

The effect of S-band microwave radiation on brain hippocampal tissue using COMSOL multiphysics

Mahmoud Feizipour Namaghi¹ , Seyed Mohammad Mahdavi^{2*} , Mohammad Karami³,
Mohammad Ali Nasiri Khalili², Vahid Vahedi⁴, Amir Modarresi Chahardehi⁵

1. Department of Bioscience and Biotechnology, Malek-Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Bioscience and Biotechnology, Malek Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran
3. Department of Electrical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran
4. MA, Department of Physics, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
5. Cognitive Neuroscience Research Center, AJA University of Medical Science, Tehran, Iran

Abstract

Received: 7 Oct. 2022

Revised: 25 Dec. 2022

Accepted: 2 Jan. 2023

Keywords

Hippocampus
SAR
Thermal effect
Non-thermal effect
Bioelectromagnetic waves

Corresponding author

Seyed Mohammad Mahdavi, Assistant Professor, Department of Bioscience and Biotechnology, Malek Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran

Email: Sm_mahdavi@mut.ac.ir



 doi.org/10.30514/icss.24.4.132

Introduction: Exposure to electromagnetic fields (EMFs) may affect cognitive functions like memory. This paper proposes a way of evaluating the impact of microwave S-band electromagnetic waves on the head layers and hippocampus using COMSOL Multiphysics.

Methods: This study investigated the bioelectric properties of software-implemented biological tissues and the creation of EMFs in the S-band on the hippocampus. In this study, the frequency was 2.45 GHz, the radiation intensity varied from 20 to 120 V/m, and the duration of radiation was thirty minutes.

Results: These EMFs heat the hippocampus but cannot impact activity or cognition (memory). The temperature of hippocampus tissue increased by 0.0001 to 0.016°C when exposed to fields of 20 to 120 V/m intensity. The specific absorption rate varied from 18×10^{-3} to 22×10^{-2} W/kg.

Conclusion: The non-thermal effects of electromagnetic waves on cognitive disorders are likely linked to their interaction with brain waves. Therefore, the non-thermal effects of electromagnetic waves may cause changes in cognitive function.

Citation: Feizipour Namaghi M, Mahdavi M, Karami M, Nasiri Khalili MA, Vahedi V, Modarresi Chahardehi A. The effect of S-band microwave radiation on brain hippocampal tissue using COMSOL multiphysics. *Advances in Cognitive Sciences*. 2023;24(4):132-145.

Extended Abstract

Introduction

Electromagnetic fields (EMFs) are emitted by many biological and manufactured sources and are vital in daily living. EMFs are a daily threat to over three billion people globally. The IEEE defines the microwave band, which

includes the S-band, as part of the electromagnetic spectrum and a radar-frequency band. The S-band operates in the 2-4 GHz range and is used chiefly for radar and communication. Due to the limitations of studying the effects

of EMFs on humans and animals, simulating the impacts of waves on biological tissue using a computer has many advantages because the S-band is released for a brief time adjacent to the human head during communication.

The CNS is one of the most sensitive human organ systems and is particularly vulnerable to microwave radiation. Studies on the impact of EMF on the CNS and cognition are needed. EMF radiation can be absorbed by organisms, resulting in physiological and functional changes and raising concern about potential health implications. The brain is one of the most vulnerable organs to microwave radiation. Psenakova et al (14). showed that the interaction of the human head with electromagnetic radiation from cell phones might cause harmful electric currents and fields inside the brain (14). Nevertheless, temperature variations are responsible for virtually all documented behavioral repercussions as Mobashsher et al. mentioned that when a signal reaches the head, it interacts with an irregularly thin layer of high permittivity skin (50-44 over the range 0.75-2.55 GHz) and then penetrates through thick fat and low permittivity skull layers (16). Following that, the signal passes through extremely high permittivity cerebrospinal fluid (CSF) (69-66.2 over the range 0.75-2.55 GHz) and Dura (44-41.9 across the band 0.75-2.55 GHz) tissues and finally through grey and white matter.

The hippocampus is a complex brain structure in the temporal lobe that plays a critical role in memory and learning. As previously discussed, memory is a vital cognitive function. The hippocampal tissue is frequently assumed to be the site of long-term memory and is required to function correctly. Damage to the hippocampus, the limbic system's cornerstone, results in impairments in converting short- to long-term memory, a uniquely cognitive function. Therefore, the present study simulates and investigates the effects of S-band electromagnetic waves on hippocampus tissue. COMSOL Multiphysics presents

a simplified method for this more accurate and informative stimulation than earlier.

Methods

Radiation system

The effect of distant field electromagnetics on brain layers simulated in different power output modes was investigated. The waves are radiated from three angles: posterior (behind), anterior (in front), and lateral of the head. The temperature rise in the skull layers and hippocampus and the amount of SAR (Specific absorption rate) have been recorded. In free space, the waves are emitted as plane waves. COMSOL Multiphysics version 5.4a solves the bioheat and bioelectromagnetic wave equations in the frequency domain and time-dependent heat transformation problems. This experiment simulates radar's electromagnetic fields. Magnetic fields are mostly ineffectual between the radiation source and the biological tissue, but electric fields are effective once they reach the biological tissue. These findings may be applied to any radar system that operates at 2.45 GHz, has a radiation source at a distance of over ten meters (remote field), an antenna gain of 30 dB, and a radiation output source ranging from 0 watts to about 20263 watts. The duration of radiation was thirty minutes. Therefore, the results may be applicable if any radars used in military, meteorological, or other applications meet these criteria.

This study applied the sphere's geometry with the radius and thickness provided to represent the layers of the human head. Two models of four or seven layers are frequently used to simulate the human skull. COMSOL Multiphysics version 5.4a created a seven-layer model of skin, fat, muscle, skull, dura, cerebrospinal fluid (CSF), and brain tissue. The human hippocampus is frequently estimated to measure between 3 and 4 cm³. In this study, the hippocampus is assumed to be 3 cm³. Using the simplified Friis equation to calculate the electric field power in dis-

tant fields, the authors first determined the wave power received from a source close to the biological tissue.

Results

This study investigated the effect of 2.45 GHz electromagnetic waves on various electric field strengths. The heat maps of head layers illustrate how electromagnetic waves affect the hippocampus and cognitive memory function. A temperature increase in the skull's layers and hippocampus tissue occurs by radiating S-band microwave electromagnetic waves generated by distant fields from three directions: the head's posterior, anterior, and lateral sides. However, this increase is negligible, and its temperature tolerance ranges from 0.0001°C (the lowest temperature increase associated with the state of radiation in front of a 20 V/m electric field) to 0.016°C (the highest temperature increase associated with the radiated from behind the head in a 120 V/m electric field). The SAR in hippocampus tissue rose by increasing electric field intensity and tissue temperature. The energy absorption tolerance varies from 0.18×10^{-3} W/kg (the lowest increase in temperature corresponds to the electric field of 20 V/m) to 22×10^{-2} W/kg (the maximum increase in exposure to temperature emitted from the back of the head in an electric field of 120 V/m). The rate of temperature rises and SAR variations in the hippocampus tissue when the intensity is 20 V/m (selected from various intensities). The radiation source is positioned in front, behind, and lateral.

When the radiation is applied to the lateral side of the head, an electric field strength of 20 to 120 V/m results in a temperature rise of between 0.0003°C to 0.012°C. In addition, the authors observed an increase in SAR from 0.45×10^{-2} to 16×10^{-2} W/kg. One-way ANOVA using Tukey's post hoc test revealed no significant difference in temperature fluctuations across the front, behind, and lateral hippocampal tissue ($P=0.1225$). However, the au-

thors found a significant difference ($P<0.0001$) between various SAR (20-120 V/m) in different positions (front, behind, and lateral) (data are not shown).

