

The Effect of Different Types of Fatigue on the Brain Waves of Air Pistol Shooters (Electroencephalography Study)

Elaheh Yousefi¹ , Hasan Mohammadzadeh¹ , Zahra Fathi Rezaei² 

1. Department of Motor Behavior, Faculty of Sport Sciences, Urmia University, Urmia, Iran
2. Department of Motor Behavior, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. & Head of Brain and Movement Research Group, Research Center of Biosciences and Biotechnology (RCBB), University of Tabriz, Tabriz.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 22 August 2025

Received in revised

form 28 January

2026

Accepted 19 April

2026

Available online 22 June

2026

Keywords:

mental fatigue,
physical fatigue,
combined fatigue,
electroencephalography,
shooting.

ABSTRACT

Objective: Shooting, as a complex cognitive-motor skill, requires optimal integration of neuromuscular and cognitive performance. Since fatigue, both mental and physical, can disrupt this integration, it is of great importance to identify indicators to measure it. Brain waves, as a non-invasive representation of the functional state of the brain, can provide such an indicator. Therefore, the present study aimed to investigate the effect of mental, physical, and combined fatigue on theta, alpha, and beta brain waves of shooters.

Methods: The study sample consisted of 40 semi-professional shooters aged 18-28 who were randomly divided into four groups: mental fatigue, physical fatigue, combined fatigue, and control group. In the pre-test, all subjects fired 10 shots, and brain waves were simultaneously recorded by an electroencephalography device. Then, the mental fatigue group received a thirty-minute Stroop task, the physical fatigue group received thirty minutes of cycling, the combined group received fifteen minutes of Stroop and fifteen minutes of cycling, and the control group did not receive any intervention.

Results: In the theta wave, mental fatigue increased activity in the prefrontal and inferior frontal regions (PF and IF); physical fatigue increased activity in the prefrontal, inferior frontal, frontal, and temporal regions (PF, IF, F and T); combined fatigue increased activity in the inferior frontal region (IF) ($P \leq 0.05$). In alpha waves, mental fatigue increased activity in the prefrontal, frontal, temporal, and central (PF, F, T, and C), physical fatigue increased activity in the frontal, temporal, central and posterior temporal (F, T, C and PT) regions, combined fatigue increased activity in the temporal and central (T and C) regions ($p < 0.05$).

Conclusion: These findings support the idea that theta, alpha, and beta brain waves can be used as sensitive and reliable indicators for monitoring and diagnosing different types of fatigue in shooters.

Cite this article: Yousefi, E., Mohammadzadeh, H., FathiRezaei, Z. The Effect of Different Types of Fatigue on the Brain Waves of Air Pistol Shooters (Electroencephalography Study). *Functional Research in Sport Psychology*, 2026;3(2):25-46. [10.22091/frs.2026.13706.1099](https://doi.org/10.22091/frs.2026.13706.1099)



© The Author(s).

DOI: [10.22091/frs.2026.13706.1099](https://doi.org/10.22091/frs.2026.13706.1099)

Publisher: University of Qom.

Extended Abstract**Introduction**

Mental fatigue is a change in psychophysiological state resulting from prolonged and demanding cognitive activities that require a high level of cognitive effort. In physical fatigue, when athletes step beyond their physiological limits, they are faced with a fatigue warning that continuing to exercise in these conditions will lead to overtraining, poor recovery, decreased coordination, and reduced muscle power output. Mental and physical fatigue each independently affect athletic performance, but the combination of these two types of fatigue can have more complex consequences on learning and performing motor tasks. Performing mental and physical activities simultaneously, compared to their separate execution, leads to an increase in the level of fatigue and a significant decrease in skill and endurance performance. These combined effects are mainly due to the involvement of common neural pathways and interference in the brain's executive networks. Given the importance of identifying factors affecting the methods of training and practicing complex motor-cognitive skills, the phenomenon of fatigue is considered as a determining variable in the training process. Sports such as shooting, as a complex cognitive-motor skill, require optimal integration of neuromuscular and cognitive performance. Since fatigue, both mental and physical, can disrupt this integration, identifying indicators for measurement is of great importance. Brain waves, as a non-invasive representation of the functional state of the brain, can provide such an indicator. The main challenge of the research is to identify brain wave patterns for each type of fatigue and to separate the mutual effects of

mental and physical fatigue at the neural level. It is also questionable whether mental, physical, and combined fatigue affect the theta, alpha, and beta brain waves of shooters.

Methods**Research design**

The present study is a semi-experimental study conducted in the field and is an applied study.

Participants

The statistical population of this study is shooters aged 18-28 in Tabriz. 40 semi-professionals were randomly selected as samples.

Materials

The instruments used in this study included an electroencephalography device, the Stroop test, and a stationary bicycle.

Procedure

The samples were divided into four groups: mental fatigue (10 people), physical fatigue (10 people), combined fatigue (10 people), and control group (10 people). The subjects were randomly assigned to four groups and, as a pre-test, they performed a shooting task with ten shots at a distance of ten meters from the target, and brain waves were simultaneously recorded with an electroencephalography device. Thus, the subjects were connected to a helmet specially designed to record brain waves from the manufacturer according to the 10-20 system. All 30 channels of EEG signals were recorded throughout the duration of the task. After the pre-test, the groups received the intervention. The first group, as the mental fatigue group, underwent a thirty-minute Stroop test intervention, the physical fatigue group underwent a thirty-minute bicycle work intervention, the third group, as the combined fatigue group, underwent a combined fifteen-minute Stroop test and fifteen-minute bicycle work intervention as a counterbalance, and the control group did not receive any intervention. Immediately after

the intervention, to find out the effect of fatigue on the electrical activity of brain waves, a post-test similar to the pre-test was taken in the same session.

Data analysis

Statistical analysis was performed using SPSS version 27, Excel 2010, AEGLab, and Matlab 2019 software at a significance level of 0.05 using descriptive and inferential statistics.

Result

In theta wave, mental fatigue increased activity in the prefrontal and inferior frontal regions (PF and IF), physical fatigue increased activity in the prefrontal, inferior frontal, frontal, temporal (PF, IF, F and T), and mixed fatigue increased activity in the inferior frontal region (IF). In alpha wave, mental fatigue increased activity in the prefrontal, frontal, temporal, central (PF, F, T and C), physical fatigue increased activity in the frontal, temporal, central and posterior temporal (F, T, C and PT) regions, and mixed fatigue increased activity in the temporal and central (T and C) regions. In beta wave, mental fatigue increased activity in the inferior frontal, frontal and central (IF, F and C) regions, and physical fatigue increased activity in the prefrontal, frontal, central (PF, F and C) regions.

Discussion

Given the importance of fatigue in athletic performance, the results of this study can contribute to a deeper understanding of the interactions between fatigue and brain activity. Therefore, the aim of the present study was to investigate the effects of different types of fatigue on the brain waves of air pistol shooters. The results showed that all three types of fatigue had significant and distinct effects on the brain wave patterns of shooters. In conditions of mental fatigue, we witness an increase in theta wave activity in the frontal lobes along with a decrease in the

amplitude of alpha waves in motor-sensory areas. In contrast, physical fatigue appears with a different pattern of simultaneous increases in theta and alpha waves in wider areas of the cerebral cortex. The state of combined fatigue, as an independent phenomenon, also shows its own neural activation pattern that manifests itself in the form of selective and focused changes in specific areas of the brain. These observations are important in two respects: first, they show that objective monitoring of fatigue status using neurophysiological markers has sufficient sensitivity and specificity. Second, these findings provide a sound scientific basis for developing new approaches to exercise management and sports recovery. The use of these objective indicators in sports training can lead to the design of personalized programs and the prevention of fatigue-related disorders. The limitations of the present study include many factors, such as the amount of rest of the subjects during the day, psychological factors such as stress and anxiety during testing, genetic effects, and the principle of individual differences in the effectiveness of exercise among the subjects. Therefore, in future studies, to better control the role of individual and genetic differences, it is recommended to use more systematic methods. These methods include examining genes related to nerve growth factor along with physiological assessments. It is also recommended to conduct long-term studies to examine the effect of repeated fatigue on brain waves and the performance of athletes in different disciplines. The results of this study indicate significant neurocognitive differences in response to different types of fatigue. Data show that each form of fatigue (mental, physical, and combined) produces a specific pattern of brain electrical activity that reflects different neural mechanisms in response to fatigue stimuli.

Conclusion

The results of this study demonstrate significant neurocognitive differences in response to different types of fatigue. The data indicate that each form of fatigue (mental, physical, and combined) produces a specific pattern of brain electrical activity that reflects different neural mechanisms in response to fatigue stimuli. The present study is important because it is the first to systematically examine the effect of combined fatigue on neurophysiological indices in shooters. The findings can provide a scientific basis for developing new frameworks for fatigue management and designing training programs. This study paves the way for future studies to develop intervention protocols based on objective neuroscientific evidence and opens a new window towards optimizing performance in skilled sports.

Keywords:

Mental fatigue, physical fatigue, combined fatigue, electroencephalography, shooting.

Article message

This study provides a neural map of the distinct effects of different types of fatigue, providing a new understanding of the brain's adaptive mechanisms under conditions of exercise stress. The findings suggest that combined fatigue, as an independent neural phenomenon, generates a specific pattern of brain activity in which the brain adopts specific adaptive strategies by optimally allocating cognitive resources. This new insight could transform the existing paradigm in fatigue management in exercise and pave the way for the development of interventions based on neural mechanisms.

Author Contributions

Conceptualization, Hasan Mohammadzadeh and Zahra Fathirezaie, methodology, Elaheh Yousefi, software, Elaheh Yousefi,

validation, Elaheh Yousefi, formal analysis, Zahra Fathirezaie, investigation, Elaheh Yousefi, resources, Elaheh Yousefi, data curation, Elaheh Yousefi, writing—original draft preparation, Elaheh Yousefi, writing—review and editing, Hasan Mohammadzadeh and Zahra Fathirezaie, visualization, Zahra Fathirezaie, supervision, Hasan Mohammadzadeh, project administration, Hasan Mohammadzadeh, funding acquisition, Elaheh Yousefi.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

The data related to the article are archived at Urmia University and for access, please contact the corresponding author of the article.

Acknowledgements

We would like to express our sincere gratitude to all the athletes, coaches, and families who participated in this study, as well as the staff of the Laboratory of Motor Development and Growth, University of Tabriz. No public, commercial, or non-governmental funding sources were used in this study, and it is solely derived from the first author's PHD dissertation.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the Urmia University (Ethical code: SSRI.REC-2312-2582). The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

تاثیر انواع خستگی بر امواج مغزی تیراندازان تپانچه بادی (مطالعه الکترونسفالوگرافی)

الهه یوسفی^۱ ، حسن محمدزاده^۲ ، زهرا فتحی رضایی^۲ 

۱. گروه رفتار حرکتی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲. گروه رفتار حرکتی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. گروه پژوهشی مغز و حرکت، مرکز تحقیقات علوم و فناوری زیستی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ کلیدواژه‌ها: کارکرد اجرایی سرد، مهارت حرکتی باز و بسته، شرایط تحت فشار روانی، ورزشکاران مبتدی.	هدف: تیراندازی به عنوان یک مهارت شناختی-حرکتی پیچیده، مستلزم یکپارچگی بهینه عملکرد عصبی-عضلانی و شناختی است. از آنجا که خستگی، چه ذهنی و چه فیزیکی، می‌تواند این یکپارچگی را مختل کند، شناسایی شاخص‌ها برای سنجش آن از اهمیت بالایی برخوردار است. امواج مغزی به عنوان بازنمایی غیرتهاجمی از وضعیت کارکردی مغز، می‌توانند چنین شاخصی فراهم آورند. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر خستگی ذهنی، فیزیکی و ترکیبی بر امواج مغزی تتا، آلفا و بتا تیراندازان بود. روش‌ها: نمونه مورد مطالعه ۴۰ تیرانداز نیمه حرفه‌ای ۱۸-۲۸ سال بودند که به صورت تصادفی در چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و گروه کنترل تقسیم شدند. در پیش‌آزمون همه افراد ۱۰ تیر شلیک کردند و همزمان امواج مغزی توسط دستگاه الکترونسفالوگرافی ثبت شد. سپس گروه خستگی ذهنی سی دقیقه تکلیف استروپ، گروه خستگی فیزیکی سی دقیقه کار روی دوچرخه، گروه ترکیبی پانزده دقیقه استروپ و پانزده دقیقه دوچرخه را دریافت کردند و گروه کنترل مداخله‌ای دریافت نکرد. پس‌آزمون مطابق پیش‌آزمون گرفته شد. داده‌ها با استفاده از روش آماری تحلیل واریانس مرکب، تحلیل شدند ($p < 0/05$). یافته‌ها: در موج تتا، خستگی ذهنی باعث افزایش فعالیت آن در مناطق پیش‌پیشانی و پیشانی تحتانی (PF و IF)، خستگی فیزیکی باعث افزایش فعالیت در مناطق پیش‌پیشانی، پیشانی تحتانی، پیشانی، گیجگاهی (PF، IF، F و T)، خستگی ترکیبی باعث افزایش فعالیت در منطقه پیشانی تحتانی (IF) شد ($P \leq 0/05$). در موج آلفا، خستگی ذهنی باعث افزایش فعالیت در مناطق پیش‌پیشانی، پیشانی، گیجگاهی، مرکزی (PF، F، T و C)، خستگی فیزیکی باعث افزایش فعالیت در مناطق پیشانی، گیجگاهی، مرکزی و گیجگاهی خلفی (F، T، C و PT)، خستگی ترکیبی باعث افزایش فعالیت در مناطق گیجگاهی و مرکزی (T و C) شد ($p < 0.05$). در موج بتا خستگی ذهنی باعث افزایش فعالیت مناطق پیشانی تحتانی، پیشانی و مرکزی (IF و F و C)، خستگی فیزیکی باعث افزایش فعالیت در مناطق پیش‌پیشانی، پیشانی، مرکزی (PF و F و C) شد ($p < 0.05$). نتیجه‌گیری: باتوجه به یافته‌ها، خستگی ذهنی و فیزیکی هر یک الگوی فعالسازی متمایزی را در نواحی مختلف قشر مغز ایجاد کردند، در حالی که خستگی ترکیبی تأثیرات پیچیده‌تری نشان داد. این یافته‌ها مؤید این نکته است که امواج مغزی تتا، آلفا و بتا می‌توانند به عنوان شاخص‌های حساس و قابل اعتمادی برای پایش و تشخیص انواع مختلف خستگی در تیراندازان مورد استفاده قرار گیرند.

