

Organization the memory processes in the brain based on fractal analysis

Mohammad Reza Arab¹, Mohsen Nadjafi², Reza Khosrowabadi³, Farbod Setoudeh^{2*} , Mohammad Bagher Tavakoli⁴

1. PhD Student of Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Arak Branch, Arak, Iran

2. Assistant Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

3. Assistant Professor, Institute for Cognitive and Brain Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Arak, Iran

Abstract

Received: 11 Nov. 2019 Revised: 10 Jan. 2021 Accepted: 18 Jan. 2021

Introduction: Learning and memory processes are two essential cognitive functions that have no meaning without the other. The learning and memory mechanisms are faced with many challenges due to the complexity of many challenges. It is believed that the brain organizes the information using the coexistence of scale-free and oscillatory activities. Nevertheless, previous studies have mainly focused on neural oscillations during memory formation, while our understanding of scale-free behavior has remained limited. So, the memory content can also be considered in the case of stimulus. Despite research into the effect of stimuli on human EEG signal and memory formation, nothing has been done about behavioral learning tests and nonlinear analysis of EEG signals simultaneously to measure changes in auditory memory content. Such that, in previous studies, learning and memory processes only would lead to transient sensory memory.

One of the tools for investigating self-organizing dynamics during learning is EEG signals analysis. The purpose of this study is to investigate the dynamics of learning and memory processes (coding, maintenance, and retrieval) in the brain. For this purpose in this research, the researchers used the Rey auditory verbal learning test (RAVLT) to create learning and memory processes and evaluate related functions.

Methods: Eighteen volunteer healthy subjects age range 18–23 assigned to evaluate Rey auditory verbal learning test (RAVLT). All of them are university students and right-handed. EEG signals are recorded during five stages of RAVLT and so before and after the behavioral test. Simultaneous to estimate learning rate and memory process through RAVLT cognitive and behavioral assessment, the dynamics of these changes are investigated by Higuchi fractal dimension (HFD) estimation EEG signals.

Results: In this study, for the first time, the specific dynamics of brain activity in learning conditions in the human brain have been modeled by fractal analysis of EEG signals and the extent of self-organizing function or the effect of brain components, including fractal and oscillating has been investigated. From this research, we have shown changes in brain signals in the learning process. The input information that is audibly passed through the sensory memory related to hearing in the behavioral test, and activating the working memory, encodes the input information and places it in the semantic memory, the output of which is as a reminder of this information through verbal memory is provided.

The results of this study showed that increasing the number of words recalled or increasing the learning rate of participants is inversely proportional to the Higuchi fractal dimensionality of the EEG signals. The power spectrum obtained show an increase in the overall frequency spectrum of the EEG.

Approximation entropy confirms reducing the chaotic behavior of signals due to decreasing the complexity of signals the during memory process increases.

Conclusion: The fractal and oscillatory components behavior of the EEG signals present brain organization during learning and memory processes. It is possible to compare the results with a healthy community, which can be used to study people with learning disabilities such as Alzheimer's disease, attention deficit hyperactivity disorder (ADHD), and autism.

Keywords: Learning and memory process, Rey auditory verbal Learning Test, Higuchi fractal dimension

*Corresponding author: Farbod Setoudeh, Assistant Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Email: F.setoudeh@arakut.ac.ir



doi.org/10.30514/icss.23.1.128



سازمان‌دهی فرایندهای حافظه در مغز مبتنی بر تحلیل فرکتالی

محمد رضا عرب^۱، محسن نجفی^۲، رضا خسروآبادی^۳، فرید ستوده^{۴*}، محمدباقر توکلی^۴

۱. دانشجوی دکتری الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران.
 ۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.
 ۳. استادیار، پژوهشکده علوم شناختی و مغز، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران.
 ۴. استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران.

چکیده

مقدمه: یادگیری و فرایندهای حافظه دو عملکرد شناختی مهم مغزی هستند که یکی بدون دیگری مفهومی ندارد. مکانیسم یادگیری و حافظه به دلیل پیچیدگی، با چالش‌های بسیاری مواجه است، یکی از ابزارهای قدرتمند بررسی دینامیک خود سازماندهی مغزی در طی یادگیری، تحلیل امواج الکتروآنسفالوگرافی می‌باشد. هدف از این مطالعه، بررسی دینامیک یادگیری و فرایندهای حافظه (کدگذاری، نگهداری و بازیابی) در مغز بود.

روش کار: در این مطالعه ۱۸ نفر مرد با میانگین سنی ۲۳-۱۸ سال و راست دست بررسی شدند. امواج الکتروآنسفالوگرافی داوطلبان در طی ۵ مرحله آزمون و قبل و بعد از اجرای آزمون رفتاری ثبت گردید. همزمان با برآورد نرخ یادگیری و فرایندهای حافظه از طریق آزمون ارزیابی یادگیری شنیداری کلامی ری (RAVLT)، دینامیک این تغییرات با استفاده از تخمین بُعد فرکتالی هیگوچی امواج الکتروآنسفالوگرافی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه برای ایجاد یادگیری و فرایندهای حافظه از آزمون RAVLT استفاده شده است.

یافته‌ها: در این پژوهش برای اولین بار، دینامیک خاص فعالیت مغز در شرایط یادگیری با استفاده از تحلیل مقطعی امواج الکتروآنسفالوگرافی و تاثیر مولفه‌های مغزی شامل با استفاده از تحلیل فرکتال بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش تعداد کلمات به خاطر آورده شده یا همان رشد منحنی نرخ یادگیری افراد مورد مطالعه متناسب با کاهش بُعد فرکتالی امواج می‌باشد. همچنین طیف توان موج بعد از یادگیری، نسبت به قبل از آن افزایش قابل توجه را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری: رفتار مولفه‌های فرکتال و نوسانی امواج نشان از دینامیک خود سازمان‌دهی مغز در هنگام یادگیری و فرایندهای حافظه دارد.

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

اصلاح نهایی: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

واژه‌های کلیدی

یادگیری و فرایندهای حافظه
 آزمون ارزیابی یادگیری شنوایی و کلامی ری
 بُعد فرکتالی هیگوچی

نویسنده مسئول

فرید ستوده، استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

ایمیل: F.setoudeh@araku.ac.ir



doi.org/10.30514/ics.23.1.128

Citation: Arab MR, Nadjafi M, Khosrowabadi R, Setoudeh F, Tavakoli MB. Organization the memory processes in the brain based on fractal analysis. Advances in Cognitive Sciences. 2021;23(1):128-139.

مقدمه

که عملکردهای آینده را هدایت می‌کند. حافظه در مفهوم گسترده به دانش ایجاد شده داخلی به عنوان نتیجه یادگیری اشاره دارد. مشخص گردیده است توانایی یادگیری و فرایندهای حافظه (کدگذاری، نگهداری و یادآوری) مرتبط با دینامیک خود سازمان‌دهی مغز در مولفه‌های فعالیت مغزی مرتبط با مقیاس‌های زمانی و فرکانسی قرار گرفته است و

یادگیری و حافظه دو کارکرد شناختی بسیار مهم و پیچیده می‌باشند که رابطه بسیار نزدیک و درهم تنیده در مغز انسان دارند. حافظه به یادگیری و یادگیری به حافظه وابسته می‌باشد و پژوهشگران علوم شناختی معتقدند حافظه بدون یادگیری مفهومی ندارد. یادگیری به توانایی یا فرایند تبدیل امواج حسی دریافتی از محیط به دانش می‌باشد

تفکیک (Segregation) و در تکالیف Iback دارای دینامیک ادغام (Integration) بوده است و این تغییرات دینامیک در پیکربندی شبکه پاسخی در مقابل افزایش بار تحریکی در تکالیف یادگیری و ارزیابی حافظه فعال بوده است (۷).