While the electric field is being radiated to the front of the head, raising the intensity from 20 to 120 V/m leads to a temperature increase of 0.0001°C to 0.0035°C and an increase in SAR from 0.18×10^{-3} to 60×10^{-3} W/kg. When electromagnetic waves are emitted from behind the head, electric field radiation intensity ranging from 20 to 120 V/m causes a temperature rise of 0.004°C to 0.016°C and a SAR increase of 0.6×10^{-2} to 22×10^{-2} W/kg.

Conclusion

This study aims to construct a realistic and complete model of head layers using the COMSOL Multiphysics software. Biophysical wave interventions may cause non-thermal effects in the brain's hippocampal tissue due to small changes in its temperature tolerance caused by exposure to S-band microwave electromagnetic waves in the present study. Non-thermal effects in the brain can be induced through the non-thermal interaction of external electromagnetic waves with brain waves or through the phase difference and attenuation of brain waves caused by external electric fields. Therefore, this study verifies the non-thermal impact mechanisms of electromagnetic waves described in previous studies on their influence on the hippocampus. However, these non-thermal interventions are negligible and safe. Therefore, this study confirms the non-thermal effect mechanisms of electromagnetic waves presented in previous studies about their effect on the hippocampus. This study states that the electromagnetic waves with the specified radiation protocol, in terms of thermal effects, probably do not have any particular outcome in this experiment. According to the studies in this field, it is suggested that the damage to the hippocampus and the cognitive processes results from the non-thermal effects of electromagnetic waves

with a frequency of 2.45 GHz and the radiation intensity and duration mentioned.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This study was based on a software program instead of an animal/human study.

Authors' contributions

Seyed Mohammad Mahdavi and Mohammad Ali Nasiri Khalili designed the study; Mahmoud Fezipour Namaghi collected and interpreted the data; Mahmoud Fezipour Namaghi and Mohammad Karami checked the data; Vahid Vahedi and Amir Modarresi Chahardehi

analyzed the data; and Amir Modarresi Chahardehi and Mahmoud Fezipour Namaghi wrote and edited the manuscript. This research was conducted under the supervision of Seyed Mohammad Mahdavi.

Funding

The authors did not receive funding for this study.

Acknowledgments

The authors are grateful to all the people who cooperated in this research.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.



بررسی تاثیر دمایی تابش الکترومغناطیسی باند-اس بر بافت هیپوکامپ مغز با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی COMSOL Multiphysics

محمود فیضی پور نامقی^۱ (iD)، سید محمد مهدوی^۲ (iD)، محمد کرمی^۳، محمد علی نصیری خلیلی^۴، وحید واحدی^۵، امیر مدرسی چهاردهی^۵

۱. گروه علوم زیستی و بیوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۲. استادیار گروه علوم زیستی و بیوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۳. گروه مهندسی الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۴. کارشناس ارشد گروه فیزیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران
۵. پژوهشگر مرکز تحقیقات علوم شناختی و علوم اعصاب، دانشگاه علوم پزشکی ارتش (آجا)، تهران، ایران

چکیده

مقدمه: قرار گرفتن در معرض میدان الکترومغناطیسی ممکن است بر عملکرد شناختی مانند حافظه تاثیر بگذارد. در این مطالعه روشی برای ارزیابی تاثیر امواج الکترومغناطیسی گروه امواج الکترومغناطیسی باند S بر روی هیپوکامپ مغز با استفاده از Comsol Multiphysics پیشنهاد شده است.

روش کار: این مطالعه خواص بیوالکتریک بافت‌های بیولوژیکی پیاده‌سازی شده توسط نرم‌افزار و ایجاد میدان‌های الکترومغناطیسی در باند S در هیپوکامپ را بررسی نموده است. در این پژوهش میزان فرکانس امواج الکترومغناطیسی ۲/۴۵ گیگاهرتز، شدت تابش در بازه ۲۰ تا ۱۲۰ ولت بر متر متغیر بوده و مدت زمان تابش ۳۰ دقیقه بود.

یافته‌ها: این امواج هیپوکامپ را گرم نموده اما برای تاثیرگذاری بر فعالیت یا شناخت حافظه کافی نیستند. در این مطالعه، دمای بافت هیپوکامپ زمانی که در معرض میدان‌هایی با شدت ۲۰ تا ۱۲۰ ولت بر متر قرار گرفتند، از ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۱۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. نرخ جذب ویژه از ۱۸×۱۰^{-۳} تا ۲۲×۱۰^{-۲} وات بر کیلوگرم متغیر بود.

نتیجه‌گیری: اثرات گرمایی امواج الکترومغناطیسی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز با شدت تابش و مدت زمان اشاره شده بر اختلالات شناختی احتمالاً بسیار ناچیز خواهد بود و تاثیری بر گرم نمودن بافت هیپوکامپ مغز نخواهد داشت. هرچند اثرات بلند مدت آن نیازمند پژوهش بیشتر است. بنابراین احتمالاً اثرات غیرگرمایی امواج الکترومغناطیسی موجب تغییرات در عملکرد کارکرد شناختی خواهد شد.

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۵

اصلاح نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

واژه‌های کلیدی

هیپوکامپ

اثرات گرمایی

نرخ جذب ویژه

اثرات غیر حرارتی

امواج مغناطیسی زیستی

نویسنده مسئول

سید محمد مهدوی، استادیار گروه علوم زیستی و بیوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

ایمیل: Sm_mahdavi@mut.ac.ir



doi.org/10.30514/ics.24.4.132

مقدمه

الکترومغناطیسی و باند فرکانس راداری تعریف می‌کند. فرستنده‌های مخابراتی، رادار و فرستنده‌های رادیویی که با فرکانس بالا نوسان دارند، میدان‌های الکترومغناطیسی شدیدی ایجاد کرده در فاصله ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز قرار گرفته‌اند. باند S در محدوده ۲ تا ۴ گیگاهرتز کار می‌کند و بیشتر برای رادار و ارتباطات در مقاصد نظامی استفاده می‌شود (۲). هدف از این مطالعه، بررسی امواج الکترومغناطیسی در فرکانس

میدان‌های الکترومغناطیسی (Electromagnetic field (EMF)) توسط بسیاری از منابع الکترونیکی ساطع می‌شوند و نقش مهمی در زندگی روزمره دارند. میدان‌های الکترومغناطیسی تهدیدی روزمره برای بیش از ۳ میلیارد نفر در سراسر جهان هستند (۱). موسسه Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (باند مایکروویو را که شامل باند S است به عنوان بخشی از طیف

بیولوژیکی قرار گرفتن در معرض امواج الکترومغناطیس هنوز ناشناخته است و مطالعات کافی در مورد خطرات سلامت عمومی به عنوان یک بیانیه قطعی وجود ندارد.

