University of Tehran Press

Journal of
Sports and Motor Development and Learning

Online ISSN: 2676-4547

The Comparison of the Mu Rhythm Power of Experts and Novices during the Golf Putting Skill Performance

Narges Abdoli[1], Alireza Saberi Kakhki[2]✉, Hamid Reza Taheri Torbati[3], Majid Ghoshuni[4]

1. Department of Motor Behavior, Faculty of Sport Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: Narges.abdoli@mail.um.ac.ir.
2. Corresponding Author, Department of Motor Behavior, Faculty of Sport Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: askakhki@um.ac.ir.
3. Department of Motor Behavior, Faculty of Sport Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: hamidtaheri@um.ac.ir.
4. Department of Biomedical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran. E-mail: ghoshuni@mshdiau.ac.ir.

Article Info

Article type: Research

Article history:
Received:
13 January 2024
Received in revised form:
13 March 2024
Accepted:
7 April 2024
Published online:
21 March 2025

Keywords:
Cognitive-motor processes,
Electroencephalography,
Golf putting skills,
Motor control
Motor learning,
Mu rhythm.

ABSTRACT

Introduction: Previous studies have reported inconsistencies regarding changes in brain waves during the learning process. Since the underlying cognitive-motor and neural-motor mechanisms of skill performance require further investigation, the present study aimed to compare Mu rhythm power in expert and novice golfers.

Methods: This study included 15 novice university students with no prior golf experience in the novice group and 15 experienced golfers in the expert group. Participants' brain waves were recorded during 20 practice trials of the golf putting skill. Data were processed using Independent Component Analysis (ICA). A one-way multivariate analysis of variance (MANOVA) with a 2×3 design (group × area) was employed for data analysis.

Results: The MANOVA results revealed a significant difference in Mu rhythm power (8–13 Hz) across three central brain areas (C3, Cz, C4) between novice and expert golfers ($P \leq 0.05$). Specifically, the expert group exhibited higher mean Mu rhythm power than the novice group.

Conclusion: The findings suggest that brain function in expert and novice golfers differs in the sensory and motor cortices. Functional changes in the brain during the learning of the golf putting skill may underlie the superior motor control and performance observed in experts. These results emphasize the importance of understanding learning processes to enhance daily motor control and specialized skill performance. The study contributes to the understanding of neurocognitive and neural-motor mechanisms of skill performance, offering insights for professionals in motor skill training and rehabilitation.

Cite this article: Abdoli, N., Saberi Kakhki, A., Taheri Torbati, H. R., & Ghoshuni, M. (2025). The Comparison of the Mu Rhythm Power of Experts and Novices during the Golf Putting Skill Performance. *Journal of Sports and Motor Development and Learning*, 17 (1), 19-37.
DOI: https://doi.org/10.22059/jsmdl.2024.371049.1762

Journal of Sports and Motor Development and Learning by University of Tehran Press is licensed under CC BY-NC 4.0| web site: https://jsmdl.ut.ac.ir | Email: jsmdl@ut.ac.ir.

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.

Journal of
Sports and Motor Development and Learning
University of Tehran Press
Online ISSN: 2676-4547

Extended Abstract

Introduction

Understanding the cognitive-motor and neuromotor processes involved in executing actions and motor skills is crucial for selecting appropriate practice methods and accelerating the motor learning process. Research indicates that brain waves in various areas can fluctuate during the learning of specific tasks. Research has observed that during successful performance, brain waves decrease in various brain areas; at the same time, other studies have shown that the power of brain waves is higher in experts. According to scientists, changes in brain wave activity in various brain regions of both novices and experts reflect improving and adjusting cognitive-motor functions. Based on *the psychomotor efficiency hypothesis*, individuals with high motor performance levels have improved cognitive-motor processes. Experts have greater neural efficiency and refined cognitive-motor processes, requiring minimal cognitive and mental energy consumption. We propose that both neurocognitive and neuromotor processes work together to generate adaptive motor outputs. Specifically, brain regions responsible for the organization and control of movements, such as the motor cortex, become more engaged and proficient at coordinating the various organs and components involved in movements as learning progresses. This advancement results in noticeable enhancements in motor behavior, including increased stability, consistency, and coordination. To investigate this issue, we conducted a study aimed at answering our main research question: Is there a difference in the Mu rhythm between expert and novice individuals in the motor areas involved in executing the golf putting task, specifically in the C3, Cz, and C4 regions?

Methods

Fifteen novice golfers and fifteen expert golfers participated in this study. All participants were right-handed, had normal vision, and had no history of head injuries, mental health issues, cognitive disorders, or neurological diseases. They were instructed to avoid any medications that could affect brain function, as well as caffeine and alcohol. Additionally, they were advised to rest adequately before the experiment. During the experiment, the participants were asked to perform a golf-putting task while their brain waves were recorded. The recorded brain waves were amplified and filtered using a hardware filter that ranged from 0.1 to 70 Hz, along with a notch filter set at 50 Hz. The data was sampled at a frequency of 250 Hz. After initial collection, the data was processed with Win EEG software. Following this, MATLAB software was employed to remove artifacts and non-neural data sources using the independent component analysis (ICA) method. The power spectrum density estimation component was measured using the Welch estimation method. A 2×3 (group×areas) one-way Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) was conducted. Before analysis, the normality of the data was confirmed using the Shapiro-Wilk test ($P>0.05$), the equality of variance was verified by the Levene test ($P>0.05$), and the homogeneity of covariance matrix was confirmed by Box's M test ($P>0.05$).

Results

The study found a significant difference in the Mu rhythm power of the C3, Cz, and C4 areas between the expert and novice groups. The results indicated that the average Mu rhythm power in the expert group was higher than in the novice group. Specifically, the difference was statistically significant in the C3 ($P=0.024$, $F_{(1,28)}=5.667$), Cz ($P=0.016$, $F_{(1,28)}=6.521$), and C4 ($P\leq0.05$, $F_{(1,28)}=3.99$) areas.

Conclusion

The study findings indicate a significant difference in the power of the Mu rhythm between novice and expert golfers. Experts demonstrate higher power in the Mu rhythm than novices. This research aligns with previous studies, suggesting that specific brain waves may increase in areas related to the task at hand while decreasing in regions unrelated to the task. Scientists believe the brain undergoes functional and structural changes, during the motor learning process and these changes in brain activity indicate improved information-processing efficiency and cognitive-motor processes. That is, successful performance requires suppressing and inhibiting cognitive-motor processes unrelated to the task, while cognitive-motor processes related to the task increase and become more involved. As a result, the experts demonstrate more efficient cortical function in the brain when performing specific tasks. This leads to minimal energy consumption in cognitive-motor processes and results in consistent and high-quality motor output. In addition to these statements, we infer that refinement and efficiency in brain function especially in neuro-motor functions occur during learning and with an increase in the learner's skill level. This means that, instead of involving unrelated cognitive processes and areas not directly connected to skill execution (like T3), the regions of the brain responsible for controlling the body and organs (such as the motor cortex or areas C3, Cz, and C4) become more active in organizing and managing the components necessary for movement. As a result, the coordination and consistency in executing the skill is improved. This improvement can be observed as an increase in wave power within the motor cortex (see Fig 3).

Ethical Considerations

University of Tehran Press

Journal of
Sports and Motor Development and Learning

Online ISSN: 2676-4547

Compliance with ethical guidelines: We have ensured that all ethical guidelines have been followed in this article. All participants were required to sign an informed consent form before participating in the study. Participants were free to withdraw from the study at any time, and we made it clear that the research results would be made available to them upon request. We guarantee the confidentiality of their information. The research conducted has been approved by the Research Ethics Committee of Ferdowsi University, with the ethics code IR.UM.REC.1400.403.

Funding: The authors received no specific funding.

Conflict of interest: The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments: We would like to extend our sincere thanks to everyone who collaborated on the research.

رشد و یادگیری حرکتی و ورزشی
شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۵۴۷
انتشارات دانشگاه تهران

مقایسهٔ توان ریتم میو افراد ماهر و مبتدی طی اجرای مهارت پات گلف

نرگس عبدلی[۱]، علیرضا صابری کاخکی[۲]✉، حمیدرضا طاهری تربتی[۳]، مجید قشونی[۴]

۱. گروه رفتار حرکتی، دانشکدهٔ علوم ورزشی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: Narges.abdoli@mail.um.ac.ir
۲. نویسندهٔ مسئول، گروه رفتار حرکتی، دانشکدهٔ علوم ورزشی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: askakhki@um.ac.ir
۳. گروه رفتار حرکتی، دانشکدهٔ علوم ورزشی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: hamidtaheri@um.ac.ir
۴. گروه مهندسی پزشکی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران. رایانامه: ghoshuni@mshdiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:
الکتروانسفالوگرافی،
ریتم میو،
مهارت پات گلف،
فرایندهای شناختی حرکتی،
کنترل حرکتی،
یادگیری حرکتی.

چکیده

مقدمه: در خصوص تغییرات امواج مغز طی فرایند یادگیری، در پژوهش‌های پیشین تناقض وجود دارد، از آنجا که سازوکارهای زیربنایی شناختی حرکتی و عصبی حرکتی اجرای اعمال نیازمند بررسی بیشتر هستند، بنابراین هدف از پژوهش حاضر مقایسهٔ توان ریتم میو گلف‌بازان ماهر و مبتدی بود.

روش پژوهش: در پژوهش حاضر ۱۵ دانشجوی مبتدی بدون تجربه در مهارت گلف، به‌عنوان گروه مبتدی و ۱۵ بازیکن باتجربه در مهارت گلف به‌عنوان گروه ماهر شرکت کردند. امواج مغزی شرکت‌کنندگان طی ۲۰ کوشش تمرینی مهارت پات گلف ثبت شد. داده‌ها با استفاده از روش ICA پردازش شدند. برای تحلیل داده‌ها، از روش تحلیل واریانس چندمتغیرهٔ یکطرفه با طرح ۲ × ۳ (گروه × ناحیه) استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج تحلیل واریانس چندمتغیره نشان داد که توان ریتم میو (۸ - ۱۳ هرتز) در سه ناحیهٔ مرکزیِ (C3, Cz, C4) مغزِ بازیکنان گلف مبتدی و ماهر تفاوت معنادار دارد ($P \leq ۰/۰۵$)، به‌طوری‌که میانگین توان ریتم میو گروه ماهر بیشتر از گروه مبتدی بود.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهد کارکرد مغز گلف‌بازان ماهر و مبتدی در نواحی قشر حسی و حرکتی مغز متفاوت است. به‌نظر می‌رسد طی فرایند یادگیری مهارت پات گلف، مغز دستخوش تغییرات کارکردی می‌شود که این تغییرات در سیستم عصبی، احتمالاً یکی از دلایل کنترل و اجرای بهتر مهارت در افراد ماهر است. یافته‌ها ضرورت توجه به فرایند یادگیری در بهبود کنترل و اجرای بهتر اعمال روزانه و مهارت‌های تخصصی را مطرح می‌کند. تحقیق حاضر به درک سازوکارهای زیربنایی عصب‌شناختی و عصبی حرکتی اجرای مهارت‌ها به متخصصان آموزش و بازتوانی اعمال و مهارت‌های حرکتی کمک می‌کند.

استناد: عبدلی، نرگس؛ صابری کاخکی، علیرضا؛ طاهری تربتی، حمیدرضا؛ قشونی، مجید (۱۴۰۴). مقایسه توان ریتم میو افراد ماهر و مبتدی طی اجرای مهارت پات گلف. *رشد و یادگیری حرکتی ورزشی*، (۱)۱۷، ۱۹-۳۷.