در بررسی پیچیدگی امواج EEG در طی حافظه کوتاه مدت، نشان از کاهش پیچیدگی در تکالیف یادگیری به دست آمده، می‌باشد، به طوری که میزان این کاهش، متناسب با مقدار یادگیری در فرد مورد مطالعه بوده و همچنین میزان انرژی باند تتا به عنوان یک باندهای تاثیرگذار در فاز کدگذاری و به خاطر آوری اطلاعات بحث شده است (۸).

یکی عوامل تاثیرگذار در فرایند یادگیری و حافظه‌سازی نسبت توان باندهای فرکانسی به یکدیگر می‌باشد، به طوری که در پژوهش‌های صورت گرفته دو موضوع بررسی شده است: یکی این که میزان توان نسبی کلیه باندهای فرکانسی تغییرات داشته است و دیگر این که نسبت توان آلفا به بتا در ناحیه دو طرف قشر پس‌سری (occipital cortex Bilateral) در تکالیف دیداری در فاز کدگذاری و به خاطر آوری کاهش داشته است (۹).

نقش دینامیک فعال قشر پیش‌پیشانی (Prefrontal cortex) در فعالیت حافظه کاری در شرایط تکالیف دیداری در تحقیقات زیادی ملاحظه شده و مشخص گردیده است که قشر پیش‌پیشانی مغز نقش حیاتی در ذخیره و دستکاری اطلاعات در حافظه کاری را به عهده دارد (۱۰). یک سوم قشر مغز انسان مختص به لوب پیشانی می‌باشد که این ناحیه نیز به سه قسمت مهم شامل: قشر پیش حرکتی، پارالیمبیک و پیش‌پیشانی تقسیم می‌گردد. علاوه بر این هم خود قشر پیش‌پیشانی قسمت‌های کوچک‌تری دارد که مسئول عملکرد مولفه‌های مختلف حافظه کاری می‌باشد. فرایندهای که در آنها، تجربیات به حافظه منتقل می‌شوند مرتبط با واحد هیپوکامپ در ناحیه میانی لوب‌های گیجگاهی می‌باشد. پژوهشگران علوم شناختی معتقدند، این واحد نقش مهمی در تقویت یادگیری و به هم مرتبط شدن تحریکات ورودی را بر عهده دارد (۱۱).

در برخی از مطالعات قبلی نشان داده شده که باندهای فرکانسی تتا و آلفا غالب‌ترین فرکانس در طی شناخت و تکالیف حافظه کاری (۱۲) و همچنین فعالیت باندهای فرکانسی آلفا و بتا در فاز به خاطر آوری حافظه رویدادی گزارش شده است (۱۳).

در یکی از پژوهش‌های که الگوی یادگیری آن وابسته به رویداد نمی‌باشد از طریق نمایش فرمول‌های شیمی برای افراد مورد مطالعه به عنوان یک الگوی رفتاری استفاده شده، که مشخص شده در طی یادگیری به طور غالب توان‌های طیفی باندهای فرکانسی دلتا و تتا نسبت به بقیه افزایش بیشتری دارد و همچنین توان فرکتالی یا همان توان طیفی با محورهای

این مقیاس‌های فرکانسی به دلیل هندسه فرکتالی مغز از خود خاصیت خود متشابهی نشان می‌دهد (۱). که یکی از ابزار قدرتمند مطالعه این ویژگی تحلیل فرکتالی می‌باشد (۲). در این مطالعه به منظور بررسی دینامیک یادگیری و فرایندهای خلق حافظه از ویژگی خود متشابهی یا فرکتالی مغز در هنگام اجرای آزمون یادگیری شنیداری و کلامی ری ((RAVLT) (Rey auditory verbal learning test) استفاده شده است. الگوی رفتاری به کار برده شده بر خلاف پژوهش‌های قبلی وابسته به زمان‌های کوتاه وابسته به رویداد ((Event related (ERP) potential) نمی‌باشد و در طی چندین مرحله یادگیری و حافظه‌سازی بر روی سوژه اجرا می‌گردد (۳).

در بررسی دینامیک یادگیری و فرایندهای حافظه پژوهش‌های زیادی بر روی ریتم‌های مغزی یا همان زیر باندهای فرکانسی با استفاده از تحلیل‌های مختلف انجام شده که عمده آنها با بررسی مراحل فرایندهای حافظه فعال (Working memory) از طریق الگوهای ارزیابی رفتاری و اندازه‌گیری میزان دامنه و تاخیر پتانسیل وابسته به رویداد (ERP) ناشی از این تغییرات در مغز مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده است که در تکالیف دیداری با نمایش مرفولوژی و مقایسه صورت افراد میزان توان طیفی (Power spectral density) باند تتا در فاز کدگذاری اطلاعات تصویری که یکی از مهمترین مراحل فرایند یادگیری است (۴) عمدتاً در نواحی قشری پیشانی (Frontal cortex) افزایش داشته و این باند فرکانسی در تکالیف شناختی، وظیفه همزمان‌سازی (Synchrony) بخش‌های مختلف مغز را به عهده دارد. توان باند فرکانسی بتا نیز در فاز نگهداری و تثبیت اطلاعات در مغز کاهش می‌یابد به گونه‌ای که این توان فرکانسی فقط در نواحی گیجگاهی توسعه داده شده و هرگونه خطا در فاز به خاطر آوری برای افراد مورد مطالعه فقط در صورت عدم شناسایی صحیح بعضی از چهره‌ها ایجاد شده است (۴). در استفاده همزمان EEG و fMRI با هدف افزایش وضوح زمانی و مکانی، افزایش توان باندهای آلفا و بتا در ارتباط با به خاطر آوری حافظه رویدادی گزارش شده که در آن ارتباط قوی بین فرایندهای حافظه و تالاموس در مغز مشاهده شده است (۵).

میزان ارتباطات عملکردهای مغز همانند همبستگی، همدوسی (Coherency) و شاخص تاخیر فاز کانال‌های ثبتي EEG یکی دیگر از روش‌های بررسی فرایندهای حافظه می‌باشد (۶).

در طراحی شبکه مغزی که حاصل دینامیک ارتباطات عملکردی بخش‌های مختلف مغز می‌باشد، اطلاعات ارزشمندی به دست آمده است، به گونه‌ای که مشخص شده شبکه مغزی در شرایط تکالیف یادگیری و حافظه از نوع 2back دارای پیکربندی با حداکثر دینامیک

در صورت توجه یا انتخاب یک نوع محرکه خاص از این اطلاعات که عمدتاً از نوع دیداری و شنوایی می‌باشد وارد حافظه کوتاه مدت می‌گردد (۲۱-۱۹). بعضی از پژوهشگران معتقدند که این همان حافظه کاری است که به دلیل دینامیک فعال خود ضمن نگهداری اطلاعات ورودی، آن را دستکاری و در صورت نیاز به اطلاعات از قبل ذخیره شده در مغز پیوند می‌دهد (۲۰) و در صورت تکرار و تمرین این اطلاعات به حافظه بلند مدت انتقال داده می‌شود که می‌تواند چندین روز یا حتی در طول زندگی در حافظه انسان پایدار بماند. فرایندهای حافظه با سه مولفه خود شامل کدگذاری اطلاعات ورودی، تثبیت و نگهداری (Maintenance) و در مرحله آخر فرد با به خاطر آوری اطلاعات ورودی (Retrieval) طبق شکل ۱ امکان ماندگاری اطلاعات در مغز فراهم می‌گردد. هرچه تعداد اجرای این سه مرحله بیشتر باشد ماندگاری اطلاعات در مغز بیشتر خواهد شد و منجر به ایجاد حافظه معنایی (Semantic memory) و رویدادی (Episodic memory) می‌گردد (۲۱).