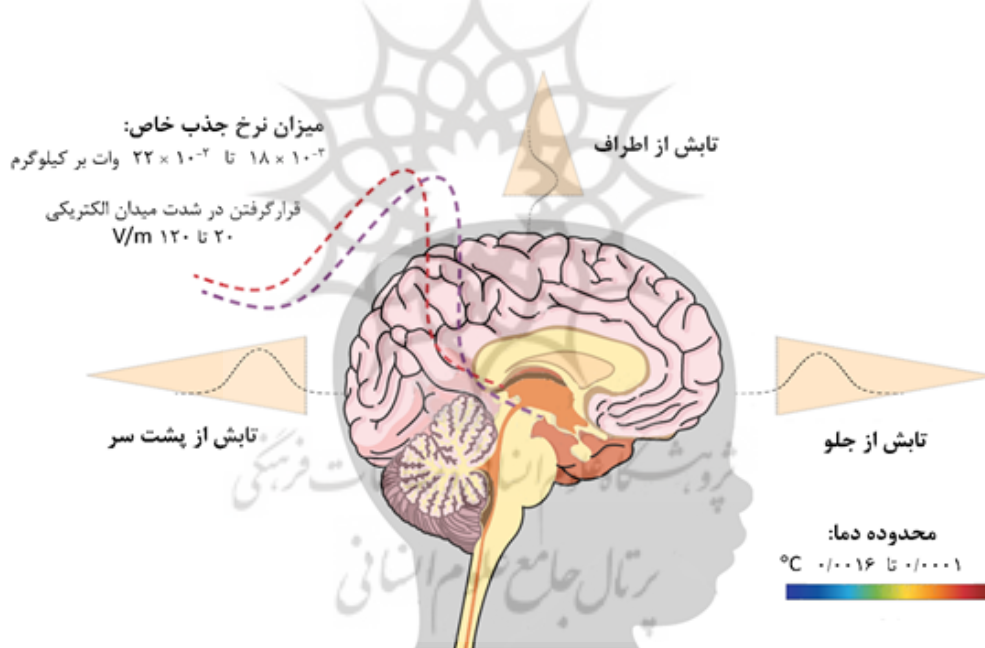
سیستم عصبی مرکزی یکی از حساس‌ترین سیستم‌های زیستی در انسان است و به ویژه در برابر تشعشعات میکروویو آسیب‌پذیر است (۹-۱۱). مطالعات در مورد تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی بر سیستم عصبی مرکزی و شناخت مورد نیاز است. تابش میدان‌های الکترومغناطیسی می‌تواند توسط ارگانیسم‌ها جذب شود و در نتیجه تغییرات فیزیولوژیکی و عملکردی ایجاد می‌نماید (۱۲) و همین امر سبب افزایش نگرانی‌ها در مورد پیامدهای سلامت مرتبط با آن خواهد بود (۱۳). میزان تابش در تعیین چگونگی واکنش موجودات زنده، از جمله انسان، به تشعشعات الکترومغناطیسی در پژوهش‌های مختلف انسانی و غیر انسانی، بسیار حائز اهمیت است. از این جهت، پژوهش‌های مشابهی که با استفاده از تکنیک‌های مختلف تشعشع انجام می‌شود، ممکن است نتایج کاملاً متفاوتی تولید نماید. شدت توان، میدان‌های الکتریکی، مدت تابش و دوره تابش عواملی هستند که سبب تغییرات فیزیولوژی می‌گردند. مغز یکی از آسیب‌پذیرترین اندام‌ها در برابر تشعشعات میکروویو است (۱۲). Benova و Psenakova (۲۰۱۱) نشان دادند که تعامل سر انسان با تشعشعات الکترومغناطیسی تلفن‌های همراه ممکن است باعث ایجاد جریان‌ها و میدان‌های الکتریکی مضر در داخل مغز شود (۱۴). با این وجود، تغییرات دما تقریباً مسئول تمام پیامدهای رفتاری مستند شده است (۱۵). همان‌طور که Mobashsher و همکاران اشاره کرده‌اند که وقتی یک سیگنال به ناحیه سر می‌رسد، با یک لایه نازک نامنظم از پوست با گذردهی بالا (۵۰-۴۴ در محدوده ۰/۷۵-۲/۵۵ گیگاهرتز) تعامل می‌کند و سپس از طریق لایه‌های چربی ضخیم و جمجمه با گذردهی کم نفوذ می‌کند. پس از آن، سیگنال از بافت‌های مایع مغزی-نخاعی با گذردهی بسیار بالا (۶۹-۶۶/۲ در محدوده ۰/۷۵-۲/۵۵ گیگاهرتز) و ناحیه دورا (۴۴-۴۱/۹ در سراسر باند عبور می‌کند (۱۶).

هیپوکامپ یک ساختار پیچیده در بخشی از مغز و در ناحیه لوب گیجگاهی است (۱۷) و نقش مهمی در حافظه و یادگیری دارد (۱۸). همان‌طور که پیش از این بیان گردید، حافظه یک عملکرد شناختی مهم است (۱۹). بافت هیپوکامپ اغلب به عنوان محل حافظه بلند مدت در نظر گرفته می‌شود و برای عملکرد صحیح لازم است. آسیب به هیپوکامپ، که جز ساختار اصلی سیستم لیمبیک محسوب می‌شود، منجر به اختلال در تبدیل حافظه کوتاه مدت به بلند مدت، به عنوان آسیب به یک

۲/۴۵ گیگاهرتز بر بافت بیولوژیکی هیپوکامپ مغز فرد اپراتور متصدی در سایت رادار با مقایسه میزان تابش‌های حرارتی و غیرحرارتی (درجه سانتی‌گراد) است. با توجه به محدودیت‌های مطالعه اثرات میدان‌های الکترومغناطیسی بر انسان و حیوانات، شبیه‌سازی اثرات امواج بر بافت بیولوژیکی با استفاده از رایانه دارای مزایای بسیاری است زیرا باند S برای مدت کوتاهی در مجاورت سر انسان در طول ارتباط منتشر می‌شود. هدف ما در این مطالعه، تعیین تأثیر دمایی این باند بر بافت هیپوکامپ مغز و در نتیجه اثر آن بر روی حافظه و عملکرد شناختی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics بود.

همان‌طور که برای همه شناخته شده است، تابش الکترومغناطیس (Electromagnetic radiation (EMR)) با عبور از یک سیستم بیولوژیکی می‌تواند انتقال، انعکاس، جذب یا شکسته شود و تأثیر مهمی بر مواد دی‌الکتریک با توان عایقی نظیر بافت‌های بیولوژیکی دارد که در نتیجه آن انرژی حرارتی افزایش می‌یابد. جذب انرژی تابش الکترومغناطیسی حرکت ذرات باردار و چرخش مولکول‌ها، عمدتاً آب را تحریک کرده و به گرما تبدیل می‌کند و ناگزیر سبب افزایش دمای خود می‌شود. با توجه به مقدار انرژی جذب شده توسط سیستم بیولوژیکی، اثرات تابش الکترومغناطیسی بر روی سیستم بیولوژیکی را می‌توان به حرارتی و غیر حرارتی تقسیم نمود. اثرات حرارتی با افزایش دما بیش از ۱ درجه سانتی‌گراد رخ داده و باعث تغییرات سلولی و درون سلولی به ویژه در سطح مولکولی می‌گردد. قرار گرفتن در معرض میدان‌های الکترومغناطیسی به طور کافی سبب ایجاد یک اثر حرارتی می‌شود که می‌تواند بدن انسان را گرم نموده و منجر به آسیب به DNA و جهش و مرگ سلولی می‌شود. چنانچه اگر گرمای ساطع شده اثر حرارتی ایجاد نکند و برای گرم کردن بدن انسان کافی نباشد، باز هم احتمال دارد آسیب به سلول‌ها و بافت‌ها وارد کند و این آسیب می‌تواند منجر به بیماری‌هایی مانند سرطان گردد (۳). مطالعات با یافته‌های متفاوت تأثیر تابش‌های الکترومغناطیسی بر موجودات زنده را مورد تردید قرار داده است. مشخص شده است که امواج الکترومغناطیس سبب مرگ سلول‌های عصبی، عملکرد غلاف میلین و عملکرد کانال یونی در سیستم عصبی مرکزی هستند (۴). با این حال، نزدیکی گوشی همراه با سیستم عصبی جمجمه فرضیه‌ای برای عواقب عصبی به همراه دارد (۵). مطالعات Barnes و Greenebaum نشان داد که میدان‌های پالس‌های میکروویو ۲/۴۵ گیگا هرتز باعث از دست دادن حافظه و اختلال شناختی می‌شود (۶). در مقابل، برخی از مطالعات نشان می‌دهند که میدان‌های الکترومغناطیسی پالسی باعث رشد مجدد آکسون‌ها و گسترش نوریت می‌شوند (۷، ۸). با این حال، اثرات