DOI: https://doi.org/10.22059/jsmdl.2024.371049.1762

این نشریهٔ علمی رایگان است و حق مالکیت فکری خود را بر اساس لایسنس کریتیو کامنز CC BY-NC 4.0 به نویسندگان واگذار کرده است. تارنما: https://jsmdl.ut.ac.ir | رایانامه: jsmdl@ut.ac.ir

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.

مقدمه

بررسی فرایندهای شناختی ـ حرکتی[1] و فرایندهای عصبی زیربنای اجرای اعمال و مهارت‌های حرکتی، اطلاعات مهمی را در اختیار محققان حوزهٔ علوم شناختی و حرکتی قرار می‌دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). درک سازوکارهای زیربنایی درگیر در اجرای اعمال و مهارت‌ها، به انتخاب روش‌های آموزشی و تمرینی مناسب کمک می‌کند. انتخاب روش آموزشی مناسب نه‌تنها موجب تسریع فرایند یادگیری حرکتی و ارتقای سطح مهارت ورزشکاران می‌شود، بلکه به معلمان و مربیان در آموزش بهتر مهارت‌های حرکتی و دستیابی به اهدافشان کمک می کند؛ بنابراین بررسی سازوکارهای زیربنایی کنترل و اجرای مهارت‌ها (برای مثال مبانی عصب فیزیولوژیکی) ضروری به‌نظر می‌رسد.

در خصوص تغییرات کارکردی و ساختاری مغز در زمینهٔ بیماری‌ها و اختلالات شناختی و عصبی (شامل پارکینسون، صرع، بی‌خوابی، بیش‌فعالی و غیره) و همچنین فرایندهای شناختی و حرکتی در افراد سالم تحقیقات بسیاری صورت گرفته است (آذرپیکان و همکاران، ۲۰۱۴). طبق *فرضیهٔ کارایی روانی حرکتی*[2] اجرای حرکتیِ افرادی که در سطوح بالای مهارت قرار دارند، با بهبود فرایندهای شناختی ـ حرکتی و سرکوب فرایندهای شناختی ـ حرکتی نامرتبط با تکلیف همراه است. بهبود فرایندهای شناختی ـ حرکتی شامل مجموعه‌ای از ورودی‌های پالایش‌شده و هماهنگ‌سازی فرایندهای عصبی حرکتی در مغز است (هتفیلد و همکاران، ۱۹۸۴؛ هتفیلد و همکاران، ۲۰۰۱). این موضوع، توسط مطالعات تأیید شده است و نتایج نشان داده است افراد ماهر طی اجرای تکالیف مختلف، برای مثال مهارت پات گلف (کوکه و همکاران، ۲۰۱۵)، مهارت تیراندازی با تفنگ یا کمان و پرتاب دارت و سایر اعمال شناختی و حرکتی کاهش سراسری در فعالیت مغز دارند (هتفیلد و همکاران، ۲۰۰۱؛ پیندا و همکاران؛ ۲۰۰۵).

برای درک پالایش و اصلاحات در فرایندهای شناختی و عصبی ـ حرکتی و همچنین بررسی تغییرات کارکردی و ساختاری مغز، در مطالعات امواج مختلف مغز برای مثال موج تتا (۴–۷ هرتز)، آلفا یک (۸–۱۰ هرتز)، آلفا دو (۱۰–۱۲ هرتز)، ریتم میو[3](۸ - ۱۳ هرتز در ناحیهٔ مرکزی)، ریتم حسی حرکتی (۱۲–۱۵ هرتز) بررسی شده است. به اعتقاد محققان، ریتم میو در ناحیهٔ قشر حرکتی منعکس‌کنندهٔ تخصیص منابع شناختی در برنامه‌ریزی و کنترل حرکات است (پیندا و همکاران، ۲۰۰۵)، موج آلفا دو و ریتم میو در ناحیهٔ پیشانی با برنامه‌ریزی حرکتی در ارتباط است (بابلیونی و همکاران، ۲۰۰۸؛ کوکه و همکاران، ۲۰۱۴) و ریتم حسی حرکتی با فرایندهای برنامه‌ریزی حرکتی در طول آماده‌سازی حرکتی مرتبط است (کوکه و همکاران، ۲۰۱۴؛ کوکه و همکاران، ۲۰۱۵). به‌طور خاص، ریتم میو نشان‌دهندهٔ تخصیص منابع شناختی در پاسخ به برنامه‌ریزی حرکتی است (کوکه و همکاران، ۲۰۱۴).

طبق نتایج تحقیقات، هنگام یادگیری یک تکلیف خاص، توان[4] امواج – شاخص توان نشان‌دهندهٔ میزان فعالیت یک باند فرکانسی خاص در یک ناحیه از مغز است – در نواحی مختلف مغز کاهش یا افزایش می‌یابند. برای مثال محققان نشان داده‌اند که در اثر تمرین، کارکرد برخی مناطق مغز کاهش می‌یابد. برای مثال محققان مشاهده کردند که فعالیت مغز در نواحی مربوط به کنترل شناختی یا فرایندهای توجه، مانند قشر کمربندی قدامی (سئو و همکاران، ۲۰۱۲) و قشر پیشانی مغز (پترینی و همکاران، ۲۰۱۱) کاهش می‌یابد. همچنین دنیس و همکاران در تحقیق خود نتیجه گرفتند که هنگام اجرای موفقیت‌آمیز عمل، ریتم میو در ناحیهٔ مرکزی کاهش می‌یابد (دنیس و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر آن، هتفیلد و همکاران در تحقیق خود مشاهده کردند که در اثر یادگیری، فعالیت مغز در نیمکرهٔ چپ نسبت به نیمکرهٔ راست کاهش پیدا می‌کند که این امر نشان‌دهندهٔ کارایی پردازش است (هتفیلد و همکاران، ۱۹۸۴). همچنین وانگ و همکاران مشاهده کردند که گلف‌بازان ماهر توان آلفای کمتری را نسبت به گلف‌بازان مبتدی در مناطق پیشانی، مرکزی، آهیانه‌ای و نیمکرهٔ راست نشان می دهند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). قاسمیان و همکاران نیز کاهش چشمگیری در توان موج آلفا و تتا در نواحی مرکزی و قشر گیجگاهی مغز هنگام تمرین و یادگیری مهارت حرکتی ردیابی پیگیری مشاهده کردند (قاسمیان و همکاران ، ۲۰۱۷). این کاهش ارتباط بین نواحی پیشانی

1. Cognitive-motor processes
2. The psychomotor efficiency hypothesis
3. Mu rhythm
4. Power

و نیمکرهٔ چپ با افزایش دقت در عملکرد در تحقیقات دیگر تکرار شد (گالیکو و همکاران، ۲۰۱۶؛ چنگ و همکاران، ۲۰۱۷) که به اعتقاد محققان این کاهش در توان امواج مغز به‌خصوص در نواحی اتصال پیشانی با گیجگاهی چپ پس از تمرین، با افزایش سطح مهارت و بهبود عملکرد همراه است (پار و همکاران، ۲۰۲۱).

در کنار تحقیقاتی که نتیجه گرفته‌اند اجرای افراد ماهر با کاهش توان امواج در نواحی مختلف مغز در ارتباط است، برخی تحقیقات نتایج متفاوت و متناقضی به‌دست آورده‌اند، به‌طوری‌که شواهد رو به رشدی نشان می‌دهد افراد ماهر نسبت به افراد مبتدی یا بی‌تجربه، توان تتا، آلفا دو، ریتم میو و ریتم حسی حرکتی بیشتری دارند (هافلر و همکاران، ۲۰۰۰؛ بائومیستر و همکاران، ۲۰۰۸؛ دلپرسیو و همکاران، ۲۰۰۹؛ کوکه و همکاران، ۲۰۱۴؛ چنگ و همکاران، ۲۰۱۷). برای مثال هافلر و همکاران در تحقیق خود که در زمینهٔ تیراندازی با تفنگ بود دریافتند که پیش از اجرای مهارت، توان موج آلفا در نیمکرهٔ چپ افراد ماهر قبل از تیراندازی افزایش می‌یابد، درحالی‌که در نیمکرهٔ راست افزایش توان موج آلفا تفاوتی ندارد. به اعتقاد هافلر و همکارانش افزایش توان آلفا در نیمکرهٔ چپ در نتیجهٔ یادگیری به‌دلیل کاهش تلاش شناختی مرتبط با اجرای تکلیف است (هافلر و همکاران، ۲۰۰۰). لندرز و همکاران (۱۹۹۴) نیز افزایش توان آلفا را در نیمکرهٔ چپ به‌دنبال یادگیری مشاهده کردند. علاوه بر آن، اسمیت و همکاران (۱۹۹۶) پس از تمرین یک بازی رایانه‌ای، افزایش توان تتا در ناحیهٔ پیشانی میانی و افزایش آلفا را در نواحی آهیانه‌ای و پس‌سری مشاهده کردند. در تحقیق دیگری در رشتهٔ گلف، بامیستر و همکاران (۲۰۰۸) دریافتند که گلف‌بازان ماهر نسبت به گلف‌بازان مبتدی، در نواحی پیشانی و مرکزی افزایش توان تتا را قبل از اجرای مهارت پات گلف داشتند که این نتیجه با نتایج تحقیقات اسمیت و همکاران (۱۹۹۹) و هافلر و همکاران (۲۰۰۰) همراستا بود. در تحقیقات کریک و همکاران (۲۰۰۱) افزایش توان موج آلفا نیز تکرار شد. در تحقیق دیگری بابیلونی و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی رابطهٔ بین توان امواج مغز و اجرای مهارت پات گلف پرداختند، درحالی‌که شرکت‌کنندگان روی تختهٔ تعادل ایستاده بودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در کوشش‌های موفقیت‌آمیز، توان آلفای بالا در نواحی پیشانی میانی و حسی حرکتی سمت راست کمتر بود؛ آنها استدلال کردند توان آلفای بالا در ناحیهٔ پیش‌حرکتی و ناحیهٔ حسی حرکتی اولیه پیش‌بینی‌کنندهٔ عملکرد موفق افراد است. در تحقیق دیگری در زمینهٔ تیراندازی با کمان، کیم و همکارانش در ناحیهٔ پیشانی فوقانی[1]، ناحیهٔ پیشانی میانی[2]، ناحیهٔ حرکتی مکمل[3]، ناحیهٔ گیجگاهی ـ آهیانه‌ای[4] و مخچه[5]، فعالیت عصبی بیشتری را در کمانداران نخبه و ماهر نسبت به افراد مبتدی مشاهده کردند (کیم و همکاران، ۲۰۱۴). در تحقیق دیگری نیز پار و همکارانش مشاهده کردند که افراد ماهر توان آلفای بیشتری را در تمام نواحی مختلف مغز نشان می‌دهند (پار و همکاران، ۲۰۱۹) که به اعتقاد محققان افزایش توان امواج در نواحی مختلف مغز موجب بهبود در عملکرد حرکتی می‌شود (هتفیلد و همکاران، ۲۰۰۱).