استناد: یوسفی، الهه؛ محمدزاده، حسن؛ فتحی رضایی، زهرا. تاثیر انواع خستگی بر امواج مغزی تیراندازان تپانچه بادی (مطالعه الکترونسفالوگرافی). مطالعات عملکردی در روانشناسی ورزشی، ۱۴۰۵، ۳ (۲)، ۲۵-۴۶.



DOI: [10.22091/frs.2026.13706.1099](https://doi.org/10.22091/frs.2026.13706.1099)

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه قم.

مقدمه

امروزه با گسترش ورزش، شناسایی عوامل اثرگذار بر روش‌های آموزش و تمرین مهارت‌های حرکتی اهمیت فراوانی یافته است. یکی از موضوعات مطرح در این زمینه، نقش خستگی^۱ در فرایند تمرین بدنی و ذهنی می‌باشد (۱). اصطلاح خستگی ذهنی^۲ عمدتاً به عنوان تغییر در حالت روانی-فیزیولوژیکی ناشی از فعالیت‌های شناختی طولانی مدت و پرتقاضا که طی آن به سطح بالایی از تلاش شناختی^۳ نیاز است تعریف می‌شود (۲). در تعریف خستگی بدنی نیز می‌توان گفت، هنگامی که ورزشکاران به سطحی فراتر از حد فیزیولوژیک خود قدم می‌گذارند، با هشدار خستگی رو به رو می‌شوند که ادامه فعالیت در این شرایط تمرین زندگی، بازیابی ضعیف، کاهش هماهنگی و کاهش برون‌ده توان عضلات را به همراه دارد (۳). خستگی فیزیولوژیک با تغییرات عملکردی محل اتصال عصب به عضله (خستگی محیطی) و یا تغییر عملکرد مغز و نخاع (خستگی مرکزی) به دست می‌آید (۴). انجام فعالیت‌های ذهنی و بدنی مسیرهای مشترک عصبی را درگیر می‌کنند. همچنین مسیرهای مشترک عصبی بین خستگی ذهنی و بدنی هم وجود دارد که شامل مدارهای عصبی تسهیلی^۴ و مهاری^۵ می‌شوند و انجام همزمان این دو فعالیت، ممکن است شاخص‌ها را افزایش دهد. مسیر تسهیلی شامل بخش‌های سیستم لیمبیک^۶، عقده‌های قاعده‌ای^۷، قشر اریتوفرونتال^۸ و قشر کمر بند قدامی^۹ و مدار مهاری متشکل از قشر اینسولا^{۱۰} و قشر کمر بند خلفی^{۱۱} است (۵).

بنابراین، خستگی ذهنی و بدنی هر یک به طور مستقل بر عملکرد ورزشی تأثیرگذارند، اما ترکیب این دو نوع خستگی می‌تواند پیامدهای پیچیده‌تری بر یادگیری و اجرای تکالیف حرکتی داشته باشد (۶). شواهد نشان می‌دهد که خستگی ذهنی با کاهش فعالیت قشر پیش‌پیشانی (PFC) و قشر کمر بند قدامی، باعث کاهش توجه، افت انگیزه و افزایش خطا در انجام تکالیف حرکتی می‌شود (۷). از سوی دیگر، خستگی بدنی از طریق تغییر در انتقال‌دهنده‌های عصبی مانند سروتونین و دوپامین و کاهش کارایی قشر حرکتی و حسی، عملکرد حرکتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۸). مطالعات نشان داده‌اند که انجام همزمان فعالیت‌های ذهنی و بدنی نسبت به اجرای جداگانه آن‌ها، منجر به افزایش سطح خستگی و کاهش قابل توجه عملکرد مهارتی و استقامتی می‌شود (۹). این اثرات ترکیبی عمدتاً ناشی از درگیری مسیرهای عصبی مشترک و تداخل در شبکه‌های اجرایی مغز است. این یافته‌ها اهمیت توجه به تعادل بین تمرین‌های ذهنی و بدنی و مدیریت خستگی در بهبود یادگیری و عملکرد تکالیف حرکتی را برجسته می‌سازد. در این رابطه، قوجازاده و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی امواج مغزی پرداختند و نتایج نشان داد که خستگی ذهنی منجر به افزایش معنادار امواج تتا در نواحی پیشانی و مرکزی و کاهش فعالیت امواج آلفا در نواحی پس‌سری می‌شود (۱۰). براساس مطالعه بستبوک^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۲) خستگی ذهنی موجب افزایش معنادار امواج تتا در نواحی پیشانی، کاهش امواج آلفا در نواحی آهیانه‌ای و تغییرات مشخص در امواج بتا می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد امواج مغزی می‌توانند به عنوان نشانگری عینی برای پایش خستگی ورزشکاران مورد استفاده قرار گیرند (۱۱). در تحقیق روبیو-مورالس^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۵) یافته‌ها حاکی از آن است که خستگی ذهنی منجر به افزایش امواج آلفا و تتا در نواحی پیشانی می‌شود، در حالی که خستگی فیزیکی با افزایش تتا در نواحی مرکزی و کاهش بتا در نواحی حسی-حرکتی همراه است. مهم‌تر اینکه، خستگی ترکیبی بیشترین تأثیر را داشته و باعث افزایش همزمان تتا در نواحی پیشانی و مرکزی همراه با کاهش آلفا در نواحی آهیانه‌ای می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که خستگی ترکیبی دارای اثرات افزایشده بر سیستم عصبی مرکزی است (۱۲). همچنین تحقیق شیبه^{۱۴} و همکاران

¹ Fatigue² Mental Fatigue³ Cognitive Effort⁴ Facilitation⁵ Inhibition⁶ Limbic System⁷ Basal Ganglia⁸ Orbitofrontal Cortex - OFC⁹ Anterior Cingulate Cortex - ACC¹⁰ Insular Cortex¹¹ Posterior Cingulate Cortex - PCC¹² Bestwick¹³ Rubio-Morales¹⁴ Xie

(۲۰۲۵)، نتایج نشان داد خستگی ذهنی منجر به افزایش معنادار توان امواج تتا در نواحی پیشانی-مرکزی و کاهش همزمان فعالیت امواج آلفا در نواحی آهیانه‌ای می‌شود (۱۳).

در نهایت، با توجه به اهمیت شناسایی عوامل مؤثر بر روش‌های آموزش و تمرین مهارت‌های حرکتی-شناختی پیچیده، پدیده خستگی به عنوان متغیری تعیین‌کننده در فرآیند تمرین مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه تأثیرات مستقل خستگی ذهنی و بدنی بر عملکرد ورزشی به طور نسبی بررسی شده، اما درک اثرات خستگی ترکیبی (ترکیب همزمان بارهای ذهنی و فیزیکی) بر شاخص‌های عینی همچنان به عنوان یک شکاف دانشی مطرح است. بر این اساس، ضرورت این پژوهش در بررسی نظام‌مند و مقایسه‌ای تأثیر همزمان سه حالت مختلف خستگی بر امواج مغزی تتا، آلفا و بتا در تیراندازان است. تیراندازی به عنوان الگویی بارز از مهارت‌های شناختی-حرکتی، بستر مناسبی برای رصد این تعاملات فراهم می‌کند. نوآوری اصلی این پژوهش در این است که می‌کوشد برای هر نوع خستگی (ذهنی، فیزیکی و ترکیبی) الگوی خاصی از فعالیت امواج مغزی ارائه دهد. این تمایزگذاری در سطح عصبی می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای طراحی پروتکل‌های تمرینی و بازیابی هوشمند، پیشگیری از تمرین‌زدگی و آسیب‌های ناشی از آن، و همچنین ارزیابی عینی ظرفیت شناختی-حرکتی ورزشکاران فراهم آورد. با این حال، اجرای این پژوهش با چالش‌ها و پرسش‌های متعددی روبرو است. اصلی‌ترین چالش، شناسایی الگوهای امواج مغزی کاملاً متمایز برای هر یک از انواع خستگی و تفکیک اثرات متقابل خستگی ذهنی و فیزیکی در سطح عصبی است. همچنین این سؤال مطرح است که آیا الگوهای عصبی شناسایی شده در تیراندازان، می‌تواند به عنوان یک مدل پایه برای بررسی خستگی در مهارت‌های شناختی-حرکتی پیچیده در نظر گرفته شود و چگونه می‌توان از یافته‌های این پژوهش در طراحی برنامه‌های تمرینی بهره برداری نمود. این پژوهش در پی آن است تا با پر کردن شکاف موجود در ادبیات پژوهشی، درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های عصبی زیربنایی انواع مختلف خستگی ارائه دهد.

روش پژوهش

طرح پژوهش

پژوهش حاضر نیمه تجربی است که به شکل میدانی انجام شده و از حیث نوع پژوهش کاربردی می‌باشد.

شرکت‌کننده‌ها

جامعه آماری این تحقیق تیراندازان ۱۸-۲۸ سال شهر تبریز است. حداقل تعداد نمونه با استفاده از نرم‌افزار جی‌پاور^۱ و با احتساب توان آماری ۰/۸، اندازه اثر ۰/۳ و فاصله اطمینان ۰/۹۵، تعداد ۴۰ نفر برای روش آماری تحلیل واریانس برآورد شد (۱۴). میانگین سنی شرکت‌کنندگان ۲۵/۶۳± سال بود. تعداد ۴۰ نفر نیمه حرفه‌ای به صورت تصادفی هدفمند به عنوان نمونه انتخاب و در چهار گروه خستگی ذهنی (۱۰ نفر)، خستگی فیزیکی (۱۰ نفر)، خستگی ترکیبی (۱۰ نفر) و گروه کنترل (۱۰ نفر) تقسیم‌بندی شدند. معیارهای ورود شرکت‌کنندگان به پژوهش شامل تیراندازان نیمه حرفه‌ای راسد دست که از سلامت جسمی و روانی برخوردار بودند و حداقل دو سال سابقه فعالیت داشتند و حائز مقام‌های برتر در مسابقات کشوری بودند، امضاء رضایت‌نامه کتبی و اجرای دستورالعمل‌های گفته شده برای ۲۴ ساعت قبل از تست بود. این دستورالعمل‌ها شامل دوش گرفتن، اجتناب از فعالیت شدید و پرخوری، عدم مصرف کافئین، سیگار، الکل بود. معیارهای خروج شرکت‌کنندگان از مطالعه نیز شامل آسیب‌دیدگی و عدم تمایل بود.

ابزار

دستگاه اکتروانسفالوگرافی اکتیو ۳۰ کاناله^۲

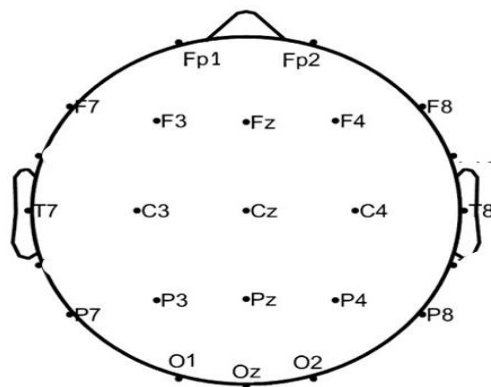
به منظور ثبت امواج مغزی در مناطق مختلف مغزی، از دستگاه اکتروانسفالوگرافی اکتیو بی‌سیم استفاده شد. این دستگاه محصول شرکت لیو فناوری هوشمند ساخت ایران است که دارای ۳۰ الکتروود فعال^۳ است. با استفاده از یک سری الکتروودها که در سطح مغز قرار می‌گیرد، فعالیت‌های الکتریکی مغز را اندازه‌گیری می‌کنند. الکتروودها به منظور جمع‌آوری ولتاژ در مکان‌های خاصی از مغز قرار می‌گیرد. قبل از اینکه الکتروودها در سطح پوست قرارگیرد، ژل هادی به منظور کاهش مقاومت روی پوست سر مالیده می‌شود. خروجی این الکتروودها به ورودی تقویت‌کننده وصل می‌شود. سپس، از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر عبور داده می‌شود. تغییر در جریان اکسیژن خون با میزان فعالیت‌های عصبی ارتباط دارد. زمانی که

^۱ G*power

^۲ Active EEG

^۳ <http://www.lliivv.com/fa/product-fa/electroencephalograph>

سلول‌های عصبی فعال است، اکسیژن حمل شده با هموگلوبین را مصرف می‌کنند. پاسخ محلی به این کاهش اکسیژن افزایش جریان خون در ناحیه‌هایی است که فعالیت‌های عصبی زیاد است. از طرف دیگر، در اثر فعالیت‌های عصبی و انتقال پیام‌های عصبی جریان الکتریکی تولید می‌شود که این جریان الکتریکی میدانی مغناطیسی تولید می‌کند. فعالیت الکتریکی امواج تتا، آلفا و بتا و فرکانس آن‌ها بر حسب میکروولت مورد بررسی قرار گرفت (۱۵). پس از ثبت و جمع‌آوری، داده‌ها، توسط نرم‌افزار متلب ۲۰۱۸ و EEGLab مورد تحلیل قرار گرفته و آرتیفکت‌ها توسط الگوریتم‌های تصحیح همچون ICA در نرم‌افزار EEGLab حذف شدند (۱۵).



