

Local field potential activity in response to a black square stimulus in the primary visual cortex

Fereshteh Khodaei¹ , Seyed Hossein Sadati^{2*} , Reza Lashgari³

1. PhD Student, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Institute of Medical Science and Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

Introduction: Local field potentials serve as a valuable electrophysiological tool for studying brain function. These signals reflect the collective activity of neighboring neurons. These signals are recorded from the narrow space of neural tissue surrounding the electrode tip using extracellular microelectrodes.

Methods: This study focuses on investigating the monkey's primary visual cortex using a 24-channel electrode. By designing an experiment involving stimulus presentation in 36 randomly selected locations, various aspects of the visual cortex, including the location of the receptive field, the spread of local field potential signals, and the times and amplitudes of peaks and troughs within different cortical layers, are explored. Kruskal-Wallis non-parametric statistical test is used to compare different layers.

Results: The response range initially decreases and then increases, moving from superficial to deeper layers. Additionally, the location of the receptive field through the analysis of features extracted from the local field potential signals is determined. The visual spread assessment exhibits the lowest spread value in layer 4C among the layers. Furthermore, by examining the timing of peaks and troughs, this study gained insights into the flow of information within and between layers, as well as their respective scopes.

Conclusion: Investigating local field potential signals shows the mechanism of accurate information propagation in the layers. These results contribute to a better understanding of the function of the primary visual cortex and have implications for the design of brain-machine interface approaches, neural prostheses, and electroencephalographic signal analysis.

Received: 30 Apr. 2023

Revised: 14 Jul. 2023

Accepted: 21 Aug. 2023

Keywords


Local field potential
Primary visual cortex
Multi-contact electrode
Visual spread
Monkey

Corresponding author

Seyed Hossein Sadati, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Email: Sadati@kntu.ac.ir



 doi.org/10.30514/icss.25.2.87

Citation: Khodaei F, Sadati SH, Lashgari R. Local field potential activity in response to a black square stimulus in the primary visual cortex. *Advances in Cognitive Sciences*. 2023;25(2):87-105.

Extended Abstract

Introduction

The cerebral cortex of mammals comprises six layers-between the soft gray matter and the white brain's white matter. The thickness of its subgroups also varies in different cortex regions. The histology and distribution of

dendrites and axons also show significant variations in different cortex regions. Three main thalamic pathways feed the primary visual cortex (V1) and have a unique position in receiving and distributing sensory input com-

pared to other areas of the visual cortex. It plays a role as the first center for visual information processing in the cerebral cortex. The information that enters the visual cortex from the outside world includes complex visual scenes that need to be analyzed and broken down. Neurons in the primary visual cortex transmit information about the surrounding environment and visual stimuli to higher brain regions with great precision and detail. The type of stimulus significantly affects the information present in the output signal.

Local field potentials (LFPs) are electrical potentials generated by local electric charges distributed in an extracellular conducting medium. A better understanding of LFPs can be useful in the interpretation of non-invasive human studies such as functional magnetic resonance imaging (fMRI), oxygen-dependent signals, electroencephalography (EEG), and event-related potential (ERP) signals. Local field potentials may vary in different cortical areas and layers. Recent studies suggest that LFPs in high-frequency ranges may originate from a limited cortical area, contrary to previous assumptions. These signals are measured from local neuronal populations recorded by an extracellular electrode. Cortical LFPs are believed to be predominantly generated by subthreshold membrane potentials in layers 2, 3, 5, and 6. Recording LFPs is easier than spike activity and can be used in neural prostheses.

In 2015, a study was conducted on the columnar organization of the visual cortex in the spatial phase (19). Kozai et al. investigated methods and parameters for quantifying multi-unit recordings and local field potentials (20). Martin-Vazquez et al. analyzed independent components extracted from local field potential activity recorded during motor movement with rewards in multiple depths of the motor cortex to investigate their role in motor learning (21). An accurate understanding of the properties of local field potential signal responses in different layers of the

cortex is crucial for future use of these signals in neural prosthetics (22). Although local field potential studies have recently received attention (23-27), there has yet to be a systematic study on the response properties of local field potentials and their relationship with neighboring neuron properties (12). The main goal of neuroscience is to understand how populations of neurons are organized in different cortical areas and layers.

In this study, the primary visual cortex of macaques was investigated. Local field potential responses were simultaneously evaluated in all cortical layers using a 24-channel electrode. By presenting a half-degree black square stimulus and recording the response signal, the response range in different layers was investigated, and the extent of visual spread was calculated using only one electrode instead of multiple electrodes. In addition, the peak and trough time and amplitude were examined to investigate the entry and exit of information.

Methods

Data Acquisition

The experiment was conducted on macaque monkeys, and the data were recorded at the Alessandra Angelucci Laboratory at the University of Utah. The raw signals were continuously recorded at a sampling rate of 30 kHz using a 128-channel system. It is common to filter the local field potential signals to highlight the desired activity (28). The effect of a low-pass filter on a completely inactive neuron depends on the distance between the soma and the input site and the membrane time constant. This indicates that dendritic morphology plays an essential role in frequency filtering and that pyramidal cells with their long dendrites are particularly affected by low-pass filters (29). Digital filters such as Gaussian filters (30), low-pass filters, Butterworth filters (30-34), and zero-phase filters (30) are used in the analysis of local field potential signals. The raw recorded voltages were filtered

(1-100 Hz, second-order Butterworth filter) and sampled up to 2 kHz to obtain local field potentials.

Receptive Field Mapping

The receptive field of neurons in each column of the primary visual cortex was manually identified to determine their approximate locations. Subsequently, black squares measuring 0.5° were presented within the visual field spanning $3 \times 3^\circ$, precisely in the approximate location of the receptive field. This process identified the exact location of the receptive field for neurons within the cortical column.

Visual Stimulus

Black squares measuring 0.5° were presented within a field of view spanning $3 \times 3^\circ$. A 24-channel linear electrode with a contact distance of 100 micrometers and a contact diameter of 20 micrometers, specifically the V-Probe type manufactured by Plexon, Texas, was employed to record local field potentials. Each stimulus within the network of these 36 blocks was presented for 500 milliseconds. The experiment was repeated between 5 to 15 times to ensure reliability and gather sufficient data.

Results

Local field potential signals hold great significance in neurophysiology research and are instrumental in diagnosing neurological disorders and abnormalities within the human body. In this section, this study presents the investigation findings into the response of these signals in macaque monkeys to a visual stimulus presented in a 36-square grid.

Initially, the current study assessed the layers using current source density analysis. Subsequently, this research analyzed the Minimum Response Field (mRF) behavior pattern in different layers, along with the neighboring ar-

reas, utilizing the response range derived from the local field potential signal. This study focuses on analyzing the propagation of the local field potential signal. By identifying the peaks and troughs within different layers, the researchers further explore the timing and intensity of information entry and exit.

Given the pivotal role of local field potential signals in comprehending brain information at the cognitive level, it is crucial to study their spatial accuracy and gain a deeper understanding of how these signals are processed.

Figure 1 (A) shows the current source density of local field potential at the minimum receptive field in the layers. The color corresponding to the sink and source is shown in the figure legend. The x-axis shows time, and the y-axis shows the depth of the cortex. Figure 1 (B) indicates the local field potential response at the minimum receptive field to the presented stimulus. The upper, middle, and deep layers are indicated in the Figure 1. The blue dashed line indicates the stimulus presentation time (0 milliseconds), and the pink dashed line demonstrated 50 milliseconds after the stimulus presentation.

Response Range

Calculating the peak and trough times and values were extracted by calculating the first and second derivatives and the sign of the local potential field signal. As can be seen, this parameter evaluates the distance between the minimum and maximum values of the local potential field signal in the range under investigation (0-200 milliseconds).

The response pattern is uniform in the minimum receiver field and its surrounding cells in the layers, and in the minimum receiver field, it has the maximum value in terms of range compared to its surrounding cells. As can be seen, as we move from the upper layers towards the middle layers, the response range decreases and then increases again upon reaching deeper layers. Based on the

results of the Kruskal-Wallis statistical test on the investigation of the response range across layers for the minimum receiver field and the P-value obtained from this

test, indicatively, a statistically significant difference was found in the response range component among primary visual cortex layers.

