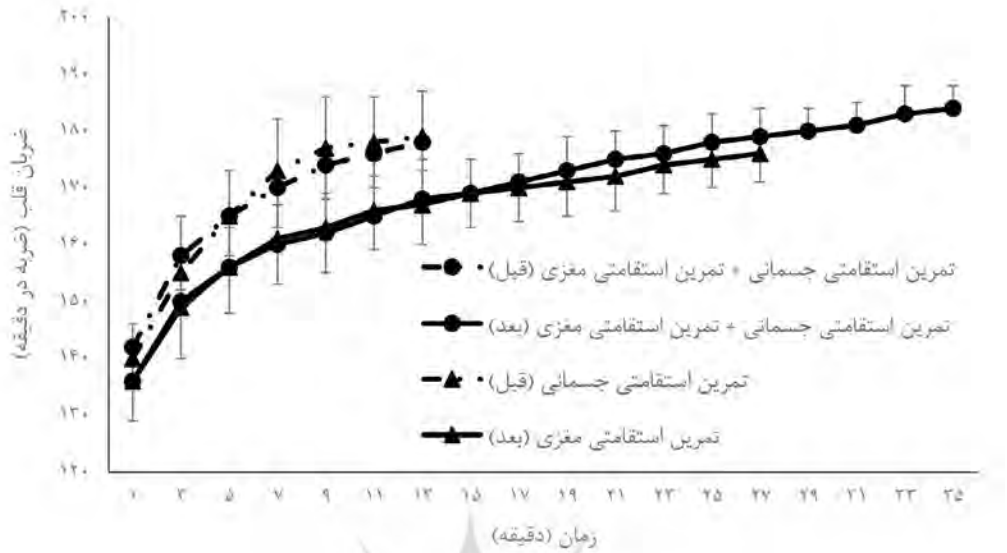
شکل ۲. مقایسه زمان رسیدن به واماندگی در وضعیت قبل از تمرین نسبت به بعد از تمرین در دو گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی و گروه تمرین استقامتی جسمانی. * نشانه اختلاف معنی‌دار بین دو گروه در سطح p= ۰/۰۰۱؛ $ نشانه اختلاف معنی‌دار پیش آزمون و پس آزمون در سطح p=۰/۰۰۱.

نتایج آزمون تحلیل واریانس با اندازه های تکراری ۷*۲ با عامل بین گروهی نشان داد که در هر دو گروه میزان درک تلاش در حین زمان های مختلف آزمون وامانده‌ساز بعد از مداخله نسبت به قبل از آن به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، اما میزان تاثیر تمرین بر درک تلاش در زمان‌های ۱، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، و ۱۳ به‌ترتیب در گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی ۲۶، ۴۱، ۴۰، ۴۲، ۴۸، ۴۳، و ۴۵ درصد و گروه تمرین استقامتی جسمانی تنها ۱۷، ۲۲، ۲۲، ۲۰، ۲۲، ۲۳، و ۲۳ درصد بود؛ تغییراتی که بین دو گروه معنی‌دار ($F_{۲,۱۸}$=۱۶/۵۰، p=۰/۰۱) بود (شکل ۳).