فرکانس و مسائل تبدیل حرارت وابسته به زمان استفاده می‌شود. این آزمایش میدان‌های الکترومغناطیسی رادار را شبیه‌سازی می‌کند (۲۱). میدان‌های مغناطیسی عمدتاً بین منبع تابش و بافت بیولوژیکی بی‌اثر هستند، اما میدان‌های الکتریکی پس از رسیدن به بافت بیولوژیکی مؤثر هستند. این یافته‌ها ممکن است برای هر سیستم راداری که در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز کار می‌کند، دارای منبع تابش در فاصله حدود ۱۰ متر (میدان راه دور)، بهره آنتن ۳۰ دسی‌بل و منبع تابش خروجی از ۰ تا ۲۰۲۶۳ وات باشد طی مدت زمان ۳۰ دقیقه تابش، اعمال گردید. بنابراین، اگر رادارهایی که در کاربردهای نظامی، هواشناسی یا سایر کاربردها استفاده می‌شوند، این معیارها را برآورده کنند، نتایج ممکن است قابل اجرا باشد. سپس افزایش دما در لایه‌های مجسمه، هیپوکامپ و میزان نرخ جذب ویژه (SAR) ثبت گردید. شکل ۱ طرح شماتیک مطالعه حاضر را به اختصار نشان می‌دهد.



شکل ۱. طرح شماتیک مطالعه شبیه‌سازی

شبیه‌سازی مجسمه انسان استفاده می‌شود. بدین منظور از نرم‌افزار شبیه‌سازی COMSOL Multiphysics نسخه ۵/۴a برای ایجاد یک مدل هفت لایه‌ای شامل پوست، چربی، عضله، مجسمه، ناحیه دورا، مایع مغزی-نخاعی به همراه بافت مغز استفاده شد. اندازه هیپوکامپ انسان اغلب بین ۳ تا ۴ سانتی‌متر مکعب تخمین زده می‌شود (۲۳). در این مطالعه هیپوکامپ ۳ سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است. جدول ۱ ضخامت و شعاع لایه‌های سر را نشان می‌دهد.

عملکرد شناختی منحصر به فرد می‌شود (۲۰). بنابراین، مطالعه حاضر به شبیه‌سازی و بررسی اثرات گرمایی امواج الکترومغناطیسی باند S بر بافت هیپوکامپ می‌پردازد. نرم‌افزار COMSOL Multiphysics روش ساده شده‌ای را برای این شبیه‌سازی دقیق‌تر و آموزنده‌تر از روش‌های قبلی ارائه می‌دهد.

روش کار

سیستم تابش

اثر الکترومغناطیسی میدان دور بر روی لایه‌های مغز شبیه‌سازی شده در حالت‌های خروجی توان مختلف مورد بررسی قرار گرفت. امواج از سه زاویه تابش می‌شوند: خلفی (پشت)، قدامی (جلو) و جانبی سر. در فضای آزاد، امواج به شکل یک موج مسطح ساطع می‌شوند. نرم‌افزار شبیه‌سازی COMSOL Multiphysics نسخه ۵/۴a برای حل معادلات زیست حرارتی و موج بیوالکترومغناطیسی در حوزه

رابطه بین هندسه و کیفیت بافت مورد مطالعه

هندسه سر انسان مانند فانتوم مانکن شبه انسانی خاص (Mannequin Specific Anthropomorphic) است که توسط IEEE از مشخصات استاندارد اندازه‌گیری‌های مقدار نرخ جذب ویژه ارائه شده است و به طور گسترده در شبیه‌سازی‌ها برای انتشار امواج فرکانس‌های رادیویی (Radio frequency (RF)) استفاده می‌شود. در این مطالعه هندسه کره با توجه به شعاع و ضخامت برای نشان دادن لایه‌های سر انسان به کار گرفته شد (۲۲). به طور معمول، دو مدل چهار و هفت لایه‌ای برای

جدول ۱. ضخامت و شعاع لایه‌های سر به کار رفته در نرم‌افزار شبیه‌سازی COMSOL Multiphysics

لایه‌ها	ضخامت (میلی متر)	شعاع (میلی متر)
پوست	۱/۰۰	۹۴/۰۰
چربی	۰/۱۴	۹۳/۰۰
عضله	۱/۸۶	۹۲/۸۶
جمجمه	۷/۰۰	۹۱/۰۰
دورا	۱/۰۰	۸۴/۰۰
بافت مغزی_نخاعی	۲/۰۰	۸۳/۰۰
مغز	۸۱/۰۰	۸۱/۰۰

برای محاسبه توان میدان الکتریکی در میدان‌های دور، ابتدا توان موج دریافتی از منبع نزدیک به بافت بیولوژیکی را با استفاده از معادله Friis ساده شده تعیین نمودیم. معادله (۱) معادله Friis ساده شده را نشان می‌دهد (۲۴).

$$P_r = G_t \times G_r \frac{\lambda}{(4\pi R)^2} \times P_t \quad (1)$$

در اینجا، G_t ، G_r ، λ ، R ، P_t و P_r نشان‌دهنده فرستنده، گیرنده، طول موج، فاصله منبع تا بافت، توان آنتن فرستنده و توان آنتن گیرنده هستند، به ترتیب با استفاده از رابطه (۱) برای ارزیابی بافت بیولوژیکی، در حالی که E و η به ترتیب شدت میدان‌های الکتریکی و امپدانس محیط را با استفاده از رابطه (۲) نشان می‌دهند. سپس با استفاده از رابطه (۲)، شدت میدان‌های الکتریکی امواج الکترومغناطیسی در فضای آزاد را به دست آوردیم.

$$P_r = \frac{E^2}{2\eta}, \quad (\eta = 120\pi) \quad (2)$$

توزیع دما در اثر تابش تشعشعات رادار میدان دور ایجاد می‌شود. معادله (۳) شامل معادله زیست حرارتی در شرایط وابسته به زمان است.

$$\rho \left(c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \nabla \cdot (c_p u) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{bio} \quad (3)$$

در اینجا، ρ به عنوان چگالی (kg.m^{-3})، c_p به عنوان ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J/kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)، k ضریب هدایت حرارتی ($\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)، Q به عنوان ضریب منبع گرما (W.m^{-3}) جایی که گرما می‌تواند از طریق متابولیسم یا از منابع خارجی تولید شود، T نمایان گر دما و t زمان (s) است. معادلات (۴) و (۵) معادلات موج به کار رفته در شبیه‌سازی را بیان می‌کنند.

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) = K_0^2 \epsilon_r E \quad (4)$$

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) = K_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E \quad (5)$$

یک معیار مرتبط برای تاثیر بیولوژیکی تابش است. میزان نرخ جذب ویژه داخل هر بافت (پوست، جمجمه، هیپوکامپ و ...) با توجه به فرمول نرخ جذب ویژه:

$$SAR = \frac{\sigma \times E^2}{\rho} \quad (6)$$

در اینجا، σ رسانایی ماده است، ω فرکانس رادیانی و E گذردهی نسبی است. نرخ جذب ویژه، همان‌طور که Zhadobov و همکاران مطرح کرده است (۲۵)،

جدول ۲ پارامترهای هر لایه سر را با میزان فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز را نشان می‌دهد (۲۶).

میزان جذب نرخ ویژه بر اساس شدت میدان الکتریکی اعمال شده بر بافت، رسانایی الکتریکی و چگالی آن بافت محاسبه می‌گردد (۲۱).