شکل ۱- نمای شماتیک ۲۰ منطقه مغزی مورد استفاده از دستگاه الکترونسفالوگرافی

Figure 1- Schematic view of the 20 brain regions used by the electroencephalography device

تکلیف استروپ

تست رنگ-کلمه استروپ، یک آزمون عصب روانشناختی پرکاربرد است و ظرفیت آزمودنی را برای اندازه‌گیری سرکوب تداخل شناختی استفاده می‌شود. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که پردازش یک ویژگی محرک با پردازش همزمان دیگری تداخل داشته باشد (۱۶). تکلیف استروپ، نیازمند توجه طولانی مدت و بازداری پاسخ است و باعث ایجاد حالت خستگی ذهنی می‌شود (۱۷). از شرکت کننده خواسته شد تا رنگ کلمه را بدون توجه به معنای واقعی آن شناسایی کند. در ۵۰٪ کارآزمایی‌ها کلمه و رنگ مطابقت داشتند، درحالی‌که ۵۰٪ ناسازگار بودند و طبق یک توالی شبه تصادفی برای شرکت‌کننده نمایش داده می‌شد. سپس به شرکت‌کنندگان گفته شد کلیدی را روی صفحه فشار دهند که با رنگ متنی که روی صفحه نمایش داده می‌شود مطابقت داشته باشد. صفحه نمایش کامپیوتر ۳۳ سانتی‌متر بود و همه شرکت‌کنندگان از این لپ‌تاپ برای مشاهده تخمین زمان ۳۰ ثانیه‌ای و وظایف استروپ در طول مطالعه استفاده کردند. به مدت ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه، هر کلمه با فونت ۳۴ روی صفحه ظاهر می‌شد و سپس قبل از ظاهر شدن کلمه بعدی، صفحه خالی می‌ماند (۱۸). در این تحقیق، ما در مجموع ۱۱۰۰ کارآزمایی را برای القای خستگی ذهنی انجام دادیم که مدت تقریبی ۳۰ دقیقه برای تکمیل آن نیاز داشت. اسلیمانی و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود نشان دادند که انجام تکلیف استروپ به مدت ۳۰ دقیقه با موفقیت باعث ایجاد خستگی ذهنی می‌شود (۱۹). افزایش تعداد خطاها در تکالیف شناختی مثل تکلیف استروپ باعث اطمینان از ایجاد خستگی می‌شود.

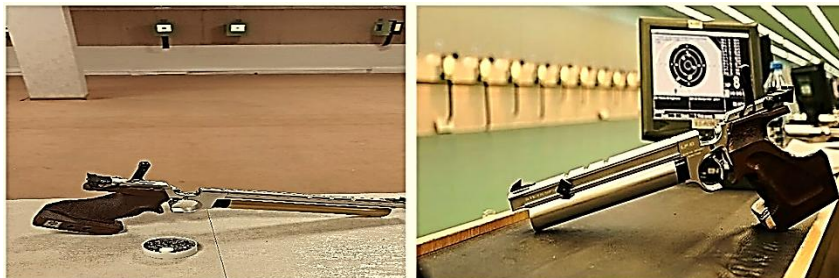
تکلیف دوچرخه

شرکت‌کنندگان در جلسه‌آشنایی اولیه یک تکلیف دوچرخه‌سواری افزایشی با ارگومتر برای تعیین حداکثر توان خروجی انجام دادند. ارتفاع ایده‌آل صندلی هر شرکت‌کننده تعیین و ثبت شد. شرکت‌کنندگان با ۵۹ وات و دور ۷۰ به مدت پنج دقیقه گرم کردند. سپس با ۶۵٪ حداکثر توان هوازی به مدت سی دقیقه دوچرخه زدند؛ به این صورت که بعد از گرم کردن با ۸۰ وات و دور ۷۰ سه دقیقه دوچرخه‌سواری کردند و هر سه دقیقه ۴۰ وات مقاومت خود را افزایش دادند تا به خستگی رسیدند. محقق به صورت شفاهی شرکت‌کنندگان را در طول آزمون تشویق می‌کرد تا تلاش واقعی و همه‌جانبه خود را نشان دهند (۲۰).

¹ Matlab 2018

پروتکل

ابتدا از ورزشکاران رضایت نامه کتبی جهت بررسی عملکرد تیراندازی و فعالیت مناطق مغز گرفته شد. سپس در صورت نداشتن مشکلات رفتاری، حرکتی، شناختی، بیماری‌های مزمن، بیماری‌های حاد، اختلالات حسی و اختلالات جسمی و ... (به صورت خوداظهاری) به عنوان آزمودنی در این تحقیق انتخاب شدند. تحقیق در سالن استاندارد تیراندازی دانشگاه تبریز که دارای ده خط سیبل الکترونیکی ده متر می‌باشد و با استفاده از تفنگ تپانچه بادی اجرا شد (شکل ۱).



شکل ۲- تپانچه و خط سیبل تیراندازی

Figure 2- Pistol and sable shooting line

آزمودنی‌ها در چهار گروه به صورت تصادفی جایگزین شدند و به عنوان پیش‌آزمون تکلیف تیراندازی به تعداد ده تیر در فاصله ده متری از سیبل انجام دادند (۲۱). همزمان امواج مغزی با دستگاه الکترونسفالوگرافی ثبت گردید. بدین ترتیب به سرآزمودنی‌ها کلاه مخصوص ثبت امواج مغزی شرکت سازنده مطابق سیستم ۱۰-۲۰ متصل شد. تمام الکترودها فعال، گراند و رفرنس روی کلاه و پشت گوش‌ها قرار داده شدند. سیگنال EEG نسبت به یک مرجع متوسط استخوان ماستوئید ثبت و نرخ نمونه‌برداری ۲۵۰ هرتز انتخاب شد (۲۲). تمامی ۳۰ کانال سیگنال‌های EEG در کل مدت اجرای تکلیف ثبت شدند. پس از ثبت و جمع‌آوری داده‌ها، آن‌ها توسط نرم‌افزار متلب ۲۰۱۸ و EEGLab مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. فیلتر باند گذر ۰/۵ تا ۵۰ هرتز انتخاب شد و آرتیفکت‌ها بصورت چشمی و همچنین توسط الگوریتم‌های تصحیح همچون ICA در نرم‌افزار EEGLab حذف شدند (۱۵). امواج مغزی مورد تحلیل، موج تتا در دامنه بین ۳ تا ۸ هرتز، موج آلفا در دامنه بین ۸ تا ۱۳ هرتز، موج بتا در دامنه بین ۱۳ تا ۳۰ هرتز (۲۳) بود. بررسی مناطق مغز در هشت منطقه شامل FP، IF، F۷، F۸، F۳، F۴، FZ، T۷، T۸، C، PT، P۷، P۸، P۳، P۴، PZ، O۱، O۲، OZ، است (۱۰). بعد از پایان پیش‌آزمون، گروه‌ها مداخله را دریافت کردند. گروه اول به عنوان گروه خستگی ذهنی، تحت مداخله سی دقیقه‌ای آزمون استروپ (۲۴)، گروه خستگی فیزیکی، تحت مداخله سی دقیقه‌ای کار بر روی دوچرخه (۲۵)، گروه سوم به عنوان گروه خستگی ترکیبی، تحت مداخله ترکیبی پانزده دقیقه‌ای آزمون استروپ و پانزده دقیقه‌ای دوچرخه به صورت کانتربالانس قرار گرفت. روش کانتربالانس به این صورت بود که نیمی از نفرات گروه ابتدا تحت خستگی ذهنی و سپس تحت خستگی فیزیکی قرار گرفتند و نیم دیگر از نفرات ابتدا تحت خستگی فیزیکی، سپس تحت خستگی ذهنی قرار گرفتند تا اثر ترتیب ارائه تمرین از بین برود و گروه کنترل مداخله‌ای دریافت نکرد. بلافاصله بعد از اعمال مداخله، برای اطلاع از تاثیر خستگی بر فعالیت الکتریکی امواج مغز، در همان جلسه پس‌آزمون مشابه پیش‌آزمون گرفته شد.

تحلیل داده‌ها

آمار توصیفی اطلاعاتی در مورد میانگین، درصدها، انحراف استاندارد متغیرهای پژوهش را فراهم کرد و آمار استنباطی تفاوت بین گروهی و درون گروهی را به روش تحلیل واریانس مرکب چهار گروه (گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل) در دو مرحله (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) برای موج تتا (۳-۸ هرتز)، موج آلفا (۸-۱۳ هرتز)، موج بتا (۳۰-۱۳ هرتز)، در هشت منطقه مغزی شامل FP، IF، F۷، F۸، F۳، F۴، FZ، T۷، T۸، C، PT، P۷، P۸، P۳، P۴، PZ، O۱، O۲، OZ، انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار اسپس اس اس نسخه ۲۷، اکسل ۲۰۱۰، ای‌ای‌جی‌لب و متلب ۲۰۱۹ در سطح معناداری ۰/۰۵ با استفاده از آمار توصیفی و استنباطی انجام گرفت.

یافته‌ها

در جدول ۱ اطلاعات مربوط به آمار توصیفی متغیرهای پژوهش و فعالیت الکتریکی امواج بر حسب میکروولت شامل میانگین و انحراف معیار در پیش‌آزمون و پس‌آزمون چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در ۸ ناحیه مغز موج تتا ارائه شده است.

جدول ۱- یافته‌های توصیفی چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در موج تتا

Table 2- Descriptive findings of the four groups of mental, physical, combined, and control fatigue in Theta wave

گروه کنترل		گروه خستگی ترکیبی				گروه خستگی فیزیکی				گروه خستگی ذهنی				مناطق		
Control group		Combined fatigue group				Physical fatigue group				Mental fatigue group				مغز		
پس آزمون		پیش آزمون		پس آزمون		پیش آزمون		پس آزمون		پیش آزمون		پس آزمون		پیش آزمون		Brain areas
Post-test	Pre-test	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	areas
۱.۱۹	۱.۸۹	۰.۸۴	۱.۹۵	۰.۸۲	۱.۲۹	۰.۵۶	۱.۰۸	۱.۵۳	۲.۰۱	۰.۴۴	۰.۸۸	۲.۰۷	۳.۲۱	۰.۸۳	۱.۰۳	PF
۱.۱۰	۲.۹۸	۰.۸۱	۲.۱۷	۱.۱۴	۲.۷۳	۰.۷۸	۱.۳۸	۱.۳۷	۲.۷۴	۰.۸۳	۱.۳۴	۱.۹۰	۳.۷۶	۱.۳۶	۱.۶۹	IF
۱.۷۲	۳.۷۶	۱.۱۹	۳.۹۱	۱.۶۵	۳.۰۶	۲.۴۰	۴.۱۵	۱.۵۳	۴.۷۵	۱.۲۶	۳.۱۰	۱.۳۰	۴.۱۳	۱.۹۱	۳.۱۸	F
۱.۶۶	۳.۵۲	۱.۳۵	۲.۶۳	۱.۱۹	۱.۹۲	۱.۸۴	۲.۵۴	۱.۶۲	۳.۴۳	۰.۸۷	۱.۷۰	۱.۹۰	۳.۳۷	۱.۴۲	۲.۰۸	T
۱.۰۷	۳.۸۲	۱.۴۷	۳.۰۲	۱.۹۴	۳.۳۶	۱.۴۲	۳.۰۱	۱.۵۳	۴.۲۰	۱.۸۳	۳.۱۷	۱.۷۸	۴.۴۷	۱.۴۷	۳.۱۲	C
۱.۳۱	۳.۷۹	۰.۹۳	۲.۶۴	۱.۳۲	۲.۳۸	۱.۱۹	۲.۱۴	۱.۴۸	۳.۰۳	۱.۲۷	۲.۰۱	۱.۸۱	۳.۲۱	۱.۶۲	۲.۳۹	PT
۲.۱۷	۴.۵۹	۱.۱۶	۳.۷۱	۱.۳۹	۳.۸۵	۱.۵۹	۳.۱۴	۲.۲۵	۴.۱۵	۲.۱۳	۳.۹۷	۲.۳۱	۴.۹۰	۱.۶۰	۳.۱۶	P
۲.۱۸	۳.۷۲	۱.۶۶	۴.۴۳	۱.۶۰	۵.۳۵	۱.۳۷	۳.۵۷	۱.۷۱	۴.۳۶	۲.۱۹	۳.۶۳	۲.۰۲	۴.۴۶	۲.۱۱	۴.۳۱	O

در جدول ۲ اطلاعات مربوط به آمار توصیفی متغیرهای پژوهش و فعالیت الکتریکی امواج بر حسب میکروولت شامل میانگین و انحراف معیار در پیش‌آزمون و پس‌آزمون چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در ۸ ناحیه موج آلفا ارائه شده است.