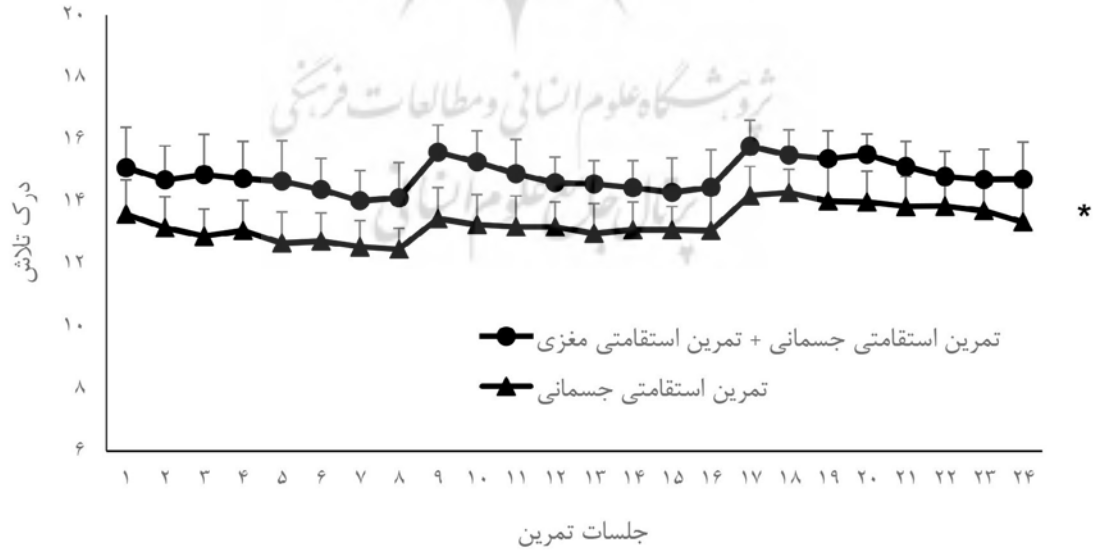
شکل ۳. مقایسه درک تلاش در حین آزمون زمان رسیدن به واماندگی در وضعیت قبل از تمرین نسبت به بعد از تمرین در دو گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی و گروه تمرین استقامتی جسمانی *نشانه اختلاف معنی داری بین دو گروه در سطح p=۰/۰۱.

بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس با اندازه های تکراری ۷*۲ با عامل بین گروهی، تفاوت معنی‌داری برای داده‌های ضربان قلب بین دو گروه تفاوت ($F_{2,18}$=۰/۷۵ ،p=۰/۳۹) یافت نشد (شکل ۴).



شکل ۴. مقایسه ضربان قلب در حین آزمون زمان رسیدن به واماندگی در وضعیت قبل از تمرین نسبت به بعد از تمرین در دو گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی و گروه تمرین استقامتی جسمانی.

بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس با اندازه های تکراری ۲۴*۲ با عامل بین گروهی، میانگین درک تلاش هر جلسه حین دوره مداخله بین دو گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی و تمرین استقامتی جسمانی تنها در همه ۲۴ جلسه دوره تمرین تفاوت معنی داری داشت؛ این در حالی بود که این تفاوت به‌طور معنی‌داری ($F_{2,18}$=۰/۵۸ ،p=۰/۰۱) در گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی بالاتر از گروه تمرین استقامتی جسمانی تنها بود (شکل ۵).



شکل ۵. مقایسه میزان درک تلاش در طول دوره تمرین در دو گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی و گروه تمرین استقامتی جسمانی * نشانه اختلاف معنی‌دار بین دو گروه در سطح p=۰/۰۱.

بحث

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که انجام تمرینات استقامتی مغزی و جسمانی به‌صورت هم‌زمان نسبت به تمرینات استقامتی جسمانی، زمان رسیدن به واماندگی را بیشتر افزایش می دهد. این افزایش قابل توجه در عملکرد استقامتی با کاهش معنی‌دار درک تلاش در گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی در هنگام انجام فعالیت استقامتی واماندەساز با بار ثابت همراه بود. این در حالی است که شاخص ضربان قلب به دنبال این دو مداخله، تغییر معنی‌داری نداشت. به علاوه، نتایج مطالعه حاضر نشان داد که زمان رسیدن به واماندگی بعد از ۲۴ جلسه تمرین در هر دو گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی و تمرین استقامتی جسمانی، در پس آزمون نسبت به پیش آزمون افزایش معنی‌داری پیدا کرده است؛ تغییری که در گروه تمرین استقامتی جسمانی + تمرین استقامتی مغزی ۱۷۶ درصد و در گروه تمرین استقامتی جسمانی ۸۶ درصد بود.