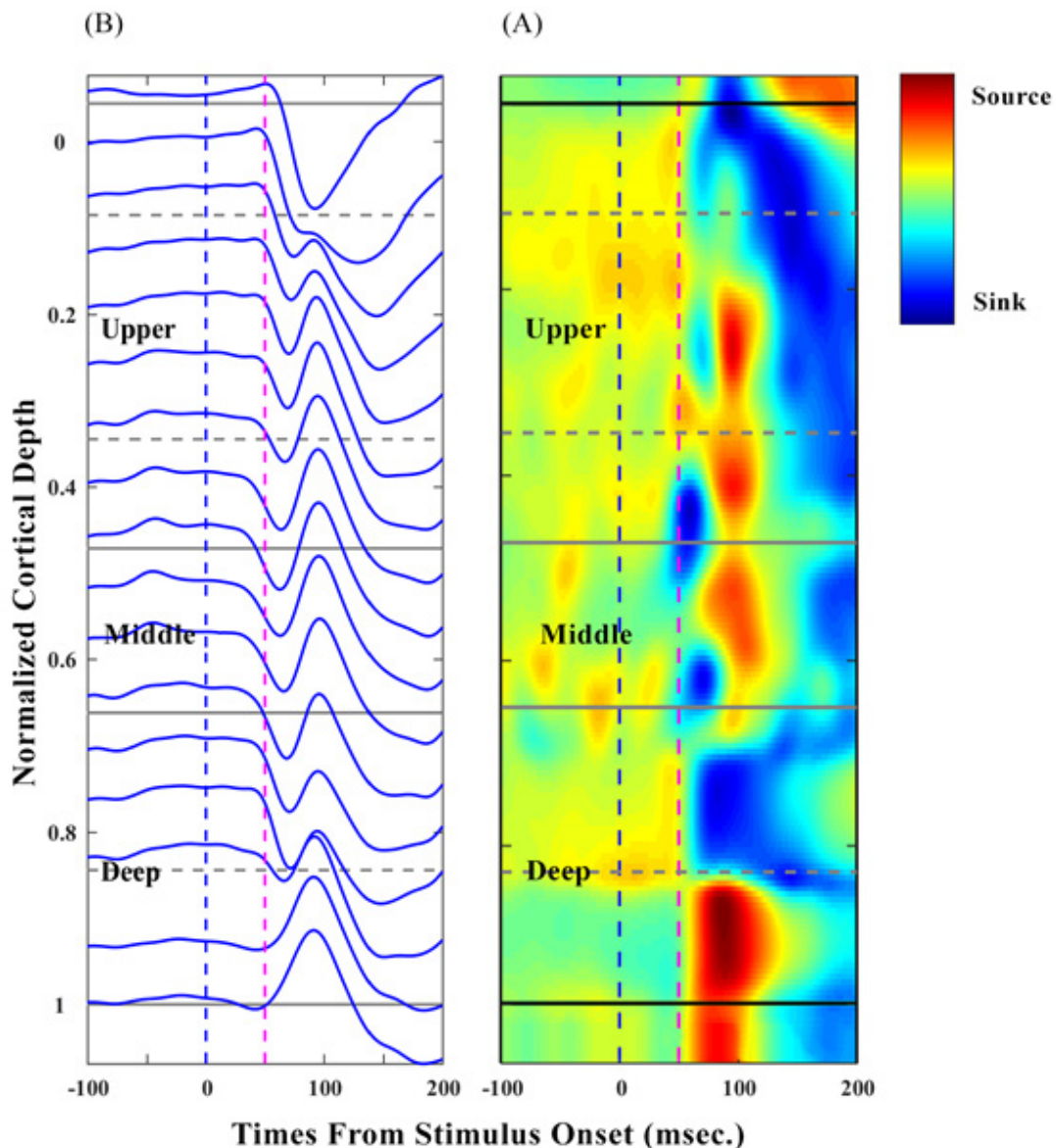


Figure 1. Local field potential response to visual stimulus presented at the minimum receptive field

Visual Spread

How far can a local field potential signal spread around the recording site? Visual spread can describe this concept for us. In this section, this study investigated the visual spread layer using black square stimuli. Undeniably, various factors affect the development of visual spread. The noteworthy approach was to use a vertical electrode and move the location of the stimulus instead of the elec-

trode location. The obtained results showed that layer 4C has the least visual spread among the layers, and this value increases, moving towards the superficial and deep layers.

Signals have notable peaks in the upper and middle layers, while notable troughs were observed in the deeper layers. The value of the signal at the peak or notable trough within the range of 0 to 200 milliseconds, was

chosen to calculate the visual spread of the signal. Clearly, this selection is related to peaks in the deeper layers and troughs in the upper layers.

Nauhaus et al. used a Gaussian function to approximate the exponential shape of the signal's inflection point (29). Katzner et al. fitted a Gaussian function to determine the orientation selectivity of stimuli in V1 (26). Xing et al. developed a method for estimating the spread of the signal with its domain at the peak of deviation (27). The current study used the domain of the signal at the peak of deviation, estimated the visual spread of local field potential signals within 0-200 milliseconds, and plotted the visual spread for all stimuli presented in all 36 networks. In calculating the degree of visual spread, this study only used one electrode, unlike previous studies that required simultaneous use of multiple electrodes.

Peak and trough time and amplitude.

To accurately examine the flow of information in response to the provided stimuli, it is crucial to analyze the peaks and troughs formed in the local field potential, serving as indicators of information-containing locations. By calculating the first and second derivatives and analyzing the local field potential signal sign, this study could extract the timing and values of the peaks and troughs.

Observing the line associated with the first trough, representing the primary sink, revealed a decrease as we moved from the upper layers to the middle layers, followed by an increase in the fifth layer and a subsequent decrease in the sixth layer. The lowest value was observed in the sixth layer, indicating that information enters the sixth layer first, then the middle layers, and finally, the upper and fifth layers.

The behavior of the secondary sink, represented by the second trough highlighted in bold pink in the figure, differed from that of the first trough. The flow of secondary information first occurs towards the upper and deeper

layers and then towards the middle layers. In terms of value, the first trough exhibited the smallest magnitude. The second trough had negative values, while the first peak had positive values.

Statistical analysis using the Kruskal-Wallis test was performed on the data. The resulting P-values indicate a statistically significant difference among the layers, both regarding the timing and range of occurrence for the peaks and troughs.

Conclusion

This study investigated the effect of a black square stimulus presented in the primary visual area of a monkey using a multi-contact electrode. By analyzing the local field potential signals, this research examined several important aspects of the visual cortex, such as response range, visual extension, and peak and trough characteristics in different layers. The analysis of the response range revealed significant variations across layers. The highest amplitude was observed in the minimum receptive field, while the surrounding areas exhibited a similar pattern with a lower amplitude. This characteristic can be utilized to determine the location of the receptive field by examining the local field potential signals. The observed changes in the response range across different layers underscore the specialized role of each layer in extracting specific visual information.

The current study examined the extent of visual spread in different layers with its dependence on the location of stimulus presentation in a grid of 36 squares. By fitting a Gaussian function to the significant peaks or troughs observed in these 36 squares, this study could quantify the width of the Gaussian curve, which represents the degree of visual spread. Layer 4C, known for its limited visual spread, plays a crucial role in early visual processing tasks such as motion detection and spatial perception. Conversely, layers that exhibit a broader visual spread are

involved in processing more intricate visual attributes, such as color and shape, with greater precision. These aspects could be explored in future studies focusing on these specific topics.

The troughs in the local field potential signal represent information entry, while the peaks signify information exit. The changes in polarity of the local field potential serve as an indicator of neural activity. To analyze the input and output of information, extracting the components associated with polarity and examining them across the cortical layers is necessary. By observing differences in the timing and magnitude of peaks and troughs across these layers, this study can gain insights into the flow of information between them. These observations highlight the intricate interplay of excitatory and inhibitory processes, as well as feedback mechanisms within the visual cortex.

This study significantly advances our understanding of the organization and functioning of the visual cortex, shedding light on unique characteristics exhibited by different layers. These findings contribute to a broader comprehension of the mechanisms involved in visual information processing. Utilizing local field potential signals extends beyond this study, encompassing applications in the implantation of brain-computer interface chips, neural prostheses, and the analysis of other signals, including electroencephalography signals. Furthermore, these signals are becoming increasingly prevalent in research and clinical settings, enabling investigations into a wide array of cortical and subcortical disorders, such as paralysis, epilepsy, and cognitive impairments.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All experiments were conducted following approved protocols by the Institutional Animal Care and Use Commit-

tee at the University of Utah and the guidelines of the NIH. The monkey was initially anesthetized with ketamine (25 mg/kg, intramuscularly) and then maintained under anesthesia with isoflurane (2%) during the procedure. Vital signs were monitored throughout the surgery, including body temperature, electrocardiogram, oxygen saturation, and blood pressure.

Authors' contributions

- Fereshteh Khodaei: Valuable assistance in analyzing and interpreting data, preparing a draft of the article, or reviewing and revising it.
- Seyed Hossein Sadati: Valuable assistance in analyzing and interpreting data, preparing a draft of the article or reviewing and revising it, approval of the final version for publication, responsiveness to all aspects of the research – Supervisor.
- Reza Lashgari: Valuable assistance in analyzing and interpreting data, preparing a draft of the article or reviewing and revising it; approval of the final version for publication, responsiveness to all aspects of the research – Supervisor.

Funding

The authors declare they have not received any financial support for conducting this research.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to the Alessandra Angelucci Laboratory for their assistance in conducting and improving the quality of this research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

فعالیت پتانسیل میدانی محلی در پاسخ به محرک مربعی مشکی در قشر اولیه بینایی میمون آزمایشگاهی

فرشته خدائی^۱، سید حسین ساداتی^{۲*}، رضا لشگری^۳

۱. دانشجوی دکترا، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
 ۲. دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
 ۳. استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری‌های پزشکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

مقدمه: پتانسیل‌های میدانی محلی به عنوان یک ابزار الکتروفیزیولوژیکی ارزشمند برای مطالعه عملکرد مغز عمل می‌کنند. این سیگنال‌ها منعکس‌کننده فعالیت جمعی نورون‌های همسایه هستند. از طریق استفاده از میکروالکترودهای خارج سلولی، این سیگنال‌ها از فضای باریک بافت عصبی اطراف نوک الکتروود ثبت می‌شوند.

روش کار: این مطالعه بر روی بررسی قشر بینایی اولیه میمون با استفاده از یک الکتروود ۲۴ کانالی تمرکز دارد. با طراحی آزمایشی شامل ارائه محرک در ۳۶ مکان به طور تصادفی انتخاب شده، جنبه‌های مختلف قشر بینایی، از جمله مکان میدان گیرنده، گسترش بینایی سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی و زمان و دامنه قله‌ها و دره‌ها در لایه‌های مختلف قشر مغز مشخص می‌شود. برای مقایسه لایه‌های مختلف از آزمون آماری ناپارامتریک Kruskal-Wallis استفاده می‌شود.

یافته‌ها: با حرکت از لایه‌های سطحی به لایه‌های عمیق‌تر، دامنه پاسخ ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مکان میدان گیرنده از طریق تجزیه و تحلیل ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی تعیین می‌شود. ارزیابی گسترش بینایی کمترین مقدار گسترش را در لایه C۴ در بین لایه‌ها نشان می‌دهد. همچنین، با بررسی زمان‌بندی قله‌ها و دره‌ها، بینش‌هایی در مورد ورود و خروج جریان اطلاعات در بین لایه‌ها به دست می‌آید.