با مرور پیشینهٔ تحقیقات، در خصوص مبانی شناختی حرکتی و عصب حرکتی که طی فرایند یادگیری رخ می‌دهد، نتایج متناقضی مشاهده می‌شود. سؤال مهمی که ذهن محققان این حوزه را درگیر خود کرده این است که چرا کارکرد مغز (برای مثال توان امواج مغز و ارتباطات عصبی نواحی مختلف مغز) در اثر یادگیری تغییر می‌کند، به‌طوری‌که فعالیت مغز افراد مبتدی و ماهر در نواحی مختلف با یکدیگر متفاوت است. پاسخی که محققان برای این سؤال ارائه کرده‌اند این است که فعالیت متفاوت (افزایش یا کاهش امواج) نواحی مختلف مغز بین افراد مبتدی و ماهر ممکن است نشان‌دهندهٔ اصلاحات و پالایش کارکردهای شناختی حرکتی به‌دنبال پیشرفت در انواع مهارت‌های شناختی و حرکتی باشد (کیم و همکاران، ۲۰۱۴)، به‌طوری‌که افراد ماهر در مقایسه با افراد مبتدی، کارایی عصبی بیشتر و فرایندهای شناختی ـ حرکتی اصلاح و پالایش‌شده‌تری دارند و در آنها فرایندهای شناختی ـ حرکتی با حداقل مصرف انرژی همراه است (دنی و همکاران، ۲۰۰۳؛ دنی و همکاران، ۲۰۰۹). به اعتقاد هتفیلد و هیلمن (۲۰۰۱) با افزایش سطح مهارت و با یادگیری کارایی پردازش بیشتر می‌شود و به‌عبارتی با یادگیری، در اصطلاح *هرس کردن سیناپس‌ها* اتفاق می‌افتد؛ به این معنا که ارتباطات نامرتبط عصبی کاهش و در مقابل ارتباطات عصبی مرتبط با اجرای تکلیف افزایش پیدا می‌کنند (گرینوف و همکاران، ۱۹۸۷). دنی و همکاران (۲۰۰۳) اظهار می‌کنند که احتمالاً در مراحل پیشرفتهٔ یادگیری، برخی تحلیل‌های شناختی نامناسب است و ورودی‌های اضافی از نواحی شناختی مغز (برای مثال

1. Superior frontal area
2. Middle frontal cortex
3. The supplementary motor area-SMA
4. Temporoparietal area
5. Cerebellum

قشر گیجگاهی چپ) به نواحی برنامه‌ریزی حرکتی (برای مثال نوحی پیشانی خلفی) ممکن است سبب ایجاد تداخل و در پی آن کاهش کیفیت در عملکرد حرکتی شود. بر این اساس، به‌نظر می‌رسد با افزایش سطح مهارت وابستگی به مناطق شناختی و درگیریِ پردازش‌های شناختی کاهش می‌یابد، این امر را می‌توان با مواردی نظیر کاهش تلاش هشیارانه و همچنین کاهش خودگویی[1] نیز توصیف کرد (دنی و همکاران، ۲۰۰۳). همچنین این کاهش فعالیت مغز ممکن است نشان‌دهندهٔ استفاده کارآمدتر از مدارهای عصبی خاص مرتبط با تکلیف باشد (کلی و گاراوان، ۲۰۰۵). به اعتقاد محققان سازماندهی مجدد قشر مغز در اثر یادگیری، می‌تواند منعکس‌کنندهٔ توسعهٔ یک استراتژی جدید برای برآورده کردن تقاضای تکلیف باشد (کلی و گاراوان، ۲۰۰۵)؛ چنین کارایی عصب‌شناختی ممکن است به عملکرد بهتری تبدیل شود که با صرفه‌جویی در تلاش[2] مشخص می‌شود (اسپارو، ۲۰۰۰).

اگرچه تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در خصوص مبانی شناختی و عملکرد حرکتی اجرای اعمال ماهرانه انجام شده، اما در مقایسه با آن، مکانیسم‌های عصب فیزیولوژیکی و عصبی حرکتی کنترل حرکات و اعمال کمتر بررسی شده است (تن و همکاران، ۲۰۱۹)؛ به‌خصوص اینکه در زمینهٔ مبانی عصب‌شناختی نتایج متناقضی مشاهده می‌گردد (پار و همکاران، ۲۰۲۱). ازاین‌رو بررسی مکانیسم‌های عصب فیزیولوژیکی زیربنایی کنترل و اجرای حرکات و اعمال موضوعی مهم و ضروری به‌نظر می‌رسد (کاو و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین به دنبال بررسی بیشتر این موضوع تحقیق حاضر را طراحی کردیم؛ مضاف بر آن، به‌نظر می‌رسد توضیحات و مبانی نظری سازوکارهای عصب فیزیولوژیکی که برخی محققان ارائه کرده‌اند کافی و کاملاً توجیه‌کننده نیستند و به این سؤال که چرا با وقوع یادگیری حرکتی علاوه بر تغییر در کارکرد مغز کنترل و سازماندهی حرکات و اعمال بهبود و توسعه می‌یابد، پاسخ کاملی ارائه نمی‌دهند.

به اعتقاد محققان دلیل پالایش کارکردهای شناختی و عصب فیزیولوژیکی مغز این است که در آغاز یادگیری، فرایندهای شناختی و ذهنی بسیاری درگیرند که به مرور زمان و با اکتساب مهارت و افزایش قابلیت افراد میزان درگیری این فرایندهای شناختی نیز کاهش می‌یابد و در پی آن نواحی درگیر مغز نیز کمتر درگیر می‌شوند. محققان معتقدند کیفیت بالاتر عملکرد حرکتی و خروجی حرکتی سازگارتر به این دلیل است که پردازش قشر مغز افراد ماهر با کارایی بیشتری همراه است، به این معنا که فرایندهای شناختی نامربوط با تکلیف مهار می‌شوند، درحالی‌که فرایندهای شناختی مرتبط با تکلیف افزایش می‌یابند (هتفیلد و هیمن، ۲۰۰۱؛ دنی و همکاران، ۲۰۰۳؛ دنی و همکاران، ۲۰۰۹). اما علاوه بر این استدلال‌ها، فرضیهٔ ما این بود که طی فرایند یادگیری حرکتی و افزایش سطح مهارت، همزمان با کاهش درگیر شدن نواحی نامربوط مغز و پالایش فرایندهای شناختی، به‌نظر می‌رسد فرایندهای عصب فیزیولوژیکی و عصبی حرکتی نیز در خروجی حرکتی سازگار دخیل باشند؛ به این معنا که به‌نظر می‌رسد در مقایسه با آغاز یادگیری، مناطق درگیر در سازماندهی و کنترل حرکات (برای مثال قشر حرکتی) بیشتر درگیر می‌شوند، به‌طوری‌که این نواحی اندام‌ها و اجزای دخیل در حرکت را بهتر کنترل می‌کنند و این پیشرفت موجب تغییرات قابل مشاهده شامل پایداری، همسانی و هماهنگی در رفتار حرکتی می‌شود. بنابراین به‌منظور بررسی و سنجش این فرضیه تحقیق حاضر را طراحی کردیم. طبق *فرضیهٔ کارایی روانی ـ حرکتی* (هتفیلد و همکاران، ۲۰۰۱) و یافته‌های تحقیقات گذشته (دنی و همکاران، ۲۰۰۳؛ دنی و همکاران، ۲۰۰۹؛ بائومیستر و همکاران، ۲۰۰۸؛ چنگ و همکاران، ۲۰۱۷) که معتقدند در اثر وقوع یادگیری، کارایی روانی ـ حرکتی رخ می‌دهد، بنابراین انتظار داشتیم که توان ریتم میو در نواحی کنترل و اجرای حرکات (قشر حرکتی) در افراد ماهر مبتدی و متفاوت باشد، به‌طوری‌که به‌دلیل عملکرد حرکتی بهتر افراد ماهر این نواحی کنترل‌گر بیشتر درگیر و فعال باشند؛ بنابراین سؤال تحقیق حاضر این بود آیا توان ریتم میو در نواحی درگیر در کنترل و اجرای مهارت (نواحی مرکزی یا قشر حرکتی) در افراد ماهر و مبتدی متفاوت است؟

روش‌شناسی پژوهش

[1]. Self-talk

[2]. Economy of effort

پژوهش حاضر از نظر زمان مقطعی و از نظر شیوهٔ جمع‌آوری اطلاعات، نیمه‌تجربی است که به‌صورت میدانی انجام گرفت.

شرکت‌کنندگان

پژوهش حاضر شامل یک گروه گلف‌باز مبتدی و یک گروه گلف‌باز ماهر است. جامعهٔ آماری گلف‌بازان مبتدی، تمامی دانشجویان کارشناسی رشتهٔ علوم ورزشی دانشگاه فردوسی شهر مشهد بودند؛ برای تعیین حجم نمونه از نرم‌افزار جی پاور (اندازهٔ اثر ۰/۵، مقدار آلفا ۰/۰۵، توان ۰/۹۵) استفاده شد (فائول و همکاران، ۲۰۰۹) و ۱۵ دانشجوی رشتهٔ تربیت بدنی (۶ زن، ۹ مرد) با میانگین سنی (۲/۹ ± ۲۵/۵ سال) به‌طور تصادفی به‌عنوان افراد بی‌تجربه یا مبتدی انتخاب شدند. شرکت‌کنندگان گروه مبتدی، هیچ‌گونه تجربهٔ قبلی در انجام مهارت پات گلف نداشتند. همچنین جامعهٔ آماری گلف‌بازان ماهر، همهٔ گلف‌بازان ماهر شهر مشهد بودند که به‌طور میانگین سابقهٔ ۹ سال تجربه و فعالیت در رشتهٔ ورزشی گلف داشتند که به‌صورت داوطلبانه ۱۵ (۴ زن، ۱۱ مرد) بازیکن گلف ماهر در دسترس، با میانگین سنی (۵/۱ ± ۲۸/۵ سال) به‌عنوان گروه ماهر در تحقیق حاضر شرکت کردند. ماهر به‌عنوان رقابت در ورزش گلف در سطح ملی تعریف شد یا اینکه افراد به‌طور متوسط سابقه ۹ تا ۱۰ هزار ساعت تمرین هدفمند و سنجیده در مهارت گلف داشته باشند (گلادول، ۲۰۰۸؛ اریکسون و همکاران، ۱۹۹۳). همهٔ شرکت‌کنندگان دارای بینایی طبیعی بودند و هیچ‌گونه سابقهٔ آسیب به سر، اختلال یا بیماری روانی، شناختی یا عصبی نداشتند (این متغیرها با استفاده از پرسش‌نامه خود گزارشی کنترل شد). همهٔ شرکت‌کنندگان راست‌دست بودند که با استفاده از پرسشنامهٔ اولدفیلد (اولدفیلد، ۱۹۷۱) بررسی شد. به شرکت‌کنندگان اطمینان داده شد که اگر به هر دلیلی قادر یا مایل به ادامهٔ همکاری با محققان نباشند، در هر مرحله از تحقیق می‌توانند از ادامهٔ همکاری خودداری کنند. همهٔ شرکت‌کنندگان در مورد هدف آزمایش، ناآگاه بودند و پیش از شرکت در آزمایش یک فرم رضایت آگاهانه را که دانشکدهٔ علوم ورزشی دانشگاه فردوسی در اختیار محققان قرار داده بود، تکمیل و امضا کردند.