مدت زمان رسیدن به واماندگی در یک آزمون با بار ثابت نشان‌دهنده عملکرد استقامتی است (پیجاوو و دیگران، ۲۰۱۸). دو نظریه در مورد عملکرد استقامتی و زمان رسیدن به واماندگی وجود دارد. بر اساس نظریه فیزیولوژیک، شاخص‌های عروقی، متابولیکی و عصبی- عضلانی که در خستگی عضلانی نقش دارند، زمان رسیدن به واماندگی را تعیین می‌کنند (نوواکس ، ۲۰۰۰). از طرف دیگر، نظریه روانی- زیستی (مارکورا و دیگران، ۲۰۰۸) بیان می‌کند که زمان رسیدن به واماندگی بر نظریه شدت انگیزش[1] (رایت[2]، ۱۹۹۶) و تعامل بین درک تلاش و میزان انگیزش (مارکورا و دیگران، ۲۰۰۸) استوار است. بر پایه این نظریه، هر عاملی که درک تلاش را کاهش و یا میزان انگیزش را بالا ببرد، باعث بهبود زمان رسیدن به واماندگی می‌شود و هر عاملی که میزان درک تلاش را افزایش و یا میزان انگیزش را کم کند، کاهش زمان رسیدن به واماندگی را در پی خواهد داشت (مارکورا و دیگران، ۲۰۰۸). انجام تمرین هوازی باعث بهبود در عملکرد سیستم قلبی-عروقی و افزایش توان هوازی و در نتیجه بهبود عملکرد استقامتی می‌شود (هلستن[3] و دیگران، ۲۰۱۱). هم‌چنین، پیتر برگ[4] و دیگران (۲۰۰۶) نشان داده اند که انجام یک دوره تمرین هوازی در مقایسه با تمرین غیر هوازی (کشش و انعطاف)، موجب افزایش حجم بخش سفید و خاکستری مغز (از جمله ACC) و در نتیجه، بهبود عملکرد هوازی می‌شود (کلکمب[5] و دیگران، ۲۰۰۶). ACC ناحیه‌ای از مغز است که در تصمیم‌گیری و تعیین درک تلاش در طول فعالیت استقامتی درگیر است (ویلیامسون[6] و دیگران، ۲۰۰۱). با توجه به مطالب علمی بیان شده و بهبود عملکرد استقامتی در پس آزمون در هر دو گروه نسبت به پیش آزمون، هر دو نظریه فیزیولوژیک و روانی- زیستی در مورد عملکرد استقامتی، تایید می شود. اما دلیل افزایش معنی‌دار زمان رسیدن به واماندگی در گروه تمرین استقامتی جسمانی + گروه تمرین استقامتی مغزی نسبت به گروه تمرین استقامتی جسمانی، تغییر در شاخص‌های روانی- زیستی (داده‌های درک تلاش در حین آزمون رسیدن به واماندگی) تلقی می شود.

داده‌های میزان درک تلاش ثبت شده در طی هر جلسه دوره مداخله نشان می‌دهد گروه تمرین استقامتی جسمانی + گروه تمرین استقامتی مغزی نسبت به گروه تمرین استقامتی جسمانی، میزان فشار بیشتری را در هر جلسه متحمل شده است. درک تلاش بالاتر مبین این است که فعالیت ذهنی که در هر جلسه در گروه تمرین مغزی به‌کار گرفته شد، باعث ایجاد خستگی ذهنی (محرک تمرین مغزی) شده است. خستگی ذهنی از طریق افزایش میزان درک تلاش در حین فعالیت جسمانی فشار تمرین را افزایش می‌دهد. با توجه به این که مسیرهای عصبی تسهیلی و مهاری مشترکی بین فعالیت جسمانی (تاناکا و دیگران، ۲۰۱۲) و فعالیت ذهنی (ایشی و دیگران، ۲۰۱۴) در مغز وجود دارد؛ احتمالا انجام هم‌زمان فعالیت جسمانی و ذهنی باعث مصرف انرژی و فعال شدن بیشتر مسیرهای عصبی در هر جلسه شده است. مدارهای عصبی مهاری فعالیت‌های جسمانی و ذهنی، متشکل از بخش PCC و IC است. تحقیقات افزایش فعالیت PCC و IC را در هنگام فعالیت‌های جسمانی خسته‌کننده (هیلتی[7] و دیگران، ۲۰۱۱) و ذهنی (کوک و دیگران، ۲۰۰۷) نشان داده‌اند. افزایش فعالیت PCC و IC همراه با افزایش گزارش خستگی توسط آزمودنی‌ها بوده است (کوک و دیگران، ۲۰۰۷ ؛ ایشی و دیگران، ۲۰۱۴). از طرف دیگر، افزایش فعالیت عصبی ناشی از انجام تلاش ذهنی، باعث افزایش مصرف انرژی در مغز می‌شود؛ روندی که با کاهش سطوح ذخایر انرژی و افزایش تجمع آدنوزین در بخش‌هایی از مغز به‌ویژه ACC همراه است (پیجاوو و دیگران، ۲۰۱۴) و باعث افزایش درک تلاش در هر جلسه می‌شود. افزایش غلظت آدنوزین، کاهش غلظت انتقال‌دهنده عصبی دوپامین را نیز در پی دارد؛ تغییری که نتیجه آن کاهش انگیزش در هر جلسه است (موری[8] و دیگران، ۲۰۰۸) . برونزبرگر[9] و دیگران (۲۰۱۳) نشان داده اند که انجام تلاش ذهنی (ایجاد خستگی ذهنی) باعث تغییر در امواج مغزی