محدودیت‌های پژوهش‌های قبلی عدم بررسی در شرایط یادگیری و حافظه‌سازی معنایی در مغز بوده و همچنین بررسی فعالیت‌های دینامیکی و اثرگذاری محتویات حافظه ایجاد شده می‌باشد که این تغییرات به وسیله آزمون‌های RAVLT در افراد مورد مطالعه تأیید می‌گردد. در این مقاله، برخلاف پژوهش‌های قبلی اطلاعات از کانال حافظه حسی عبور کرده (۱۷) که به علت تکرار و تمرین زیاد (Rehearsal) اطلاعات ورودی تا حد زیادی کدگذاری، تثبیت و به خاطر آوری شده و نهایتاً به حافظه شنیداری و کلامی تقریباً پایداری تبدیل می‌گردد.

در این مقاله، ما از تحلیل غیر خطی فرکتال جهت محاسبه بُعد فرکتالی هیگوجی امواج EEG استفاده کرده‌ایم که بازه بُعد فرکتالی هیگوجی در مراحل آزمایش رفتاری با هم متفاوت می‌باشد ولی میانگین این متغیر با افزایش مقدار حافظه در قشر مغزی روند کاهشی پیدا می‌کند و این کاهش بُعد فرکتالی امواج به معنی کاهش میزان تصادفی بودن یا کاهش پیچیدگی امواج می‌باشد که به وسیله تخمین آنتروپی تقریب، تأیید گردیده است. به موازات تغییرات بُعد فرکتالی زیر باندها، تغییرات میانگین توان امواج مغزی در مراحل مختلف یادگیری نیز بررسی شده که این مقدار آهنگ افزایشی داشته، که نشان از دینامیک فعال مغز در فرایندهای حافظ را دارد که هم جهت با پژوهش‌های پیشین می‌باشد. ساختار پیشنهادی استفاده شده در این مقاله، به منظور شکل‌گیری فرایندهای حافظه، در شکل ۱ نشان داده شده است.

هدف این مطالعه بررسی رفتار خود سازمانده مغز در روند یادگیری و فرایندهای حافظه ایجاد شده به وسیله اجرای آزمون RAVLT می‌باشد که در این راستا دینامیک حاصل از تغییرات حافظه و نوسانات امواج

لگاریتمی، روند صعودی داشته و شیب این منحنی یا همان ویژگی مستقل از مقیاس (Scale free) با بهره یادگیری رفتاری همبستگی منفی داشته و نشان از افزایش محدود رفتار بدون مقیاس مغزی در هنگام یادگیری به منظور تجمیع و هم‌گرایی تحریکات ورودی و امکان اتصال اطلاعات جدید وارد شده به مغز با استفاده از اطلاعات از قبل ذخیره شده دارد (۱۴).

غیر از تاثیر تخصصی باندهای فرکانسی، منابع تولید آنها نیز در تعدادی از پژوهش‌های گزارش شده، بر این اساس فاز کدگذاری اطلاعات جدید در مغز را مرتبط با فعالیت تتا در حلقه فیدبکی قشر مغز (هیپوکمپ) و کاهش نوسانات آلفا دو (۱۳-۱۰ هرتز) را مرتبط با حلقه فیدبکی قشر مغز (تلاموس) می‌دانند (۱۵).

نمای هرست (Hurst exponent) یکی از روش‌های تحلیل فرکتالی می‌باشد، که به طور قوی قادر است وابستگی بلند مدت یا همان محتویات حافظه یک سری زمانی مثل امواج EEG را اندازه‌گیری و تخمین نماید (۱۶). بررسی تاثیر تحریکات شنوایی مثل موسیقی، آمیخته به انواع نویزهای صورتی و سیاه بر روی محتویات حافظه ایجاد شده در امواج EEG نشان داده شده است، به طوری که در هر تحریک شنوایی، نمای هرست امواج EEG با مقادیر $H > 0.5$ اندازه‌گیری شده است. با توجه به تغییر نمای هرست امواج می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حافظه‌سازی فقط مربوط به مرحله حسی یا حافظه حسی (buffer sensory) بوده و به دلیل عمر کوتاه این اطلاعات برای فرد منجر به حافظه طولانی مدت نشده است (۱۷).

تغییرات Plasticity در ماده خاکستری و سفید مغز در ساختار مغز در طی یادگیری مهارتی نشان داد که با تکرار و تمرین بدنی در فرد مورد مطالعه، مهارت ایجاد می‌گردد. این یادگیری با تغییر حجم ماده سفید و خاکستری در قشر مغز در تصاویر پزشکی تشدید مغناطیسی قابل ارزیابی می‌باشد (۱۷).

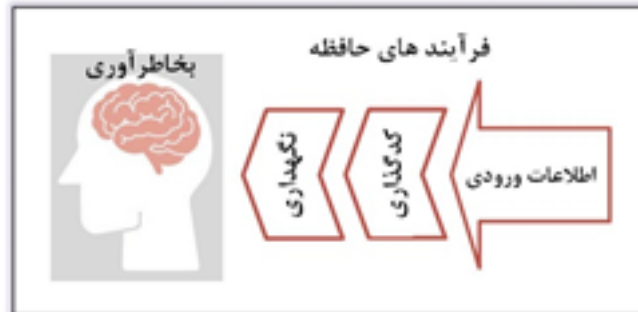
بررسی رفتار مغز در شرایط یادگیری با استفاده از تحلیل امواج مغزی با وضوح بالای ۱۲۸ کانال که در آن توزیع حداکثر طیف توانی در باندهای تتا و گاما بررسی شده است (۱۷).

از بازی‌های رایانه‌ای نیز برای مدل‌سازی حافظه معنایی و تعامل با حافظه رویدادی استفاده شده است، به طوری که این مدل جدید برای بازنمایی و یادگیری انواع مختلف دانش معنایی به کار رفته است (۱۸).

یکی از مهمترین مدل‌های موجود در یادگیری و تعامل حافظه مربوط به مدل Atkinson و Shiffrin می‌باشد که در این مدل اطلاعات از طریق حواس پنج‌گانه وارد حافظه موقت حسی شده، با توجه به عمر کم این اطلاعات در حدود چند ثانیه، عمده این اطلاعات از بین می‌رود و فقط

بعد فرکتالی و تغییرات توان EEG مرتبط با مراحل یادگیری تأیید گردیده است.

با استفاده از تحلیل‌های غیر خطی و تخمین توان طیفی بررسی شده است و این تغییرات با معیارهای ارزیابی RAVLT و نقشه مغزی توزیع



شکل ۱. فرایندهای حافظه شامل کدگذاری، تثبیت و نگهداری و یادآوری

روش کار

الف) دادگان

جهت افراد مورد مطالعه تکرار شده و در هر مرحله آزمایش بلافاصله از فرد خواسته می‌شود هر تعدادی از کلماتی که برایش خوانده شده را تکرار کند در صورتی که فرد، کلمه‌ای را چند بار در هر مرحله به خاطر آورد و تکرار کند تنها یک امتیاز برای او محسوب می‌گردد در این روش یادگیری رفتاری، احتمال به خاطر آوری کلمه از خارج فهرست بسیار نادر می‌باشد. تعداد کلماتی، که در هر مرحله اجرای آزمایش توسط فرد به خاطر آورد شده را ثبت می‌گردد. بعد از ۵ بار تکرار ۱۵ کلمه مورد نظر آزمایش، تعداد کل کلمات به خاطر آورده شده توسط فرد در این ۵ مرحله ثبت می‌گردد. با توجه دستورالعمل منحنی پیشرفت نرخ یادگیری یا حافظه‌سازی فرد در پنج مرحله یادگیری رسم شده و نرخ کل یادگیری فرد (Learning of total) بر اساس رابطه (۱) محاسبه گردید. در صورتی که میزان نرخ یادگیری عددی مثبت باشد، این به معنای فعالیت حافظه کاری و ایجاد یادگیری در فرد می‌باشد (۲۴).