تکلیف

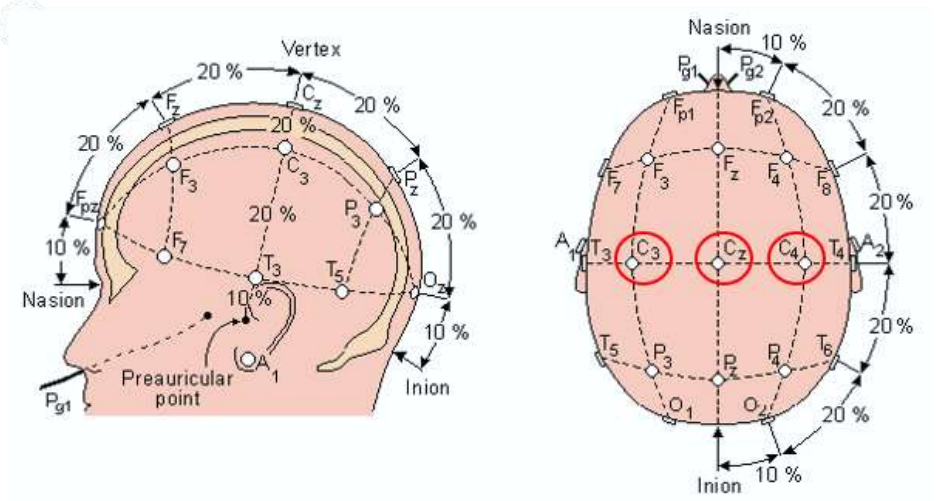
در تحقیق حاضر از مهارت پات گلف استفاده شد. شرکت‌کنندگان ۲۰ کوشش تمرینی مهارت پات را از فاصلهٔ ۳۰۰ سانتی‌متری روی چمن مصنوعی سرپوشیدهٔ سبز (۷۰۰ ×۴۰۰ سانتی‌متر) در آزمایشگاه انجام دادند. برای اجرای تکلیف از یک پاتر، یک حفرهٔ گلف با اندازهٔ استاندارد (قطر ۱۰/۸ سانتی‌متر) و توپ‌های سفید گلف استاندارد (قطر ۴/۷ سانتی‌متر) استفاده شد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

روند اجرای پژوهش

آماده‌سازی برای ثبت امواج مغز: به‌منظور دستیابی به حداکثر کیفیت در ثبت امواج مغز، یک روز پیش از اجرای آزمایش از تمام شرکت‌کنندگان خواسته شد که برای شرکت در تحقیق، داروهایی را که کارکرد مغز را تحت تأثیر قرار می‌دهد مصرف نکنند، همچنین چند ساعت پیش از آزمون، نوشیدنی حاوی کافئین یا الکل مصرف نکنند، شب/روز قبل از آزمون به‌خوبی استراحت کنند و موهای خود را در شب/صبح قبل از آزمایش بشویند. پیش از ثبت و جمع‌آوری امواج مغز، تجهیزات موردنیاز را آماده کرده و از کارکرد صحیح آنها اطمینان حاصل شد و همچنین سعی شد که با ایجاد محیطی به دور از هرگونه سروصدا، در حین ثبت امواج مغز، شرکت‌کنندگان در آرامش و پایداری کافی قرار داشته باشند. همچنین با هدف اطمینان کافی در مورد ثبت امواج مغز، امواج دریافتی از تمام کانال‌ها، قبل از ضبط، توسط نرم‌افزار WinEEGبررسی شد تا اطمینان حاصل شود که الکترود یا محل نامناسبی وجود ندارد و در نتیجه نویز یا منابع غیرعصبی ثبت نمی‌شود.

ابزار و پروتکل ثبت امواج مغز: به‌منظور ثبت امواج الکتریکی مغز از دستگاه الکترونسفالوگرام ۲۱ کاناله مدل ۲۰۱ کمپانی Mitsar روسیه استفاده شد. با استفاده از کلاه‌های نئوپرن[1] با سوراخ‌های از پیش تعریف‌شده، ۱۹ الکترود فعال در نواحی مختلف سر شامل (Fp1, Fp2, F3, Fz, F4, F7, F8, C3, Cz, C4, T3, T4, T5, T6, P3, Pz, P4, O1, O2) روی سر شرکت‌کنندگان قرار گرفتند. موقعیت مکانی یا ترتیب قرارگیری الکترودها مطابق با سیستم استاندارد بین‌المللی ۱۰ – ۲۰ بود (شکل ۱).

1. Neoprene



شکل ۱. سیستم الکترودگذاری ۱۰–۲۰، یک شیوه استاندارد الکترودگذاری است که امکان مقایسهٔ نتایج ثبت امواج مغزی و امکان تعمیم نتایج را می‌دهد. این چیدمان الکترودها، امکان پوشاندن تقریباً تمام نواحی سر را فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر توان ریتم میو از نواحی مرکزی مغز (C3, Cz, C4) تجزیه‌وتحلیل شد. شکل حاضر از سایت زیر استفاده شده است.
https://www.bci2000.org/mediawiki/index.php/User_Tutorial:EEG_Measurement_Setup

به‌منظور حذف نویز مشترک کانال‌ها، بر اساس مونتاژ تک‌قطبی دو الکترود به نرمهٔ گوش چپ و راست (A1، A2) متصل شد و نیز یک الکترود فعال زمین یا گراند در موقعیت بین ناحیهٔ پیشانی و مرکزی (FCz) قرار گرفت (جاسپر، ۱۹۵۸). برای دریافت اطلاعات، تقویت امواج دریافتی و تبدیل آنها به داده‌های دیجیتالی از آمپلی‌فایر[1] دستگاه EEG استفاده شد. برای ثبت امواج و به‌منظور تضمین اندازه‌گیری هایی با بالاترین کیفیت، امپدانس انتقالی از پوست سر به الکترود، از الکل طبی جهت پاک‌سازی پوست استفاده شد و جهت هدایت الکتریکی بهتر، کاهش و حذف مقاومت بین الکترودها و پوست سر و ثبت سیگنال با حداکثر کیفیت، از ژل هادی مخصوص استفاده شد. با استفاده از معیارهایی مانند تنظیم موقعیت الکترودها، چرب نبودن موهای شرکت‌کنندگان و تزریق مقدار مناسب ژل الکترولیت، امپدانس بین الکترود و پوست سر زیر ده کیلو اهم نگه‌داشته شد (کائو و همکاران، ۲۰۱۴). درحالی‌که شرکت‌کنندگانِ هر دو گروه، در حال اجرای مهارت پات گلف از فاصلهٔ ۳۰۰ سانتی‌متری از یک حفرهٔ استاندارد گلف بودند، امواج مغزی آنها تقویت و با اعمال یک فیلتر سخت‌افزاری ۰/۱ تا ۷۰ هرتز و یک فیلتر ناچ[2] در فرکانس ۵۰ هرتز، با فرکانس نمونه‌برداری ۲۵۰ هرتز در ثانیه ثبت شد. جمع‌آوری و فرایند کمی‌سازی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Win EEG نصب‌شده روی یک سیستم کامپیوتری انجام گرفت.

پیش‌پردازش امواج مغز: به‌منظور پیش‌پردازش امواج مغز، داده‌ها را در نرم‌افزار WinEEG کمی‌سازی کرده و سپس به نرم‌افزار متلب (نسخهٔ ۲۰۲۲a) منتقل کردیم. در نرم‌افزار متلب کوشش‌های تمرینی بر اساس محل دقیق ضربهٔ گلف تعیین شد و داده‌ها در محدودهٔ ۲۰۰۰– میلی‌ثانیه قبل از ضربهٔ گلف و ۲۰۰۰ میلی‌ثانیه پس از ضربهٔ گلف استخراج شدند. به‌منظور شناسایی و حذف انواع منابع تولید نویز، داده‌ها با روش تحلیل مؤلفه‌های مستقل[3] با استفاده از توابع متلب بررسی و تمام مصنوعات و منابع غیرعصبی (برای مثال منابع مربوط به حرکات بدن، حرکات چشم یا پلک زدن، نبض یا ضربان قلب و سایر فعالیت‌های غیرعصبی) شناسایی و سپس حذف شدند (دلورمه و ماکینک، ۲۰۰۴).

پردازش امواج مغز: برای بررسی و محاسبهٔ توان ریتم میو (۸ – ۱۳ هرتز)، مؤلفهٔ تخمین چگالی طیف توان با استفاده از روش تخمین ولش[4] مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفت (ولش، ۱۹۶۷) پنجرهٔ زمانی هانینگ[5] به طول دو ثانیه با همپوشانی ۵۰ درصد و وضوح نیم هرتز

1. Amplifier
2. Notch filter
3. The independent component analysis-ICA
4. Welch
5. Hanning

اعمال شد. داده‌های دو ثانیه پیش از اجرای ضربهٔ گلف و داده‌های دو ثانیه پس از اجرای ضربهٔ گلف (در مجموع حدود چهار ثانیه) تجزیه‌وتحلیل شد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). بر اساس فرضیه تحقیق، بررسی مؤلفهٔ توان ریتم میو در نواحی مرکزی یا قشر حسی حرکتی و حرکتی که ناحیهٔ مربوط به کنترل و اجرای حرکات است، انجام گرفت (مدندروپ و هید، ۲۰۱۹).

روش آماری

برای توصیف داده‌های تحقیق، از میانگین و انحراف معیار استفاده شد. برای تحلیل داده‌ها از یک طرح تحلیل واریانس چندمتغیره[1] دو (گروه: مبتدی و ماهر) × سه (ناحیه: C3, Cz, C4) استفاده شد. مفروضه‌های مانوا یکطرفه شامل نرمال بودن داده‌ها بود که این شرط با استفاده از آزمون شاپیرو ویلک[2] برای هر دو گروه مبتدی و ماهر و در هر سه متغیر وابسته بررسی و تأیید شد ($P > ۰/۰۵$). همچنین شروط شامل برابری واریانس نمرات بود که با استفاده از آزمون لون[3] تأیید شد ($P > ۰/۰۵$). شرط دیگر استفاده از تحلیل واریانس چندمتغیره، همگنی کوواریانس خطای نمرات بود که این شرط نیز توسط آزمون ام‌باکس[4] تأیید شد ($P > ۰/۰۵$). داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار اس پی اس اس نسخهٔ ۲۶ تجزیه‌وتحلیل شدند؛ برای تحلیل‌ها سطح معناداری $P < ۰/۰۵$ در نظر گرفته شد.

یافته‌های پژوهش

اطلاعات مربوط به آمار توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار به تفکیک هر گروه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. یافته‌های توصیفی (میانگین و انحراف معیار) متغیرهای پژوهش

		C4		Cz		C3	
گروه	تعداد	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین
مبتدی	۱۵ نفر	۰/۵۰۷	۱/۷۳۹۵	۰/۴۶۱	۱/۸۸۸۳	۰/۵۱۸	۱/۷۹۳۸
ماهر	۱۵ نفر	۰/۵۱۸	۲/۱۸۵۸	۰/۴۸۸	۲/۳۳۱۷	۰/۵۰۵	۲/۱۶۷۴

در تحقیق حاضر، توان ریتم میو گلف‌بازان مبتدی و ماهر در سه ناحیه از مغز (C3, Cz, C4) بررسی و مقایسه شد. همان‌گونه‌که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نتایج تجزیه‌وتحلیل آنالیز واریانس چندمتغیره نشان داد که اثر اصلی گروه معنادار است ($\eta p^2 = ۰/۲۸۱$، $P = ۰/۰۳$، $F_{(۱و۲۸)} = ۳/۹۱$).