1. Motivational intensity theory
2. Wright
3. Hellsten
4. Pittsburgh
5. Colcombe
6. Williamson
7. Hilty
8. Morree
9. Brownsberger

و کاهش فعالیت جسمانی انجام شده بعد از تلاش ذهنی نسبت به گروه کنترل می‌شود. آن ها گزارش کردند که انجام ۹۰ دقیقه تلاش ذهنی باعث افزایش میزان امواج بتا از بخش پیشانی مغز می‌شود و میزان کار انجام شده در حین فعالیت رکاب زدن کاهش و حس خستگی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد این افزایش فشار تمرین طبق اصل سندروم سازگاری، باعث ایجاد سازگاری بیشتر شده است. در همین راستا، دنگ و دیگران (۲۰۱۹) اثر یک دوره تمرین شناختی (تمرین مغزی) را بر میزان شکل‌پذیری[1] و اتصالات بخش‌های مغز بررسی کردند. آزمودنی‌ها ۲۴ جلسه تمرین شناختی (تمرین مغزی)، هر جلسه ۶۰ دقیقه به مدت ۱۲ هفته انجام دادند. تجزیه و تحلیل داده‌های تصویربرداری مغناطیسی مغزی نشان داد که این تمرین باعث بهبود اتصالات عصبی در بخش‌هایی از مغز می‌شود. مطالعات نشان از آن دارند که انجام یک دوره تمرین جسمانی هوازی و تمرین شناختی (مغزی)، موجب افزایش اندازه ACC می‌شود (کلکمب و دیگران، ۲۰۰۶ ؛ دنگ و دیگران، ۲۰۱۹). هم‌چنین نشان داده شده است که میزان فعالیت ACC در هنگام انجام یک فعالیت ذهنی پیچیده، در افراد سالمند فعال نسبت به سالمندان غیرفعال، کمتر است (وونگ[2] و دیگران، ۲۰۱۵). این یافته ها دال بر آن هستند که انجام یک دوره تمرین جسمانی و مغزی، می‌تواند کارآیی عصبی را بهبود بخشد. این افزایش کارآیی عصبی (کاهش فعالیت نرونی و مصرف انرژی کمتر) باعث کاهش میزان درک تلاش می‌شود و بر اساس نظریه روانی - زیستی، عملکرد استقامتی بهبود می‌یابد. هم‌چنین با توجه به عدم معنی‌داری داده‌های ضربان قلب و حداکثر اکسیژن مصرفی بین دو گروه در پس آزمون، می‌توان گفت که تمرین مغزی بدون اثرگذاری بر عوامل فیزیولوژیک قلبی- عروقی، عملکرد استقامتی را به اندازه قابل توجهی بهبود می‌بخشد. بر اساس گزارش ها، خستگی ذهنی بر شاخص‌های فیزیولوژیک ضربان قلب و اکسیژن مصرفی در حین فعالیت ورزشی استقامتی اثرگذار نیست. مارکورا و دیگران (۲۰۰۹) نشان داده اند که انجام ۹۰ دقیقه تلاش ذهنی (آزمون AX_CPT) قبل از یک فعالیت فزآینده، باعث افت تحمل ورزشی و کاهش زمان رسیدن به واماندگی می‌شود. این کاهش عملکرد استقامتی همراه با افزایش بیشتر درک تلاش در طول انجام فعالیت فزآینده نسبت به جلسه کنترل بوده است؛ در حالی‌که بین شاخص‌های فیزیولوژیک (شاخص‌های قلبی- عروقی و مکانیسم‌های ماسکولوانرژتیک) دو جلسه تفاوت معنی‌داری نبود. در کل، به‌نظر می‌رسد تمرین مغزی بدون اثرگذاری بر شاخص‌های حداکثر اکسیژن مصرفی و ضربان قلب (عوامل فیزیولوژیک) و با اثرگذاری بر شاخص درک تلاش (عوامل روانی- زیستی)، عملکرد استقامتی را بهبود می‌بخشد.