تعداد ۱۸ نفر داوطلب در این آزمایش از دانشجویان مرد دانشگاه صنعتی اراک با میانگین سنی ۲۳-۱۸ سال شدند، که از نظر شنیداری و گفتاری در شرایط سلامت و از نظر اختلال نورولوژی و اثرات دارویی کاملاً عاری بودند.

با توجه به اثر اضطراب، استرس و هیجان در فرایند یادگیری و حافظه‌سازی کلیه داوطلبان به وسیله آزمون ارزیابی اضطراب، استرس و هیجان DASS-42، بررسی و اندازه‌گیری شده است (۲۲). در صورت کسب نمره حد نصاب در این آزمون، امکان اجرای آزمون یادگیری شنیداری و گفتاری ری برای این داوطلبان وجود دارد، این آزمون به دلیل تکرار و تمرین اطلاعات ورودی طبق مدل Shiffrin و Atkinson امکان انتقال اطلاعات به حافظه میان مدت را دارد (۲۱، ۲۳).

ملاحظات اخلاق پژوهشی حاضر مطابق با بیانیه هلسینکی بوده که از طرف دانشگاه صنعتی تأیید گردیده که شامل موارد فوق بود: کلیه آزمودنی‌ها اطلاعاتی در مورد پژوهش دریافت کردند و با رضایت آگاهانه در پژوهش مشارکت داشتند و می‌توانستند در هر مقطع زمانی، مطالعه را ترک کنند. این اطمینان به آزمودنی‌ها داده شد که تمام اطلاعات محرمانه خواهد ماند و فقط برای امور پژوهشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور رعایت حریم خصوصی، مشخصات آزمودنی‌ها ثبت نشد.

آزمون شناختی ارزیابی یادگیری شنیداری - کلامی RAVLT: این آزمون جهت تعیین نرخ یادگیری می‌باشد. این بسته آزمون یادگیری با نسخه فارسی (۲۴) در طی ۲۰ دقیقه و در ۵ مرحله اجرا می‌گردد در هر مرحله برای فرد مورد مطالعه تعداد ۱۵ کلمه مثل سرباز، بچه، کاسه و ... که هیچ ارتباطی با یکدیگر ندارند با یک ریتم یکنواخت

$$LOT = LT - (5 * WS_1) \quad (1)$$

WS_1 - تعداد لغت به یادآوری شده در مرحله اول آزمایش
 LT - تعداد کل لغات بیاد آوری شده در کل ۵ مرحله آزمایش
 LOT - میزان نرخ کل یادگیری

ب) ثبت امواج EEG:

ثبت ۳۲ کانال امواج مغزی بر اساس سیستم ۲۰-۱۰ بوده و کانال شماره ۳۲ هم به پائین چشم راست جهت ثبت امواج EOG چشم اتصال داده شده است. در حد امکان سعی شده محل ثبت امواج افراد، عاری از هرگونه تحریک خارجی (صوتی و نويز ۵۰ هرتز شهر و ...)

فرکانسی ۱-۴۵ هرتز جهت امواج انجام گردیده است.
 ۲- حذف Artifact ناشی از پلک زدن، حرکت کره چشم و ... با استفاده الگوریتم ICA و روش Infomax انجام می‌شود.
 ۳- حذف Artifactهای باقی مانده با استفاده از معیار آماری کورتوزیس امواج با توجه به رابطه (۲) محاسبه و در صورت بیشتر بودن از آستانه مورد نظر ($k > 5$) امواج کانال مورد نظر حذف و با انجام درون‌یابی کروی (Spherical interpolation) کانال‌های مجاور کانال مورد نظر مربوطه تخمین می‌گردد.

$$k = \frac{E(X - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (2)$$

۴- ۶۰ ثانیه اول امواج که مرتبط با زمان اجرای آزمایش بوده انتخاب می‌گردد، به طوری که ۱۵ ثانیه اول آن مربوط به تکرار ۱۵ کلمه جهت افراد مورد مطالعه بوده و ورود اطلاعات به حافظه شنیداری و کدگذاری و نگهداری اطلاعات در مغز بوده است و مابقی این زمان مربوط به یادآوری کلمات از طرف داوطلبان می‌باشد.

باشد. این تداخلات باعث کاهش کیفیت امواج ثبتی خواهد شد. حداکثر امپدانس موجود بین پوست سر و الکترودهای ثبتی ۱۰ کیلو اهم برقرار گردیده است. دستگاه EXG استفاده شده در این پژوهش قابلیت ثبت اکثر امواج زیستی (EEG, ECG, EOG, EMG, ECoG) را دارد. این دستگاه دارای فرکانس نمونه‌برداری ۱ کیلو هرتز و مبدل آنالوگ به دیجیتال ۲۴ بیتی می‌باشد. با توجه طولانی بودن زمان نمونه‌برداری از داوطلبان سعی شده، جهت کاهش Artifact ناشی از حرکت سر محل نصب الکترودهای مرجع و زمین در پشت گوش راست در ناحیه استخوان ماستوئید باشد.

امواج EEG افراد مورد مطالعه در ۷ مرحله و هر مرحله به مدت ۱۲۰ ثانیه ثبت شده است. این مراحل شامل قبل از اجرای آزمون (rest1) و در حین ۵ مرحله اجرای آزمون (trial1, ..., trial5) و در شرایط آرامش، بعد از اجرای آزمون (rest2) می‌باشد. مراحل اجرای این مطالعه با توجه به بلوک دیاگرام در شکل ۲ نمایش داده شده است.

ج) پیش‌پردازش امواج EEG:

۱- ابتدا فیلترینگ میان‌گذر با استفاده از فیلتر باترورث در محدود



شکل ۲. نمودار مراحل پژوهش

$$D=2-H \quad (5)$$

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = c * n^H \quad (6)$$

برای یک سری زمانی کاملاً تصادفی $D=1/5$ می‌باشد و مقادیر بُعد فرکتالی امواج EEG، با افزایش محتویات حافظه در امواج EEG، به دلیل افزایش مقادیر نمای هرست طبق رابطه (5) کاهش می‌یابد. مقدار نمای هرست نیز بر اساس رابطه (6) به دست می‌آید که در آن همان دامنه تجدید مقیاس شده، S انحراف معیار سری زمانی، c عدد ثابت و n بیان گر تعداد مشاهدات می‌باشد (25، 26).

آنتروپی تقریب: آنتروپی تقریب معیاری برای اندازه‌گیری میزان بی‌نظمی در سری‌های زمانی می‌باشد، که مقدار آن بین صفر و یک بوده و هر چقدر میزان تصادفی بودن و یا بی‌نظمی یک سری افزایش پیدا کند به مقدار یک نزدیک‌تر می‌شود، که با استفاده از تابع $ApEn(x, N)$ در نرم‌افزار MATLAB محاسبه گردیده است، به طوری که x نشان دهنده سری زمانی موج و N نشان دهنده تعداد ابعاد موج می‌باشد.