نتیجه‌گیری: بررسی سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی مکانیسم انتشار دقیق اطلاعات در لایه‌ها را نشان می‌دهد. این نتایج به درک بهتر عملکرد قشر بینایی اولیه کمک می‌کند و پیامدهایی برای طراحی رویکردهای رابط مغز و ماشین، پروتوزهای عصبی و آنالیز سیگنال الکتروانسفالوگرافی دارد.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

اصلاح نهایی: ۱۴۰۲/۰۴/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰

واژه‌های کلیدی

پتانسیل میدانی محلی
 قشر اولیه بینایی
 الکتروود چند تماسی
 گسترش بینایی
 میمون

نویسنده مسئول

سید حسین ساداتی، دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
 ایمیل: Sadati@kntu.ac.ir



doi.org/10.30514/ics.25.2.87

مقدمه

جایگاه منحصر به فردی در دریافت و توزیع اطلاعات ورودی حسی نسبت به سایر نواحی قشر بینایی مغز می‌باشد و به عنوان نخستین مرکز پردازش اطلاعات بینایی در قشر مغز نقش ایفا می‌کند. اطلاعاتی که از دنیای بیرون وارد قشر بینایی می‌شود، شامل صحنه‌های بینایی در هم‌ریخته‌ای است که باید تجزیه و تحلیل شوند (۵). نورون‌های قشر اولیه بینایی با جزئیات بسیار دقیق و ظریف اطلاعات محیط اطراف و

قشر مغزی پستانداران از شش لایه تشکیل شده است که بین سطوح نرم شامه‌ای (Pia mater) و ماده سفید مغز واقع شده است. ضخامت زیر گروه‌های آن نیز در سطوح مختلف قشر متفاوت می‌باشد. ریخت‌شناسی (Morphology) و توزیع دندریت و آکسون نیز در عرض قشر در نواحی متفاوت تغییرات بارزی را نشان می‌دهد (۱-۳). قشر اولیه بینایی (ناحیه V1) که توسط سه مسیر اصلی تالاموس تغذیه می‌شود (۴) دارای

سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی مورد بررسی قرار گرفت (۲۸). ما در این پژوهش این ویژگی را در طول لایه‌ها مورد بررسی قرار دادیم و از آن برای برآورد محل کمینه میدان گیرنده استفاده کردیم. از سوی دیگر پژوهش‌های متعددی در مورد گسترش بینایی سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی انجام شده است. مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۶، ۵ میلی‌متر را به دست آوردند (۲۳). در مطالعه دیگری، نتایج متفاوتی در مورد گسترش بینایی حاصل شد که ۲-۳ میلی‌متر را نشان می‌داد (۲۹). نتایج سایر مطالعات در مقیاس میکرومتری است. در سال ۲۰۰۸ نشان دادند که این رهاسازی در محدوده ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر است (۲۵). در سال ۲۰۰۹، دو مطالعه دیگر در این زمینه انجام شد و نتایج آنها ۴۰۰-۲۰۰ میکرومتر را برای انتشار سیگنال ارائه کرد (۲۶، ۲۷). در سال ۲۰۰۹ بیان شد که گسترش بینایی در لایه‌های قشری متفاوت است (۲۷). ۴۰۰ میکرومتر نیز نتیجه بررسی گسترش بینایی در ناحیه MT بود (۲۴) و در نهایت در سال ۲۰۱۱ یک ارزیابی بر روی گسترش بینایی انجام شد که حاصل آن فراتر از ۴۰۰-۲۰۰ میکرومتر بود (۳۰).

مطالعات قبلی در مورد گسترش بینایی نتایج بسیار متفاوتی داشتند. این می‌تواند نشان‌دهنده این واقعیت باشد که عوامل مختلفی بر این گسترش تأثیر می‌گذارند. ما فکر می‌کنیم که شرایط تجربی، الکترو، فرکانس نمونه‌برداری و نوع و اندازه محرک بر نتایج تجزیه و تحلیل تأثیر می‌گذارند. در نتیجه برای مقایسه نتایج پژوهش باید عوامل مؤثر یکسان باشند.

در این مطالعه، قشر اولیه بینایی میمون ماکاک (Macaque) مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از الکترو ۲۴ کاناله، پاسخ پتانسیل میدانی محلی در تمام لایه‌های قشری به طور همزمان ارزیابی شده است. با ارائه محرک مربعی مشکی به اندازه نیم‌درجه و ثبت پاسخ سیگنال، به بررسی محدوده پاسخ در لایه‌های مختلف پرداخته شد و این ویژگی برای برآورد محل کمینه میدان گیرنده به کار بردیم. همچنین میزان گسترش بینایی (Visual Spread) با استفاده تنها از یک الکترو به جای استفاده همزمان از چند الکترو (۲۷)، محاسبه شده است. در نهایت، زمان و دامنه قله و دره‌ها به منظور بررسی ورود و خروج اطلاعات بررسی شده است.

روش کار

در این پژوهش آزمایشی طراحی شد که به کمک آن بتوان ویژگی‌های محدوده پاسخ، میزان گسترش بینایی و ورود و خروج اطلاعات را با استفاده از سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی در ناحیه فووا قشر بینایی میمون ماکاک به دست آورد.

محرک‌های بینایی را به نواحی بالاتر مغز مخابره می‌کنند (۶، ۷). نوع محرک بر اطلاعات موجود در سیگنال خروجی موثر است (۸، ۹). پتانسیل‌های میدانی محلی ((Local Field Potential (LFP)، پتانسیل‌های الکتریکی تولید شده توسط بارهای الکتریکی محلی توزیع شده در یک محیط خارج سلولی رسانا هستند. درک بهتر پتانسیل میدانی محلی می‌تواند در تفسیر مطالعات انسانی غیرتهاجمی مانند سیگنال‌های تصویربرداری رزونانس مغناطیسی عملکردی ((fMRI) (Functional magnetic resonance imaging)، سیگنال وابسته به سطح اکسیژن خون ((Blood-oxygen-level-dependent (BOLD)، الکتروانسفالوگرافی (Electroencephalography (EEG) و سیگنال پتانسیل مرتبط با رویداد (Event-Related Potential (ERP) مفید باشد. پتانسیل‌های میدانی محلی ممکن است در نواحی و لایه‌های قشری مختلف متفاوت باشند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که برخلاف تصورات قبل، پتانسیل میدانی محلی در طیف فرکانس‌های بالا از یک ناحیه محدود قشری منشأ می‌گیرد (۱۴-۱۰). این سیگنال‌ها اندازه‌گیری پتانسیل‌های الکتریکی از جمعیت محلی نورون‌های ثبت شده با یک الکترو خارج سلولی هستند. تصور می‌شود که پتانسیل میدانی محلی قشری غالباً از طریق پتانسیل‌های غشایی زیرآستانه توسط لایه‌های ۲/۳، ۵ و ۶ تولید می‌شود (۱۷-۱۵). ثبت پتانسیل‌های میدانی محلی در مقایسه با فعالیت اسپایک آسان است و می‌توان از آن در پروتزهای عصبی استفاده کرد (۱۸).

در سال ۲۰۱۵ مطالعه‌ای بر روی سازمان‌دهی ستونی فاز فضایی در قشر بینایی انجام شد (۱۹). Kozai و همکاران روش‌ها و پارامترهای کمی‌سازی ثبت‌های چند واحدی و پتانسیل میدانی محلی را بررسی کردند (۲۰). Martin-Vazquez و همکاران مؤلفه‌های مستقل استخراج شده از فعالیت پتانسیل میدانی محلی که در چند عمق قشر حرکتی موش در طول حرکت با پاداش ثبت شده است را برای بررسی نقش آنها در یادگیری حرکتی، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند (۲۱). درک دقیق خواص پاسخ سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی در لایه‌های مختلف قشری برای استفاده در آینده از این سیگنال‌ها در پروتزهای عصبی مهم است (۲۲). اگرچه مطالعه پتانسیل میدانی محلی اخیراً مورد توجه قرار گرفته است (۲۷-۲۳)، اما مطالعه جامعی در مورد خواص پاسخی پتانسیل میدانی محلی و نحوه ارتباط آنها با خواص نورون‌های همسایه وجود ندارد (۱۲). حال آن که هدف اصلی علوم اعصاب فهمیدن چگونگی سازمان‌دهی جمعیت‌های نورونی در مدار عصبی نواحی قشری مختلف و لایه‌ها است. ویژگی محدوده پاسخ (Response Range) در سال ۲۰۱۵ در

ثبت داده‌ها

آزمایش و داده‌برداری در ناحیه فووا میدان بینایی میمون ماکاک در آزمایشگاه Alessandra Angelucci در دانشگاه یوتا انجام شد. سیگنال خام به طور پیوسته با نرخ نمونه‌برداری ۳۰ کیلوهرتز و با استفاده از یک سیستم ۱۲۸ کانالی ثبت شده‌اند.

معمول است که سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی برای برجسته کردن فعالیت‌های مورد علاقه فیلتر شوند (۳۱). اثر فیلتر پایین‌گذر از یک نوروں کاملاً منفعل، بستگی به فاصله بین سوما (Soma) و محل ورودی و ثابت زمانی غشا دارد. این نشان می‌دهد که ریخت‌شناسی دندریتی عامل مهمی در فیلتر کردن فرکانس است و سلول‌های هرمی با دندریت‌های طولانی خود، به طور ویژه‌ای تحت تأثیر فیلترهای پایین‌گذر هستند (۳۲). در تحلیل‌های مربوط به سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی از فیلترهای دیجیتال مانند فیلتر گاوسی (۳۳)، فیلتر پایین‌گذر (۳۴-۳۶)، فیلتر باترورث (Butterworth) (۳۴-۳۶) و فیلتر فاز صفر (Zero-phase) استفاده می‌شود (۳۰). برای به دست آوردن پتانسیل‌های میدانی محلی، ولتاژهای ضبط شده خام، فیلتر (۱۰۰-۱ هرتز، فیلتر مرتبه دوم باترورث) و تا ۲ کیلوهرتز نمونه‌برداری شده‌اند.