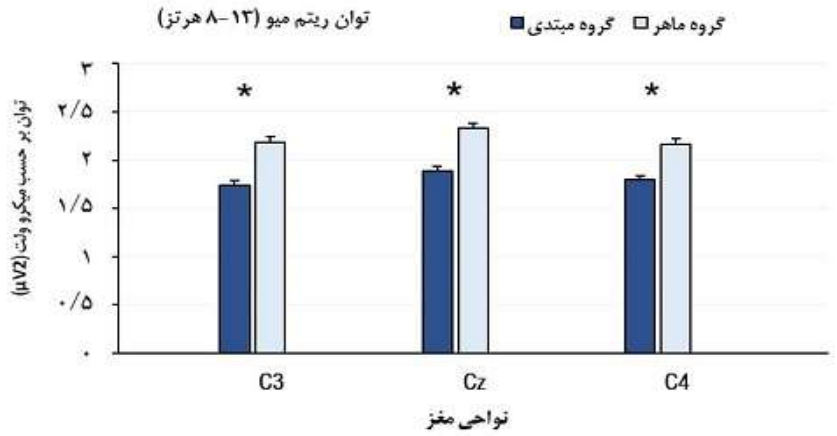
جدول ۲. نتایج تحلیل واریانس چندمتغیره در عامل بین‌گروهی

منابع تغییر	متغیر	مجموع مجذورات	میانگین مجذورات	درجهٔ آزادی	ارزش F	ارزش P	اندازه اثر ηp2
گروه	C3	۱/۴۹۴	۱/۴۹۴	۱	۵/۶۷۷	*۰/۰۲۴	۰/۱۶۹
	Cz	۱/۴۷۵	۱/۴۷۵	۱	۶/۵۲۱	*۰/۰۱۶	۰/۱۸۹
	C4	۱/۰۴۷	۱/۰۴۷	۱	۳/۹۹۸	*۰/۰۵	۰/۱۲۵
خطا	C3	۷/۳۶۸	۰/۲۶۳	۲۸	–	–	–
	Cz	۶/۳۳۳	۰/۲۲۶	۲۸	–	–	–
	C4	۷/۳۳۲	۰/۲۶۲	۲۸	–	–	–

*وجود تفاوت معنادار در سطح $P \leq ۰/۰۵$

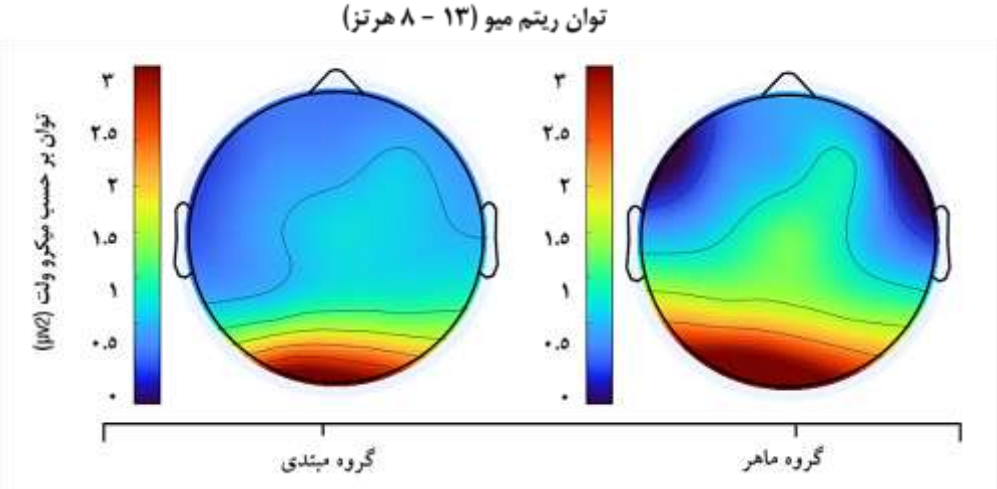
1. Multivariate analysis of variance or MANOVA
2. Shapiro-Wilk
3. Leven test
4. Box's M test

نتایج جدول آزمون آثار بین گروهی نشان داد که در ناحیهٔ C3 (ηp^2 = ۰/۱۶۹، P = ۰/۰۲۴، $F_{(۱و۲۸)}$ = ۵/۶۷۷)، ناحیهٔ Cz (ηp^2 = ۰/۱۸۹، P = ۰/۰۱۶، $F_{(۱و۲۸)}$ = ۶/۵۲۱)، و ناحیهٔ C4 (ηp^2 = ۰/۱۲۵، P = ۰/۰۵، $F_{(۱و۲۸)}$ = ۳/۹۹۸)، بین گروه‌های ماهر و مبتدی توان ریتم میو تفاوت معناداری دارد، به‌طوری‌که میانگین توان ریتم میو گروه‌ها نشان داد در این نواحی توان ریتم میو در گروه ماهر بیشتر از گروه مبتدی است (جدول ۲). میانگین و انحراف معیار توان ریتم میو دو گروه در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه شده و همچنین نمایشی از کارکرد مغز (توان ریتم میو) گلف‌بازان ماهر و مبتدی در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲. شکل حاضر نتایج تحلیل توان ریتم میوی بازیکنان گلف ماهر و مبتدی را نمایش می‌دهد. محور افقی سه ناحیه از مغز (C3, Cz, C4) و محور عمودی توان ریتم میو را برحسب میکرو ولت نمایش می‌دهد؛ همان‌طورکه مشاهده می‌شود، توان ریتم میوی افراد ماهر در هر سه ناحیه به‌طور معناداری از افراد مبتدی بیشتر است؛ *وجود تفاوت معنادار در سطح P ≤ ۰/۰۵.

فرضیهٔ تحقیق حاضر این بود که در نواحی مرکزی (C3, Cz, C4) مغزِ بازیکنان گلف ماهر و مبتدی، توان ریتم میو (۸ تا ۱۳ هرتز) تفاوت معناداری وجود دارد؛ هنگامی‌که توان ریتم میو در نواحی مربوط به اجرا و کنترل حرکات بررسی شد، نتایج نشان داد که توان ریتم میو در نواحی مرکزی مغز بازیکنان گلف مبتدی و ماهر تفاوت معنادار دارد (P ≤ ۰/۰۵) (شکل ۳).



شکل ۳. شکل حاضر نمایی از کارکرد مغز (ریتم میو) افراد ماهر و مبتدی را در حین اجرای مهارت پات گلف نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، توان ریتم میو در گروه ماهر (در نواحی مرکزی) نسبت به گروه مبتدی به‌طور معناداری بیشتر است * (P ≤ ۰/۰۵).

بحث و نتیجه‌گیری

هدف تحقیق حاضر، بررسی فرایندهای شناختی حرکتی و عصبی حرکتی زیربنایی اجرای اعمال و مهارت‌های حرکتی، در افراد ماهر و مبتدی طی اجرای مهارت پات گلف بود. فرض بر این بود که یادگیری حرکتی زمینه‌ساز تغییرات عصبی حرکتی است؛ به‌طوری‌که به‌نظر می‌رسد یکی از دلایل عملکرد حرکتی همسان و سازگار، فرایندهای زیربنایی عصب فیزیولوژیکی و عصبی حرکتی‌اند. به این معنا که به نظر می‌رسد طی یادگیری، فعالیت مغز در نواحی درگیر در سازماندهی و کنترل حرکات (برای مثال قشر حرکتی) بیشتر است که این موضوع نشان می‌دهد که در مقایسه با آغاز یادگیری، این نواحی، اندام‌ها و اجزای دخیل در حرکت را بهتر کنترل می‌کنند که کارکرد خود را به‌صورت عملکرد حرکتی پایدار، همسان و هماهنگ نمایش می‌دهد. بر مبنای این فرض، انتظار داشتیم که در نواحی مرکزی مغز افراد ماهر و مبتدی (قشر حسی و حرکتی)، توان ریتم میو (۸ تا ۱۳ هرتز) تفاوت معناداری داشته باشند، به‌طوری‌که در افراد ماهر توان ریتم میو بیشتر باشد. برای ارزیابی این فرضیه و دستیابی به هدف تحقیق حاضر، توان ریتم میو گلف‌بازان ماهر و مبتدی مقایسه شد. با بررسی توان ریتم میو در نواحی مربوط به اجرا و کنترل حرکات، مشاهده شد که توان ریتم میو در نواحی مرکزی مغز (C3, Cz, C4)، بین افراد مبتدی و ماهر تفاوت معنادار دارد و توان ریتم میو افراد ماهر به‌طور معناداری بیشتر است (شکل‌های ۲ و ۳).

این نتیجه که در اثر یادگیری توان امواج در برخی نواحی مغز افزایش می‌یابد، با نتایج تحقیقات گذشته همسوست. برای مثال لندرز و همکاران (۱۹۹۴) افزایش توان آلفا در نیمکرهٔ چپ در نتیجهٔ یادگیری را مشاهده کردند (لندرز و همکاران، ۱۹۹۴). همچنین کریک و همکاران افزایش توان آلفا را به‌دلیل یادگیری در ناحیهٔ گیجگاهی و ناحیهٔ پس‌سری مشاهده کردند (کریک و همکاران، ۲۰۰۱). هافلر و همکاران (۲۰۰۰) دریافتند که پیش از تیراندازی، توان آلفا در نیمکرهٔ چپ افراد ماهر افزایش می‌یابد، اما در نیمکرهٔ راست تفاوت معناداری وجود ندارد (هافلر و همکاران، ۲۰۰۰). همچنین تالیپ و جان در تحقیقات خود نشان دادند که افراد ماهر در مقایسه با افراد مبتدی، توان آلفای بیشتری در ناحیهٔ گیجگاهی چپ دارند (تالیپ و جان، ۲۰۱۴). پار و همکاران مشاهده کردند که افراد ماهر توان آلفای بیشتری را در تمام نواحی مغز نشان می‌دهند (پار و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین اسمیت و همکاران افزایش توان تتا در ناحیهٔ میانی پیشانی و افزایش توان آلفا در ناحیهٔ پس‌سری پس از تمرین یک بازی رایانه‌ای را مشاهده کردند (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۹). در تحقیق دیگری کیم و همکاران (۲۰۱۴) فعالیت عصبی موضعی بیشتری را در ناحیهٔ حرکتی مکمل، ناحیهٔ گیجگاهی ـ آهیانه‌ای، ناحیهٔ پیشانی فوقانی و مخچه در کمانداران نخبه و ماهر در مقایسه با کمانداران مبتدی در یک تکلیف هدف‌گیری یافتند. علاوه بر آن، کمانداران نخبه فعالیت بیشتری در ناحیهٔ حسی حرکتی، قشر پیشانی میانی، نواحی گیجگاهی و مخچه نسبت به کمانداران ماهر نشان دادند. بنابراین طبق یافته‌های این تحقیقات، افراد ماهر توان تتا، آلفا، ریتم میو و ریتم حسی حرکتی بیشتر و بالاتری در مقایسه با افراد مبتدی دارند (کوکه و همکاران، ۲۰۱۴؛ باومیستر و همکاران، ۲۰۰۸؛ دلپرسیو و همکاران، ۲۰۰۹). طبق این تحقیقات، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد ماهرانه و موفقیت‌آمیز با افزایش توان امواج مغز در نواحی مختلف مغز، برای مثال پیشانی، گیجگاهی، آهیانه‌ای و پس‌سری مشخص می‌شود (هتفیلد و همکاران، ۱۹۸۴؛ لوز و همکاران، ۲۰۰۱؛ کریک و هید، ۲۰۰۱).