یافته‌ها

نتایج آزمون RAVLT نشان داده که میانگین تعداد کل کلمات به خاطر آوری شده یا نرخ یادگیری (Learning rate) در کل افراد مورد مطالعه طبق نمودار (3-الف) با افزایش مراحل یادگیری دارای روند صعودی می‌باشد که در تحلیل آماری ANOVA این نمودار با تغییرات معنادار زیاد ($P < 0.05$) و با اندازه تاثیر در حد بالای ($\omega^2 = 74/52$) تأیید گردیده است.

در شکل (3-ب)، مشاهده شده که افزایش مراحل یادگیری باعث کاهش متوسط بُعد فرکتالی هیگوجی (HFD) امواج EEG افراد مورد مطالعه می‌شود، که این به منزله کاهش میزان پیچیدگی و افزایش قاعده‌مندی فعالیت مغزی می‌باشد. این تغییرات با تخمین آنتروپی تقریب تأیید گردیده است.

برای مقایسه تغییرات بُعد فرکتالی در کانال‌های ثبتي، مطابق شکل 3-ج مشاهده شده است که میانگین بُعد فرکتالی هیگوجی 31 کانال ثبتي EEG مرتبط با کل داوطلبان در شرایط قبل و بعد از اجرای آزمون یادگیری، دارای روند کاهشی بوده که بیشترین مقدار اندازه این بُعد فرکتالی و تغییرات آن، مربوط به کانال‌های شماره 10 (T8) و کانال 20 (T7) بوده که در ناحیه قشر گیجگاهی و محل استقرار مرکز حافظه شنیداری ایجاد شده است (27).

د) پردازش‌های اصلی امواج EEG:

تحلیل اصلی امواج مغزی: کلیه تحلیل‌های این مقاله با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB-2016 و SPSS-20 انجام شده است. این متغیرها شامل تخمین بُعد فرکتالی هیگوجی، آنتروپی تقریب و چگالی طیف توانی امواج می‌باشد، که ارزش تغییرات معنادار آنها به وسیله آزمون آماری واریانس یک طرفه (ANOVA) بررسی شده است.

بُعد فرکتالی هیگوجی: یکی از رویکردهای جدید برای تخمین پیچیدگی و بررسی فضای بدون مقیاس در سری‌های زمانی استفاده از تحلیل فرکتال می‌باشد. تخمین بُعد فرکتال با استفاده از روش هیگوجی نسبت به سایر روش‌ها مانند شمارش جعبه (Box counting) و Katz، به دلیل دقت بالا و کاربرد فراوان آن در تحلیل امواج EEG اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از طرفی لازم به ذکر است این روش نسبت به دیگر روش‌های تخمین بُعد فرکتالی دارای حساسیت نسبت به نویز می‌باشد (25، 26).

در روش محاسبه بُعد فرکتال هیگوجی از سری داده‌های ورودی $x(1), x(2), \dots, x(N)$ سری جدیدی به صورت زیر ساخته می‌شود: برای

$$m=1, 2, 3, \dots, k$$

$$x_m^k = \left\{ x(m), x(m+k), x(m+2k), \dots, x\left(m + \left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor k\right) \right\} \quad (3)$$

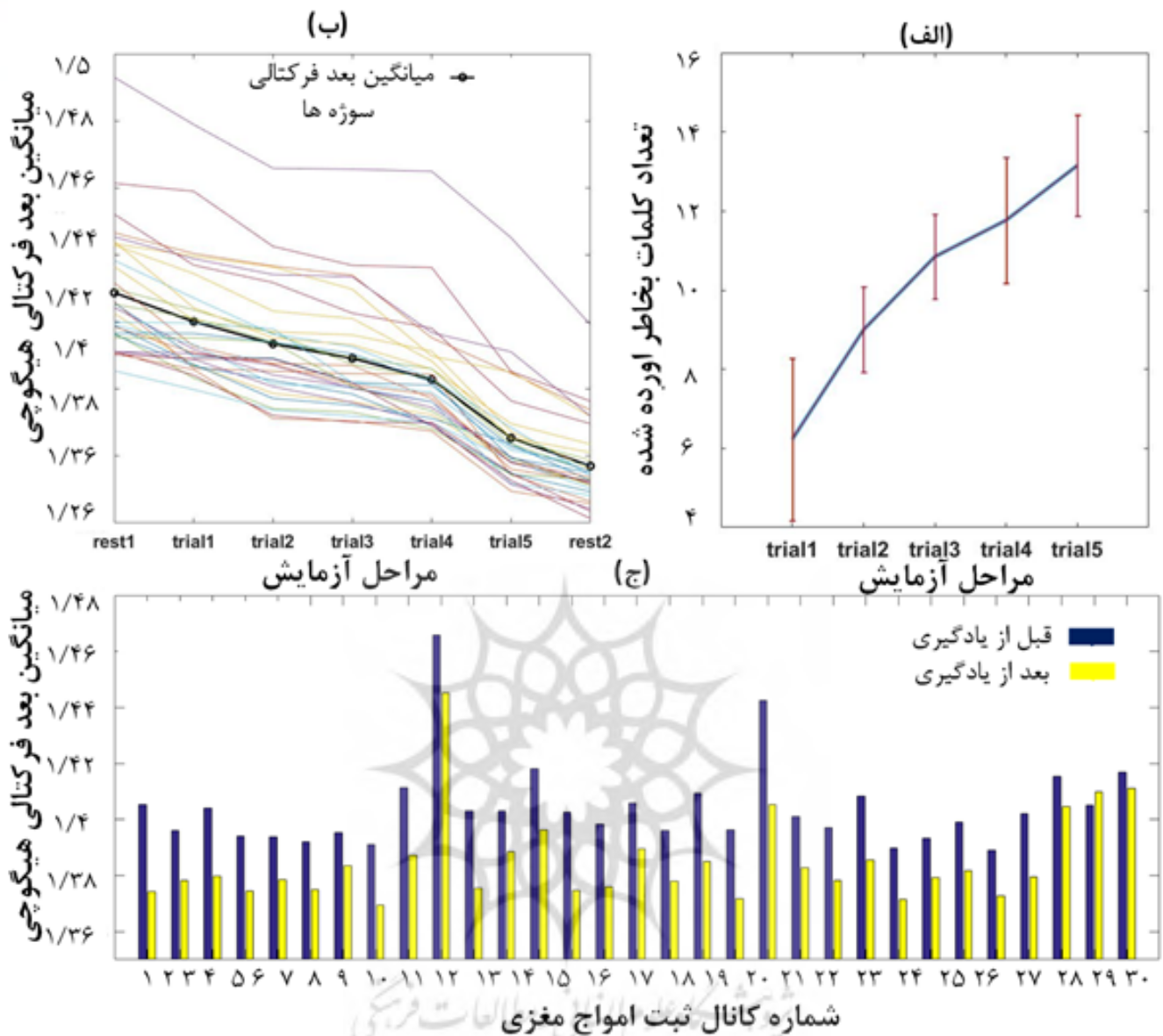
m نشان دهنده نقطه اولیه هر سری و k نشان دهنده جزء صحیح عدد است. برای هر x_m^k طول $L_m(k)$ برابر است با:

$$L_m(k) = \frac{\sum_{i=1}^{\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} |x(m+ik) - x(m+(i-1)k)|}{\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} \quad N-1/k \quad (4)$$

که N نشان دهنده تعداد نمونه‌ها و مرجع معادله (3) ضریب نرمال‌سازی، برای هر مقدار k و تعداد k طول به دست می‌آید. سپس میانگین آنها به عنوان طول میانگین محاسبه می‌شود، این عمل تا k_{max} تکرار می‌شود. بُعد هیگوجی شیب بهترین خط تقریب زده شده با روش کمترین مربع خطا برای $\log(L(k))$ بر حسب $\log(k)$ می‌باشد (25، 26).

