

## The Effect of Adaptation on Decoding Accuracy of Sound Frequencies in Rat Auditory Cortex

F. Saberpour<sup>1</sup>, M. Parto Dezfouli<sup>2</sup>, V. Shalchyan<sup>3</sup>, M. R. Daliri<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>MSc. Student, Biomedical Engineering Department, Electrical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Ph.D Student, Biomedical Engineering Department, Electrical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Biomedical Engineering Department, Electrical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Professor, Biomedical Engineering Department, Electrical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Receipt in the Online Submission System: 4 July 2018, Received in Revised Form: 11 November 2018, Accepted: 23 November 2018

### Abstract

Neural adaptation is a brain ability which reduces the neural activities in response to a repeated stimulus. In this study, we examined the effect of adaptation on neural decoding. For this purpose, pure tones with different frequency-amplitude combinations were presented randomly in two sequences (usual and adaptive). During the task, local field potential (LFP) signals were recorded from the primary auditory cortex of fifteen anesthetized rats. In the usual sequence, the stimuli were presented randomly with 50 ms duration and 300 ms interstimulus interval (ISI). Each combination was presented about 25 times. In the adaptive sequence, same as the usual one, stimuli were presented with this difference that one specific frequency (adapter) with the probability of 80% was presented frequently in this sequence. Comparison between decoding accuracy of two sequences allows us to study the effect of adaptation to a specific frequency on neural decoding. First, considering the power spectrum feature in six frequency bands and using LDA (linear discrimination analysis) classifier, the average decoding accuracy of all frequency-pairs were calculated in the usual sequence. Subsequently, the decoding accuracy of frequency-pairs in the adaptive sequence was calculated and compared with the usual sequence. Results show a significant decoding accuracy between different frequency-pairs in beta, gamma, and high-gamma bands (>12 Hz) of local field potential with an accuracy of about 80%. Moreover, we found that adaptation to one frequency of sound decreases the decoding accuracy of neighbor frequencies. This signature was observed in high-frequency gamma and high-gamma activities (30-120 Hz) of LFPs.

**Keywords:** *Adaptation, Neural Decoding, Primary Auditory Cortex, Frequency Discrimination, Local Field Potential*

\* Corresponding Author

Address: Biomedical Engineering Department, School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, P.O.Box: 1684613114, Tehran, Iran

Tel: +98-21-73225738

Fax: +98-21-73225777

E-mail: [daliri@iust.ac.ir](mailto:daliri@iust.ac.ir)

## اثر تطبیق پذیری بر دقت رمزگشایی فرکانس‌های صدا در قشر شنوایی موش صحرایی

فرناز صابریپور<sup>۱</sup>، محسن پرتو دزفولی<sup>۲</sup>، وحید شالچیان<sup>۳</sup>، محمدرضا دلیری<sup>۴\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پزشکی بیوالکتریک، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی پزشکی بیوالکتریک، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی پزشکی بیوالکتریک، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۴</sup> استاد، گروه مهندسی پزشکی بیوالکتریک، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ ثبت در سامانه: ۱۳۹۷/۴/۱۳، بازنگری: ۱۳۹۷/۸/۲۰، پذیرش قطعی: ۱۳۹۷/۹/۲