محرك بينايي

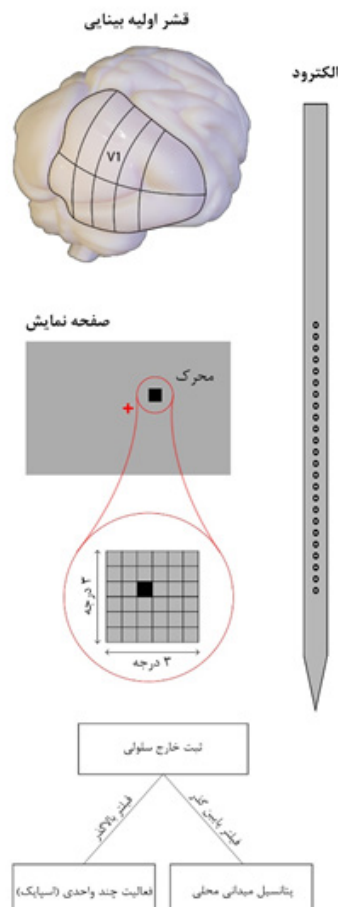
محرك بينايي در شكل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مربع‌های سیاه ۰/۵ درجه در ناحیه میدان بینایی ۳*۳ درجه، چشمک زده‌اند. برای ثبت پتانسیل‌های میدانی محلی از الکتروده خطی ۲۴ کاناله با فاصله بین تماسی ۱۰۰ میکرومتر و قطر تماس ۲۰ میکرومتر استفاده شده است. این الکتروده از نوع V-Probe و ساخت شرکت Plexon تگزاس است. محرك در هر شبکه از این ۳۶ بلوک در ۵۰۰ میلی‌ثانیه ارائه و آزمایش ۱۵-۵ بار تکرار شده است.

نگاشت میدان گیرنده (Receptive Field)

محل تقریبی میدان گیرنده نوروں‌ها در هر ستون قشر بینایی اولیه به صورت دستی شناسایی شده است. سپس مربع‌های سیاه ۰/۵ درجه در میدان بینایی ۳*۳ درجه در محل تقریبی میدان گیرنده ارائه شده و مکان دقیق میدان گیرنده نوروں‌ها در ستون قشر مغز شناسایی شده‌اند.

ترازبندی لایه‌ها

در این مطالعه برای مشخص کردن لایه‌های سیگنال‌های LFP ثبت شده، از تجزیه و تحلیل چگالی منبع جریان (Current (CSD) و مشاهدات بافت‌شناسی استفاده شده است.



شکل ۱. مشخصات محرك ارائه شده و استخراج سیگنال عصبی

بارهای الکتریکی محلی توزیع شده در یک محیط خارج سلولی رسانا هستند. این سیگنال‌ها اندازه پتانسیل‌های الکتریکی هستند اما به اشتباه میدان‌های الکتریکی نامیده می‌شوند. بنابراین، اصطلاح پتانسیل میدانی محلی یک اصطلاح غلط است که به طور گسترده در علوم اعصاب استفاده می‌شود (۳۲). میدان الکتریکی در یک منطقه از فضای قشری در اطراف ذرات باردار الکتریکی وجود دارد. میدان الکتریکی از قانون کولمب پیروی می‌کند. مقدار میدان الکتریکی تولید شده توسط یک بار تک نقطه‌ای در یک فاصله معین به صورت معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$\vec{E} = \frac{k \cdot Q}{r^2} \quad (1)$$

که مقدار k بر اساس معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{1}{4\pi\sigma} \quad (2)$$

خارج سلولی است. پتانسیل الکتریکی محاسبه شده در هر نقطه به صورت معادله (۳) محاسبه می‌شود که V پتانسیل الکتریکی (یا ولتاژ)، r فاصله بین بار و نوک الکتروود، Q بار یونی و k ثابت است.

$$V = \frac{k \cdot Q}{r} \quad (3)$$

خارج سلولی است. بنابراین، این سیگنال‌ها در فضای خارج سلولی به صورت معادله (۴) محاسبه می‌شوند.

$$LFP = \sum_{i=1}^N V_i = \frac{1}{4\pi\sigma} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{r_i} \quad (4)$$

یافته‌ها

سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی در پژوهش‌های نوروفیزیولوژی بسیار اهمیت داشته و نقش حیاتی در تشخیص اختلالات عصبی و ناهنجاری‌های دیگر در بدن انسان دارند. در این بخش نتایج بررسی پاسخ این سیگنال در میمون ماکاک را به محرک بینایی ارائه شده در شبکه ۳۶ تایی مربعی شکل ارائه می‌شود. ابتدا با استفاده از تحلیل چگالی منبع جریان، لایه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس با استفاده از محدوده پاسخ، الگوی رفتاری مربع مربوط به کمینه میدان گیرنده ((Minimum Response Field (mRF)) در لایه‌های مختلف و همچنین خانه‌های اطراف آن با کمک سیگنال پتانسیل میدانی محلی

در شکل ۱ محرک در ناحیه اولیه بینایی ارائه شده است. محرک مربعی شکل مشکی با محدوده میدان بینایی 3×3 درجه است. الکتروود ۲۴ کاناله مورد استفاده قرار گرفته است. علامت + قرمز بیانگر مرکز میدان بینایی می‌باشد که محرک نسبت به مرکز میدان بینایی ارائه شده است. با اعمال فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر بر ثبت‌های خارج سلولی به ترتیب فعالی چند واحدی و پتانسیل میدانی محلی استخراج می‌شوند.

پایه فیزیولوژیکی پتانسیل میدانی محلی

پتانسیل‌های میدانی محلی، پتانسیل‌های الکتریکی تولید شده توسط

و \vec{E} میدان الکتریکی (مقدار بردار)، Q بار یونی در واحد کولمب، r فاصله در متر، k یک ثابت (9×10^9) و σ رسانایی خارج سلولی است. پتانسیل الکتریکی اختلاف پتانسیل ناشی از مجموعه بارها در محیط

پتانسیل میدانی محلی، که نشان‌دهنده فعالیت یک جمعیت عصبی محلی است، ناشی از تمام بارهای یونی فعال در هر نقطه‌ای از فضای

پتانسیل‌های خارج سلولی از جریان‌های درونی (سینک (Sink)) و بیرونی (سورس (Source)) ناشی از بارهای مثبت در حرکت در غشاهای سلولی در فضای خارج سلولی نشأت می‌گیرند. بنابراین، هر جریان در غشاهای سلولی، صرف‌نظر از مبدأ آنها، باعث اختلاف ولتاژ خارج سلولی می‌شود که به طور کلی به عنوان پتانسیل میدان معرفی می‌شود. مقدار گرادیان ولتاژ به طور معکوس با فاصله بین منبع جریان و محل ثبت مرتبط است، بنابراین وقتی که فاصله از منبع جریان افزایش می‌یابد، پتانسیل الکتریکی ضعیف‌تر و حاوی اطلاعات مفید کمتری می‌شود (۳۲).

دارای قطبیت مثبت بودند.

در این بخش با اعمال تحلیل چگالی منبع جریان بر روی سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی به بررسی محل سینک‌ها و سورس‌های جریان در کمینه میدان گیرنده پرداختیم. با توجه به شکل (۲-الف) که چگالی منبع جریان را نشان می‌دهد، سینک‌ها و سورس‌ها تفکیک شدند. هدف استفاده از مورفولوژی سینک‌ها و سورس‌ها برای اندازه‌گیری اطلاعات ورودی و خروجی در لایه‌های مختلف بود. رابطه مربوط به چگالی منبع جریان در معادله (۵) بیان شده است. که LFP ولتاژ (μV) است، x نقطه‌ای است که چگالی منبع جریان در آن محاسبه می‌شود، h فاصله تماس‌های ثبت شده (در اینجا ۱۰۰ میکرومتر) و σ هدایت بافت قشر مغز ($0.4/S$) زمینس در هر متر است. زمینس در هر متر واحدی در دسته رسانایی الکتریکی است. این واحد معمولاً در سیستم واحد SI استفاده می‌شود.

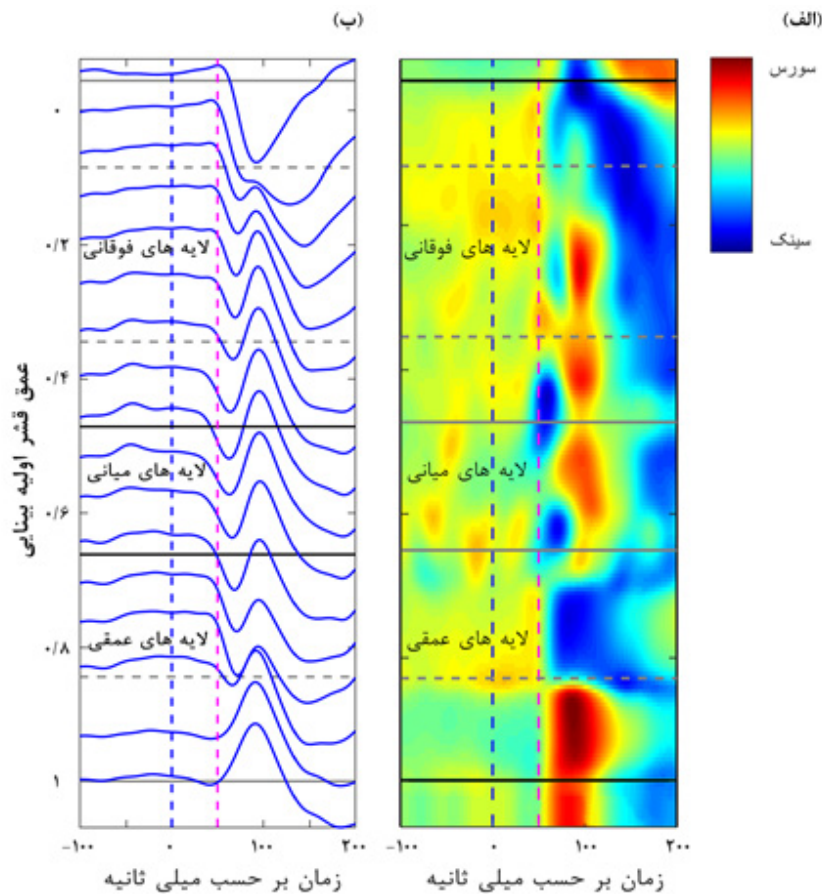
$$CSD(x) = -\sigma \frac{LFP(x-h) - 2LFP(x) + LFP(x+h)}{h^2} \quad (5)$$

اولیه اطلاعات به این لایه‌هاست. سورس‌های اولیه در لایه‌های فوقانی و لایه‌های عمقی دیده شد که به معنای خروج اطلاعات از این لایه‌هاست.