در این مقاله، به منظور محاسبه بُعد فرکتالی هیگوجی، مقدار $k_{max}=70$ انتخاب شده است. به این دلیل که حداکثر مقادیر بُعد فرکتال در این پنجره زمانی به دست آمده و برای مقادیر بیشتر از 70 عملاً میزان بُعد فرکتال هیگوجی مقدار ثابتی به دست می‌آید.

بُعد فرکتال و نمای هرست دارای رابطه خطی (5) می‌باشد در این رابطه، D بُعد فرکتال و H نمای هرست می‌باشد.



شکل ۳. (الف) میانگین کلی تعداد کلمات به خاطر آوری شده داوطلبان به همراه خطای استاندارد. (ب) تغییرات بعد فرکتال هیگوچی (HFD) امواج مغزی داوطلبان در هفت مرحله آزمایش یادگیری. (ج) میانگین بعد فرکتال هیگوچی (HFD) داوطلبان در قبل و بعد از یادگیری.

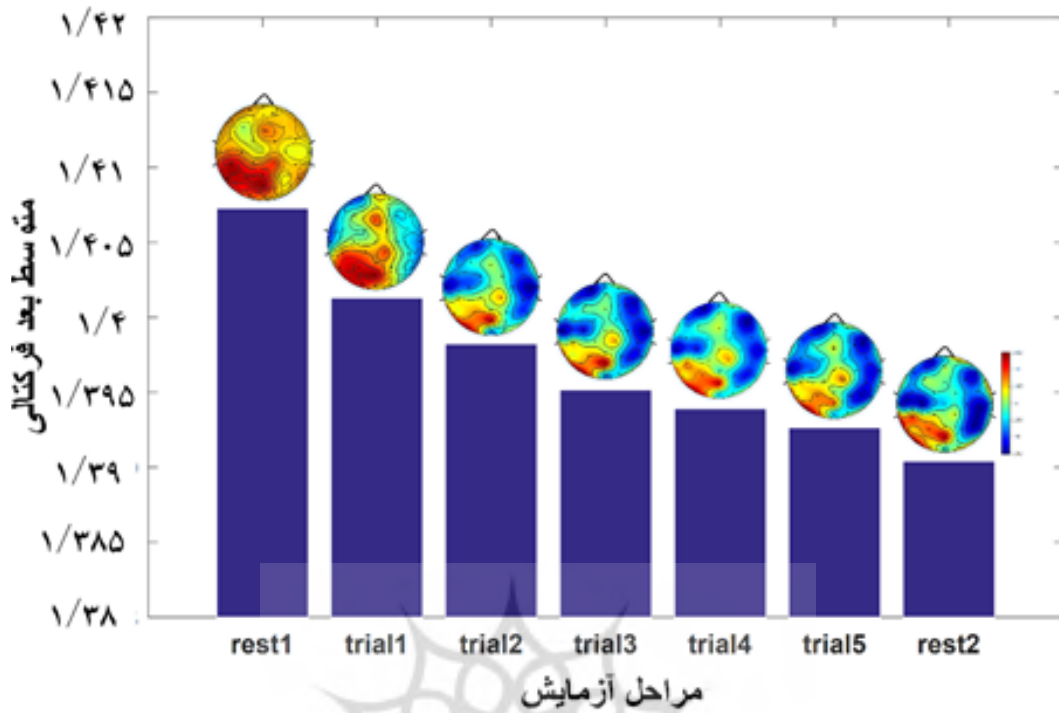
جدول ۱. تحلیل آماری واریانس یک طرفه مربوط به بعد فرکتال هیگوچی امواج مغزی در ۷ مرحله ثبت EEG در زمان اجرای آزمون یادگیری

منبع تغییرات	مجموع مجذورات	درجه آزادی	میانگین مجذورات	F	P
بین گروه	۰/۰۴۷۵	۴	۰/۰۱۱۹	۴۲/۵۰	۰/۰۰۰۰۰۱
درون گروه	۰/۰۴۱۹	۱۵۰	۰/۰۰۰۳		
کل	۰/۰۸۹۴	۱۵۴			

شکل ۴ نیز نقشه مغزی توزیع بعد فرکتالی کانال‌ها به همراه تغییرات متوسط بعد فرکتالی هیگوچی کل افراد مورد مطالعه (به صورت منحنی میله‌ای) را در هفت مرحله ثبت امواج مغزی نشان داده است که کاهش بعد فرکتالی هیگوچی (HFD)، با افزایش مراحل یادگیری (شامل: قبل از یادگیری (rest1)، در حین یادگیری (trial1, ..., trial5) و بعد از یادگیری (rest2)) مطابق است. ارزش این تغییرات با استفاده از تحلیل

شکل ۴ نیز نقشه مغزی توزیع بعد فرکتالی کانال‌ها به همراه تغییرات متوسط بعد فرکتالی هیگوچی کل افراد مورد مطالعه (به صورت منحنی میله‌ای) را در هفت مرحله ثبت امواج مغزی نشان داده است که کاهش

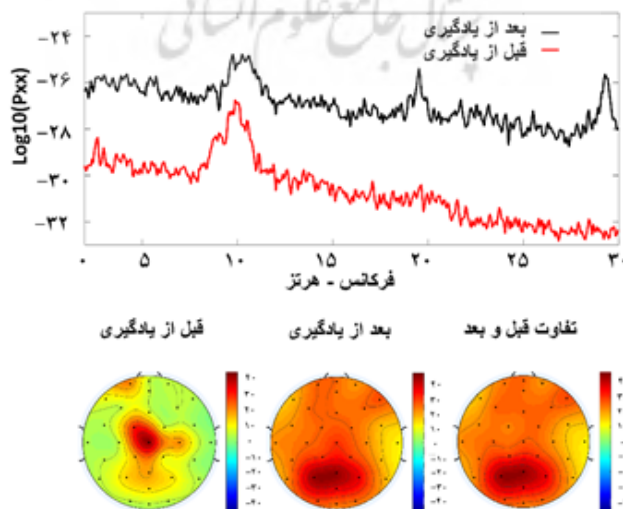
واریانس مطابق جدول ۱ با تغییرات معنادار زیاد ($P < 0.05$) و اندازه تاثیر $\omega^2 = 59.82$ در حد قابل قبولی تأیید گردیده است.



شکل ۴. تغییرات میانگین بُعد فرکتال هیگوچی امواج مغزی به همراه نقشه مغزی توزیع در مراحل اجرای آزمون و قبل و بعد از آن

مطالعه نیز از چگالی طیف توان (Power spectrum density) امواج مغزی در دو وضعیت قبل و بعد از اجرای آزمون ارزیابی یادگیری و فرایند حافظه مطابق شکل (۵-الف) استفاده شده است. نتایج حاصل از این شکل نشان می‌دهد که میزان چگالی طیف توان امواج مغزی در راستای نگهداری و سازمان دهی اطلاعات ورودی در کل بازه فرکانسی افزایش پیدا کرده است.