جدول ۲. مشخصات خواص فیزیکی لایه‌های مختلف سر

لایه‌ها	رسانایی گرمایی (k)	ظرفیت گرمایی ویژه (Cp)	ضریب گذردهی نسبی الکتریکی (εr) در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز	چگالی (ρ)	تانژانت تلفات (δ)
پوست	۰/۳۷	۳۳۹۱	۳۸/۰	۱۱۰۹	۰/۲۷۲
چربی	۰/۲۱	۲۳۴۸	۱۰/۸	۹۱۱	۰/۱۴۵
ماهیچه	۰/۴۹	۳۴۲۱	۵۲/۷	۱۰۹۰	۰/۲۴۱
جمجمه	۰/۳۲	۱۳۱۳	۱۱/۴	۱۱۷۸	۰/۲۶
لایه دورا	۰/۴۴	۳۳۶۴	۴۲/۰	۱۱۷۴	۰/۲۹۱
بافت مغزی_نخاعی	۰/۵۷	۴۰۹۶	۶۶/۲	۱۰۰۷	۰/۳۸۲
بافت مغز	۰/۵۱	۳۶۳۰	۴۴/۸	۱۰۴۶	۰/۲۴۶
هیپوکامپ	۰/۵۵	۳۶۹۶	۴۸/۹	۱۰۴۵	۰/۲۷۱

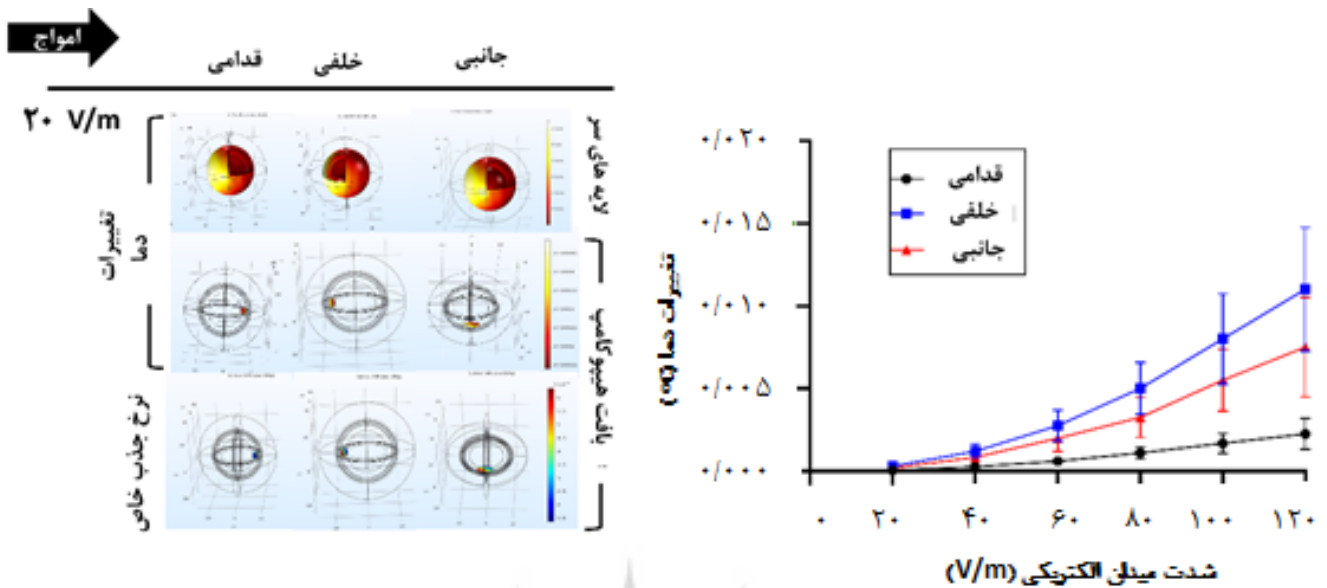
یافته‌ها

این مطالعه به بررسی اثر امواج الکترومغناطیسی ۲/۴۵ گیگاهرتز با شدت‌های مختلف میدان الکتریکی و رابطه حرارتی آن با هیپوکامپ در مغز پرداخته است. نقشه‌های حرارتی لایه‌های سر نشان می‌دهد که چگونه امواج الکترومغناطیسی بر هیپوکامپ و عملکرد حافظه شناختی تأثیر می‌گذارد. افزایش دما در لایه‌های جمجمه و بافت هیپوکامپ با تابش امواج الکترومغناطیسی میکروویو در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز، شدت تابش ۱۲۰-۲۰ ولت بر متر در مدت ۳۰ دقیقه ایجاد شده توسط میدان‌های دور از سه جهت، یعنی قسمت‌های خلفی، قدامی و جانبی سر اتفاق می‌افتد. با این حال، این افزایش ناچیز است و تحمل دمای آن از ۰/۰۰۰۱ درجه سانتی‌گراد (کمترین افزایش دما مرتبط با وضعیت تابش در مقابل میدان الکتریکی ۲۰ ولت بر متر) تا ۰/۰۱۶ درجه سانتی‌گراد (بالاترین افزایش دما مرتبط با از پشت سر در یک میدان الکتریکی ۱۲۰ ولت بر متر) بود. با افزایش شدت میدان الکتریکی و دمای بافت، نرخ جذب ویژه در بافت هیپوکامپ افزایش یافت. میزان جذب انرژی از $10^{-2} \times 0/118$ وات بر کیلوگرم (کمترین افزایش دما مربوط به میدان الکتریکی ۲۰ ولت بر متر) تا $10^{-2} \times 22$ وات بر کیلوگرم (میدان الکتریکی ۱۲۰ ولت بر متر از ناحیه خلفی سر) متغیر است. در شکل ۲، میزان ۲۰ ولت بر متر به عنوان یکی از واحدهای میدان الکتریکی انتخاب گردیده است. منبع تابش نیز به صورت قدامی، خلفی و جانبی در نظر گرفته شده است.

این مطالعه به بررسی اثر امواج الکترومغناطیسی ۲/۴۵ گیگاهرتز با شدت‌های مختلف میدان الکتریکی و رابطه حرارتی آن با هیپوکامپ در مغز پرداخته است. نقشه‌های حرارتی لایه‌های سر نشان می‌دهد که چگونه امواج الکترومغناطیسی بر هیپوکامپ و عملکرد حافظه شناختی تأثیر می‌گذارد. افزایش دما در لایه‌های جمجمه و بافت هیپوکامپ با تابش امواج الکترومغناطیسی میکروویو در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز، شدت تابش ۱۲۰-۲۰ ولت بر متر در مدت ۳۰ دقیقه ایجاد شده توسط میدان‌های دور از سه جهت، یعنی قسمت‌های خلفی، قدامی و جانبی سر اتفاق می‌افتد. با این حال، این افزایش ناچیز است و تحمل دمای آن از ۰/۰۰۰۱ درجه سانتی‌گراد (کمترین افزایش دما مرتبط با وضعیت تابش در مقابل میدان الکتریکی ۲۰ ولت بر متر) تا ۰/۰۱۶ درجه سانتی‌گراد (بالاترین افزایش دما مرتبط با از پشت سر در یک میدان الکتریکی ۱۲۰ ولت بر متر) بود. با افزایش شدت میدان الکتریکی و دمای بافت، نرخ جذب ویژه در بافت هیپوکامپ افزایش یافت. میزان جذب انرژی از $10^{-2} \times 0/118$ وات بر کیلوگرم (کمترین افزایش دما مربوط به میدان الکتریکی ۲۰ ولت بر متر) تا $10^{-2} \times 22$ وات بر کیلوگرم (میدان الکتریکی ۱۲۰ ولت بر متر از ناحیه خلفی سر) متغیر است. در شکل ۲، میزان ۲۰ ولت بر متر به عنوان یکی از واحدهای میدان الکتریکی انتخاب گردیده است. منبع تابش نیز به صورت قدامی، خلفی و جانبی در نظر گرفته شده است.