جدول ۲. یافته‌های توصیفی چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در فعالیت موج آلفا

Table 2- Descriptive findings of the four groups of mental, physical, combined, and control fatigue in Alpha wave

گروه کنترل		گروه خستگی ترکیبی				گروه خستگی فیزیکی				گروه خستگی ذهنی				مناطق مغز		
Control group		Combined fatigue group				Physical fatigue group				Mental fatigue group				Brain areas		
پس‌آزمون		پیش‌آزمون		پس‌آزمون		پیش‌آزمون		پس‌آزمون		پیش‌آزمون		پس‌آزمون		پیش‌آزمون		
Post-test		SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	
SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	Brain areas
۰.۷۳	۱.۶۸	۰.۹۰	۱.۲۶	۱.۳۴	۲.۴۹	۱.۹۸	۱.۹۷	۱.۶۵	۳.۰۳	۱.۲۶	۱.۸۱	۱.۳۶	۳.۲۹	۱.۰۱	۱.۴۳	PF
۰.۵۵	۱.۲۷	۰.۷۵	۲.۰۸	۱.۴۸	۳.۶۷	۱.۳۷	۲.۷۶	۱.۲۵	۱.۸۰	۱.۱۱	۲.۳۷	۱.۷۶	۲.۲۰	۱.۶۴	۲.۸۴	IF
۱.۲۶	۳.۶۱	۲.۱۳	۳.۷۶	۲.۳۷	۵.۰۵	۲.۱۳	۴.۵۶	۱۰.۸۱	۱۱.۷۱	۴.۵۵	۴.۴۰	۳.۸۷	۷.۳۹	۱.۳۳	۳.۲۴	F
۱.۱۲	۱.۹۷	۱.۷۶	۱.۶۲	۴.۹۶	۷.۰۳	۱.۵۹	۱.۶۵	۵.۳۰	۶.۰۱	۰.۷۹	۱.۱۲	۳.۸۵	۶.۱۴	۱.۰۳	۱.۸۸	T
۰.۵۷	۲.۰۶	۰.۸۰	۱.۸۱	۱.۲۳	۳.۷۱	۰.۸۲	۲.۰۶	۰.۵۸	۳.۳۳	۱.۳۳	۲.۳۱	۰.۶۱	۳.۹۳	۱.۵۷	۲.۷۷	C
۱.۰۵	۱.۷۷	۰.۴۸	۱.۳۳	۱.۶۳	۴.۰۷	۲.۰۸	۲.۲۵	۰.۹۵	۳.۰۲	۰.۷۸	۱.۸۶	۲.۳۳	۳.۶۴	۰.۵۸	۲.۶۹	PT
۰.۷۵	۱.۶۸	۱.۱۰	۱.۹۱	۱.۴۸	۳.۶۴	۱.۸۷	۲.۵۸	۱.۱۰	۳.۱۹	۱.۵۵	۲.۲۸	۰.۹۶	۳.۰۶	۱.۵۷	۳.۷۶	P
۰.۹۷	۲.۰۲	۳.۳۴	۳.۱۴	۱.۷۵	۳.۴۵	۲.۱۷	۳.۳۳	۰.۸۰	۴.۰۴	۱.۵۰	۲.۱۹	۲.۰۳	۴.۰۳	۱.۳۸	۳.۲۰	O

در جدول ۳ اطلاعات مربوط به آمار توصیفی متغیرهای پژوهش و فعالیت الکتریکی امواج بر حسب میکروولت شامل میانگین و انحراف معیار در پیش‌آزمون و پس‌آزمون چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در ۸ ناحیه موج بتا ارائه شده است.

جدول ۳- یافته‌های توصیفی چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در فعالیت موج بتا

Table 3- Descriptive findings of the four groups of mental, physical, combined, and control fatigue in Beta wave

مناطق مغز Brain areas	گروه خستگی ترکیبی															
	گروه کنترل				گروه خستگی ترکیبی				گروه خستگی فیزیکی				گروه خستگی ذهنی			
	Control group				Combined fatigue group				Physical fatigue group				Mental fatigue group			
	پس آزمون		پیش آزمون		پس آزمون		پیش آزمون		پس آزمون		پیش آزمون		پس آزمون		پیش آزمون	
Post-test	Pre-test	Post-test	Pre-test	Post-test	Pre-test	Post-test	Pre-test	Post-test	Pre-test	Post-test	Pre-test	Post-test	Pre-test	Post-test	Pre-test	
SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	
۱.۶۶	۳.۰۱	۱.۴۹	۳.۸۱	۱.۸۴	۳.۵۵	۱.۵۵	۲.۶۳	۱.۴۴	۵.۹۱	۱.۴۹	۲.۰۷	۱.۷۷	۵.۰۰	۱.۷۸	۳.۵۸	PF
۰.۶۷	۲.۲۲	۰.۷۶	۲.۸۲	۰.۸۳	۲.۳۰	۱.۱۲	۳.۰۴	۱.۶۵	۳.۶۲	۰.۸۴	۲.۴۶	۲.۶۵	۴.۲۳	۰.۶۱	۲.۲۹	IF
۱.۴۶	۳.۳۶	۲.۰۱	۳.۲۲	۲.۰۵	۳.۷۴	۱.۹۰	۳.۴۶	۳.۰۷	۴.۴۳	۱.۶۱	۲.۵۷	۲.۳۶	۶.۲۲	۱.۳۳	۳.۶۵	F
۱.۰۱	۲.۶۰	۰.۹۲	۲.۴۳	۱.۸۷	۲.۹۲	۱.۲۵	۲.۱۳	۱.۹۶	۲.۹۳	۱.۱۰	۲.۱۴	۳.۹۴	۳.۷۰	۱.۵۶	۲.۴۵	T
۱.۴۹	۲.۲۱	۰.۸۱	۱.۵۲	۰.۸۴	۲.۳۳	۰.۵۵	۱.۵۰	۲.۵۷	۲.۷۷	۰.۷۰	۱.۱۶	۱.۵۱	۴.۰۳	۰.۳۹	۱.۴۰	C
۰.۶۲	۱.۶۹	۰.۷۹	۲.۴۱	۰.۹۹	۲.۲۵	۰.۹۶	۳.۰۶	۲.۶۳	۳.۲۴	۱.۵۲	۲.۶۲	۱.۸۳	۳.۰۹	۲.۴۶	۳.۶۶	PT
۱.۴۵	۲.۸۶	۱.۲۱	۳.۱۹	۱.۵۲	۲.۴۳	۲.۱۰	۳.۲۰	۲.۳۹	۲.۵۹	۱.۷۶	۲.۷۱	۲.۲۱	۳.۹۸	۲.۸۶	۴.۸۴	P
۲.۶۱	۴.۲۸	۱.۲۵	۴.۳۲	۲.۶۲	۴.۵۰	۲.۶۶	۴.۶۳	۲.۰۸	۳.۹۵	۱.۷۳	۳.۷۶	۲.۹۲	۵.۰۰	۱.۹۶	۳.۸۳	O

در ادامه با توجه به رعایت پیش فرض‌های تحقیق شامل نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک، برابری واریانس‌ها با آزمون لون و آزمون کرویت موجولی از آمار استنباطی به روش تحلیل واریانس مرکب $4 \times 2 \times 3 \times 8$ یعنی چهار گروه (گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل) در دو مرحله (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) در سه موج (امواج تتا، آلفا و بتا) در ۸ ناحیه مغز (C, T, F, IF, FP) استفاده شد. همچنین از آزمون تعقیبی LSD برای مقایسه گروه‌ها استفاده شد.

نتایج تحلیل واریانس مرکب ۴ (گروه) $2 \times$ (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) $3 \times$ (امواج تتا، آلفا و بتا) $8 \times$ (نواحی مغز) اثر عامل‌های درون آزمودنی را به صورت جدول ۴ نشان داده است.

جدول ۴. مقادیر اثرات اصلی و تعاملی بین چهار گروه در پیش‌آزمون و پس‌آزمون امواج مغز در هشت ناحیه مغزی

Table 4. Main and interaction effect values between the four groups in the pre-test and post-test of brain waves in eight brain regions

منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقادیر آماره تحلیل واریانس	معناداری	مجازر اتای تفکیکی	توان آزمون
زمان	۲۹۲.۲۲	۳۶ و ۱	۲۹۲.۲۲	۶۳.۷۱	*۰.۰۰۱	۰.۶۹	۱.۰۰
امواج مغز	۲.۳۵	۷۲ و ۲	۱.۱۷	۰.۲۲	۰.۷۹	۰.۰۰۸	۰.۰۸
مناطق مغز	۵۹۳.۰۴	۲۵۲ و ۷	۸۴.۷۲	۲۰.۸۱	*۰.۰۰۱	۰.۴۲	۱.۰۰
گروه	۱۷۱.۷۹	۳۶ و ۳	۵۷.۲۶	۴.۴۴	*۰.۰۰۱	۰.۳۲	۰.۸۲
زمان*گروه	۱۳۱.۸۲	۳۶ و ۳	۴۳.۹۴	۹.۵۸	*۰.۰۰۱	۰.۵۰	۰.۹۹
امواج مغز*گروه	۱۷۵.۱۱	۲۵۲ و ۶	۲۹.۱۸	۵.۶۱	*۰.۰۰۱	۰.۳۷	۰.۹۹
مناطق مغز*گروه	۷۷.۳۱	۲۵۲ و ۲۱	۳.۶۸	۰.۹۰	۰.۵۸	۰.۰۸	۰.۶۹
زمان*امواج مغز	۲۸.۲۰	۷۲ و ۲	۱۴.۱۰	۵.۳۴	*۰.۰۰۸	۰.۱۶	۰.۸۲
زمان*مناطق مغز	۱۱۷.۸۲	۲۵۲ و ۷	۱۶.۸۳	۴.۴۷	*۰.۰۰۱	۰.۱۳	۰.۹۹
امواج مغز*مناطق مغز	۴۲۷.۰۴	۵۰۴ و ۱۴	۳۰.۵۰	۸.۰۹	*۰.۰۰۱	۰.۲۲	۱.۰۰
امواج مغز*گروه*مناطق مغز	۱۶۷.۲۴	۵۰۴ و ۴۲	۳.۹۸	۱.۰۵	۰.۳۸	۰.۱۰	۰.۹۵
زمان*امواج مغز*مناطق مغز	۱۸۶.۰۹	۵۰۴ و ۱۴	۱۳.۲۹	۴.۲۲	*۰.۰۰۱	۰.۱۳	۱.۰۰
زمان*گروه*مناطق مغز	۹۸.۸۰	۵۰۴ و ۲۱	۴.۷۰	۱.۲۵	۰.۲۱	۰.۱۱	۰.۸۶
زمان*گروه*امواج مغز*مناطق مغز	۱۴۹.۹۷	۵۰۴ و ۴۲	۳.۵۷	۱.۱۳	۰.۲۶	۰.۱۰	۰.۹۷

با توجه به تعامل معنادار بین عوامل در ادامه به بررسی فعالیت امواج مغز و نواحی مختلف آن در چهار گروه خستگی ذهنی، خستگی فیزیکی، خستگی ترکیبی و گروه کنترل به صورت مجزا پرداخته شد.

موج تتا

بخش اول (اثر درون گروهی)

برای بررسی اثر درون گروهی ابتدا تفاوت مراحل یادگیری (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) در چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در ۸ منطقه مغزی بررسی شد. در ادامه به بررسی اثر دو به دو آن‌ها پرداخته شد.