بررسی شد. در ادامه میزان گسترش سیگنال پتانسیل میدانی محلی محاسبه شد و در نهایت با استخراج قله‌ها و دره‌های به وجود آمده در لایه‌های مختلف، زمان و مقدار ورود و خروج اطلاعات ارزیابی شد. به دلیل نقش قابل توجه سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی در تفسیر اطلاعات مغزی در سطح شناختی، مطالعه دقت مکانی مناسب و درک پردازش این سیگنال‌ها بسیار حائز اهمیت است.

پاسخ پتانسیل میدانی محلی به محرک، در کمینه میدان گیرنده در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. برای برآورد عمق قشری ثبت‌ها، قطبیت امواج پتانسیل میدانی محلی با اندازه‌گیری آنها بعد از شروع تحریک محاسبه شد. مشاهده شد که استخراج این سیگنال‌ها از لایه‌های سطحی قشر، ابتدا دارای قطبیت مثبت و سپس منفی است. در حالی که استخراج سیگنال‌ها از لایه‌های میانی قشر دارای قطبیت منفی و سپس مثبت؛ و هنگامی که از لایه‌های عمیق استخراج شدند،

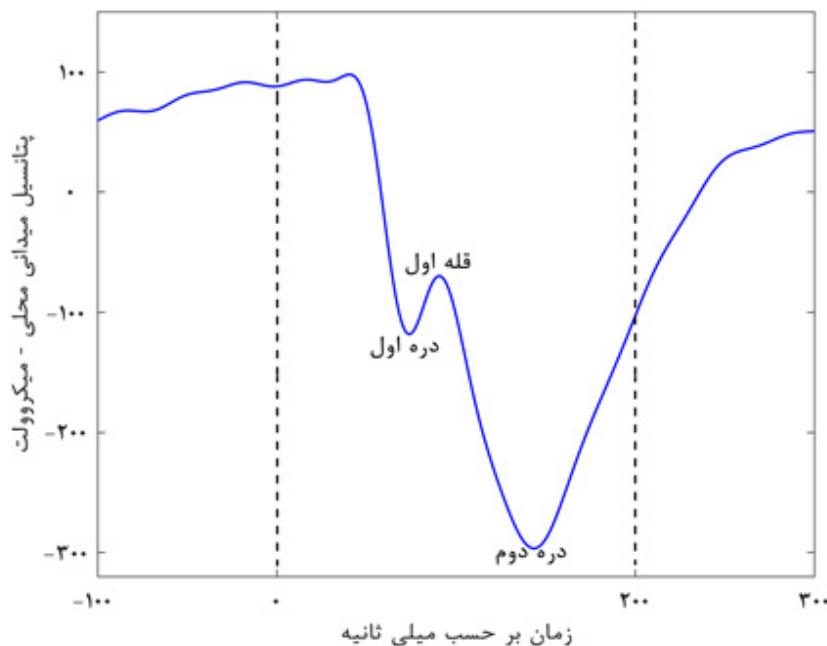
همان‌طور که دیده شد سینک‌ها بارنگ آبی و سورس‌ها بارنگ قرمز مشخص شدند. سینک‌های اولیه در لایه‌های میانی اتفاق می‌افتند که به معنای ورود



شکل ۲. پاسخ پتانسیل میدانی محلی به محرک بینایی ارائه شده در کمینه میدان گیرنده

شکل ۲-الف، چگالی منبع جریان پتانسیل میدانی محلی در کمینه میدان گیرنده در لایه‌ها را نشان می‌دهد. رنگ مربوط به سینک و سورس در راهنمای شکل نشان داده شده است. محور x زمان و محور y عمق قشر را نشان می‌دهد. شکل ۲-ب، پاسخ پتانسیل میدانی محلی در کمینه میدان گیرنده به محرک ارائه شده است. لایه‌های فوقانی، میانی و عمقی بر روی شکل مشخص شده‌اند. خطچین آبی عمودی زمان ارائه محرک (۰ میلی‌ثانیه) و خطچین صورتی ۵۰ میلی‌ثانیه پس

از ارائه محرک را نشان می‌دهند. با مشاهده پتانسیل‌های میدانی محلی در تمام لایه‌ها دیدیم که یک قله و دو دره با مقادیر مختلف در بازه زمانی ۰-۲۰۰ میلی‌ثانیه مشاهده می‌شود. در شکل ۳ محل این قله و دره‌ها به عنوان نمونه مشخص شدند. به دلیل اهمیت مورفولوژی سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی، به بررسی اطلاعات موجود در آنها پرداختیم. در ادامه به بیان نتایج حاصل از بررسی قله‌ها و دره‌های موجود در سیگنال پتانسیل میدانی محلی می‌پردازیم.



شکل ۳. قله و دره‌های سیگنال پتانسیل میدانی محلی

بین قله و دره بزرگ است که در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین رابطه محدوده پاسخ در معادله (۶) بیان شده است. شکل (۴-الف)، مفهوم محدوده پاسخ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این پارامتر فاصله بین کمترین و بیشترین مقدار سیگنال پتانسیل میدانی محلی در محدوده مورد بررسی (۰-۲۰۰ میلی‌ثانیه) را ارزیابی می‌کند.

یک نمونه سیگنال پتانسیل میدانی محلی به همراه قله و دره‌های مشخص شده در محدوده زمانی (۰-۲۰۰ میلی‌ثانیه) نشان داده شده است.

محدوده پاسخ

اولین ویژگی مورد بررسی، محدوده پاسخ است. محدوده پاسخ فاصله

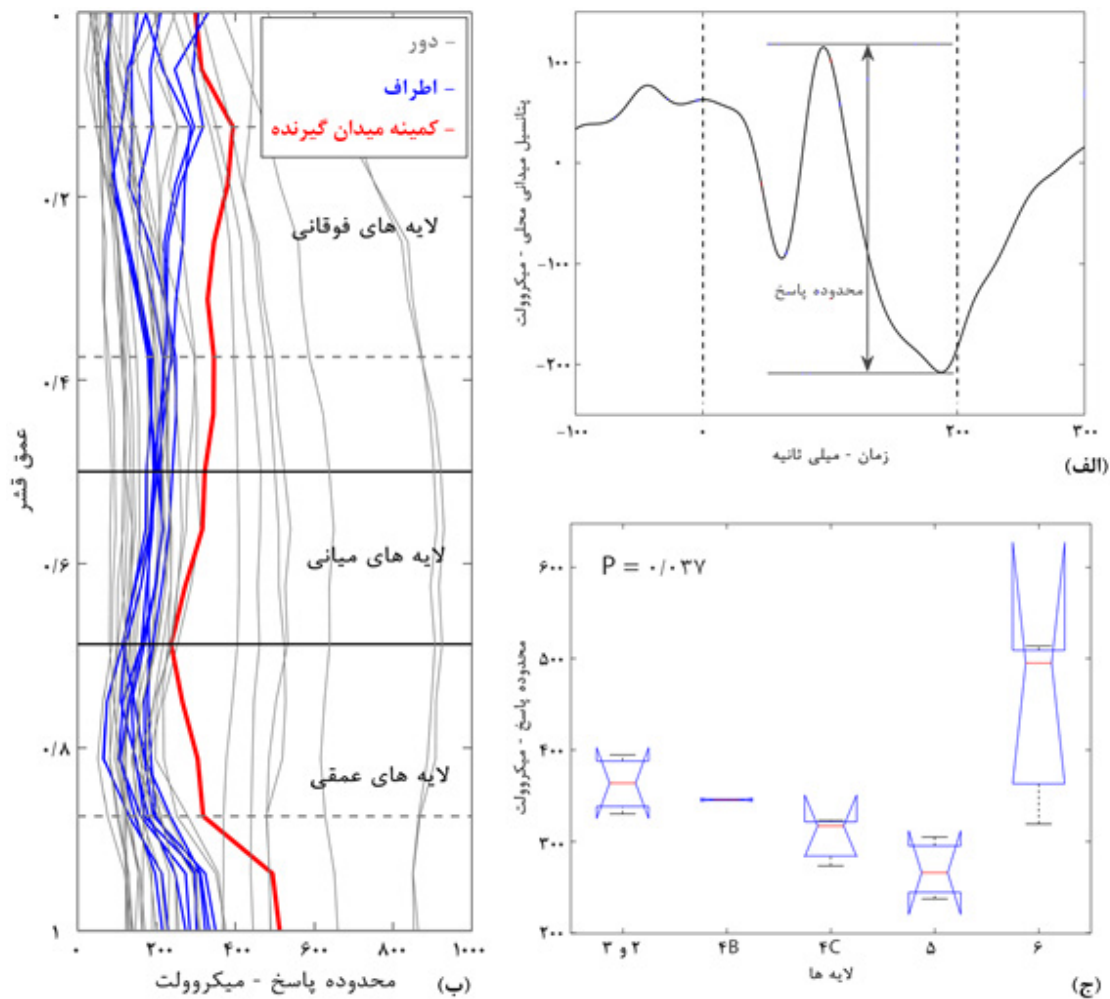
$$ResponseRange = Max(LFP) - Min(LFP) \quad (۶)$$

بود و در کمینه میدان گیرنده بیشترین مقدار از لحاظ دامنه را نسبت به خانه‌های اطراف خود داشت. همان‌طور که دیده شد با حرکت از لایه‌های فوقانی به سمت لایه‌های میانی، محدوده پاسخ، کاهش یافته و مجدداً با رسیدن به لایه‌های عمقی افزایش یافت. در شکل (۴-ج)، نتیجه آزمون کروسکال والیس در بررسی محدوده پاسخ در طول لایه‌ها

در شکل (۴-ب)، محدوده پاسخ برای همه لایه‌ها و هر ۳۶ خانه ترسیم شد. محدوده پاسخ مربوط به کمینه میدان گیرنده با رنگ قرمز، خانه‌های اطراف کمینه میدان گیرنده با رنگ آبی و خانه‌های دور نسبت به میدان گیرنده با رنگ خاکستری نشان داده شدند. الگوی پاسخ در کمینه میدان گیرنده و خانه‌های اطراف آن در لایه‌ها یکسان

لایه‌های مختلف قشر، از آزمون ناپارامتریک Kruskal-Wallis استفاده شد. این آزمون با آزمون یک طرفه ANOVA معادل است. با بررسی این ویژگی، توانستیم محل کمینه میدان گیرنده که معمولاً با استفاده از فعالیت اسپایک محاسبه می‌شود را با تحلیل سیگنال پتانسیل میدانی محلی به دست آوریم.