(ب)

(الف)



شکل ۲. الف) سرعت افزایش دما و تغییرات نرخ جذب ویژه در حالی که شدت میدان الکتریکی ۲۰ ولت بر متر انتخاب شده است (نشان گر فلش سیاه رنگ مسیر تابش میدان الکتریکی را مشخص می‌کند، شکل ۲. ب) تغییرات دما بسته به شدت میدان الکتریکی را در بخش هیپوکامپ نشان می‌دهد.

ساطع می‌شود، شدت تابش میدان الکتریکی در محدوده ۲۰ تا ۱۲۰ ولت بر متر باعث افزایش دما از 0.004 درجه سانتی‌گراد تا 0.016 درجه سانتی‌گراد و افزایش نرخ جذب ویژه از 0.6×10^{-2} تا 22×10^{-2} را شاهد بودیم.

بحث

در این مطالعه به بررسی میزان حرارت دریافت شده ناشی از امواج الکترومغناطیس باند S (در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز) در ناحیه هیپوکامپ مغز در سایت رادار با استفاده از نرم‌افزار تجاری COMSOL Multiphysics مورد بررسی قرار گرفت. از این رو اهمیت این پژوهش در مراکز مخابراتی و راداری احساس می‌گردد. امواج الکترومغناطیسی با انواع فعالیت‌های فیزیولوژیکی مرتبط هستند (۲۷). پژوهشگران در بیوالکترومغناطیس بر دو فرآیند تأثیر موج بر بافت‌های بیولوژیکی تمرکز می‌کنند. اولین مکانیسم، اثر حرارتی است که زمانی رخ می‌دهد که بافت‌های بیولوژیکی در معرض امواج الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند. مکانیسم دوم اثر غیر حرارتی است که به عنوان "بررسی نظری و تجربی رویدادهای قطبیت الکترون و یون در ماده" مشخص می‌شود. در نتیجه، یک میدان الکتریکی خارجی می‌تواند ساختار میدان الکترومغناطیسی داخلی یک موجود بیولوژیکی را تغییر دهد. پلاریزاسیون ناشی از میدان

هنگامی که تابش به سمت جانبی سر اعمال می‌شود، شدت میدان الکتریکی ۲۰ تا ۱۲۰ ولت بر متر باعث افزایش دما بین 0.003 تا 0.012 درجه سانتی‌گراد می‌شود. همچنین شاهد افزایش نرخ جذب ویژه از 0.45×10^{-2} به 16×10^{-2} ولت بر کیلوگرم بودیم. آزمون تحلیل واریانس یک راهه با استفاده از تست توکی مشخص نمود که تفاوت حرارتی در بخش‌های قدامی، خلفی و جانبی هیپوکامپ تفاوت معناداری ندارند ($P=0.1225$). با این حال، با توجه به شکل ۲A، اختلاف معناداری در میزان نرخ جذب ویژه در شدت میدان‌های مختلف (۱۲۰-۲۰ ولت بر متر) مشاهده شد ($P<0.001$), هرچند که اطلاعات آن در این مطالعه منتشر نشده است. همچنین میزان افزایش دما با گذشت زمان (۰ تا ۳۰ دقیقه) با اعمال میدان‌های مختلف الکتریکی با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز رابطه مستقیمی داشت (اطلاعات در این مطالعه منتشر نشده است).

زمانی که تابش از بخش قدامی تابیده شد، با افزایش میزان واحد الکتریکی از ۲۰ تا ۱۲۰ ولت بر متر، شاهد افزایش دما از 0.001 تا 0.035 درجه سانتی‌گراد به همراه افزایش میزان نرخ جذب ویژه از 0.18×10^{-2} به 60×10^{-2} ولت بر کیلوگرم بودیم (شکل ۲ ب). شکل ۲ ب رابطه مستقیم بین افزایش دما و میزان نرخ جذب ویژه را در این مطالعه نشان می‌دهد. هنگامی که امواج الکترومغناطیسی از پشت سر

که توسط Wang و همکاران (۲۰۲۱) توسط برنامه کامپوس بر روی فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز انجام شد، نشان داد که توزیع دما با پارامترهای مختلف پالس‌های الکترومغناطیسی تقریباً ویژگی‌های مشابه داشتند. بالاترین مقادیر افزایش دما در سر انسان با تغییرات پارامترهای امواج الکترومغناطیسی پالسی همبستگی مثبت نشان داد (۳). با این حال، خطرات بالقوه برای سر انسان ممکن است هنگامی رخ دهد که پارامترهای امواج الکترومغناطیسی پالسی از سطح ایمنی فراتر رود. بر اساس مقاله Wang و همکاران (۲۰۲۱)، چنانچه شدت پالس قوی‌تر از ۱۳۰۰ کیلوولت بر متر و تعداد کل پالس‌ها بیشتر از ۶۶۰۰ پالس باشد، قرار گرفتن در معرض امواج الکترومغناطیسی پالسی ممکن است اثرات نامطلوبی بر روی سر انسان بگذارد. همچنین اگر عرض پالس بزرگتر از ۱۳۰ ns باشد، به عنوان آستانه ایمنی در معرض تابش امواج الکترومغناطیسی معرفی شده است (۳).

به جز تابش امواج الکترومغناطیسی با قدرت بالا، اثرات بیولوژیکی پدید آمده از آنها همچنان مورد بحث است. با این حال، هیچ مدرک محکمی مبنی بر این که این امواج سبب سرطان گردند، وجود ندارد. این امواج به دلیل تاثیراتشان بر فرآیندهای یادگیری و حافظه، به ویژه در ساختار و عملکرد سیناپسی، استرس اکسیداتیو، آپوپتوز، سنتز پروتئین، ژن‌ها، حساسیت فردی و متابولیسم انرژی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۱۲، ۳۷، ۳۸). علاوه بر این، پژوهش‌ها نشان می‌دهد که افزایش تأخیر زمان خواب به دنبال قرار گرفتن در معرض تابش، نشان‌دهنده تغییر در الگوی خواب بر روی حیوانات مورد آزمایش بود و از این رو شواهدی بر تاثیر مضر میدان‌های الکترومغناطیسی غیرحرارتی بر فیزیولوژی مغز ارائه می‌دهد (۳۹). در نهایت، اکثر پژوهشگران بر این باورند که امواج الکترومغناطیسی اثرات مختلفی بر بافت‌های زیستی دارند (۱۱)، اما تعیین این که آیا این اثرات حرارتی یا غیرحرارتی هستند، همچنان یک سوال چالش‌برانگیز است. هرچند پژوهش‌های قبلی در تمایز این دو مورد نشان می‌دهد که اثرات حرارتی می‌تواند بر سیستم عصبی مرکزی، بافت‌ها و عملکردهای شناختی تأثیر بگذارد (۴۰-۴۲). علاوه بر این، این تغییرات در عملکردهای شناختی زمانی مختل می‌گردند که حداقل دمای بافت یک درجه سانتی‌گراد افزایش یابد و چنین عامل محرکی باعث می‌شود که دمای بافت به بیش از ۳۸/۵ درجه سانتی‌گراد و بالاتر برسد (۴۳). به نظر می‌رسد با توجه به اطلاعات به دست آمده در نرم‌افزار شبیه‌سازی در این پژوهش، تغییرات حرارتی ناشی از تابش امواج الکترومغناطیسی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز طی میدان‌های دور در مدت زمان ۳۰ دقیقه و با شدت حداکثر ۱۲۰ ولت بر متر بسیار ناچیز باشد و تغییرات در عملکرد

پتانسیل‌های غشاء و ویژگی‌های بیوالکتریکی را تغییر می‌دهد که بر فعالیت‌های بیوالکتریکی تأثیر می‌گذارد. از این رو، امواج الکترومغناطیسی می‌توانند ساختار و عملکرد سیستم عصبی را تغییر دهند (۲۸). با این حال، به دلیل سطح مقطع جذب محدود یون‌ها (طول موج میکروویو به طور قابل توجهی بزرگتر از ابعاد سلول است) و ویژگی‌های اینرسی و ویسکوزیته محیط مایع، میدان میکروویو با فرکانس بالا نمی‌تواند تغییر منظمی در حرکت آنها ایجاد کند (۲۱).