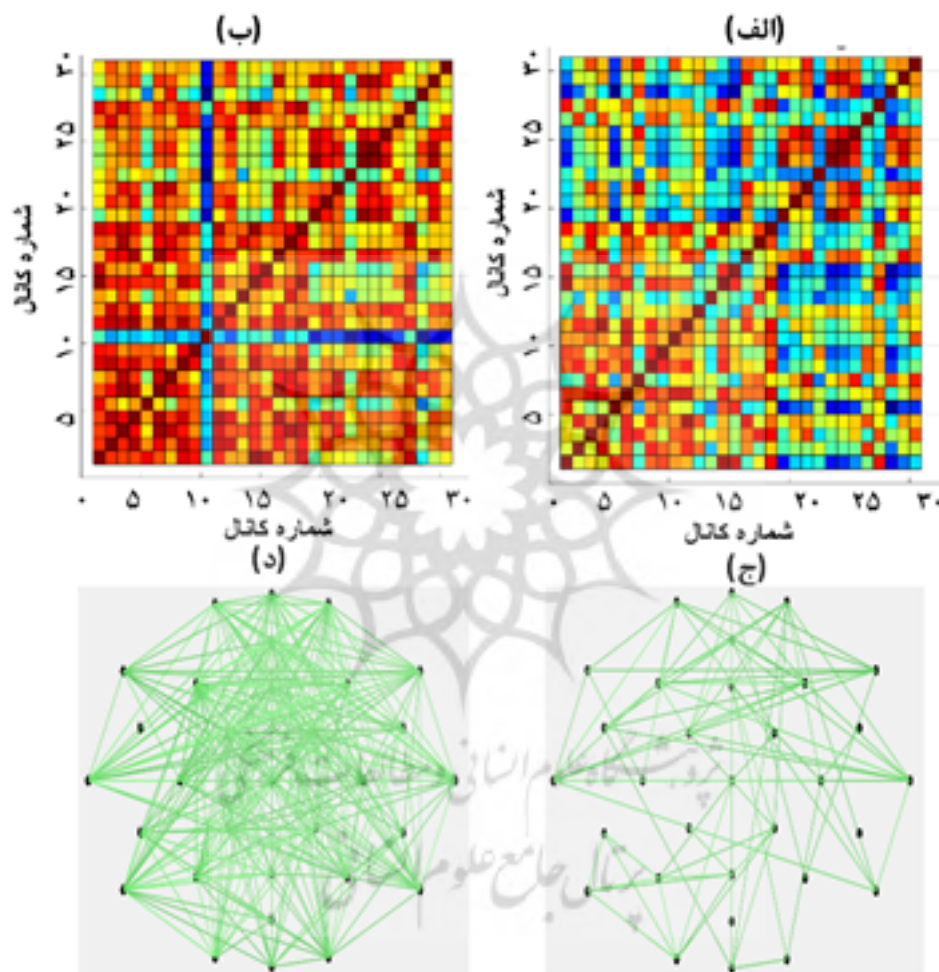
همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، کاهش بُعد فرکتالی به صورت منظم همراه با افزایش میزان فعالیت مغز برای حافظه‌سازی بوده که دینامیک حاصل از این تغییرات، به صورت نامتقارن در دو نیم کره مغزی نمایش داده شده، که بیشترین تراکم آن در نواحی قشر گیجگاهی و آهیانه چپ و قسمتی از قشر مرکزی حاصل شده است. یکی از مولفه‌های سازمان دهی مغز، نوسانات مغزی بوده که در این



شکل ۵. الف) مقایسه تغییرات چگالی طیف توان EEG در شرایط قبل از یادگیری (قرمز) و بعد از یادگیری (مشکی). ب) نقشه مغزی توزیع چگالی طیف توان امواج مغزی قبل و بعد از اجرای آزمون یادگیری و تفاوت این دو حالت

توان امواج مغزی در حین و بعد از یادگیری، نشان از فعالیت مولفه نوسانی در فرایندهای حافظه و یادگیری دارد. در این مطالعه مشخص شده است که تغییرات در شبکه مغزی نیز حکایت از افزایش ارتباطات همزمانی بین کانال‌های مغزی یا مراکز مغزی طبق شکل ۶ دارد. کاهش بُعد فرکتالی مراکز مغزی در حین یادگیری، به همراه افزایش محتویات حافظه نیز نشان‌دهنده تمایل دینامیک شبکه مغزی به کاهش پیچیدگی دارد.

نقشه مغزی تغییرات چگالی طیفی توان EEG ثبت شده، قبل و بعد از اجرای آزمون رفتاری یادگیری نشان از این افزایش قابل توجه را دارد که مطابق شکل (۵-ب) گسترش مناطق قرمز رنگ در قشر مغزی، حاصل رشد توان امواج مغزی به دلیل فعالیت یادگیری و حافظه‌سازی بوده است. میزان تفاوت حاصل از طیف توان طیفی مغز در قبل و بعد از اجرای آزمون مطابق شکل (۵-ب) حکایت از افزایش گسترده توان امواج مغزی به صورت متقارن در دو نیمکره مغز بوده است که این روند افزایشی



شکل ۶. نمایش ضریب همبستگی تقاطعی کانال‌های مغزی: الف) و ب) نمایش ماتریس رنگی از ضرایب همبستگی متقاطع (Cross correlation) کانال‌های مغزی در شرایط قبل و بعد از یادگیری و حافظه‌سازی ج) و د) نمایش میزان همبستگی متقاطع کانال‌ها به صورت ارتباط خطی (Graph) در شرایط قبل و بعد از یادگیری و فرایند حافظه

(Sensory memory) مربوط به شنوایی عبور کرده و با فعال‌سازی حافظه کاری اطلاعات ورودی را کدگذاری و در حافظه معنایی مستقر می‌کند، که خروجی آن به صورت به خاطرآوری این اطلاعات از طریق حافظه کلامی ارائه می‌گردد (۲۱). در این مطالعه روش ثبت و پردازش امواج مغزی با روش‌های رفتاری ارزیابی یادگیری RAVLT و ایجاد حافظه منطبق می‌باشد. بیشترین اندازه تاثیر حاصل از دینامیک خود سازمان‌دهی در رفتار خود متشابهی (Self-similarity) یا فرکتالی

بحث

در این مقاله برای اولین بار دینامیک فعالیت مغزی به صورت تخصصی در شرایط یادگیری در مغز انسان به وسیله تحلیل‌های فرکتال امواج EEG مدل‌سازی شد و میزان عملکرد خود سازمان‌دهی یا اثرگذاری فعالیت مولفه‌های مغز شامل فرکتال و نوسانی بررسی گردید. نتایج حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد اطلاعات ورودی که به صورت شنیداری در آزمون رفتاری به داوطلبان داده شده از حافظه حسی

افراد مختلف با استفاده از روش‌های پردازش امواج مغزی ایجاد نمود.

نتیجه‌گیری

از نتایج این مطالعه می‌توان برای بررسی افراد دچار اختلال در یادگیری مثل بیماران مبتلا به آلزایمر، اختلال نقص توجه و اختلال بیش‌فعالی و اوتیسم استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله نتیجه بخشی از پایان‌نامه مقطع دکترا می‌باشد که در آن از امکانات دانشگاه‌های صنعتی اراک جهت ثبت امواج مغزی و از دانشکده علوم شناختی دانشگاه شهید بهشتی جهت طراحی مراحل آزمایش کمک گرفته شده است.