بر خلاف افزایش توان امواج مغز در نواحی مختلف مغز، برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افراد ماهر توان آلفای کمتری نسبت به افراد مبتدی دارند. به‌طوری‌که برخی محققان معتقدند که با افزایش سطح مهارت، توان آلفا در نواحی مرکزی (کوکه و همکاران، ۲۰۱۴؛ بابیلونی و همکاران، ۲۰۰۸) یا در قسمت میانی پیشانی، ناحیهٔ مرکزی و حسی حرکتی و آهیانه‌ای کاهش می‌یابد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). طبق برخی تحقیقات کاهش توان آلفا به‌ویژه در ناحیهٔ گیجگاهی چپ (ناحیهٔ T3 یا T7) نیز گزارش شده است؛ برای مثال هتفیلد و هیلمن (۲۰۰۱) و جانل و همکاران (۲۰۰۰) مشاهده کردند که توان آلفای گیجگاهی چپ در افراد ماهر نسبت به افراد مبتدی کمتر است. هتفیلد و همکاران همچنین فعالیت مغز تیراندازان نخبه را در طول تیراندازی ثبت کردند و دریافتند که در حین یک تکلیف کلامی، توان آلفا در قشر گیجگاهی راست (T4) و چپ (T3) بیشتر است، درحالی‌که توان آلفا بین این دو ناحیه در انجام یک تکلیف فضایی کمتر بود (هتفیلد و هیمن، ۲۰۰۱؛ جانل و همکاران، ۲۰۰۰).

با بررسی تحقیقات انجام‌گرفته در خصوص فرایندهای شناختی حرکتی، تناقض نتایج تحقیقات در زمینهٔ کارکرد مغز و کاهش یا افزایش توان امواج را شاهدیم. با توجه به *فرضیهٔ کارایی روانی حرکتی* (هتفیلد و همکاران، ۲۰۰۱)، نتیجه می‌گیریم که به‌نظر می‌رسد نباید انتظار کاهش یا افزایش صرف یک موج خاص در تمام نواحی مغز را داشت و در واقع بسته به نوع تکلیف ممکن است کاهش امواج در مناطق نامرتبط با تکلیف و افزایش در نواحی مرتبط با انجام تکلیف را مشاهده کنیم. هتفیلد و همکاران استنباط می‌کنند که این تغییرات در فعالیت مغز نشان‌دهندهٔ کارایی پردازش اطلاعات است (هتفیلد و همکاران، ۱۹۸۴؛ هتفیلد و همکاران، ۲۰۰۱). برای مثال کاهش فعالیت در قشر گیجگاهی چپ و ناحیهٔ پیش‌حرکتی در افراد ماهر و خبره ممکن است به تجربهٔ پدیدارشناختی –که به‌طور معمول به شکل افزایش تمرکز و کاهش تفکر آگاهانه و خودگویی یا بیان کلامی پنهان گزارش می‌شود – کمک کنند (دنی و همکاران، ۲۰۰۳). در واقع، افراد ماهر کارایی عصبی بیشتری نسبت به افراد مبتدی نشان می‌دهند و فرایندهای شناختی حرکتی با حداقل مصرف انرژی همراه است (دنی و همکاران، ۲۰۰۳). به گفتهٔ محققان، عملکرد موفق مستلزم آن است که فرایندهای شناختی نامربوط با تکلیف مهار شوند، درحالی‌که فرایندهای شناختی مرتبط با تکلیف افزایش یابند؛ بنابراین، کارکرد قشری مغز افراد ماهر با کارایی بیشتری همراه است و افراد نخبه و ماهر از پردازش قشر مغزی مناسب‌تری نسبت به افراد مبتدی برای انجام یک تکالیف برخوردارند که این به کیفیت بیشتر و خروجی حرکتی سازگارتر منجر می‌شود (هتفیلد و هیمن، ۲۰۰۱؛ دنی و همکاران، ۲۰۰۳).

همچنین از دلایل نتایج متناقض تحقیقات در زمینهٔ فرایندهای شناختی حرکتی، می‌تواند این موضوع باشد که در این تحقیقات از تکالیف مختلفی برای مثال شناختی، ادراکی و حرکتی که نواحی متفاوتی از مغز را با توجه به سطح مهارت افراد درگیر می‌کنند، استفاده شده است. علاوه بر این، برخی تحقیقات برای بررسی فرایندهای زیربنایی یادگیری و کنترل حرکتی، بیشتر بر ناحیهٔ گیجگاهی چپ (T3 یا T7) تمرکز کرده‌اند (قاسمیان و همکاران، ۲۰۱۷؛ هتفیلد و همکاران، ۱۹۸۴)، که به‌نظر می‌رسد نه‌تنها این ناحیه به‌طور مستقیم با کنترل حرکتی مرتبط نیست، بلکه استنباط یک فرایند شناختی خاص از فعالیت ناحیهٔ گیجگاهی چپ از نظر قیاسی معتبر نیست که به این عمل *استنتاج معکوس*[1] گفته می‌شود (پولدراک، ۲۰۰۶؛ پار و همکاران، ۲۰۲۱)، زیرا ناحیهٔ گیجگاهی چپ در طیف متنوع و پیچیده‌ای از کارکردهای شناختی حرکتی مانند حافظهٔ فعال (لیاکاکیس و همکاران، ۲۰۱۱)، کنترل حرکتی بازدارنده (سویک و اشلی، ۲۰۰۸)، پردازش چندحسی، زبان، توجه و تلاش شناختی و حرکتی نقش دارد (پار و همکاران، ۲۰۲۱).

احتمالاً از دلایل بررسی این ناحیه توسط محققان این است که از آنجایی که ناحیهٔ گیجگاهی چپ با فرایندهای کلامی ـ تحلیلی (هافلر و همکاران، ۲۰۰۰) یعنی درک زبان و تولید گفتار مرتبط است (اسپرینگر و دویچ، ۱۹۹۸)، بنابراین ناحیهٔ مناسبی برای اندازه‌گیری کنترل حرکتی آگاهانه است، درحالی‌که به‌نظر می‌رسد که این ناحیه ارتباط مستقیمی با کنترل آگاهانه حرکات نداشته باشد. در واقع چون یادگیرندگان مبتدی هنوز مهارت موردنظر را اکتساب نکرده‌اند و در اجرای تکلیف ناتوان هستند، تلاش می‌کنند تا از طریق گفت‌وگو با خود ایدهٔ اساسی مهارت را درک کرده و الگوهای حرکتی را تا حد امکان صحیح اجرا کنند (فیتز و پوزنر، ۱۹۶۷) که این عمل موجب افزایش درگیر شدن قشر گیجگاهی چپ می‌شود. بر این اساس، بررسی صرف ناحیهٔ گیجگاهی چپ، برای بررسی سازوکارهای شناختی حرکتی و عصبی حرکتی زیربنایی یادگیری و کنترل حرکات، ناکافی و یک محدودیت تحقیقاتی است، زیرا کنترل تفکر و خودگویی تا حدودی دشوار و حتی غیرممکن به‌نظر می‌رسد، چراکه علاوه بر افراد مبتدی، حتی ممکن است افراد ماهر هم درگیر خودگویی شوند و دربارهٔ موضوعاتی که به عملکرد یا حتی جنبه‌های راهبردی تکلیف مرتبط نیست، تفکر کرده و با خود صحبت کنند؛ به‌خصوص اینکه افراد ماهر به‌دلیل اینکه خودکار شده‌اند، ذهن آزادتری دارند (در تحقیق حاضر از طریق مصاحبهٔ انفرادی، متوجه شدیم که افراد ماهر در حین اجرای تکلیف، درگیر فعالیت‌های نامربوط با اجرای مهارت می‌شوند). بنابراین این محدودیت می‌تواند موجب تناقض در نتایج تحقیقات شناختی حرکتی و عصب حرکتی کنترل و یادگیری حرکات شود. در عوض، مناسب است محققان مناطق بیشتر و به‌طور خاص نواحی مسئول کنترل و اجرای حرکات و اعمال را بررسی کنند (برای مثال قشر حرکتی که در تحقیق حاضر بررسی شد).

---

[1]. Reverse inference

بر اساس نتایج پژوهش حاضر مبنی بر بیشتر بودن توان ریتم میو در افراد ماهر در نواحی مربوط به کنترل حرکتی و نیز طبق *فرضیهٔ کارایی روانی حرکتی* که بیان می‌کند بهبود در فرایندهای شناختی حرکتی شامل مجموعه‌ای از پردازش اطلاعات تصفیه‌شده برای هماهنگ‌سازی فرایندهای شناختی حرکتی در مغز است (هتفیلد و همکاران، ۲۰۰۱)، به‌طوری‌که اجرای مهارت و اعمال حرکتی افراد نخبه و ماهر، با سرکوب فرایندهای شناختی حرکتی نامرتبط با تکلیف مشخص می‌شود؛ محققان تحقیق حاضر نیز استنباط می‌کنند که به‌دلیل تکرار و تمرین مهارت پات گلف، شاهد پالایش و کارایی کارکرد مغز در افراد ماهر هستیم، به‌طوری‌که نواحی مربوط و درگیر در اجرای تکلیف، برای مثال نواحی پیشانی که نواحی مرتبط با فرایندهای برنامه‌ریزی حرکتی هستند (هافلر و همکاران، ۲۰۰۰) و نیز نواحی مرکزی یا قشر حرکتی که مربوط به کنترل و اجرای حرکات هستند (مندروپ و هید، ۲۰۱۹)، بیشتر درگیر می‌شوند؛ به‌طوری‌که این فعالیت بیشتر مغز با افزایش توان امواج (در تحقیق حاضر ریتم میو) در نواحی مرکزی (C3، Cz و C4) قابل مشاهده است، درحالی‌که نواحی نامرتبط با کنترل و اجرای مهارت کمتر درگیرند (شکل ۲).