جدول ۵- مقایسه دوبه‌دو در پیش‌آزمون و پس‌آزمون فعالیت موج تتا در ۸ منطقه مغزی در چهار گروه

Table 5- Pairwise comparison of pre-test and post-test theta wave activity in 8 brain regions in four groups

گروه کنترل Control group			گروه خستگی ترکیبی Combined fatigue group			گروه خستگی فیزیکی Physical fatigue group			گروه خستگی ذهنی Mental fatigue group			زمان (j) time (j)	زمان (i) time (i)	مناطق مغز Brain areas
P	S _E	i-j	P	SE	i-j	P	SE	i-j	P	SE	i-j	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	Braint areas
۰/۹۱	۰/۵۰	۰/۰۵	۰/۶۷	۰/۵۰	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۵۰	۰/۱۳	۰/۰۰۱	۰/۵۰	۲/۱۷	پس آزمون	پیش آزمون	PF
.	.					*	.		*	.	-	Post-test	Pre-test	
۰/۱۸	۰/۶۰	۰/۰۸۱	*۰/۰۳	۰/۶۰	۰/۳۵	۰/۰۲	۰/۶۰	۰/۴۰	۰/۰۰۲	۰/۶۰	۲/۰۷	پس آزمون	پیش آزمون	IF
.	.					*	.		*	.	-	Post-test	Pre-test	
۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۸۱	۱/۰۹	۰/۰۵	۰/۸۱	۰/۶۵	۰/۲۵	۰/۸۱	۰/۹۴	پس آزمون	پیش آزمون	F
.	.					*	.			.	-	Post-test	Pre-test	
۰/۲۷	۰/۷۹	۰/۰۸۹	۰/۴۴	۰/۷۹	۰/۶۲	۰/۰۳	۰/۷۹	۰/۷۲	۰/۱۱	۰/۷۹	۱/۲۹	پس آزمون	پیش آزمون	T
.	.					*	.			.	-	Post-test	Pre-test	
۰/۳۳	۰/۸۰	۰/۰۸۰	۰/۶۶	۰/۸۰	۰/۳۵	۰/۲۱	۰/۸۰	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۸۰	۱/۲۵	پس آزمون	پیش آزمون	C
.	.						.			.	-	Post-test	Pre-test	
۰/۱۱	۰/۷۰	۰/۱۱۴	۰/۷۳	۰/۷۰	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۷۰	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۷۰	۰/۸۲	پس آزمون	پیش آزمون	PT
.	.						.			.	-	Post-test	Pre-test	
۰/۳۷	۰/۹۷	۰/۰۸۸	۰/۴۷	۰/۹۷	۰/۷۱	۰/۸۵	۰/۹۷	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۹۷	۱/۷۴	پس آزمون	پیش آزمون	P
.	.						.			.	-	Post-test	Pre-test	
۰/۴۶	۰/۹۶	۰/۷۱	۰/۰۷	۰/۹۶	۰/۷۸	۰/۴۵	۰/۹۶	۰/۷۲	۰/۸۷	۰/۹۶	۰/۱۵	پس آزمون	پیش آزمون	O
.	.						.			.	-	Post-test	Pre-test	

$P < 0.05$

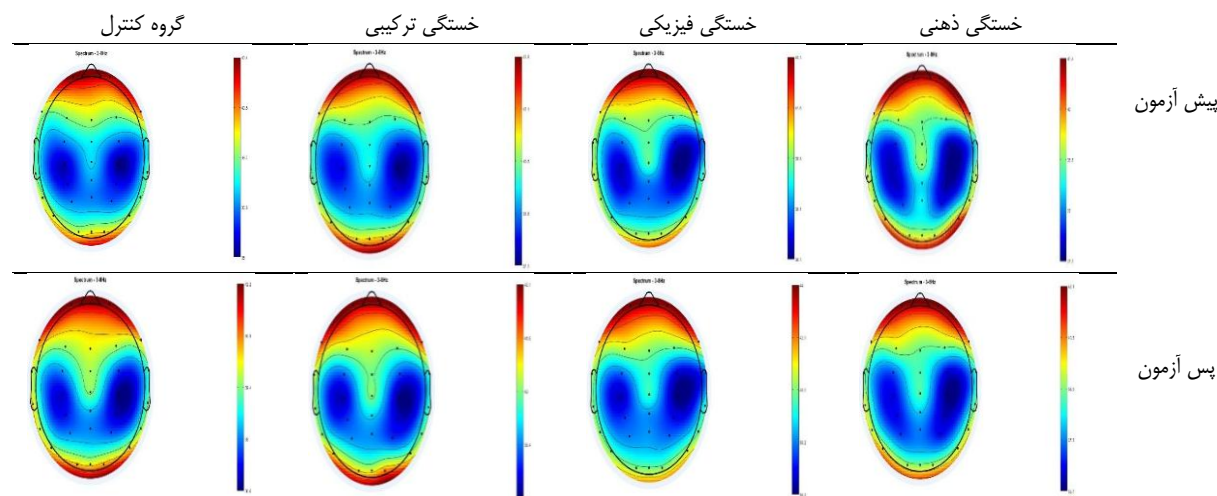
بر همین اساس نتایج اثر تعاملی در گروه خستگی ذهنی نشان داد که در منطقه PF ($\eta^2_{\text{partial}} = 0/40$ ، $p = 0/001$) تفاوت معناداری مشاهده شد. بر اساس مقادیر اثر اندازه می‌توان گفت که احتمالاً ۴۰٪ از تغییرات در منطقه PF، ۲۹٪ از تغییرات در منطقه IF، $\eta^2_{\text{partial}} = 0/29$ ، $p = 0/002$) تفاوت معناداری مشاهده شد. بر اساس مقادیر اثر اندازه می‌توان گفت که احتمالاً ۴۰٪ از تغییرات در منطقه PF، ۲۹٪ از تغییرات در منطقه IF، $\eta^2_{\text{partial}} = 0/29$ ، $p = 0/002$) تحت تأثیر خستگی ذهنی بود و مقادیر تتا در این مناطق بعد از خستگی ذهنی، افزایش فعالیت را نشان می‌دهد.

نتایج اثر تعاملی در گروه خستگی فیزیکی نشان داد که در موج تتا، در منطقه PF ($\eta^2 = .058$) توان آزمون، $p = .03$, $\partial \eta^2 = .015$ ، منطقه IF ($F_{(1,36)} = 5.44$)، $p = .02$, $\partial \eta^2 = .016$ ، توان آزمون، $p = .061$ ، منطقه F ($F_{(1,36)} = 5.0$)، $p = .012$, $\partial \eta^2 = .012$.

مقادیر اثر اندازه می‌توان گفت که احتمالاً ۱۵٪ از تغییرات در منطقه PF، ۱۶٪ از تغییرات در منطقه IF، ۱۲٪ از تغییرات در منطقه F، ۱۴٪ از تغییرات در منطقه T، تحت تأثیر خستگی فیزیکی بود و مقادیر تتا در این مناطق بعد از خستگی فیزیکی افزایش فعالیت را نشان می‌دهد. نتایج اثر تعاملی در گروه خستگی ترکیبی نشان داد که در موج تتا، در منطقه IF (توان آزمون، $p=0.03$, $\partial\eta^2=0.15$ ، $F_{(1,36)}=4.73$)، تفاوت معناداری مشاهده شد. بر اساس مقادیر اثر اندازه می‌توان گفت که احتمالاً ۱۵٪ از تغییرات در منطقه IF، تحت تأثیر خستگی ترکیبی بود و مقادیر تتا در این مناطق بعد از خستگی ترکیبی افزایش فعالیت را نشان می‌دهد. نتایج اثر تعاملی در گروه کنترل نشان داد در هیچ کدام از مناطق در موج تتا تفاوت معناداری مشاهده نشد. در واقع می‌توان گفت در گروه کنترل تغییری ایجاد نشد.

بخش دوم (تفاوت بین گروهی)

در پیش‌آزمون ($P=0.65$) بین گروه‌ها تفاوت معناداری وجود نداشت. در بررسی تفاوت دو به دوی چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در مرحله پس‌آزمون برای ۸ منطقه مغزی موج تتا نتایج نشان داد: در موج تتا بین گروه خستگی ذهنی و ترکیبی در منطقه PF ($P=0.01$) تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی ذهنی مقادیر بیشتری نسبت به گروه خستگی ترکیبی داشتند. همچنین بین گروه خستگی فیزیکی و ترکیبی در منطقه F ($P=0.03$) تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی فیزیکی مقادیر بیشتری نسبت به گروه خستگی ترکیبی داشتند.



شکل ۳. توپوگرافی دامنه موج تتا در پیش‌آزمون و پس‌آزمون چهار گروه (گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل)

Figure 3. Topography of theta wave amplitude in pre-test and post-test of 4 groups (mental fatigue, physical fatigue, combined fatigue, and control groups)

موج آلفا

بخش اول (اثر درون گروهی)

برای بررسی اثر درون گروهی ابتدا تفاوت مراحل یادگیری (پیش‌آزمون و پس‌آزمون) در چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در ۸ منطقه مغزی بررسی شد. در ادامه به بررسی اثر دو به دو آن‌ها پرداخته شد.

جدول ۶- مقایسه دوبه‌دوی در پیش‌آزمون و پس‌آزمون فعالیت موج آلفا در ۸ منطقه مغزی چهار گروه

Table 6- Pairwise comparison of pre-test and post-test alpha wave activity in 8 brain regions of four groups

گروه کنترل Control group			گروه خستگی ترکیبی Combined fatigue group			گروه خستگی فیزیکی Physical fatigue group			گروه خستگی ذهنی Mental fatigue group			زمان (j) time (j)	زمان (i) time (i)	مناطق مغز Brain areas
P	SE	i-j	P	SE	i-j	P	SE	i-j	P	SE	i-j	پس‌آزمون Post-test	پیش‌آزمون Pre-test	Bra in areas
/۵۸	/۷۴	-۰/۴۱	۰/۴۹	۰/۷۴	-۰/۵۲	۰/۱۱	/۷۴	-۱/۲۲	۰/۰۱	/۷۴	-۱/۸۶	پس‌آزمون Post-test	پیش‌آزمون Pre-test	PF
.	.						.		*	.				
/۲۶	/۷۲	۰/۸۱	۰/۲۱	۰/۷۲	-۰/۹۱	۰/۴۳	/۷۲	۰/۵۷	۰/۳۸	/۷۲	۰/۶۳	پس‌آزمون Post-test	پیش‌آزمون Pre-test	IF
.	.						.		.	.				
/۸۲	/۸۹	۰/۴۱	۰/۷۹	۱/۸۹	-۰/۴۹	*۰/۰۰۱	/۸۹	-۷/۳۰	۰/۰۳	/۸۹	-۴/۱۵	پس‌آزمون Post-test	پیش‌آزمون Pre-test	F
.	۱						۱		*	۱				
/۸۲	/۵۶	-۰/۳۵	۰/۰۰۲	۱/۵۶	-۵/۳۸	*۰/۰۰۴	/۵۶	-۴/۸۸	۰/۰۱	/۵۶	-۴/۲۶	پس‌آزمون Post-test	پیش‌آزمون Pre-test	T
.	۱		*				۱		*	۱				
/۶۱	/۴۹	-۰/۲۴	۰/۰۰۲	۰/۴۹	-۱/۶۵	*۰/۰۰۴	/۴۹	-۱/۰۱	۰/۰۲	/۴۹	-۱/۱۶	پس‌آزمون Post-test	پیش‌آزمون Pre-test	C
.	.		*				.		*	.				
/۴۱	/۵۲	-۰/۴۴	۰/۱۳	۰/۵۲	-۰/۸۱	*۰/۰۰۳	/۵۲	-۱/۱۶	۰/۰۸	/۵۲	-۰/۹۵	پس‌آزمون Post-test	پیش‌آزمون Pre-test	PT
.	.						.		.	.				
/۷۰	/۶۰	۰/۲۳	۰/۹۱	۰/۶۰	-۰/۰۶	۰/۱۵	/۶۰	-۰/۹۰	۰/۲۶	/۶۰	۰/۶۹	پس‌آزمون Post-test	پیش‌آزمون Pre-test	P
.	.						.		.	.				
/۲۹	/۰۲	۱/۰۹	۰/۹۰	۱/۰۲	-۰/۱۲	۰/۰۸	/۰۲	-۱/۸۵	۰/۴۲	/۰۲	-۰/۸۳	پس‌آزمون Post-test	پیش‌آزمون Pre-test	O
.	۱						۱		.	۱				

P≤0/05

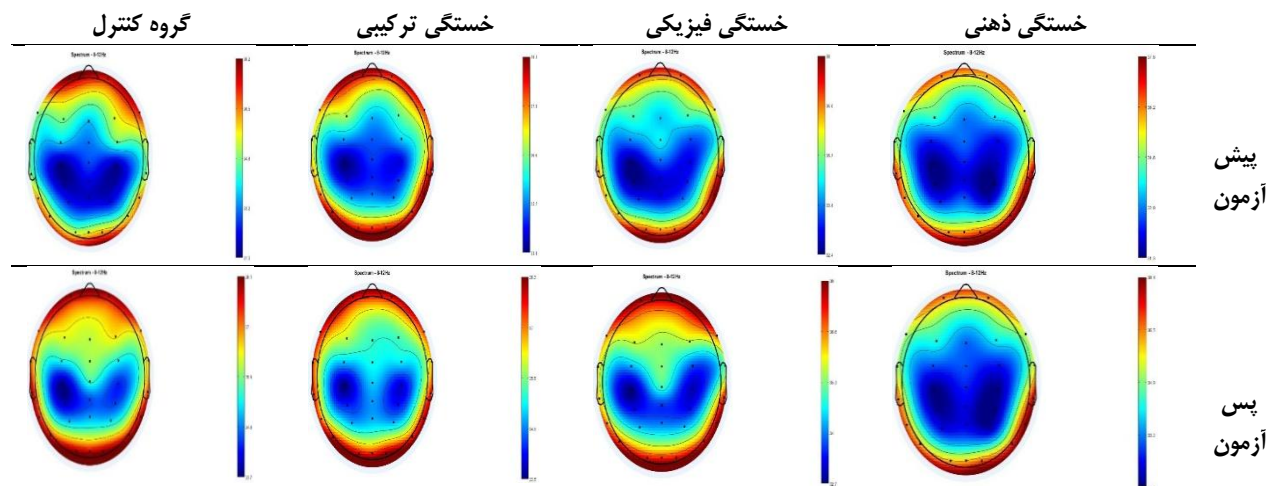
بر همین اساس نتایج اثر تعاملی در گروه خستگی ذهنی نشان داد که در موج آلفا، در منطقه PF (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/18$ ، $p=0/01$)، منطقه F (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، منطقه T (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/19$ ، $p=0/01$)، منطقه C (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/20$ ، $p=0/01$)، منطقه PT (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/13$ ، $p=0/04$)، منطقه P (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، منطقه O (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، تفاوت معناداری مشاهده شد. بر اساس مقادیر اثر اندازه می‌توان گفت که احتمالاً ۱۸٪ از تغییرات در منطقه PF، ۱۴٪ از تغییرات در منطقه F، ۲۰٪ از تغییرات در منطقه T، ۱۶٪ از تغییرات در منطقه C، تحت تأثیر خستگی ذهنی بود و مقادیر آلفا در این مناطق بعد از خستگی ذهنی افزایش فعالیت را نشان می‌دهد.