Krylova و همکاران (۱۹۹۲) کاهش غلظت گیرنده‌های استیل‌کولینی موسکارینی را در قشر پیشانی و هیپوکامپ در موش‌هایی که در معرض تابش امواج میکروویو با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز و ۰/۶ وات بر کیلوگرم (به مدت ۲۰ دقیقه طی ۱۰ روز) قرار گرفته بودند، را مشاهده کردند. در حالی که، موش‌هایی که در طول مدت ۴۵ دقیقه طی ۱۰ روز قرار داشتند، میزان غلظت گیرنده‌های استیل‌کولینی موسکارینی در هیپوکامپ روند صعودی داشت، این تغییرات با از دست دادن ظرفیت یادگیری و حافظه همراه بود (۲۹). از نظر تغییرات دمایی، Kim و Connors (۲۰۱۲) کشف کردند که سلول‌های CA3 در هیپوکامپ نسبت به سلول‌های CA1 حساس‌تر به دما هستند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که افزایش دمای نورون‌های هیپوکامپ می‌تواند خواص بازدارندگی و تحرکی آنها را تغییر دهد. همچنین افزایش قابل توجه دما می‌تواند خواص پلاریزاسیون غشاهای عصبی را تغییر دهد و این افزایش، احتمال دارد سبب فعالیت سیناپسی در هیپوکامپ گردد (۳۰).

سیناپس‌ها ساختارهای منحصر به فردی در سیستم عصبی مرکزی هستند که در انتقال تکانه‌های الکتروشیمیایی بین نورون‌ها نقش دارند (۳۱). پلاستیسیته یا انعطاف‌پذیری سیناپسی یک ویژگی سیناپسی مورد نیاز برای یادگیری و حافظه است (۳۲). در یک مطالعه مشخص گردید که تابش امواج میکروویو با فعال کردن بیش از حد مسیر سیگنال‌دهی گیرنده NMDA (۳۳)، از جمله شکل‌پذیری ساختاری و عملکردی، بر انعطاف‌پذیری سیناپسی در هیپوکامپ موش و سلول‌های PC12 تأثیر می‌گذارد. از این جهت، به دنبال تابش امواج الکترومغناطیسی، وزیکول‌های پیش سیناپسی تجمع یا خالی می‌شوند، میتوکندری‌ها از بین می‌روند (۳۴) و توزیع چگالی پس سیناپسی نامنظم می‌گردد. تشکیل فیبر خزه‌ای (Mossy fiber) در طول عملکردهای یادگیری و حافظه مهار می‌شود، در نتیجه تراکم و فعالیت‌های فیلوپودی دندریتی کاهش می‌یابد (۳۵). همچنین Shahin و همکاران (۲۰۱۸)، تأکید کردند که یادگیری هیپوکامپ و حافظه فضایی هنگامی که سیگنالینگ iGluR/ERK/CREB توسط تابش الکترومغناطیسی در محدوده ۲/۴۵ گیگاهرتز سرکوب می‌شود، مختل می‌شود (۳۶). در مدل‌سازی

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق در پژوهش

این مطالعه بر اساس شبیه‌سازی رایانه‌ای انجام گردیده است و از این جهت بی‌نیاز به استفاده از مطالعه بر روی حیوانات و انسان بود.

مشارکت نویسندگان

سید محمد مهدوی و محمد علی نصیری خلیلی این پژوهش را طراحی کردند. محمود فیضی پور نامقی به جمع‌آوری و تفسیر داده‌ها پرداخت. محمود فیضی پور نامقی و محمد کرمی داده‌ها را بررسی کردند. وحید واحدی و امیر مدرسی چهاردهی به تجزیه و تحلیل داده‌ها پرداختند. امیر مدرسی چهاردهی و محمود فیضی پور نامقی به نگارش و ویرایش مقاله پرداخته‌اند. این پژوهش تحت نظارت سید محمد مهدوی انجام گرفت.

منابع مالی

پژوهش برای اجرا هیچ‌گونه حمایت مالی از هیچ‌سازمانی دریافت نکرده است.

تشکر و قدردانی

از کلیه افرادی که در انجام این پژوهش همکاری کرده‌اند و فرصت‌گران‌بهای خود را در اختیار تیم پژوهشی ما قرار داده‌اند، کمال سپاسگزاری را داریم.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی بر حسب پژوهش، نویسندگی، و یا انتشار وجود ندارد.

حافظه که در سایر پژوهش‌ها به آن اشاره شده می‌شود ناشی از اثرات غیرحرارتی امواج الکترومغناطیسی با پروتکل تابش این پژوهش است. هرچند پژوهش‌های بیشتر در این زمینه مورد نیاز است. برای مثال، فاصله از دستگاه، تغییرات بر سایر بافت‌های مغزی که همچنان مورد مناقشه در این بحث است، ضروری است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ساخت یک مدل واقعی و کامل از لایه‌های سر با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام گردیده است. مداخلات فیزیکی (امواج الکترومغناطیسی) ممکن است سبب ایجاد اثرات غیرحرارتی در بافت هیپوکامپ مغز به دلیل تغییرات در تحمل دمای ناشی از قرار گرفتن در معرض امواج باند S گردند. این اثرات غیر حرارتی در مغز می‌تواند از طریق تعامل غیرحرارتی امواج الکترومغناطیسی خارجی با امواج مغزی یا از طریق اختلاف فاز و تضعیف امواج مغزی ناشی از میدان‌های الکترومغناطیس خارجی ایجاد شود. بنابراین، این مطالعه، مکانیسم‌های تاثیر غیرحرارتی امواج الکترومغناطیسی که در مطالعات قبلی تأثیر آنها بر هیپوکامپ ارائه شده است را تأیید می‌کند. این مطالعه بیان می‌کند که امواج الکترومغناطیسی با پروتکل تابش مشخص شده، در این آزمایش، از جنبه اثرات حرارتی احتمالاً فاقد اثرگذاری خاصی هستند، حال آن که با توجه به مطالعات انجام شده در این حوزه پیشنهاد می‌شود که آسیب به هیپوکامپ و فرایندهای شناختی حاصل اثرات غیرحرارتی امواج الکترومغناطیسی با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز و شدت تابش و مدت زمان ذکر شده می‌باشد.