### چکیده

تشخیص و تفکیک فرکانس‌های مختلف صدا، یکی از مکانیسم‌های مهم مغز انسان و سایر جانداران است. از سوی دیگر، یکی از قابلیت‌های مهم مغز، که بار محاسباتی آن را در برابر محرک‌های تکراری کم می‌کند، پدیده‌ی تطبیق‌پذیری است. هدف اصلی این مقاله، رمزگشایی فرکانس‌های صوتی از پاسخ نورونی ناحیه‌ی شنوایی مغز و بررسی تاثیر تطبیق‌پذیری بر دقت رمزگشایی فرکانس‌های صوتی می‌باشد. برای این منظور، فرکانس‌های مختلف از تن‌های صوتی در دو دنباله‌ی صدا (معمول و تطبیقی) پخش شده و سیگنال‌های پتانسیل محلی از ناحیه‌ی اولیه‌ی شنوایی پانزده موش صحرایی در حالت بیهوشی، ثبت گردیده است. دنباله‌ی معمول، شامل محرک‌های صوتی از ترکیب فرکانس-دامنه‌ی مختلفی از صدا به طول ۵۰ میلی‌ثانیه و با فاصله‌ی بین محرکی ۳۰۰ میلی‌ثانیه بوده که به صورت تصادفی پخش شدند. دنباله‌ی تطبیقی، همانند دنباله‌ی معمول در نظر گرفته شد، با این تفاوت که در این دنباله، یک محرک در اطراف فرکانس مشخص، به عنوان محرک تطبیقی، بین محرک‌های اصلی و با توزیع تصادفی، در نظر گرفته شد که ۸۰٪ از دنباله‌ی تطبیقی را به خود اختصاص می‌داد. در ابتدا، با در نظر گرفتن ویژگی طیف توان در شش باند فرکانسی و طبقه‌بند LDA، میانگین قدرت رمزگشایی جفت فرکانس‌های صوتی در دنباله‌ی معمول محاسبه گردید. در قدم بعد، قدرت رمزگشایی جفت فرکانس‌ها در دنباله‌ی تطبیقی در باندهای فرکانسی تعیین شده، محاسبه و با نتایج رمزگشایی در دنباله‌ی معمول مقایسه گردید. نتایج حاکی از آن است که رمزگشایی محرک‌های صوتی با فرکانس‌های مختلف در باندهای بتا و گاما (<math>12</math> هرتز) از سیگنال‌های پتانسیل محلی با دقتی در حدود ۸۰٪ انجام می‌شود. همچنین، پخش یک محرک، به عنوان محرک تطبیقی‌پذیری که مانند یک پیش‌زمینه در دنباله‌ی صدا قرار دارد، باعث کاهش دقت تفکیک‌پذیری فرکانس‌های مجاور صدا می‌شود. این اثر در فعالیت‌های فرکانس بالای (گاما و گامای بالا) سیگنال‌های پتانسیل محلی، به صورت معناداری مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: تطبیق‌پذیری، رمزگشایی نورونی، ناحیه‌ی اولیه‌ی شنوایی، تفکیک فرکانسی، پتانسیل میدان محلی

\* نویسنده مسئول

نشانی: گروه مهندسی پزشکی، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، کد پستی: ۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴

تلفن: ۷۳۲۲۲۵۷۳۸ (۲۱) ۹۸+

دورنگار: ۷۳۲۲۲۵۷۷۷ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: daliri@iust.ac.ir