نتایج اثر تعاملی در گروه خستگی فیزیکی نشان داد که در موج آلفا، در منطقه F (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/34$ ، $p=0/001$)، منطقه T (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/25$ ، $p=0/004$)، منطقه C (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، منطقه PT (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، منطقه P (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، منطقه O (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، تفاوت معناداری مشاهده شد. بر اساس مقادیر اثر اندازه می‌توان گفت که احتمالاً ۳۴٪ از تغییرات در منطقه F، ۲۵٪ از تغییرات در منطقه T، ۱۳٪ از تغییرات در منطقه C، ۱۴٪ از تغییرات در منطقه PT، تحت تأثیر خستگی فیزیکی بود و مقادیر آلفا در این مناطق بعد از خستگی فیزیکی افزایش فعالیت را نشان می‌دهد. نتایج اثر تعاملی در گروه خستگی ترکیبی نشان داد که در موج آلفا، در منطقه T (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/29$ ، $p=0/002$)، منطقه F (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، منطقه C (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، منطقه PT (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، منطقه P (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، منطقه O (توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/14$ ، $p=0/03$)، تفاوت معناداری مشاهده شد.

منطقه C ($F_{(1,36)}=11/89$) توان آزمون، $\text{partial}\eta^2=0/28$ ، $p=0/002$ ، $F_{(1,36)}=11/25$ ، منطقه تفاوت معناداری مشاهده شد. بر اساس مقادیر اثر اندازه می توان گفت که احتمالاً ۲۹٪ از تغییرات در منطقه T، ۲۸٪ از تغییرات در منطقه C، تحت تأثیر خستگی ترکیبی بود و مقادیر آلفا در این مناطق بعد از خستگی ترکیبی افزایش فعالیت را نشان می دهد. نتایج اثر تعاملی در گروه کنترل نشان داد در هیچ کدام از نواحی در موج آلفا تفاوت معناداری مشاهده نشد. در واقع می توان گفت در گروه کنترل تغییری ایجاد نشد.

بخش دوم (تفاوت بین گروهی)

در پیش آزمون ($P=0/58$) بین گروه ها تفاوت معناداری وجود نداشت. در به بررسی تفاوت دو به دوی چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در مرحله پس آزمون برای ۸ منطقه مغزی موج آلفا نتایج نشان داد: در موج آلفا بین گروه خستگی ذهنی و کنترل در منطقه PF ($P=0/02$) T ($P=0/05$) C ($P=0/001$) PT ($P=0/02$) P ($P=0/01$) O ($P=0/01$) تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی ذهنی مقادیر بیشتری نسبت به گروه کنترل داشتند. بین گروه خستگی فیزیکی و کنترل در منطقه PF ($P=0/05$) F ($P=0/008$) C ($P=0/004$) P ($P=0/01$) O ($P=0/01$)، تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی فیزیکی مقادیر بیشتری نسبت به گروه کنترل داشتند. بین گروه خستگی ترکیبی و کنترل در منطقه IF ($P=0/001$) T ($P=0/02$) C ($P=0/001$) PT ($P=0/007$) P ($P=0/001$)، تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی ترکیبی مقادیر بیشتری نسبت به گروه کنترل داشتند. همچنین بین گروه خستگی ذهنی و ترکیبی در منطقه IF ($P=0/03$) تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی ترکیبی مقادیر بیشتری نسبت به گروه خستگی ذهنی داشتند. همچنین بین گروه خستگی فیزیکی و ترکیبی در منطقه IF ($P=0/009$) F ($P=0/03$)، تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی فیزیکی مقادیر بیشتری نسبت به گروه خستگی ترکیبی داشتند.



شکل ۴. توپوگرافی دامنه موج آلفا در پیش آزمون و پس آزمون چهار گروه (گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل)
 Figure 4. Topography of Alpha wave amplitude in pre-test and post-test of 4 groups (mental fatigue, physical fatigue, combined fatigue, and control groups)

موج بتا

بخش اول (اثر درون گروهی)

برای بررسی اثر درون گروهی ابتدا تفاوت مراحل یادگیری (پیش آزمون و پس آزمون) در چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در ۸ منطقه مغزی بررسی شد. در ادامه به بررسی اثر دو به دو آن‌ها پرداخته شد.

جدول ۷- مقایسه دوبه دو در پیش آزمون و پس آزمون فعالیت موج بتا در ۸ منطقه مغزی در چهار گروه

Table 7- Pairwise comparison of pre-test and post-test beta wave activity in 8 brain regions in four groups

گروه کنترل			گروه خستگی ترکیبی			گروه خستگی فیزیکی			گروه خستگی ذهنی			زمان (j)	زمان (i)	منا
Control group			Combined fatigue group			Physical fatigue group			Mental fatigue group			Post-test	Pre-test	ق مغز
P	SE	i-j	P	SE	i-j	P	SE	i-j	P	SE	i-j	پس آزمون	پیش آزمون	Bra in areas
۰/۳۳	۰/۸۰	۰/۷۹	۰/۲۶	۰/۸۰	۰/۹۲	*۰/۰۰۱	۰/۸۰	۰/۸۴	۰/۰۸	۰/۸۰	۰/۴۲	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	PF
۰/۴۰	۰/۷۱	۰/۶۰	۰/۳۱	۰/۷۱	۰/۷۳	۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۱۶	*۰/۰۱	۰/۷۱	۰/۹۴	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	IF
۰/۸۸	۰/۹۳	۰/۱۳	۰/۷۷	۰/۹۳	۰/۲۶	*۰/۰۵	۰/۹۳	۰/۸۶	*۰/۰۱	۰/۹۳	۰/۵۷	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	F
۰/۸۶	۰/۹۸	۰/۱۶	۰/۴۲	۰/۹۸	۰/۷۹	۰/۴۲	۰/۹۸	۰/۷۹	۰/۲۱	۰/۹۸	۰/۲۵	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	T
۰/۲۵	۰/۵۹	۰/۶۹	۰/۱۷	۰/۵۹	۰/۸۳	*۰/۰۱	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۰۰۱ *	۰/۵۹	۰/۶۲	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	C
۰/۳۰	۰/۶۸	۰/۷۱	۰/۲۴	۰/۶۸	۰/۸۱	۰/۳۷	۰/۶۷	۰/۶۲	۰/۴۱	۰/۶۸	۰/۵۶	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	PT
۰/۷۳	۰/۹۷	۰/۳۳	۰/۴۳	۰/۹۷	۰/۷۷	۰/۹۰	۰/۹۷	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۹۷	۰/۸۵	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	P
۰/۹۷	۱/۱۵	۰/۰۴	۰/۹۰	۱/۱۵	۰/۱۳	۰/۸۶	۱/۱۵	۰/۱۹	۰/۳۲	۱/۱۵	۰/۱۶	پس آزمون Post-test	پیش آزمون Pre-test	O

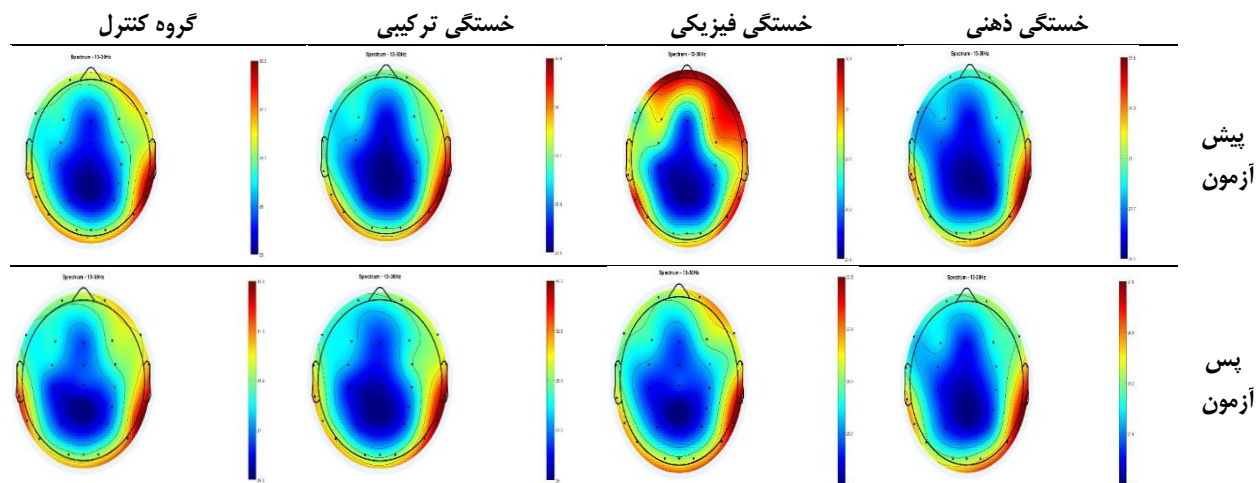
P<0/05

بر همین اساس نتایج اثر تعاملی در گروه خستگی ذهنی نشان داد که در موج بتا، در منطقه IF ($\eta^2 = 0.74$)=توان آزمون، $\partial \eta^2 = 0.20$ ، منطقه F ($F_{(1,36)} = 7/30$, $p = 0.01$)، منطقه C ($F_{(1,36)} = 7/55$, $p = 0.01$)، منطقه IF ($\eta^2 = 0.41$)=توان آزمون، $\partial \eta^2 = 0.21$ ، منطقه F ($F_{(1,36)} = 19/56$, $p = 0.001$)، تفاوت معناداری مشاهده شد. بر اساس مقادیر اثر اندازه می‌توان گفت که احتمالاً ۲۰٪ از تغییرات در منطقه IF، ۲۱٪ از تغییرات در منطقه F، ۴۱٪ از تغییرات در منطقه C، تحت تأثیر خستگی ذهنی بود و مقادیر بتا در این مناطق بعد از خستگی ذهنی، افزایش فعالیت را نشان می‌دهد.

نتایج اثر تعاملی در گروه خستگی فیزیکی نشان داد که در موج بتا، در منطقه PF $p=0/001$, $partial\eta^2=0/44$ ، توان آزمون، منطقه C $(F_{(1,36)}=3/96, p=0/05, partial\eta^2=0/12)$ ، توان آزمون، منطقه F $(F_{(1,36)}=22/61, p=0/001, partial\eta^2=0/20)$ ، توان آزمون، منطقه F $(F_{(1,36)}=7/31, p=0/01, partial\eta^2=0/20)$ ، تفاوت معناداری مشاهده شد. بر اساس مقادیر اثر اندازه می توان گفت که احتمالاً ۴۴٪ از تغییرات در منطقه PF، ۱۲٪ از تغییرات در منطقه C، ۲۰٪ از تغییرات در منطقه F، و ۲۰٪ از تغییرات در منطقه C تحت تأثیر خستگی فیزیکی بود و مقادیر بتا در این مناطق بعد از خستگی فیزیکی افزایش فعالیت را نشان می دهد. نتایج اثر تعاملی در گروه خستگی ترکیبی نشان داد در هیچ کدام از نواحی در موج بتا تفاوت معناداری مشاهده نشد. در واقع می توان گفت در گروه خستگی ترکیبی تغییری ایجاد نشد. نتایج اثر تعاملی در گروه کنترل نشان داد در هیچ کدام از نواحی در موج بتا تفاوت معناداری مشاهده نشد. در واقع می توان گفت در گروه کنترل تغییری ایجاد نشد.

بخش دوم (تفاوت بین گروهی)

در پیش آزمون ($P=0/24$) بین گروه ها تفاوت معناداری وجود نداشت. در بررسی تفاوت دو به دوی چهار گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل در مرحله پس آزمون برای ۸ منطقه مغزی موج بتا نتایج نشان داد: در موج بتا بین گروه خستگی ذهنی و کنترل در منطقه PF ($P=0/02$)، IF ($P=0/02$)، F ($P=0/02$)، C ($P=0/04$) تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی ذهنی مقادیر بیشتری نسبت به گروه کنترل داشتند. بین گروه خستگی فیزیکی و کنترل در منطقه PF ($P=0/002$) تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی فیزیکی مقادیر بیشتری نسبت به گروه کنترل داشتند. همچنین بین گروه خستگی ذهنی و ترکیبی در منطقه IF ($P=0/02$)، F ($P=0/04$)، C ($P=0/05$) تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی ذهنی مقادیر بیشتری نسبت به گروه ترکیبی داشتند. همچنین بین گروه خستگی فیزیکی و ترکیبی در منطقه PF ($P=0/009$) تفاوت معنادار وجود دارد و با توجه به اندازه میانگین دو گروه، گروه خستگی فیزیکی مقادیر بیشتری نسبت به گروه ترکیبی داشتند.