ملاحظات اخلاقی

ملاحظات اخلاقی پژوهش حاضر مطابق با بیانیه هلسینکی بوده که از طرف دانشگاه صنعتی اراک تأیید گردیده، که شامل موارد فوق بود: کلیه آزمودنی‌ها اطلاعاتی در مورد پژوهش دریافت کردند و با رضایت آگاهانه در پژوهش مشارکت داشتند، آنها می‌توانستند در هر مقطع زمانی، مطالعه را ترک کنند. این اطمینان به آزمودنی‌ها داده شد که تمام اطلاعات محرمانه خواهد ماند و فقط برای امور پژوهشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور رعایت حریم خصوصی، مشخصات آزمودنی‌ها ثبت نشد.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

بر اساس تخمین بُعد فرکتالی هیگوچی به دست آمده است. این تغییرات به وسیله نمودار کاهشی آنتروپی تقریب تأیید شده است و میزان آن با افزایش مراحل یادگیری کاهش پیدا کرده که نشان از کاهش پیچیدگی یا کاهش میزان تصادفی بودن امواج مغزی برای تجمیع تحریکات ورودی بوده است. بر اساس نظریه دینامیک تعادلی شبکه‌ها، این تغییرات سبب افزایش پدیده خودسازمان‌دهی بحرانی (Self-Organizing Criticality)، تمایل شبکه مغزی در حرکت از شرایط بی‌نظمی (Disorder) به سمت نظم (Order)، کاهش آنتروپی و پیچیدگی می‌باشد که نیازمند پژوهش‌های وسیع‌تری در این زمینه می‌باشد. بررسی آماری نیز به طور قوی، تغییرات معنایی متغیرهای این مطالعه را با تأیید کرده است. در هیچ‌کدام از پژوهش‌های قبلی (۱۷-۱۴) مربوط به بررسی یادگیری و فرایندهای حافظه از روش آزمون RAVLT همراه با پردازش و بررسی دینامیک امواج EEG استفاده نشده است. اجرای RAVLT منحصراً به فرم رفتاری پژوهش شده است. در بیشتر پژوهش‌های (۱۷-۱۴) انجام شده در زمینه یادگیری و فرایندهای حافظه از روش‌های یادگیری وابسته به رویدادهای لحظه‌ای (ERP) که عمدتاً از تکلیف مرتبط با حافظه کاری مثل N-back و Sternberg استفاده شده است در صورتی که در آزمون RAVLT به دلیل تمرین و تکرار امکان انتقال اطلاعات به حافظه میان مدت وجود دارد. همچنین امکان بررسی دینامیک حافظه گذشته‌نگر (Retrospective) و حافظه آینده‌نگر (Prospective memory) نیز در این پژوهش می‌باشد که تاکنون انجام نشده است. در کارهای آینده پیشنهاد می‌شود، ضمن افزایش تعداد داوطلبان برای بالا بردن دقت نتایج، بررسی تاثیر جنسیت بر نرخ یادگیری نیز لحاظ گردد. با توسعه این روش می‌توان راهی برای بررسی هوشمند میزان نرخ یادگیری در

References

1. Amina HU, Malikb AS. Larning and memory improvement: Evidence from current research and neurofeedback applications. *Asia Pacific Journal of Neurotherapy*. 2019;1(2):1-9.
2. Vega CF, Noel J. Parameters analyzed of Higuchi's fractal dimension for EEG brain signals. In 2015 Signal Processing Symposium (SPSymo). 2015 June 10-12; Debe, Poland; Piscataway, NJ:IEEE;2015. pp. 1-5.
3. Can H, Dogutepe E, Yazıhan NT, Korkman H, Bakar EE. Construct validity of auditory verbal learning test. *Turkish*

- Journal of Psychiatry*. 2016;27(3):195-203.
4. Park HD, Min BK, Lee KM. EEG oscillations reflect visual short-term memory processes for the change detection in human faces. *Neuroimage*. 2010;53(2):629-637.
5. Ahmad RF, Malik AS, Kamel N, Reza F, Abdullah JM. Simultaneous EEG-fMRI for working memory of the human brain. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*. 2016;39(2):363-378.
6. Hanouneh S, Amin HU, Saad NM, Malik AS. EEG power and functional connectivity correlates with semantic long-term

- memory retrieval. *Access IEEE*. 2018;6:8695-8703.
7. Zippo AG, Della Rosa PA, Castiglioni I, Biella GE. Alternating dynamics of segregation and integration in human EEG functional networks during working-memory task. *Neuroscience*. 2018;371:191-206.
 8. Ono M, Furusho H, Iramina K. Analysis of the complexity of EEG during the short-term memory task. In 2015 8th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON). 2015 November 25-27; Pattaya, Thailand; Piscataway, NJ:IEEE;2015. pp. 1-5.
 9. Heinrichs-Graham E, Wilson TW. Spatiotemporal oscillatory dynamics during the encoding and maintenance phases of a visual working memory task. *Cortex*. 2015;69:121-130.
 10. Chai WJ, Abd Hamid AI, Abdullah JM. Working memory from the psychological and neurosciences perspectives: A review. *Frontiers in Psychology*. 2018;9:401.
 11. D'Esposito M. From cognitive to neural models of working memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2007;362(1481):761-772.
 12. Michels L, Luchinger R, Koenig T, Martin E, Brandeis D. Developmental changes of BOLD signal correlations with global human EEG power and synchronization during working memory. *PLoS One*. 2012;7(7):e39447.
 13. Roux F, Uhlhaas PJ. Working memory and neural oscillations: Alpha-gamma versus theta-gamma codes for distinct WM information?. *Trends in Cognitive Sciences*. 2014;18(1):16-25.
 14. Bongers A, Flynn AB, Northoff G. Is learning scale-free? Chemistry learning increases EEG fractal power and changes the power law exponent. *Neuroscience Research*. 2020;156:165-177.
 15. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*. 1999;29(2-3):169-195.
 16. John TN, Puthankattil SD, Menon R. Analysis of long range dependence in the EEG signals of Alzheimer patients. *Cognitive Neurodynamics*. 2018;12(2):183-199.
 17. Namazi H, Khosrowabadi R, Hussaini J, Habibi S, Farid AA, Kulish VV. Analysis of the influence of memory content of auditory stimuli on the memory content of EEG signal. *Oncotarget*. 2016;7(35):56120-56128.
 18. Wang W, Tan AH, Teow LN. Semantic memory modeling and memory interaction in learning agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2016;47(11):2882-2895.
 19. Baddeley AD, Hitch GJ, Allen RJ. From short-term store to multicomponent working memory: The role of the modal model. *Memory & Cognition*. 2019;47(4):575-588.
 20. Vogan VM, Morgan BR, Powell TL, Smith ML, Taylor MJ. The neurodevelopmental differences of increasing verbal working memory demand in children and adults. *Developmental Cognitive Neuroscience*. 2016;17:19-27.
 21. Atkinson RC, Shiffrin RM. Human memory: A proposed system and its control processes. In Spence KW, Spence JD, editors. *Psychology of learning and motivation*. Vol. 2. New York:Academic Press;1968. pp. 89-195.
 22. Bilgel N, Bayram N. Turkish version of the Depression Anxiety Stress Scale (DASS-42): Psychometric properties. *Archives of Neuropsychiatry*. 2010;47(2):118-126.
 23. Ogmen H, Herzog MH. A new conceptualization of human visual sensory-memory. *Frontiers in Psychology*. 2016;7:830.
 24. Aghamollaei M, Jafari Z, Toufan R, Esmaili M, Rahimzadeh S. Evaluation of auditory verbal memory and learning performance of 18-30 year old Persian-speaking healthy women. *Audiology*. 2012;21(3):32-39.
 25. Paramanathan P, Uthayakumar R. An algorithm for computing the fractal dimension of waveforms. *Applied Mathematics and Computation*. 2008;195(2):598-603.
 26. Bachmann M, Lass J, Suhhova A, Hinrikus H. Spectral asymmetry and Higuchi's fractal dimension measures of depression electroencephalogram. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2013;2013.
 27. Mangold SA, Das JM. Neuroanatomy, cortical primary auditory area. StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL), Scotland:StatPearls Publishing;2020.