## ۱- مقدمه

رمزگشایی نورونی، به فرایند تحلیل پاسخ برای رسیدن به محرک گفته می‌شود. در مطالعات مختلف، یکی از راه‌های رمزگشایی پاسخ نورونی، برای بررسی عمل‌کرد مغز، استفاده از روش‌های مختلف طبقه‌بندی است. در سیستم شنوایی نیز مطالعات مختلفی بر پایه‌ی رمزگشایی فرکانس‌های صوت برای بررسی عمل‌کرد مغز انجام شده است. در سال ۲۰۰۵، مولاریداران و روشه، دی‌کدری مبتنی بر شبکه‌ی عصبی<sup>۱</sup> برای رمزگشایی محرک در قشر شنوایی طراحی کردند. این شبکه با صحت رمزگشایی بالایی، برای نمونه‌ی کوچکی از داده‌های پاسخ تحریک، مورد استفاده قرار گرفت [۱]. در سال ۲۰۰۷، استرن و هم‌کارانش، قدرت طبقه‌بندی دو کلاسه برای چهار دسته‌ی صدا (گربه‌ها، خوانندگان زن، گیتارهای صوتی و صداهای خالص) را به وسیله‌ی طبقه‌بند SVM مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از fMRI، میانگین صحت طبقه‌بندی دو کلاسه‌ی آن‌ها برای خوانندگان زن نسبت به گیتارهای صوتی، خوانندگان زن نسبت به صدای گربه‌ها و صدای گیتارهای صوتی نسبت به صدای گربه‌ها، به ترتیب برابر با ۶۹٪، ۶۹٪ و ۷۰٪ به دست آمد [۲]. در سال ۲۰۱۶، هونگ<sup>۲</sup> و هم‌کارانش، از SVM و LDA برای رمزگشایی فعالیت‌های مغزی برانگیخته شده توسط محرک‌های شنیداری چهار دسته‌ی صوت استفاده کردند. در مطالعه‌ی fMRI انجام شده، متوسط صحت طبقه‌بندی ۴۰٪ به وسیله‌ی ماشین بردار پشتیبان چند کلاسه به دست آمد. در این آزمایش، از افراد خواسته شده بود که با دقت و توجه به تحریک‌های شنوایی گوش داده و برای هر تحریک، نوع یا گروه صدا را حدس بزنند. بعد از آزمایش، از تمام افراد خواسته شد تا در خصوص توانایی خود نسبت به تشخیص هر تحریک شنوایی، اظهار نظر نمایند. تمام داده‌های تغییرات جریان خون، از قشر شنوایی، با استفاده از سیستم fNIRS موج پیوسته ثبت شده‌اند. نواحی مورد نظر (ROI) چهار تحریک شنوایی، مورد بررسی قرار گرفتند. ابتدا، سیگنال‌های حاصل از ROI یک تحریک صوتی مشخص، میانگین‌گیری شده و سپس مقادیر میانگین و شیب غلظت سیگنال‌های خونی (اکسی‌هموگلوبین و دی‌اکسی‌هموگلوبین)، به عنوان ویژگی برای طبقه‌بندی، مورد استفاده قرار گرفتند. در این پژوهش، صحت‌های طبقه‌بندی چهار کلاسه توسط LDA، برابر با ۴۶/۱۷±۶/۲۵٪ و ۴۰/۲۸±۶/۰۰٪ و با استفاده از

SVM، برابر با ۳۸/۳۵±۵/۳۹٪ و ۳۶/۹۹±۴/۲۳٪ به دست آمد. در مرحله‌ی بعد، برای بررسی دقت طبقه‌بندی در تشخیص زبان، طبقه‌بندی دو کلاسه صورت گرفت. میانگین کلی صحت‌های طبقه‌بندی برای تشخیص صحبت، برابر با ۷۰/۵۳±۸/۷۹٪ (LDA) و ۶۸/۱۱±۷/۹۰٪ (SVM) و برای تشخیص صدا، برابر با ۷۳/۳۹±۱۰/۸۲٪ (LDA) و ۷۲/۲۴±۹/۶۱٪ (SVM) به دست آمد که در هر دو مورد، دقت طبقه‌بندی به طور معناداری بالاتر از سطح شانس (۵۰٪) بود [۳]. در سال ۲۰۱۳، تاکاهاشی<sup>۴</sup> و هم‌کارانش، در آزمایشی رمزگشایی فرکانس شنوایی موش را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، نحوه‌ی نمایش اطلاعات صوتی توسط فعالیت‌های پایدار، با رمزگشایی اطلاعات صوتی در قشر شنوایی موش توسط SLR بررسی گردید. سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی LFP توسط یک آرایه‌ی میکروالکترو، شامل یک شبکه‌ی ۱۰×۱۰ از لایه‌ی چهارم قشر شنوایی موش ثبت گردید. محرک صدا، تن‌های خالص (۵ میلی‌ثانیه صعود/سقوط و ۲۰ میلی‌ثانیه ثابت) با فرکانس‌هایی از ۱/۶ تا ۶۴ کیلوهرتز بودند. هم‌چنین، فعالیت‌های پایدار سیگنال‌های پتانسیل محلی در پاسخ به صداهای خالص درازمدت (با مدت زمان ۳۰ ثانیه، شامل ۵ میلی‌ثانیه صعود/سقوط، ۶۰ دسی‌بل) با فرکانس‌های ۱۲ تا ۵۰ کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، برای طبقه‌بندی از الگوریتم یادگیری SLR برای رمزگشایی فرکانس‌های تست استفاده شد. در ابتدا فعالیت‌های ناشی از اعمال محرک صدا، در مقایسه با فعالیت‌های خودبه‌خودی مطالعه گردید. از آن‌جا که تفاوت‌های معناداری میان پتانسیل‌های برانگیخته‌ی شنوایی و خودبه‌خودی وجود دارد، نرخ صحت در این بررسی ۹۵/۳٪ گزارش شد. دی‌کدر SLR توانست فعالیت‌های ناشی از صوت و خودبه‌خودی را به وسیله‌ی ویژگی PLV با بیش‌ترین صحت (۷۱/۳٪) از هم تشخیص دهد، که این دقت در باند گامای بالا در پنجره‌ی زمانی ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه به دست آمد. نتایج، نشان دهنده‌ی اثر متفاوت فاصله‌ی فرکانس‌های تست، بر الگوهای مکانی فعالیت‌های پایدار و هم‌چنین نمایش‌گر فرکانس فعالیت‌های پایدار بر اساس سازمان‌دهی تونوتوپیک قشر شنوایی است [۴]. سیستم شنوایی، تغییرات مداوم صدا در محیط را پردازش می‌کند. پدیده‌ی انطباق با محرک خاص (SSA)، ایجاد یک کاهش خاص در پاسخ نورون به محرک استاندارد (مکرر) است، که قابل تعمیم به محرک نادر (جدید) نمی‌باشد.