برای توضیح و توجیه این نتایج شناختی حرکتی و عصب حرکتی، مبنی بر کاهش فعالیت نواحی نامربوط مغز با تکلیف، برای مثال ناحیهٔ گیجگاهی چپ (دنی و همکاران، ۲۰۰۳) و در مقابل افزایش درگیر شدن نواحی مرتبط با برنامه‌ریزی، سازماندهی و کنترل مهارت، برای مثال نواحی کنترل حرکتی قشر مغز که در یافته‌های پژوهش حاضر نیز مشاهده و تکرار شد، ما استنباط می‌کنیم که به‌نظر می‌رسد در ابتدای یادگیری، به‌دلیل ناتوانی در انجام مهارت، افراد مبتدی به شیوه و نحوهٔ اجرای مهارت فکر می‌کنند و برای اجرای صحیح حرکات و دستیابی به اهداف مهارت چون درگیر خودگویی هستند و تلاش می‌کنند به هر نحو ممکن تکلیف را انجام دهند (فیتز و پوزنر، ۱۹۶۷)، ناحیهٔ گیجگاهی چپ بسیار درگیر و فعال است. با ادامهٔ یادگیری و اکتساب دانش رویّه‌ای[1] و قابلیت لازم، به مرور زمان خودگویی کاهش یافته و در پی آن نیز توان امواج و کوهرنس یا اتصال امواج در ناحیهٔ گیجگاهی چپ کاهش می‌یابد. با افزایش سطح مهارت یادگیرنده در مقایسه با آغاز یادگیری، در عوضِ درگیر بودن فرایندهای شناختی نامربوط و همچنین نواحی درگیر در دانش اخباری[2] (برای مثال قشر گیجگاهی چپ) و نواحی نامربوط با اجرای مهارت، نواحی کنترل‌کنندهٔ بدن و اندام‌ها (برای مثال قشر حرکتی) بیشتر درگیر می‌شوند، تا اجزای درگیر در حرکات را بهتر سازماندهی و کنترل کنند که در راستای کسب این قابلیت، مهارت موردنظر هماهنگ‌تر و همسان‌تر اجرا می‌شود. این استدلال ما با نظریه‌های حوزهٔ یادگیری حرکتی همراستا و توجیه‌پذیر است. برای مثال طبق *مدل سه‌مرحله‌ای* اکتساب مهارت[3] فیتز و پوزنر (۱۹۶۷) و *مدل شناختی اکتساب مهارت*[4] اندرسون (۱۹۸۲)، یادگیری به‌عنوان فرایندی پیوسته، همراه با تغییرات تدریجی در ماهیت پردازش اطلاعات توصیف می‌شود (دیویدز و همکاران، ۲۰۰۸)، به‌طوری‌که در مراحل مختلف زمانیِ فرایند یادگیری، فرایندهای شناختی، ادراکی و حرکتی متفاوتی درگیر می‌شوند (فیتز و پوزنر، ۱۹۶۷). برای مثال در آغاز یادگیری یعنی مرحلهٔ شناختی[5]، فرایندهای شناختی و ذهنی هشیار و دانش آشکار[6] بسیار درگیرند (*نظریهٔ کنترل تفکر تطبیقی اندرسون*[7]؛ ۱۹۸۲). از آنجا که یادگیرنده هنوز دانش رویه‌ای مورد نیاز برای اجرای مهارت را ندارد، در تلاش برای جبران فقدان این دانش، برای اجرای مهارت، درگیر آزمون و خطا و یک رویکرد آزمایشی می‌شود (*آزمون فرضیه*[8]؛ مستر، ۲۰۰۰). بنابراین، عملکرد و اجرای یادگیرنده بی‌ثبات، ناپایدار، ناهمسان و دارای خطاهای زیاد است و فرد نیازمند تلاش‌های ذهنی و جسمانی بسیاری برای اصلاح خطاهاست (فیتز و پوزنر، ۱۹۶۷). از آنجا که یادگیرنده برای رفع خطاها و یافتن راه‌حل‌های مشکلات از فرایندهای شناختی استفاده می‌کند و توجه و آگاهی وی معطوف به یافتن راه‌حل‌هاست، ازاین‌رو درگیر خودگویی و فعالیت‌های کلامی می‌شود، به‌طوری‌که هشیارانه تلاش می‌کند تا به‌طور تحت‌اللفظی به شیوه و نحوهٔ اجرای مهارت فکر کند تا قادر باشد به هر طریق ممکن مهارت موردنظر را به‌درستی اجرا کند، ازاین‌رو بیشتر بر دانش اخباری تکیه می‌کند (اندرسون، ۱۹۸۲؛ دریفوس، ۲۰۰۵؛ فیتس و پوزنر، ۱۹۶۷).

---

1. Procedural knowledge
2. Declarative knowledge
3. The model of motor skill acquisition
4. Cognitive model of skill acquisition
5. Cognitive stage of learning
6. Explicit knowledge
7. Adaptive control of thought theory (ACT)
8. Hypothesis testing

به مرور و با کسب تجربه، یادگیرنده یاد می‌گیرد تا بر اساس منابع اطلاعاتی و از طریق فرایند تداعی، برای رسیدن به اهداف مهارت تلاش کند و با درگیر شدن در فرایند ارزیابی و اصلاح خطا، سعی می‌کند نیازهای حرکت کنونی را با اطلاعاتی موجود در حافظهٔ بلندمدت ارتباط دهد و اطلاعات یاد گرفته‌شدهٔ قبلی را برای برآورده ساختن نیازهای فعلی اجرای مهارت جدید انتقال دهد تا پیش از برنامه‌ریزی، سازماندهی و اجرای کوشش بعدی تعدیل‌هایی را ایجاد کند (فیتز و پوزنر، ۱۹۶۷). بنابراین در مرحلهٔ پالایش یا تداعی یادگیری[1]، پردازش اطلاعات با تغییرات زیادی در فعالیت شناختی همراه است، به‌طوری‌که یادگیرنده دیگر به‌طور کامل بر دانش و حافظهٔ اخباری وابسته نیست، چراکه برخی عناصر مهارت به شکل حافظهٔ رویه‌ای کسب می‌شوند که دیگر در حافظه فعال نیستند (*نظریهٔ اکتساب مهارت*[2]؛ اندرسون، ۱۹۸۲)، ازاین‌رو به مرور خودگویی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر به‌دلیل اینکه یادگیرنده مکانیک زیربنایی مهارت را یاد گرفته است، در نتیجه، تغییرات واضحی در رفتار او مشاهده می‌شود؛ برای مثال هم میزان و بزرگی خطاها و هم تغییرپذیری بین خطاها کاهش می‌یابد، در مقابل اجرای وی یکنواخت‌تر و سریع‌تر شده و ناهماهنگی، ناهمسانی و بی‌نظمی‌های ابتدایی در رفتارش کاهش می‌یابد و یا حتی ناپدید می‌شود (نیوول، ۱۹۸۵). علاوه بر این، حتی برخی بخش‌های مهارت تا حدودی خودکار کنترل می‌شوند و نیاز به توجه هشیارانهٔ کمتری دارند؛ بنابراین همچنان‌که حافظهٔ حرکتی و رویه‌ای در کنترل عمل مسلط می‌شود، خودگویی بیشتر کاهش می‌یابد.

به مرور زمان و با تمرین و تجربهٔ بیشتر، پالایش پردازش اطلاعات بیشتر رخ می‌دهد و یادگیرنده وارد مرحلهٔ خودکاری یا خودمختاری یادگیری[3] می‌شود، به‌طوری‌که دیگر نیاز به توجه صریح و مداوم (فیسک و اشنایدر، ۱۹۸۴) دربارهٔ نحوهٔ چگونه اجرا کردن مهارت ندارد (فیتز و پوزنر، ۱۹۶۷) و با کمترین تفکر آگاهانه به اجرای مهارت (براونشتاین، ۲۰۱۴؛ دریفوس، ۲۰۰۵)، به‌طور دقیق و سریع و با تلاش ذهنی و جسمانی کم (لوگان، ۱۹۸۵)، بدون محاسبه، مقایسه، قضاوت، استدلال، یا اعمال قوانین (*مدل پنج‌مرحله‌ای اکتساب مهارت بزرگسالان*[4]؛ دریفوس، ۲۰۰۵)، به‌طور مؤثر و کارامد و تقریباً خودکار عمل می‌کند (*نظریهٔ خودکاری*[5]؛ لوگان، ۱۹۸۵). به‌دلیل اینکه فرد ماهر نیازی به توجه هشیار بر مهارت ندارد، در عوض توجه خود را به جنبه‌های دیگر اجرا معطوف می‌کند (*نظریهٔ دوفرایندی پردازش اطلاعات*[6]؛ شیفرین و اشنایدر، ۱۹۷۷). به‌طوری‌که می‌تواند مهارت آموخته‌شده را همزمان با سایر تکالیف یا مهارت‌ها اجرا کند (*مدل معماری مشبک*[7]؛ کریستنسن و همکاران، ۲۰۱۶). برای مثال او همزمان با اجرای خودکار مهارت، شرایط محیطی و یا موقعیت بازیکنان رقیب را بررسی می‌کند و ازاین‌رو اعمالش را با موقعیت‌های محیطی متنوع و متغیر مطابقت می‌دهد (فیتز و پوزنر، ۱۹۶۷) و به این طریق در موقعیت‌های پویا بسیار انعطاف‌پذیر عمل می‌کند (*فرضیهٔ عملکرد برتر*[8]؛ برتلو همکاران، ۲۰۱۶).

به‌طور کلی، پژوهش حاضر نشان داد که در نواحی قشر حسی و حرکتی مغز، کارکرد مغز افراد ماهر و مبتدی متفاوت است. به‌نظر می رسد طی فرایند یادگیری حرکتی و تمرین کردن یک مهارت حرکتی خاص (برای مثال مهارت پات گلف)، مغز دستخوش تغییرات کارکردی و ساختاری می‌شود که این تغییرات در سیستم عصبی، نشان می‌دهد پردازش اطلاعات و کنترل حرکات و اعمال با کارایی بیشتری رخ می دهد. به‌نظر می‌رسد در افراد ماهر که عملکرد بهتر و موفق‌تری دارند، فرایندهای شناختی حرکتی و عصبی حرکتی مربوط با تکلیف افزایش می‌یابد و بیشتر درگیر می‌شوند و این تغییرات عصبی احتمالاً یکی از دلایل کنترل و اجرای بهتر مهارت‌های حرکتی در افراد ماهر است. ازاین‌رو هنگام انجام یک تکلیف خاص، کارکرد قشری مغز افراد نخبه و ماهر با کارایی بیشتر و مناسب‌تری همراه است که به حداقل مصرف انرژی در فرایندهای شناختی عصبی و افزایش کیفیت و خروجیِ حرکتیِ سازگارتر منجر می‌شود. به این معنا که افراد ماهر نه‌تنها انرژی ذهنی و شناختی کمتری را صرف می‌کنند، بلکه از اجرای حرکتی هماهنگ، بهینه و کارامدی برخوردارند.

1. Associative stage of learning
2. Theory of skill acquisition
3. Autonomous stage of learning
4. The Five Models of Adult Skill Acquisition
5. Theory of automatization
6. The two-process theory of information processing
7. The meshed architecture model
8. The hypothesis of superior performance

تقدیر و تشکر

محققان تحقیق حاضر، از افرادی که در فرایند انجام تحقیق همکاری داشته‌اند و نیز از تمامی شرکت‌کنندگان، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌کنند. همچنین از داوران محترم به‌دلیل ارائهٔ نظرهای ساختاری و علمی، سپاسگزاری می‌شود.

References

Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skills. *Psychological review*, *89*(4), 369. https://doi.org/10.1037/0033-295X.89.4.369

Azarpaikan, A., Taheri-Torbati, H. R., & Sohrabi, M. (2014). Effect of neurofeedback training on postural stability and fall risk in patients with Parkinson's disease. *Journal of Isfahan Medical School*, 31(270), 2352-2361. (In Persian)

Babiloni, C., Del Percio, C., Iacoboni, M., Infarinato, F., Lizio, R., Marzano, N., ... & Eusebi, F. (2008). Golf putt outcomes are predicted by sensorimotor cerebral EEG rhythms. *The Journal of Physiology*, 586(1), 131-139. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.141630

Baumeister, J., Reinecke, K., Liesen, H., & Weiss, M. (2008). The cortical activity of skilled performance in a complex sports-related motor task. *European journal of applied physiology*, *104*, 625-631. https://doi.org/10.1007/s00421-008-0811-x

Bertollo, M., di Fronso, S., Conforto, S., Schmid, M., Bortoli, L., Comani, S., & Robazza, C. (2016). Proficient brain for optimal performance: the MAP model perspective. *PeerJ*, *4*, e2082.