References

1. Kivrak EG, Yurt KK, Kaplan AA, Alkan I, Altun G. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*. 2017;5(4):167-176.
2. Martone A, Amin M. A view on radar and communication systems coexistence and dual functionality in the era of spectrum sensing. *Digital Signal Processing*. 2021;119:103135.
3. Wang S, Song Z, Yuan Y, Guo G, Kang J. Effects of pulse parameters on the temperature distribution of a human head

- exposed to the electromagnetic pulse. *Scientific Reports*. 2021;11(1):22938.
4. Kim JH, Lee JK, Kim HG, Kim KB, Kim HR. Possible effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on central nerve system. *Biomolecules & Therapeutics*. 2019;27(3):265-275.
5. Hardell L, Carlberg M, Mild KH. Use of cellular telephones and brain tumour risk in urban and rural areas. *Occupational and Environmental Medicine*. 2005;62(6):390-394.
6. Barnes FS, Greenebaum B. Biological and medical aspects of

- electromagnetic fields. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2018.
7. Gholami D, Riazi G, Fathi R, Sharafi M, Shahverdi A. Comparison of polymerization and structural behavior of microtubules in rat brain and sperm affected by the extremely low-frequency electromagnetic field. *BMC Molecular and Cell Biology*. 2019;20:41.
 8. Seo N, Lee SH, Ju KW, Woo J, Kim B, Kim S, et al. Low-frequency pulsed electromagnetic field pretreated bone marrow-derived mesenchymal stem cells promote the regeneration of crush-injured rat mental nerve. *Neural Regeneration Research*. 2018;13(1):145-153.
 9. Yu C, Peng RY. Biological effects and mechanisms of shortwave radiation: A review. *Military Medical Research*. 2017;4:24.
 10. Taki M, Watanabe S. Biological and health effects of exposure to electromagnetic field from mobile communications systems. *IATSS Research*. 2001;25(2):40-50.
 11. Zhu R, Wang H, Xu X, Zhao L, Zhang J, Dong J, et al. Effects of 1.5 and 4.3 GHz microwave radiation on cognitive function and hippocampal tissue structure in Wistar rats. *Scientific Reports*. 2021;11:10061.
 12. Zhi WJ, Wang LF, Hu XJ. Recent advances in the effects of microwave radiation on brains. *Military Medical Research*. 2017;4:29.
 13. Bektas H, Dasdag S, Bektas MS. Comparison of effects of 2.4 GHz Wi-Fi and mobile phone exposure on human placenta and cord blood. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*. 2020;34(1):154-162.
 14. Psenakova Z, Benova M. Measurement evaluation of EMF effect by mobile phone on human head phantom. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2011;7(1-2):350-353.
 15. Wetsel WC. Hyperthermic effects on behavior. *International Journal of Hyperthermia*. 2011;27(4):353-373.
 16. Mobashsher AT, Mahmoud A, Abbosh AM. Portable wide-band microwave imaging system for intracranial hemorrhage detection using improved back-projection algorithm with model of effective head permittivity. *Scientific Reports*. 2016;6:20459.
 17. Kiernan JA. Anatomy of the temporal lobe. *Epilepsy Research and Treatment*. 2012;2012:176157.
 18. Bird CM, Burgess N. The hippocampus and memory: Insights from spatial processing. *Nature Reviews Neuroscience*. 2008;9(3):182-194.
 19. Cowan N. Working memory underpins cognitive development, learning, and education. *Educational Psychology Review*. 2014;26:197-223.
 20. Anand KS, Dhikav V. Hippocampus in health and disease: An overview. *Annals of Indian Academy of Neurology*. 2012;15(4):239-246.
 21. Hinrikus H, Bachmann M, Tomson R, Lass J. Non-thermal effect of microwave radiation on human brain. *Environmentalist*. 2005;25(2):187-194.
 22. Zhang X, Zhang X. Optimal design and analysis of the stepped core for wireless power transfer systems. *Mobile Information Systems*. 2016;2016:2624917.
 23. Vijayakumar A, Vijayakumar A. Comparison of hippocampal volume in dementia subtypes. *ISRN Radiology*. 2013;2013:174524.
 24. Shaw JA. Radiometry and the Friis transmission equation. *American Journal of Physics*. 2013;81(1):33-37.
 25. Zhadobov M, Nicolaz CN, Sauleau R, Desmots F, Thouroude D, Michel D, et al. Evaluation of the potential biological effects of the 60-GHz millimeter waves upon human cells. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2009;57(10):2949-2956.
 26. Karnaushenko DD, Karnaushenko D, Makarov D, Schmidt OG. Compact helical antenna for smart implant applications. *NPG Asia Materials*. 2015;7:e188.
 27. Singh S, Kapoor N. Health implications of electromagnetic fields, mechanisms of action, and research needs. *Advances in Biology*. 2014;2014:198609.
 28. Hu C, Zuo H, Li Y. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation on neurotransmitters in the brain. *Frontiers in Public Health*. 2021;9:691880.
 29. Krylova IN, Dukhanin AS, Il'in AB, Kuznetsova E, Ba-

laeva NV, Shimanovskii NL, et al. The effect of ultrahigh-frequency electromagnetic radiation on learning and memory processes. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 1992;114(11):483-484.

30. Kim JA, Connors BW. High temperatures alter physiological properties of pyramidal cells and inhibitory interneurons in hippocampus. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2012;6:27.

31. Pereda AE. Electrical synapses and their functional interactions with chemical synapses. *Nature Reviews Neuroscience*. 2014;15(4):250-263.

32. Rendeiro C, Rhodes JS. Dietary flavonoids and brain health in aging: Food for thought. In: Martin CR, Preedy VR, Rajendram R, editors. Factors affecting neurological aging. Cambridge, Massachusetts:Academic Press;2021. pp. 589-601.

33. Xiong L, Sun CF, Zhang J, Gao YB, Wang LF, Zuo HY, et al. Microwave exposure impairs synaptic plasticity in the rat hippocampus and PC12 cells through over-activation of the NMDA receptor signaling pathway. *Biomedical and Environmental Sciences*. 2015;28(1):13-24.

34. Qiao S, Peng R, Yan H, Gao Y, Wang C, Wang S, et al. Reduction of phosphorylated synapsin I (ser-553) leads to spatial memory impairment by attenuating GABA release after microwave exposure in Wistar rats. *Plos One*. 2014;9(4):e95503.

35. Mortazavi SM, Rouintan MS, Taeb S, Dehghan N, Ghafarpanah AA, Sadeghi Z, et al. Human short-term exposure to electromagnetic fields emitted by mobile phones decreases computer-assisted visual reaction time. *Acta Neurologica Belgica*. 2012;112:171-175.

36. Shahin S, Banerjee S, Swarup V, Singh SP, Chaturvedi CM. From the cover: 2.45-GHz microwave radiation impairs hip-

pocampal learning and spatial memory: Involvement of local stress mechanism-induced suppression of iGluR/ERK/CREB signaling. *Toxicological Sciences*. 2018;161(2):349-374.

37. Pak Aeen M, Mahdavi SM, Maghami P, Modarresi Chahardehi A. The effect of non-ionizing electromagnetic fields in the range of 2.4 GHz on memory, thermal sensitivity and serum protein in male rats. *Activitas Nervosa Superior Rediviva*. 2022;64(2-3):77-85.

38. Dehghani Z, Mahdavi SM, Chahardehi AM, Mansouri V, Sherafat SJ. The effect of 2.45 GHz electromagnetic fields on fear memory extinction in male rats. *Journal of Lasers in Medical Sciences*. 2022;13:e52.

39. Mohammed HS, Fahmy HM, Radwan NM, Elsayed AA. Non-thermal continuous and modulated electromagnetic radiation fields effects on sleep EEG of rats. *Journal of Advanced Research*. 2013;4(2):181-187.

40. Ding C, Pan Y, Zhang A, Zhu C, Liu D, Xu G. Zhonghua laodong wei sheng zhi ye bing za zhi= Zhonghua laodong weisheng zhiyebing zazhi=. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*. 2015;33(12):894-899.

41. Zhao X, Dong G, Wang C. The non-thermal biological effects and mechanisms of microwave exposure. *International Journal of Radiation Research*. 2021;19(3):483-494.

42. Echchgadda I, Cantu JC, Tolstykh GP, Butterworth JW, Payne JA, Ibey BL. Changes in the excitability of primary hippocampal neurons following exposure to 3.0 GHz radiofrequency electromagnetic fields. *Scientific Reports*. 2022;12:3506.

43. Lohmus M. Possible biological mechanisms linking mental health and heat—a contemplative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(7):1515.