برای کمینه میدان گیرنده نشان داده شد. با توجه به مقدار ($P=0/037$) به دست آمده از این آزمون، می‌توان گفت که تفاوت آماری معناداری در بین لایه‌های قشر اولیه بینایی در مولفه محدوده پاسخ وجود داشت. از آنجایی که توزیع داده‌های جمع‌آوری شده از نظر تعداد زیاد نبود و توزیع نرمال نداشت، بر این اساس، برای مقایسه این ویژگی در بین



شکل ۴. محدوده پاسخ پتانسیل میدانی محلی

میزان گسترش بینایی

در این پژوهش به بررسی گسترش بینایی در لایه‌های مختلف با کمک ارائه محرک‌های مربعی مشکی در خانه‌های ۳۶ تایی پرداختیم. نتایج ما با تایید مطالعات قبلی (۲۷)، نشان داد که لایه C۴ کمترین میزان گسترش بینایی را در بین لایه‌ها دارد و این مقدار با حرکت به سمت لایه‌های سطحی و عمقی افزایش یافت.

در لایه‌های بالایی و میانی سیگنال‌ها دارای دره‌های قابل توجه و در لایه‌های عمیق دارای قله‌های قابل توجهی بودند. برای محاسبه گسترش بینایی سیگنال، مقدار سیگنال در قله و یا دره قابل توجه

شکل ۴-الف، تعریف مربوط به محدوده پاسخ پتانسیل میدانی محلی را نشان می‌دهد. شکل ۴-ب، محدوده پاسخ به محرک‌های ارائه شده در خانه ۳۶ در لایه‌ها را نمایش می‌دهد. رنگ قرمز مربوط به کمینه میدان گیرنده (mRF)، رنگ آبی مربوط به خانه‌های اطراف (Sur) کمینه میدان گیرنده و رنگ خاکستری مربوط به خانه‌های دور از کمینه میدان گیرنده (Far) هستند. لایه‌های فوقانی، میانی و عمقی بر روی شکل مشخص شده است. شکل ۴-ج، پاسخ تست آماری کروسکال والیس در طول لایه‌ها برای محدوده پاسخ به محرک ارائه شده در کمینه میدان گیرنده است. مقدار P بر روی شکل نوشته شده است.

تخمین زده شد و گسترش بینایی برای همه محرک‌های ارائه شده در کل ۳۶ شبکه ترسیم شد. در محاسبه میزان گسترش بینایی، برخلاف کارهای قبلی که نیازمند استفاده همزمان از چند الکتروود بود، فقط از یک الکتروود استفاده شد.

با برازش تابع گاوسی روی این داده‌ها در هر دو جهت x و y ، مقدار σ برای هر جهت به دست آمد. در نهایت اندازه بردار در جهت کل از ریشه دوم مجموع مجذورهای σ_x و σ_y محاسبه شد که میزان گسترش بینایی را نشان می‌دهد. برای تخمین گسترش بینایی پتانسیل میدانی محلی، تابع گاوسی یک بعدی با معادله (۷) برازش شد که x_0, a و σ ضرایب ثابت هستند.

$$a * \exp\left(-\left(\frac{x - x_0}{\sigma}\right)^2\right) \quad (7)$$

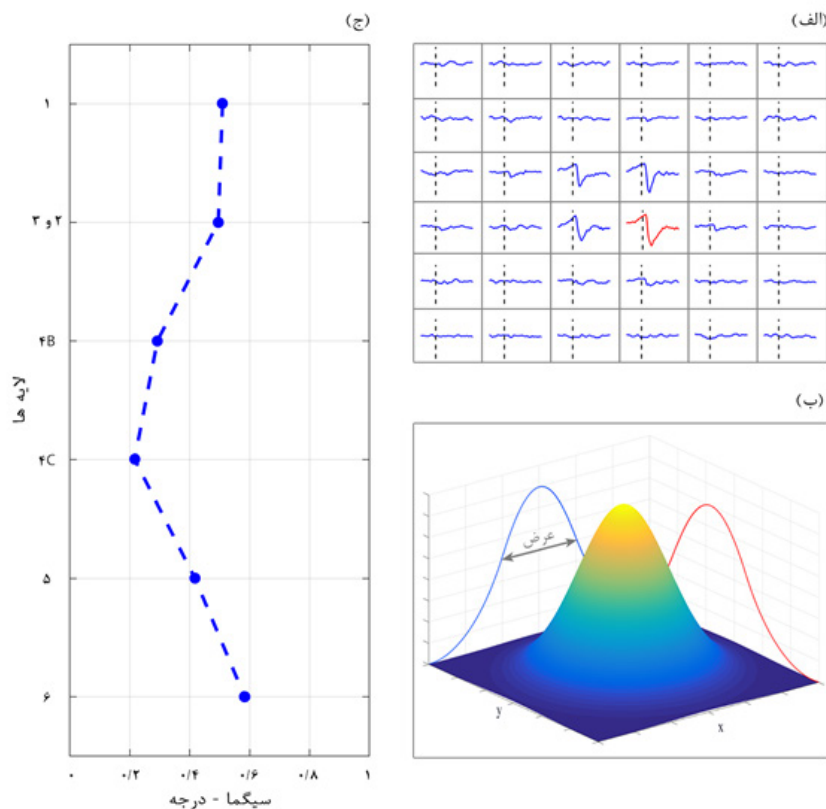
پس از محاسبه میزان گسترش بینایی در جهت x و y ، برای محاسبه آن در جهت کلی از معادله (۸) استفاده شد. نتیجه این بررسی در شکل ۵ نشان داده شد.

در محدوده ۰ تا ۲۰۰ میلی‌ثانیه انتخاب شدند. واضح است که این انتخاب مربوط به قله‌ها در لایه‌های عمیق و دره‌ها در لایه‌های بالایی است.

Nauhaus و همکاران از تابع گاوسی برای نشان دادن اوج انحنای سیگنال به صورت تقریباً نمایی استفاده کردند (۲۹). Katzner و همکاران تابع گاوسی را برای تعیین انتخاب جهت‌گیری محرک‌ها در V1 برازش دادند (۲۶). Xing و همکاران نیز روشی را برای تخمین گسترش بینایی سیگنال با دامنه آنها در اوج انحراف توسعه دادند (۲۷). در این پژوهش از دامنه سیگنال در انحراف اوج استفاده شد و گسترش بینایی سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی را در ۰-۲۰۰ میلی‌ثانیه

شکل این تابع زنگوله‌ای است که به صفر می‌رسد. عرض انحنای زنگوله، نشان‌دهنده میزان گسترش بینایی است. تابع گاوسی به طور گسترده در علوم احتمال، آمار و هوش مصنوعی و به ویژه در توزیع نرمال استفاده می‌شود.

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (8)$$



شکل ۵. گسترش بینایی پاسخ پتانسیل میدانی محلی در طول لایه‌ها

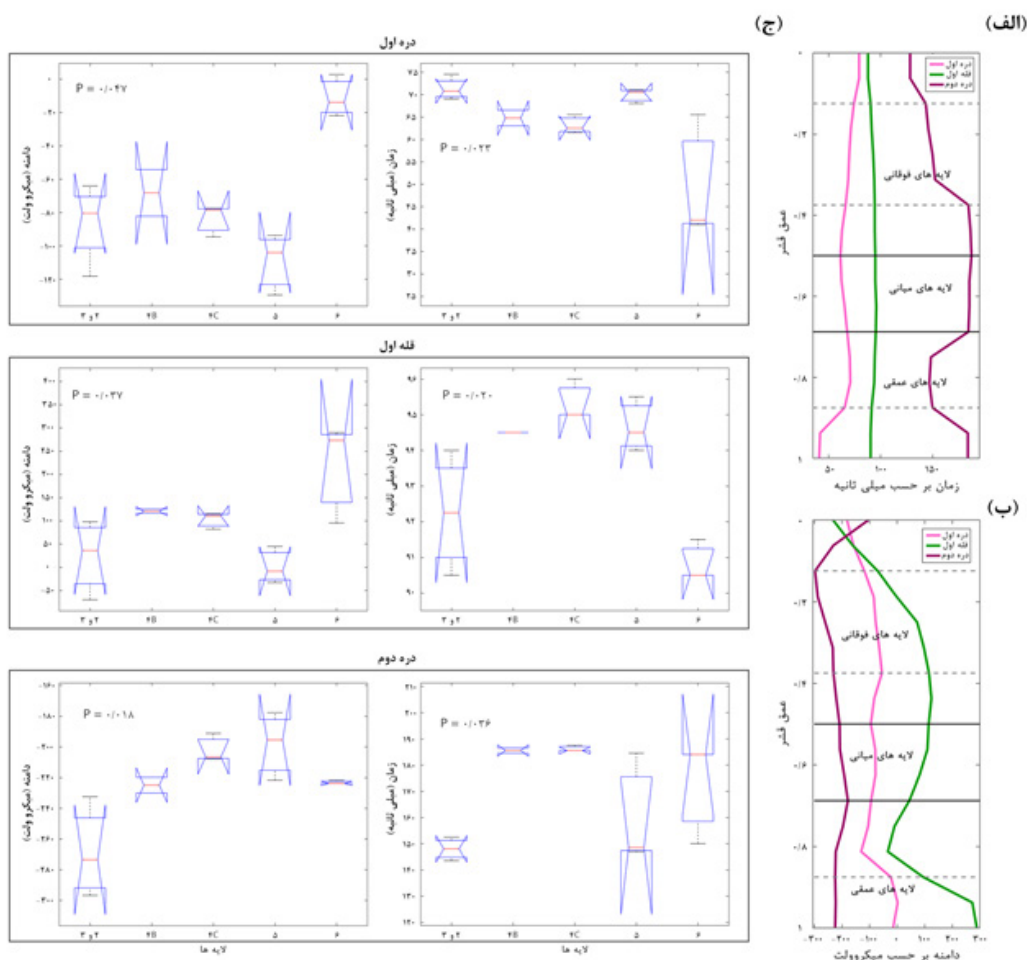
آمده از هسته ژنیکوله (Geniculate Nucleus) جانبی است (۳۷).
لایه خروجی ۲/۳ دارای اتصالات افقی و بازخورد قوی است (۳۸).