Brownstein, M. (2014). Rationalizing flow: Agency in skilled unreflective action. *Philosophical*

Studies, 168, 545-568. https://doi.org/10.1007/s11098-013-0143-5

Cannon, E. N., Yoo, K. H., Vanderwert, R. E., Ferrari, P. F., Woodward, A. L., & Fox, N. A. (2014). Action experience, more than observation, influences mu rhythm desynchronization. *Plos one*, *9*(3), e92002. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092002

Cheng, M. Y., Huang, C. J., Chang, Y. K., Koester, D., Schack, T., & Hung, T. M. (2015). Sensorimotor rhythm neurofeedback enhances golf putting performance. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *37*(6), 626-636. https://doi.org/10.1123/jsep.2015-0166

Cheng, M. Y., Wang, K. P., Hung, C. L., Tu, Y. L., Huang, C. J., Koester, D., ... & Hung, T. M. (2017). Higher power of sensorimotor rhythm is associated with better performance in skilled air-pistol shooters. *Psychology of Sport and Exercise*, *32*, 47-53. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2017.05.007

Christensen, W., Sutton, J., & McIlwain, D. J. (2016). Cognition in skilled action: Meshed control and the varieties of skill experience. *Mind & Language*, *31*(1), 37-66. https://doi.org/10.1111/mila.12094

Cooke, A., Gallicchio, G., Kavussanu, M., Willoughby, A., McIntyre, D., & Ring, C. (2015). Premovement high- alpha power is modulated by previous movement errors: Indirect evidence to endorse high- alpha power as a marker of resource allocation during motor programming. *Psychophysiology*, *52*(7), 977-981. https://doi.org/10.1111/psyp.12414

Cooke, A., Kavussanu, M., Gallicchio, G., Willoughby, A., McIntyre, D., & Ring, C. (2014). Preparation for action: Psychophysiological activity preceding a motor skill as a function of expertise, performance outcome, and psychological pressure. *Psychophysiology*, *51*(4), 374-384.

https://doi.org/10.1111/psyp.12182

Davids, K., Button, C., & Bennett, S. (2008). *Dynamics of skill acquisition: A constraints-led approach*. Human kinetics.

Deeny, S. P., Haufler, A. J., Saffer, M., & Hatfield, B. D. (2009). Electroencephalographic coherence during visuomotor performance: a comparison of cortico-cortical communication in experts and novices. *Journal of Motor Behavior*, *41*(2), 106-116. https://doi.org/10.3200/JMBR.41.2.106-116

Deeny, S. P., Hillman, C. H., Janelle, C. M., & Hatfield, B. D. (2003). Cortico-cortical communication and superior performance in skilled marksmen: An EEG coherence analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *25*(2), 188-204. https://doi.org/10.1123/jsep.25.2.188

Del Percio, C., Babiloni, C., Bertollo, M., Marzano, N., Iacoboni, M., Infarinato, F., ... & Eusebi, F. (2009). Visuo- attentional and sensorimotor alpha rhythms are related to visuomotor performance in athletes. *Human brain mapping*, *30*(11), 3527-3540.

https://doi.org/10.1002/hbm.20776

Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open-source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, *134*(1), 9-21. https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009

Denis, D., Rowe, R., Williams, A. M., & Milne, E. (2017). The role of cortical sensorimotor oscillations in action anticipation. *NeuroImage*, *146*, 1102-1114. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.10.022

Deutsch, G., & Springer, S. P. (1989). *Left brain, right brain*. WH Freeman.

Dreyfus, H. L. (2006). Overcoming the myth of the mental. *Topoi*, *25*, 43-49. https://doi.org/10.1007/s11245-006-0006-1

Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, *100*(3), 363. https://doi.org/10.1037/0033-295X.100.3.363

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G* Power 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

Fisk, A. D., & Schneider, W. (1984). Memory as a function of attention, level of processing, and automatization. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *10*(2), 181.

https://doi.org/10.1037/0278-7393.10.2.181

Fitts, P.M. and Posner, M.I. (1967) Human Performance. Brooks/Cole, Belmont.

Fox, N. A., Bakermans-Kranenburg, M. J., Yoo, K. H., Bowman, L. C., Cannon, E. N., Vanderwert, R. E., Ferrari, P. F., & van IJzendoorn, M. H. (2016). Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis. Psychological Bulletin, 142(3), 291–313.https:// doi. org/10. 1037/ bul00 00031

Gallicchio, G., Cooke, A., & Ring, C. (2016). Lower left temporal-frontal connectivity characterizes expert and accurate performance: High-alpha T7-Fz connectivity as a marker of conscious processing during movement. *Sport, Exercise, and Performance Psychology*, *5*(1), 14. https://doi.org/10.1037/spy0000055

Ghasemian, M., Taheri, H., Saberi Kakhki, A., & Ghoshuni, M. (2017). Electroencephalography pattern variations during motor skill acquisition. *Perceptual and Motor Skills*, *124*(6), 1069-1084. https://doi.org/10.1177/0031512517727404

Gladwell, M. (2008). *Outliers: The story of success*. Little, Brown.

Greenough, W. T., Black, J. E., & Wallace, C. S. (1987). Experience and brain development. *Child development*, 539-559. https://doi.org/10.2307/1130197

Hatfield, B., & Hillman, C. (2001). The psychophysiology of sport: A mechanistic understanding of the psychology of superior performance. *Handbook of Sport Psychology*, 2, 362-386. https://doi.org/10.1002/9781119568124.ch23

Haufler, A. J., Spalding, T. W., Santa Maria, D. L., & Hatfield, B. D. (2000). Neuro-cognitive activity during a self-paced visuospatial task: comparative EEG profiles in marksmen and novice shooters. *Biological psychology*, *53*(2-3), 131-160. https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00047-8

Janelle, C. M., Hillman, C. H., Apparies, R. J., Murray, N. P., Meili, L., Fallon, E. A., & Hatfield, B. D. (2000). Expertise differences in cortical activation and gaze behavior during rifle shooting. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *22*(2), 167-182. https://doi.org/10.1123/jsep.22.2.167

Jasper, H. H. (1958). The ten-twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *10*, 371-375.

Kao, S. C., Huang, C. J., & Hung, T. M. (2014). Neurofeedback training reduces frontal midline theta and improves putting performance in expert golfers. *Journal of Applied Sport Psychology*, *26*(3), 271-286. https://doi.org/10.1080/10413200.2013.855682

Kelly, A. C., & Garavan, H. (2005). Human functional neuroimaging of brain changes associated with practice. *Cerebral cortex*, *15*(8), 1089-1102. https://doi.org/10.1093/cercor/bhi005

Kerick, S. E., McDowell, K., Hung, T. M., Santa Maria, D. L., Spalding, T. W., & Hatfield, B. D. (2001). The role of the left temporal region under the cognitive-motor demands of shooting in skilled marksmen. *Biological psychology*, *58*(3), 263-277. https://doi.org/10.1016/S0301-0511(01)00116-8

Kim, W., Chang, Y., Kim, J., Seo, J., Ryu, K., Lee, E., ... & Janelle, C. M. (2014). An fMRI study of differences in brain activity among elite, expert, and novice archers at the moment of optimal aiming. *Cognitive and Behavioral Neurology*, *27*(4), 173-182. https:/do.org/10.1097/WNN.0000000000000042

Kuo, B. C., Yeh, L. C., Chen, F. W., Chang, C. S., Hsieh, C. W., & Yeh, Y. Y. (2023). Temporal profiles of cortical oscillations in novice performers for goal-directed aiming in a shooting task. *Biological Psychology*, *176*, 108482. https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2022.108482

Landers, D. M., Han, M., Salazar, W., & Petruzzello, S. J. (1994). Effects of learning on electroencephalographic and electrocardiographic patterns in novice archers. *International Journal of Sport Psychology*.

Liakakis, G., Nickel, J., & Seitz, R. (2011). Diversity of the inferior frontal gyrus—a meta-analysis of neuroimaging studies. *Behavioral brain research*, *225*(1), 341-347. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.06.022

Loze, G. M., Collins, D., & Holmes, P. S. (2001). Pre-shot EEG alpha-power reactivity during expert air-pistol shooting: A comparison of best and worst shots. *Journal of Sports Sciences*, *19*(9), 727-733. https://doi.org/10.1080/02640410152475856

Masters, R. S. (2000). Theoretical aspects of implicit learning in sport. *International Journal of Sport Psychology*.

Medendorp, W. P., & Heed, T. (2019). State estimation in posterior parietal cortex: Distinct poles of environmental and bodily states. *Progress in neurobiology*, *183*, 101691. https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2019.101691

Newell, K. M. (1985). Coordination, control, and skill. *Differing perspective in motor learning, memory, and control/Elsevier Science Publishers*. https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62541-8

Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*(1), 97-113. https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4

Parr, J. V. V., Vine, S. J., Wilson, M. R., Harrison, N. R., & Wood, G. (2019). Visual attention, EEG alpha power, and T7-Fz connectivity are implicated in prosthetic hand control and can be optimized through gaze training. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, *16*, 1-20. https://doi.org/10.1186/s12984-019-0524-x

Parr, J. V., Gallicchio, G., & Wood, G. (2023). EEG correlates of verbal and conscious processing of motor control in sport and human movement: a systematic review. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, *16*(1), 396-427. https://doi.org/10.1080/1750984X.2021.1878548

Petrini, K., Pollick, F. E., Dahl, S., McAleer, P., McKay, L., Rocchesso, D., ... & Puce, A. (2011). Action expertise reduces brain activity for audiovisual matching actions: an fMRI study with expert drummers. *Neuroimage*, *56*(3), 1480-1492. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.03.009

Pineda, J. A. (2005). The functional significance of mu rhythms: translating "seeing" and "hearing" into "doing". *Brain research reviews*, *50*(1), 57-68. https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2005.04.005

Poldrack, R. A. (2006). Can cognitive processes be inferred from neuroimaging data? *Trends in cognitive sciences*, *10*(2), 59-63.https:do.org/10.1016/j.tics.2005.12.004

Seo, J., Kim, Y. T., Song, H. J., Lee, H. J., Lee, J., Jung, T. D., ... & Chang, Y. (2012). Stronger activation and deactivation in archery experts for differential cognitive strategy in visuospatial working memory processing. *Behavioral brain research*, *229*(1), 185-193. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.01.019

Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological review*, *84*(2), 127. https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.2.127

Smith, M. E., McEvoy, L. K., & Gevins, A. (1999). Neurophysiological indices of strategy development and skill acquisition. *Cognitive Brain Research*, *7*(3), 389-404. https://doi.org/10.1016/S0926-6410(98)00043-3

Sparrow, W. A. (2000). *Energetics of human activity*. Human Kinetics.

Swick, D., Ashley, V., & Turken, A. U. (2008). The left inferior frontal gyrus is critical for response inhibition. *BMC Neuroscience*, *9*, 1-11. https://doi.org/10.1186/1471-2202-9-102

Taliep, M. S., & John, L. (2014). Sport expertise: the role of precise timing of verbal-analytical engagement and the ability to detect visual cues. *Perception*, *43*(4), 316-332. https://doi.org/10.1068/p753

Tan, S. J., Kerr, G., Sullivan, J. P., & Peake, J. M. (2019). A brief review of the application of neuroeconomics in skilled cognition during expert sports performance. *Frontiers in human neuroscience*, *13*, 278. https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00278

Verbruggen, F., & Logan, G. D. (2009). Models of response inhibition in the stop-signal and stop-change paradigms. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *33*(5), 647-661. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.08.014

Wang, K. P., Cheng, M. Y., Chen, T. T., Huang, C. J., Schack, T., & Hung, T. M. (2020). Elite golfers are characterized by psychomotor refinement in cognitive-motor processes. *Psychology of Sport and Exercise*, *50*, 101739. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2020.101739

Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, *15*(2), 70-73. https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901