نتیجه‌گیری: تمرین مغزی شیوه جدیدی از تمرین است که با استفاده از محرک خستگی ذهنی در هر جلسه و سازگاری ناشی از آن، میزان مقاومت افراد به خستگی را طی یک جلسه فعالیت ورزشی افزایش می‌دهد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که ترکیب یک دوره تمرین استقامتی جسمانی و تمرین استقامتی مغزی می‌تواند در زمان رسیدن به واماندگی در یک آزمون با بار ثابت (عملکرد استقامتی)، بهبود بیشتری ایجاد می نماید. به نظر می‌رسد این نوع تمرین با تغییر در ساختار، عملکرد و کارآیی مغز، باعث تغییر در شاخص‌های روانی- فیزیولوژیکی (درک تلاش) عملکرد استقامتی می‌شود و از طریق کاهش میزان درک تلاش، عملکرد استقامتی را توسعه می‌دهد. قابل ذکر است که از محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان به عدم همگن سازی آزمودنی‌ها بر اساس عملکرد ذهنی، عدم کنترل خواب، غذا و میزان انگیزش آزمودنی‌ها اشاره کرد.

تضاد منافع

هیچ کدام از نویسندگان تضاد منافی در این پژوهش ندارند.

قدردانی و تشکر

از تمام آزمودنی‌هایی که در این تحقیق شرکت کردند قدردانی و تشکر به عمل می‌آید. هم‌چنین از همه همکاران و مسئولین آزمایشگاه دانشگاه شهید بهشتی تهران کمال تشکر را داریم.

منابع

Amozei, H. (2018). *Effect of mental exertion along with submaximal exercise on mental fatigue and exercise tolerance in men cyclist.* **MSc Thesis, Departemant of sport biological scince, Faculty of physical education and sport scinces, Shahid Beheshti University. [Persian]**

Bajramovic, I., Habul, C., Talovic, M., Likic, S., Nurkovic, N., & Mekic, A. (2018). Effects of 8 weeks long muscular endurance training with body weight in case of recreational athletes. *Homo Sporticus*, **20(1),47-51.**

1. Plasticity
2. Wong

Boksem, M. A., & Tops, M. (2008). Mental fatigue: costs and benefits. Brain Research Reviews, 59(1), 125-139.

Brownsberger, J., Edwards, A., Crowther, R., & Cottrell, D. (2013). Impact of mental fatigue on self-paced exercise. *International Journal of Sports Medicine, 34***(12), 1029-1036.**

Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science, 280***(5364), 747-749.**

Chatain, C., Radel, R., Vercruyssen, F., Rabahi, T., Vallier, J. M., Bernard, T., & Gruet, M. (2019). Influence of cognitive load on the dynamics of neurophysiological adjustments during fatiguing exercise. *Psychophysiology, 56***(6), e13343.**

Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E., . . . Kramer, A. F. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences, 61***(11), 1166-1170.**

Cook, D. B., O'Connor, P. J., Lange, G., & Steffener, J. (2007). Functional neuroimaging correlates of mental fatigue induced by cognition among chronic fatigue syndrome patients and controls. *Neuroimage, 36***(1), 108-122.**

Deng, L., Cheng, Y., Cao, X., Feng, W., Zhu, H., Jiang, L., . . . & Li, C. (2019). The effect of cognitive training on the brain's local connectivity organization in healthy older adults. *Scientific Reports, 9***(1), 9033.**

Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2016). Translating fatigue to human performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 48***(11), 2228.**

Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & psychophysics,* **16(1), 143-149.**

Hellsten, Y., & Nyberg, M. (2011). Cardiovascular adaptations to exercise training. *Comprehensive Physiology, 6***(1), 1-32.**

Hilty, L., Jäncke, L., Luechinger, R., Boutellier, U., & Lutz, K. (2011). Limitation of physical performance in a muscle fatiguing handgrip exercise is mediated by thalamo-insular activity. *Human Brain Mapping, 32***(12), 2151-2160.**

Ishii, A., Tanaka, M., & Watanabe, Y. (2014). Neural mechanisms of mental fatigue. *Reviews in the Neurosciences, 25***(4), 469-479.**

Ishii, A., Tanaka, M., Yamano, E., & Watanabe, Y. (2014). The neural substrates of physical fatigue sensation to evaluate ourselves: a magnetoencephalography study. *Neuroscience, 261***(1), 60-67.**

Jouanin, J. C., Pérès, M., Ducorps, A., & Renault, B. (2009). A dynamic network involving M1-S1, SII-insular, medial insular, and cingulate cortices controls muscular activity during an isometric contraction reaction time task. *Human Brain Mapping, 30***(2), 675-688.**

Karvonen, M. J. (1957). The effects of training on heart rate: a longitudinal study. *Annales Medicinae Experimentalis et Biologiae Fenniae, 35***(3), 307-315.**

Kuipers, H., Verstappen, F., Keizer, H., Geurten, P., & Van Kranenburg, G. (1985). Variability of aerobic performance in the laboratory and its physiologic correlates. *International journal of sports medicine, 6***(04), 197-201.**

Marcora, S., Staiano, W., & Merlini, M. (2015). A randomized controlled trial of brain endurance training (bet) to reduce fatigue during endurance exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 47***(5S), 198.**

Marcora, S. M. (2008). Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance? *European Journal of Applied Physiology, 104***(5),9-29.**

Marcora, S. M., Bosio, A., & de Morree, H. M. (2008). Locomotor muscle fatigue increases cardiorespiratory responses and reduces performance during intense cycling exercise independently from metabolic stress. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 294***(3), R874-R883.**

Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. J*ournal of Applied Physiology, 106***(3), 857-864.**

Mehta, R. K., & Parasuraman, R. (2014). Effects of mental fatigue on the development of physical fatigue: a neuroergonomic approach. *Human Factors, 56***(4), 645-656.**

Noakes, T. (2000). Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports: Review Article, 10***(3), 123-145.**

Pageaux, B., & Lepers, R. (2018). The effects of mental fatigue on sport-related performance. *Progress in Brain Research, 240,* **291-315.**

Pageaux, B., Lepers, R., Dietz, K. C., & Marcora, S. M. (2014). Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance. *European Journal of Applied Physiology, 114***(5), 1095-1105.**

Tanaka, M., & Watanabe, Y. (2012). Supraspinal regulation of physical fatigue. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 36***(1), 727-734.**

Van Cutsem, J., De Pauw, K., Buyse, L., Marcora, S. M., Meeusen, R., & Roelands, B. (2017). Effects of mental fatigue on endurance performance in the heat. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 49***(8), 1677-1687.**

Weng, T. B., Pierce, G. L., Darling, W. G., & Voss, M. W. (2015). Differential effects of acute exercise on distinct aspects of executive function. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 47***(7), 1460-1469.**

Williamson, J., McColl, R., Mathews, D., Mitchell, J., Raven, P., & Morgan, W. (2001). Hypnotic manipulation of effort sense during dynamic exercise: cardiovascular responses and brain activation. *Journal of Applied Physiology, 90***(4), 1392-1399.**

Wong, C. N., Chaddock-Heyman, L., Voss, M. W., Burzynska, A. Z., Basak, C., Erickson, K. I., . . . Wojcicki, T. (2015). Brain activation during dual-task processing is associated with cardiorespiratory fitness and performance in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience,12***(7), 154.**

Wright, R. A. (1996). *Brehm's theory of motivation as a model of effort and cardiovascular response.* **2th Edition. Guilford Press.**