قله و دره‌ها؛ بررسی زمان و دامنه

با محاسبه مشتق اول و دوم و علامت سیگنال پتانسیل میدانی محلی، زمان و مقدار قله و دره‌ها استخراج شدند. شکل ۶ نتیجه بررسی تغییرات زمان و مقدار دامنه قله و دره‌ها در لایه‌های مختلف را نشان داد. شکل ۶-الف) مربوط به زمان قله و دره‌هاست. خط مربوط به دره اول با رنگ صورتی روشن ترسیم شد که نشان‌دهنده سینک اولیه است. با حرکت از لایه‌های فوقانی به سمت لایه‌های میانی کاهش و در لایه ۵ افزایش و در لایه ۶ کاهش یافت. کمترین مقدار در لایه ۶ است که نشان‌دهنده ورود اطلاعات ابتدا به لایه ۶ و سپس به لایه‌های میانی و سپس به لایه‌های فوقانی و ۵ است. سینک ثانویه (دره دوم) که با صورتی پررنگ در شکل نشان داده شد، رفتاری متفاوت با دره اول داشت. جریان ورود اطلاعات ثانویه ابتدا به لایه‌های فوقانی و عمقی و سپس به لایه‌های میانی بود. شکل ۶-ب) دامنه را نشان داد. اولین دره از لحاظ دامنه کمترین مقدار را داشت. دره دوم دارای مقادیر منفی و قله اول دارای مقادیر مثبت بود.

شکل ۵-الف) پاسخ پتانسیل میدانی محلی به محرک‌های ارائه شده در هر ۳۶ خانه ترسیم شده است. خط چین عمودی زمان ارائه محرک را نشان می‌دهد. نمودار قرمز رنگ مربوط به کمینه میدان گیرنده است. شکل ۵-ب) طرح نمودار زنگوله‌ای که بر روی مقادیر شکل اول برآزش می‌شود. مقدار عرض نمودار زنگوله‌ای، میزان گسترش بینایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، عرض نمودار در دو محور x و y قابل اندازه‌گیری است. شکل ۵-ج) میزان گسترش بینایی در طول لایه‌ها در پاسخ به محرک مربعی مشکی در این شکل نشان داده شده است. محور x میزان گسترش بینایی بر حسب درجه را نشان می‌دهد و محور y شماره لایه‌ها را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۵ دیده شد با حرکت از لایه‌های سطحی به سمت لایه‌های میانی، میزان گسترش بینایی کاهش یافت. کمترین میزان گسترش بینایی در لایه C۴ با مقدار ۰/۲ درجه بود. با حرکت به سمت لایه‌های عمقی، میزان گسترش بینایی مجدداً افزایش یافت. بیشترین مقدار گسترش بینایی در لایه ۶ با مقدار حدود ۰/۶ درجه بود. لایه C۴ لایه ورودی است و دارای اتصالات مکرر موضعی و پیش‌بینی‌های پیش



شکل ۶. دامنه و زمان قله و دره‌ها

بدانیم میزان گسترش بینایی می‌تواند در لایه‌ها و نواحی مختلف قشر بینایی بر اساس نقش‌های عملکردی خاص و الگوهای اتصال متفاوت باشد.

به منظور بررسی جریان ورود و خروج اطلاعات در پاسخ به محرک‌های ارائه شده به صورت دقیق، قله و دره‌های شکل گرفته در پتانسیل میدانی محلی به عنوان محل‌های شاخص حاوی اطلاعات مورد بررسی قرار گرفتند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر محرک مربعی مشکی ارائه شده در ناحیه اولیه بینایی میمون با استفاده از الکتروود چندتماسی مورد بررسی قرار گرفت. چند جنبه مهم قشر بینایی از جمله محدوده پاسخ، گسترش بینایی و ویژگی‌های قله و دره در لایه‌های مختلف بررسی شد. تجزیه و تحلیل محدوده پاسخ تغییرات قابل توجهی را در بین لایه‌ها نشان داد. با استفاده از این ویژگی می‌توان محل میدان گیرنده را به کمک سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی یافت. تغییرات مشاهده شده در محدوده پاسخ در لایه‌های مختلف، نقش تخصصی هر لایه را در استخراج اطلاعات بینایی خاص برجسته می‌کند.

میزان گسترش بینایی سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی در لایه‌های مختلف و با تغییر محل ارائه محرک در ۳۶ خانه مورد بررسی قرار گرفت. با برازش تابع گاوسی بر دامنه قله و یا دره قابل توجه در ۳۶ خانه، میزان گسترش بینایی که عرض نمودار گاوسی است حاصل شد. لایه C۴، با گسترش بینایی محدود، نقش مهمی در پردازش بینایی اولیه، مانند تشخیص حرکت و درک فضایی ایفا می‌کند. از سوی دیگر، لایه‌های با گسترش بینایی وسیع‌تر در پردازش ویژگی‌های بینایی پیچیده‌تر، مانند رنگ و شکل دقیق‌تر نقش دارند که می‌تواند در مطالعات مرتبط مورد توجه قرار گیرد. پیشنهاد ما برای پژوهش‌های آتی این است که می‌توان با اندازه‌گیری دقیق پارامترهای نوع محرک و فرکانس سیگنال، یک مطالعه دقیق، جامع و قابل مقایسه در مورد گسترش بینایی داشت. همچنین، تفاوت‌های مشاهده شده در زمان وقوع و بزرگی قله و دره‌ها در سراسر لایه‌ها نشان می‌دهد که اطلاعات چطور در بین لایه‌ها جریان می‌یابند. این نشان‌دهنده یک تعامل پیچیده از فرآیندهای تحریکی و مهاری و مکانیسم‌های بازخورد در قشر بینایی است.

این مطالعه دانش ما را از سازمان‌دهی و عملکرد قشر بینایی افزایش می‌دهد و ویژگی‌های متمایز را در لایه‌های مختلف نشان می‌دهد. سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی می‌توانند در کاشت تراشه‌های رابط مغز و رایانه و پروتزه‌های عصبی و تحلیل سایر سیگنال‌ها از جمله

شکل ۶-الف)، زمان قله و دره‌ها در لایه‌ها را نشان می‌دهد. محور x زمان و محور y عمق قشر را نشان می‌دهد. شکل ۶-ب)، دامنه قله و دره‌ها در لایه‌ها را نشان می‌دهد. محور x دامنه و محور y عمق قشر را نشان می‌دهد لایه‌های فوقانی، میانی و عمقی بر روی شکل با خطوط افقی متمایز شده‌اند. N_1 مربوط به دره اول، P_1 مربوط به قله اول و N_2 مربوط به دره دوم است که در راهنمای شکل با رنگ‌های مختلف نشان داده شده است. شکل ۶-ج)، آزمون آماری کروسکال والیس بر روی نمودارهای الف و ب اعمال شده است. ستون سمت چپ مربوط به دامنه قله و دره‌ها و ستون سمت راست مربوط به زمان آنهاست. سطر اول مربوط به دره اول، سطر دوم قله اول و سطر سوم مربوط به دره دوم است. مقدار P بر روی هر شکل نوشته شده است. محور x لایه‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۶-ج) آزمون آماری کروسکال والیس بر روی داده‌های شکل ۶-الف و ب) است. مقادیر P مربوط به این تست نشان داد که در قله و دره‌ها هم از لحاظ زمان وقوع آنها و هم از لحاظ مقدار دامنه آنها تمایز آماری معناداری در لایه‌ها وجود داشت.

بحث

بررسی ویژگی‌های ظاهری سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی، نشان داد که این سیگنال‌ها حاوی اطلاعاتی هستند که بینش‌های ارزشمندی را در مورد دینامیک پردازش اطلاعات در سیستم بینایی نخستین‌ها ارائه می‌کنند. تجزیه و تحلیل چگالی منبع جریان، مدولاسیون اطلاعات بصری در قشر بینایی اولیه را روشن کرد و پاسخ‌های متمایز لایه‌ها را نشان داد. تحلیل چگالی منبع جریان به منظور بررسی لایه‌ها و محل وقوع سینک‌ها و سورس‌های جریان به کار گرفته شد.

علاوه بر این، کاوش در محدوده پاسخ و میزان گسترش بینایی درک جامعی از توزیع اطلاعات قشر مغز ارائه کرد. بررسی ویژگی محدوده پاسخ نشان داد که می‌توان با استفاده از سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی، محل کمینه میدان گیرنده را یافت.