شکل ۵. توپوگرافی دامنه موج بتا در پیش آزمون و پس آزمون ۴ گروه (گروه خستگی ذهنی، فیزیکی، ترکیبی و کنترل)

Figure 5. Topography of Beta wave amplitude in pre-test and post-test of 4 groups (mental fatigue, physical fatigue, combined fatigue, and control groups)

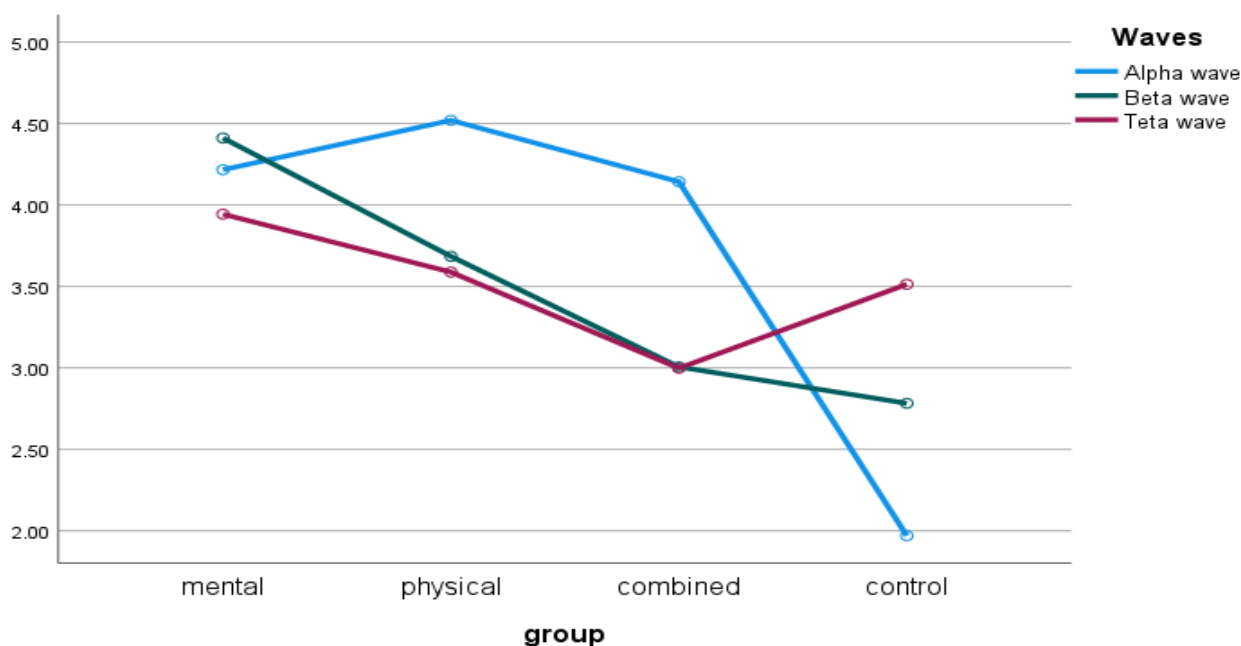
نتایج آزمون تعقیبی LSD در جدول ۷ تفاوت بین گروه ها را در فعالیت الکتریکی امواج مغز نشان می دهد.

جدول ۸. نتایج آزمون تعقیبی تفاوت بین گروه‌ها در فعالیت الکتریکی امواج مغز

Table 8. Results of post hoc test of differences between groups in electrical brain wave activity

P	Sd	(i-j)	گروه (j)	گروه (i)
*۰.۰۳	۰.۱۶	۰.۳۵	خستگی فیزیکی	خستگی ذهنی
*۰.۰۱	۰.۱۶	۰.۴۱	خستگی ترکیبی	خستگی ذهنی
*۰.۰۰۱	۰.۱۶	۰.۸۰	گروه کنترل	خستگی ذهنی
۰.۷۰	۰.۱۶	۰.۰۶	خستگی ترکیبی	خستگی فیزیکی
*۰.۰۰۹	۰.۱۶	۰.۴۵	گروه کنترل	خستگی فیزیکی
*۰.۰۲	۰.۱۶	۰.۳۸	گروه کنترل	خستگی ترکیبی

نتایج آزمون تعقیبی نشان داد بین گروه خستگی ذهنی و فیزیکی ($P=۰.۰۳$)، گروه خستگی ذهنی و ترکیبی ($P=۰.۰۱$)، گروه خستگی ذهنی و کنترل ($P=۰.۰۰۱$)، گروه خستگی فیزیکی و کنترل ($P=۰.۰۰۹$)، گروه خستگی ترکیبی و کنترل ($P=۰.۰۲$) تفاوت معنادار وجود دارد.



شکل ۶. تفاوت چهار گروه در پس آزمون فعالیت الکتریکی امواج تتا، آلفا و بتا

Figure 6. Differences between the four groups in the post-test electrical activity of Theta, Alpha, and Beta waves

بحث

با توجه به اهمیت خستگی در عملکرد ورزشی، نتایج این تحقیق می‌تواند به درک عمیق‌تری از تعاملات بین خستگی و فعالیت مغزی کمک کند. بنابراین هدف از پژوهش حاضر، تاثیر انواع خستگی بر امواج مغزی تیراندازان تپانچه بادی بود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که هر سه نوع خستگی تأثیرات معنادار و متمایزی بر الگوی امواج مغزی تیراندازان داشته‌اند. در موج تتا، خستگی ذهنی منجر به افزایش معنادار فعالیت در نواحی PF و IF شد، در حالی که خستگی فیزیکی دامنه وسیع‌تری از نواحی شامل PF، IF، و T را تحت تأثیر قرار داد. نکته جالب توجه این بود که خستگی ترکیبی، برخلاف انتظار، تنها در ناحیه IF افزایش معنادار فعالیت را نشان داد و مناطق تحت پوشش دو نوع خستگی دیگر را پوشش نداد. این یافته نشان می‌دهد که خستگی ترکیبی صرفاً یک اثر جمعی ساده نیست، بلکه احتمالاً مکانیسم‌های عصبی پیچیده‌تری در آن دخیل هستند. در موج آلفا نیز الگوی مشابهی مشاهده شد. خستگی ذهنی باعث افزایش معنادار فعالیت در نواحی PF، T، F، و C شد و خستگی فیزیکی نواحی C، T، F، و PT را تحت تأثیر قرار داد، اما خستگی ترکیبی تنها در نواحی T و C افزایش فعالیت معنادار نشان داد. این محدود شدن دامنه نواحی تحت تأثیر در خستگی ترکیبی، مجدداً بر پیچیدگی اثرات تعاملی خستگی ذهنی و فیزیکی تأکید دارد. در موج بتا، در حالی که خستگی ذهنی

و فیزیکی به ترتیب باعث افزایش معنادار فعالیت در نواحی C, F, PF و C, F, IF شدند، خستگی ترکیبی هیچ تغییر معناداری در این موج ایجاد نکرد. این یافته قابل تأمل بر ماهیت خاص خستگی ترکیبی تأکید دارد.

نتایج پژوهش حاضر با سایر تحقیقات مختلف در مورد تأثیر انواع خستگی بر امواج مغزی ورزشکاران هم راستا می باشد. در مطالعه بیلی و همکاران (۲۰۰۸)، نشان داد که افزایش خستگی ناشی از تمرین منجر به افزایش فعالیت امواج بتا می شود (۲۶)، که این یافته با نتایج پژوهش حاضر در زمینه افزایش فعالیت بتا در نواحی پیشانی و مرکزی تحت شرایط خستگی فیزیکی همخوانی دارد. به نظر می رسد این افزایش فعالیت بتا نشان دهنده مکانیسم جبرانی سیستم عصبی مرکزی برای حفظ عملکرد حرکتی در شرایط خستگی باشد. مطالعه گیل^۱ و همکاران (۲۰۲۲)، ترن^۲ و همکاران (۲۰۲۰)، گزارش کردند، خستگی ذهنی با افزایش فعالیت امواج آلفا در نواحی پیشانی-مرکزی همراه است، در حالی که خستگی فیزیکی باعث افزایش قدرت امواج تتا در نواحی مرکزی-آهیانه ای می شود. این یافته ها مؤید آن است که انواع مختلف خستگی، الگوهای فعال سازی عصبی متمایزی را در مغز ایجاد می کنند (۲۷، ۲۹). همچنین، پژوهش هژبرنیا و همکاران (۲۰۲۴)، سو^۳ و همکاران (۲۰۲۲) گزارش نمودند که خستگی ذهنی باعث کاهش توان موج آلفا و خستگی بدنی باعث افزایش آن می شود که این الگو کاملاً با یافته های حاضر در مورد تغییرات متمایز امواج آلفا در انواع مختلف خستگی مطابقت دارد (۳۱، ۲۸). مطالعه هابای^۴ و همکاران (۲۰۲۱)، نیز تأیید کرد که خستگی ذهنی با افزایش فعالیت امواج تتا در نواحی پیشانی و کاهش فعالیت امواج آلفا در نواحی حسی-حرکتی همراه است که همسو با الگوی مشاهده شده در پژوهش حاضر برای خستگی ذهنی می باشد (۳۳). بعلاوه، یافته سان و همکاران (۲۰۲۱)، در مورد نقش قشر پیش پیشانی و مدارهای عصبی به خوبی با نتایج این پژوهش که افزایش فعالیت تتا را در نواحی پیشانی (شامل قشر پیش پیشانی) در شرایط خستگی ذهنی و ترکیبی نشان داد، مطابقت دارد (۳۰). یافته های قربانی و همکاران (۲۰۱۷)، نیز نشان داد که خستگی فیزیکی منجر به افزایش معنادار فعالیت امواج بتا در نواحی پیشانی و مرکزی می شود که این نتیجه با الگوی فعال سازی مشاهده شده در پژوهش حاضر، برای خستگی فیزیکی همخوانی کامل دارد (۳۲). علاوه بر این، پژوهش روبیو-مورالس و همکاران (۲۰۲۵)، الگوی متمایزی برای خستگی ترکیبی گزارش نمودند که شامل افزایش تتا در نواحی پیشانی-گیجگاهی و آلفا در مناطق گیجگاهی-مرکزی، بدون تغییر معنادار در بتا بود (۱۲)، این الگو با یافته های منحصربه فرد پژوهش حاضر در مورد خستگی ترکیبی که نشان از فعال سازی محدود و متمرکز نواحی مغزی داشت، همسویی قابل توجهی نشان می دهد. همان طور که ملاحظه شد، یافته های پژوهش حاضر در مورد الگوی تغییرات امواج مغزی ناشی از انواع خستگی، به طور قابل توجهی با تحقیقات پیشین در این زمینه همخوانی دارد. این همسویی علمی نه تنها اعتبار یافته های پژوهش حاضر را تأیید می کند، بلکه بر این نکته تأکید دارد که الگوهای فعالیت مغزی می توانند به عنوان نشانگرهای عینی و قابل اعتمادی برای تشخیص و پیگیری انواع مختلف خستگی در ورزشکاران مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج این مطالعه مؤید آن است که هر یک از اشکال مختلف خستگی، امضای عصبی ویژه ای در فعالیت الکتروآنسفالوگرافی مغز بر جای می گذارند. در شرایط خستگی ذهنی، شاهد افزایش فعالیت امواج تتا در لوب های پیشانی همراه با کاهش دامنه امواج آلفا در مناطق حرکتی-حسی هستیم. در مقابل، خستگی جسمانی با الگوی متفاوت از افزایش همزمان امواج تتا و آلفا در نواحی گسترده تری از قشر مخ ظاهر می شود. حالت خستگی ترکیبی نیز، به عنوان پدیده ای مستقل، الگوی فعال سازی عصبی خاص خود را نشان می دهد که در قالب تغییرات منتخب و متمرکز در مناطق خاصی از مغز تظاهر می یابد. این مشاهدات از دو جنبه حائز اهمیت است: نخست آنکه، نشان می دهد پایش عینی وضعیت خستگی با استفاده از نشانگرهای عصب فیزیولوژیک از حساسیت و اختصاصیت کافی برخوردار است. دوم آنکه، این یافته ها مبنای علمی مناسبی برای توسعه رهیافت های نوین در مدیریت تمرین و بازیافت ورزشی فراهم می آورد. به کارگیری این شاخص های عینی در تمرین های ورزشی می تواند به طراحی برنامه های شخصی شده و پیشگیری از اختلالات ناشی از خستگی مفرب بینجامد. در مقابل، یافته های گودال و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد خستگی ذهنی باعث کاهش عملکرد و کاهش درجه خستگی مرکزی و محیطی در طی فعالیت های دوچرخه سواری تفریحی نمی شود (۳۱). علت ناهمسویی در نتایج تحقیقات مختلف می تواند به نوع ورزش، سطح مهارت ورزشکاران، نوع خستگی، تفاوت های فردی و روش های تجزیه و تحلیل داده ها مربوط باشد. این عوامل نشان دهنده پیچیدگی موضوع و تأثیرات متنوع خستگی بر عملکرد است.

¹ Gebel

² Tran

³ Su

⁴ Habay

از محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان به بسیاری از عوامل، مانند میزان استراحت آزمودنی‌ها در طول روز، عوامل روانشناختی مانند استرس و اضطراب طی انجام آزمون‌ها، اثرات ژنتیکی و اصل تفاوت‌های فردی در تأثیرپذیری از تمرین در بین آزمودنی‌ها اشاره نمود. بنابراین، در پژوهش‌های آینده، برای کنترل بهتر نقش تفاوت‌های فردی و ژنتیکی، پیشنهاد می‌شود از روش‌های نظام‌مندتری استفاده شود. این روش‌ها شامل تعیین واریانت‌های ژنی (مانند بررسی ژن‌های مرتبط با فاکتور رشد عصبی، آنزیم مبدل آنژیوتانسین و اینترلوکین-۶) در کنار ارزیابی‌های فیزیولوژیک می‌باشد.