برای توصیف این که سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی چقدر می‌توانند در اطراف محل ثبت گسترش یابند، از مفهوم گسترش بینایی استفاده شد. در این بخش با طراحی آزمایشی که تنها از یک الکتروود استفاده می‌کرد، توانستیم میزان گسترش بینایی را در لایه‌های قشری مورد بررسی قرار داده و به نتایج قابل مقایسه با مطالعات پیشین برسیم.

میزان کمتر گسترش بینایی، یک ویژگی کلی نوروها در لایه‌های ورودی قشر بینایی، از جمله لایه C۴ است. با این حال، مهم است که

سیگنال‌های الکتروانسفالوگرافی مفید باشند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق در پژوهش

همه آزمایش‌ها مطابق با پروتکل‌های تایید شده توسط کمیته مراقبت و استفاده از حیوانات نهادی دانشگاه Utah و با دستورالعمل‌های NIH بود. میمون ابتدا با کتامین (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، داخل بدن) بیهوش شد و سپس بیهوشی با ایزوفلوران (۲ درصد) ادامه یافت. علائم حیاتی شامل دمای بدن، الکتروکاردیوگرام، سطح اکسیژن و فشار خون و فشار ریه در حین جراحی بررسی شد.

مشارکت نویسندگان

فرشته خدائی: کمک در تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، آماده کردن پیش‌نویس مقاله و بررسی و بازبینی آن. سید حسین ساداتی: کمک در تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، آماده کردن پیش‌نویس مقاله و بررسی و بازبینی آن، تأیید نسخه نهایی برای انتشار، پاسخ‌گویی به تمام

جنبه‌های پژوهش، استاد راهنما. رضا لشگری: کمک در تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، آماده کردن پیش‌نویس مقاله و بررسی و بازبینی آن، تأیید نسخه نهایی برای انتشار، پاسخ‌گویی به تمام جنبه‌های پژوهش، استاد راهنما.

منابع مالی

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه حمایت مالی برای انجام این پژوهش دریافت نکرده‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان تمایل دارند تشکر صمیمانه خود را از آزمایشگاه الساندرا آنجلوچی ابراز کنند که به ما در انجام و بهبود کیفیت این پژوهش کمک کرد.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ تضاد منافع را اعلام نمی‌کنند.

References

- Briggs F, Usrey MW. Modulation of gamma-band activity across local cortical circuits. *Frontiers in Integrative Neuroscience*. 2009;3:15.
- Briggs F, Usrey WM. Patterned activity within the local cortical architecture. *Frontiers in Neuroscience*. 2010;4:18.
- Briggs F, Usrey WM. Corticogeniculate feedback and visual processing in the primate. *The Journal of Physiology*. 2011;589(1):33-40.
- Jansen M, Li X, Lashgari R, Kremkow J, Bereshpolova Y, Swadlow HA, et al. Chromatic and achromatic spatial resolution of local field potentials in awake cortex. *Cerebral Cortex*. 2015;25(10):3877-3893.
- Kamkar S, Moghaddam HA, Lashgari R. Early visual processing of feature saliency tasks: A review of psychophysical experiments. *Frontiers in Systems Neuroscience*. 2018;12:54.
- Callaway EM. Local circuits in primary visual cortex of the macaque monkey. *Annual Review of Neuroscience*. 1998;21(1):47-74.
- Buzsaki G, Buhl DL, Harris KD, Csicsvari J, Czeh B, Morozov A. Hippocampal network patterns of activity in the mouse. *Neuroscience*. 2003;116(1):201-211.
- Jansen M, Jin J, Li X, Lashgari R, Kremkow J, Bereshpolova Y, et al. Cortical balance between ON and OFF visual responses is modulated by the spatial properties of the visual stimulus. *Cerebral Cortex*. 2019;29(1):336-355.
- Doostmohammadi J, Gieselmann MA, van Kempen J, Lashgari R, Yoonessi A, Thiele A. Ripples in macaque V1 and V4 are modulated by top-down visual attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2023;120(5):e2210698120.
- Colonnier M. Synaptic patterns on different cell types in the different laminae of the cat visual cortex. An electron microscope study. *Brain Research*. 1968;9(2):268-287.
- De Valois RL, Albrecht DG, Thorell LG. Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex. *Vision Research*.

- 1982;22(5):545-559.
12. DeAngelis GC, Ghose GM, Ohzawa I, Freeman RD. Functional micro-organization of primary visual cortex: Receptive field analysis of nearby neurons. *Journal of Neuroscience*. 1999;19(10):4046-4064.
 13. Chudasama Y, Robbins T. Psychopharmacological approaches to modulating attention in the five-choice serial reaction time task: Implications for schizophrenia. *Psychopharmacology*. 2004;174:86-98.
 14. Churchland MM, Yu BM, Cunningham JP, Sugrue LP, Cohen MR, Corrado GS, et al. Stimulus onset quenches neural variability: A widespread cortical phenomenon. *Nature Neuroscience*. 2010;13(3):369-378.
 15. Mitzdorf U. Current source-density method and application in cat cerebral cortex: Investigation of evoked potentials and EEG phenomena. *Physiological Reviews*. 1985;65(1):37-100.
 16. Pesaran B, Pezaris JS, Sahani M, Mitra PP, Andersen RA. Temporal structure in neuronal activity during working memory in macaque parietal cortex. *Nature Neuroscience*. 2002;5(8):805-811.
 17. Buzsaki G. Large-scale recording of neuronal ensembles. *Nature Neuroscience*. 2004;7(5):446-451.
 18. Khodaei F, Sadati S, Doost M, Lashgari R. LFP polarity changes across cortical and eccentricity in primary visual cortex. *Frontiers in Neuroscience*. 2023;17:1138602.
 19. Wang Y, Jin J, Kremkow J, Lashgari R, Komban SJ, Alonso JM. Columnar organization of spatial phase in visual cortex. *Nature Neuroscience*. 2015;18(1):97-103.
 20. Kozai TD, Du Z, Gugel ZV, Smith MA, Chase SM, Bodily LM, et al. Comprehensive chronic laminar single-unit, multi-unit, and local field potential recording performance with planar single shank electrode arrays. *Journal of Neuroscience Methods*. 2015;242:15-40.
 21. Martin-Vazquez G, Asabuki T, Isomura Y, Fukai T. Learning task-related activities from independent local-field-potential components across motor cortex layers. *Frontiers in Neuroscience*. 2018;12:429.
 22. Andersen R, Burdick J, Musallam S, Scherberger H, Pesaran B, Meeker D, et al. Recording advances for neural prosthetics. The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2004;14(2):246-250.
 23. Kreiman G, Hung CP, Kraskov A, Quiroga RQ, Poggio T, DiCarlo JJ. Object selectivity of local field potentials and spikes in the macaque inferior temporal cortex. *Neuron*. 2006;49(3):433-445.
 24. Liu J, Newsome WT. Local field potential in cortical area MT: Stimulus tuning and behavioral correlations. *Journal of Neuroscience*. 2006;26(30):7779-7790.
 25. Berens P, Keliris GA, Ecker AS, Logothetis NK, Tolias AS. Feature selectivity of the gamma-band of the local field potential in primate primary visual cortex. *Frontiers in Neuroscience*. 2008;2:2.
 26. Katzner S, Nauhaus I, Benucci A, Bonin V, Ringach DL, Carandini M. Local origin of field potentials in visual cortex. *Neuron*. 2009;61(1):35-41.
 27. Xing D, Yeh CI, Shapley RM. Spatial spread of the local field potential and its laminar variation in visual cortex. *Journal of Neuroscience*. 2009;29(37):11540-11549.
 28. Seyedhosseini M, Shushruth S, Davis T, Ichida JM, House PA, Greger B, et al. Informative features of local field potential signals in primary visual cortex during natural image stimulation. *Journal of Neurophysiology*. 2015;113(5):1520-1532.
 29. Nauhaus I, Busse L, Carandini M, Ringach DL. Stimulus contrast modulates functional connectivity in visual cortex. *Nature Neuroscience*. 2009;12(1):70-76.
 30. Kajikawa Y, Schroeder CE. How local is the local field potential?. *Neuron*. 2011;72(5):847-858.
 31. Herreras O. Local field potentials: Myths and misunderstandings. *Frontiers in Neural Circuits*. 2016;10:101.
 32. Buzsaki G, Anastassiou CA, Koch C. The origin of extracellular fields and currents—EEG, ECoG, LFP and spikes. *Nature Reviews Neuroscience*. 2012;13(6):407-420.

33. Henrie JA, Shapley R. LFP power spectra in V1 cortex: The graded effect of stimulus contrast. *Journal of Neurophysiology*. 2005;94(1):479-490.
34. Gawne TJ. The local and non-local components of the local field potential in awake primate visual cortex. *Journal of Computational Neuroscience*. 2010;29(3):615-623.
35. Lashgari R, Li X, Chen Y, Kremkow J, Bereshpolova Y, Swadlow HA, et al. Response properties of local field potentials and neighboring single neurons in awake primary visual cortex. *Journal of Neuroscience*. 2012;32(33):11396-11413.
36. Mahmud M, Maschietto M, Girardi S, Vassanelli S, editors. A Matlab based tool for cortical layer activation order detection through latency calculation in local field potentials recorded from rat barrel cortex by brain-chip interface. 2012 ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference: Biosignals and Robotics for Better and Safer Living (BRC); 2012 January 9-11; Manaus, Brazil; IEEE;2012. pp. 1-4.
37. Yang Y, Wang T, Li Y, Dai W, Yang G, Han C, et al. Coding strategy for surface luminance switches in the primary visual cortex of the awake monkey. *Nature Communications*. 2022;13(1):286.
38. Wang T, Li Y, Yang G, Dai W, Yang Y, Han C, et al. Laminar subnetworks of response suppression in macaque primary visual cortex. *Journal of Neuroscience*. 2020;40(39):7436-7450.