همچنین انجام مطالعات بلندمدت برای بررسی اثر خستگی‌های مکرر بر امواج مغزی و عملکرد ورزشکاران در رشته‌های مختلف توصیه می‌شود. همچنین، به منظور تعمیق درک مکانیسم‌های عصبی الگوی متمایز خستگی ترکیبی مشاهده شده در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از تلفیق EEG و fMRI استفاده شود. این رویکرد تلفیقی می‌تواند با ترکیب دقت زمانی EEG و دقت فضایی fMRI، منشأ و شبکه‌های عصبی مسئول این الگوی خاص را به طور دقیق‌تری شناسایی کند. بررسی عوامل تأثیرگذار دیگری مانند ساعت زیستی بدن، سطح هورمون‌های استرس و توانایی‌های ذهنی ورزشکاران نیز می‌تواند به ارائه الگوهای دقیق‌تری برای پیش‌بینی اثرات خستگی بیانجامد. چنین پژوهش‌هایی مبنای علمی مناسبی برای طراحی برنامه‌های تمرینی و مدیریت خستگی هر ورزشکار بر اساس ویژگی‌های فردی او فراهم خواهند کرد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش گویای تمایزهای عصبی-شناختی معنادار در پاسخ به انواع مختلف خستگی است. داده‌ها نشان می‌دهد که هر یک از اشکال خستگی (ذهنی، جسمی و ترکیبی) الگوی فعالیت الکتریکی مغزی ویژه‌ای را ایجاد می‌کنند که بازتاب‌کننده سازوکارهای عصبی متفاوتی در مواجهه با محرک‌های خستگی است. مطالعه حاضر از این جهت حائز اهمیت است که برای نخستین بار به بررسی نظام‌مند تأثیر خستگی ترکیبی بر شاخص‌های عصب‌فیزیولوژیک در تیراندازان پرداخته است. یافته‌های به‌دست‌آمده می‌تواند مبنای علمی برای توسعه چهارچوب‌های نوین در زمینه مدیریت خستگی و طراحی برنامه‌های تمرینی فراهم آورد. این پژوهش زمینه را برای مطالعات آینده در جهت تدوین پروتکل‌های مداخله‌ای مبتنی بر شواهد عینی عصبی هموار ساخته و دریچه‌ای جدید به سوی بهینه‌سازی عملکرد در ورزش‌های مهارتی می‌گشاید.

پیام مقاله

این مطالعه با ارائه نقشه‌ای عصبی از تأثیرات متمایز انواع خستگی، درک جدیدی از مکانیسم‌های تطابقی مغز در شرایط فشار ورزشی ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که خستگی ترکیبی به عنوان یک پدیده مستقل عصبی، الگوی فعالیت مغزی ویژه‌ای را ایجاد می‌کند که در آن مغز با تخصیص بهینه منابع شناختی، راهبردهای تطابقی خاصی را در پیش می‌گیرد. این بینش جدید می‌تواند پارادایم موجود در مدیریت خستگی در ورزش را متحول ساخته و زمینه را برای توسعه مداخلات مبتنی بر مکانیسم‌های عصبی فراهم آورد.

ملاحظات اخلاقی

مقاله دارای کد اخلاق به شماره SSRI.REC-2312-2582 می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان پژوهش حاضر در مراحل اجرا، مشارک یکسانی داشتند و نویسنده اول، مسئولیت پژوهش را به عهده دارد.

حامی مالی

در پژوهش حاضر از هیچ‌گونه منبع تأمین مالی در بخش عمومی، تجاری و غیردولتی استفاده نشد و صرفاً برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

از همه ورزشکاران، مربیان و خانواده‌هایی که در انجام این پژوهش همکاری کردند، همچنین عوامل آزمایشگاه رشد و تکامل حرکتی دانشگاه تبریز صمیمانه سپاس‌گزاری می‌شود.

منابع

- قاسم‌نژاد، م.، اقدایی، م.، و فارسی، ع. (۱۴۰۰). تأثیر تمرین جسمانی و تصویرسازی تحت شرایط خستگی ذهنی بر تلاش شناختی در افراد مبتدی بسکتبال. *مطالعات روان‌شناسی ورزشی*، ۱۴ (۵۱). <https://doi.org/10.22089/spsyj.2021.11198.2223>
- حیدرزاده، ا.، حسینی، ف. س.، و توفیقی، ع. (۱۴۰۲). تأثیر خستگی بدنی بر زمان‌بندی و وضوح تصویرسازی ذهنی در ورزشکاران ماهر و نیمه‌ماهر کاراته. *مطالعات روان‌شناسی ورزشی*، ۱۲ (۴۴)، ۳۶-۲۳. <https://doi.org/10.22089/SPSYJ.2019.7382.1788>
- مرادی، ح.، و شهبازی، م. (۱۴۰۳). آموزش نوروفیدبک بر عملکرد حرکتی و رفتار چشم تیراندازان ماهر تپانچه. *دوماهنامه علمی-پژوهشی طب توانبخشی*، ۱۳ (۶)، ۱۱۰۷-۱۰۹۴. <https://doi.org/10.32598/SJRM.13.6.3271>
- قربانی، م.، غزالیان، ف.، ابراهیم، خ. ح.، و عابدنطنزی، ح. (۱۳۹۹). پاسخ عصبی قشر مغز در طی خستگی ناشی از رکاب‌زدن تناوبی با شدت بالا در زنان دوچرخه‌سوار. *مجله علوم پیراپزشکی و توانبخشی*، ۹ (۱)، ۹۹-۹۱. <https://doi.org/10.22038/jpsr.2020.38361.1911>

References

- Ghasemnezhad, M., Aghdaei, M., & Farsi, A. (2021). Effect of physical and imagery training under mental fatigue condition on cognitive effort among basketball novices. *Sport Psychology Studies*, 14(51). <https://doi.org/10.22089/spsyj.2021.11198.2223> [In Persian]
- Hancock, P. A., Desmond, P. A., & Matthews, G. (2017). Conceptualizing and defining fatigue. In *The handbook of operator fatigue* (pp. 63–73). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315557366>
- Heidarzadeh, A., Hosseini, F. S., & Tofighi, A. (2023). The effect of body fatigue on the timing and imagery vividness in skilled and semi-skilled karate athletes. *Sport Psychology Studies*, 12(44), 23–36. <https://doi.org/10.22089/SPSYJ.2019.7382.1788> [In Persian]
- Walsh, M. L. (2000). Whole body fatigue and critical power: A physiological interpretation. *Sports Medicine*, 29(3), 153–166. <https://doi.org/10.2165/00007256-200029030-00002>
- Ishii, A., Tanaka, M., Yamano, E., & Watanabe, Y. (2014). The neural substrates of physical fatigue sensation to evaluate ourselves: A magnetoencephalography study. *Neuroscience*, 261, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.12.049>
- Meeusen, R., Van Cutsem, J., & Roelands, B. (2021). Endurance exercise-induced and mental fatigue and the brain. *Experimental Physiology*, 106(12), 2294–2298. <https://doi.org/10.1113/EP088186>
- Wang, Z. (2024). The neurobiological mechanisms of mental fatigue: Implications for cognitive performance and recovery. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7(5), 226.
- Hogan, P. S., Chen, S. X., Teh, W. W., et al. (2020). Neural mechanisms underlying the effects of physical fatigue on effort-based choice. *Nature Communications*, 11, Article 4026. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17855-5>
- Mortimer, H., Dallaway, N., & Ring, C. (2024). Effects of isolated and combined mental and physical fatigue on motor skill and endurance exercise performance. *Psychology of Sport and Exercise*, 75, Article 102720. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2024.102720>
- Ghojzadeh, M., Farahbakhsh, M., Sahrai, H., Beheshti, R., Norouzi, A., & Sadeghi-Bazargani, H. (2024). The activity of different brain regions in fatigued and drowsy drivers: A systematic review based on EEG findings. *Journal of Research in Clinical Medicine*, 12, Article 20. <https://doi.org/10.34172/jrcm.34638>
- Bestwick-Stevenson, T., Toone, R., Neupert, E., Edwards, K., & Kluzek, S. (2022). Assessment of fatigue and recovery in sport: Narrative review. *International Journal of Sports Medicine*, 43(14), 1151–1162. <https://doi.org/10.1055/a-1834-7177>
- Rubio-Morales, A., Díaz-García, J., Berchicci, M., Morenas-Martín, J., del Campo, V. L., & García-Calvo, T. (2025). The mental fatigue induced by physical, cognitive and combined effort in amateur soccer players: A comparative study using EEG. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 10(4), Article 373. <https://doi.org/10.3390/jfmk10040373>
- Xie, N., Zhang, X., & Lu, C. (2025). An exploratory framework for EEG-based monitoring of motivation and performance in athletic-like scenarios. *Scientific Reports*, 15, Article 26156. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05420-3>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). GPower 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191. <https://doi.org/10.3758/bf03193146>
- Dong, S. Y., & Lee, S. Y. (2012). Understanding human implicit intention based on frontal electroencephalography (EEG). In *The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2012.6252753>

16. Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643–662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
17. Smith, M., Coutts, A., Merlini, M., Deprez, D., Lenoir, M., & Marcora, S. (2016). Mental fatigue impairs soccer-specific physical and technical performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(2), 267–276. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000762>
18. Barzegarpour, H., Amoozi, H., Rajabi, H., Button, D., & Fayazmilani, R. (2020). The effects of performing mental exertion during cycling exercise on fatigue indices. *International Journal of Sports Medicine*, 41(12), 846–857. <https://doi.org/10.1055/a-1179-8326>
19. Slimani, M., Znazen, H., Bragazzi, N. L., Zguira, M. S., & Tod, D. (2018). The effect of mental fatigue on cognitive and aerobic performance in adolescent active endurance athletes: Insights from a randomized counterbalanced, cross-over trial. *Journal of Clinical Medicine*, 7(12), 510–517. <https://doi.org/10.3390/jcm7120510>
20. Goudini, R., Zahiri, A., Alizadeh, S., Drury, B., Anvar, S. H., Daneshjoo, A., & Behm, D. G. (2024). The effects of physical and mental fatigue on time perception. *Sports*, 12(2), Article 59. <https://doi.org/10.3390/sports12020059>
21. Moradi, H., & Shahbazi, M. (2024). Neurofeedback training on motor performance and gaze behavior of skilled pistol shooters. *Bimonthly Scientific-Research Journal of Rehabilitation Medicine*, 13(6), 1094–1107. <https://doi.org/10.32598/SJRM.13.6.3271> [In Persian]
22. Fang, Q., Fang, C., Li, L., & Song, Y. (2022). Impact of sport training on adaptations in neural functioning and behavioral performance: A scoping review with meta-analysis on EEG research. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 20(3), 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2022.04.001>
23. Cheng, S. Y., & Hsu, H. T. (2011). Mental fatigue measurement using EEG. In *Risk management trends*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/16376>
24. Cuchna, F. M., Blair, P., Herrick, J., & Collins, S. (2024). The effects of mental fatigue induced by the Stroop test on muscular endurance performance and neuromuscular activation in Division III female athletes. *International Journal of Exercise Science*, 17(4), 1540. <https://doi.org/10.70252/LEDA1951>
25. García-Pérez, J. A., Pérez-Soriano, P., Llana, S., Martínez-Nova, A., & Sánchez-Zuriaga, D. (2013). Effect of overground vs treadmill running on plantar pressure: Influence of fatigue. *Gait & Posture*, 38(4), 929–933. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.04.026>
26. Bailey, S. P., Hall, E. E., Folger, S. E., & Miller, P. C. (2008). Changes in EEG during graded exercise on a recumbent cycle ergometer. *Journal of Sports Science & Medicine*, 7(4), 505–511.
27. Gebel, A., Busch, A., Stelzel, C., Hortobágyi, T., & Granacher, U. (2022). Effects of physical and mental fatigue on postural sway and cortical activity in healthy young adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, Article 871930. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.871930>
28. Su, M., Li, W., Peng, F., Zhou, W., Zhang, R., & Wen, Y. (2022, November). EEG-based mental fatigue detection using CNN-LSTM. In *2022 16th ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME)* (pp. 302–305). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CME55444.2022.10063316>
29. Tran, Y., Craig, A., Craig, R., Chai, R., & Nguyen, H. (2020). The influence of mental fatigue on brain activity: Evidence from a systematic review with meta-analyses. *Psychophysiology*, 57(5), Article e13554. <https://doi.org/10.1111/psyp.13554>
30. Sun, H., Soh, K. G., Roslan, S., Wazir, M. R. W. N., & Soh, K. L. (2021). Does mental fatigue affect skilled performance in athletes? A systematic review. *PLOS ONE*, 16(10), Article e0258307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258307>
31. Goodall, S., Howatson, G., & Thomas, K. (2018). Modulation of specific inhibitory networks in fatigued locomotor muscles of healthy males. *Experimental Brain Research*, 236(2), 463–473. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5142-x>
32. Ghorbani, M., Ghazalian, F., Ebrahim, K. H., & Abednatanzi, H. (2020). Neural response of cortical brain during high intensity interval pedaling induced fatigue in women cyclist. *Journal of Paramedical Sciences & Rehabilitation*, 9(1), 91–99. <https://doi.org/10.22038/jpsr.2020.38361.1911> [In Persian]
33. Habay, J., Van Cutsem, J., Verschuere, J., De Bock, S., Proost, M., De Wachter, J., ... & Roelands, B. (2021). Correction to: Mental fatigue and sport-specific psychomotor performance: A systematic review. *Sports Medicine*, 51(7). <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01478-x>