<sup>۱</sup> LAMSTAR<sup>۲</sup> Keum-Shik Hong<sup>۳</sup> Region of Interest<sup>۴</sup> Hirokazu Takahashi

ضرورت تمایز قائل شدن میان شدت اولیه‌ی تحریک و کاهش پاسخ به تحریک مداوم (انطباق) در سیستم شنوایی توسط هالپیک و هود<sup>۱</sup> در سال ۱۹۵۱ آشکار شد. به تدریج، چگونگی تشخیص سریع محرک جدید، در مطالعات انسانی با عنوان وقوع موج منفی ناهم‌خوان و در مطالعات جانوری با عنوان تطبیق‌پذیری به یک محرک خاص، به معنای کاهش پاسخ به یک محرک یک‌سان و افزایش پاسخ به محرک جدید، مورد مطالعه قرار گرفت. این مکانیسم در قشر شنوایی نیز مانند قشر بینایی، بویایی و حس لامسه، روی حیوان‌های مختلف با استفاده از الگوهای odd-ball، به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۶]. در مطالعات اولیه، تصور می‌شد که تنها نورون‌های قشر مغز دارای خاصیت تطبیق‌پذیری هستند. در مطالعات بعدی، وجود تطبیق‌پذیری به محرک خاص، علاوه بر قشر، در نواحی زیرقشری نیز مشخص شد (اندرسون و مالمریکا<sup>۲</sup>). نشان داده شد که در مسیر شنوایی، تطبیق‌پذیری در پاسخ، در هسته‌ی IC و تالاموس شنوایی<sup>۳</sup> (در هسته‌ی MGN<sup>۴</sup>)، وجود دارد. در این مسیر، بیش‌ترین میزان تطبیق‌پذیری، مانند بیش‌ترین میزان انتخاب‌پذیری، متعلق به قشر شنوایی می‌باشد [۷-۹]. در سال ۲۰۰۹، زیمانسکی و اسناب<sup>۵</sup>، از CSD به عنوان یک ابزار مفید برای مشاهده‌ی روند تکامل فعالیت‌های مربوط به محرک استفاده کردند، تا با اندازه‌گیری فعالیت‌های سیناپسی در تمامی لایه‌ها، این پدیده را بررسی کنند. آن‌ها با ثبت LFP هم‌زمان از ۱۶ کانال در لایه‌های قشر اولیه‌ی شنوایی و به کمک آنالیز توزیع منبع جریان<sup>۶</sup>، نشان دادند که این مکانیسم در تمامی لایه‌های مختلف A1 وجود داشته و همچنین، تطبیق‌پذیری به محرک خاص، از لایه‌های ۳ و ۴ به لایه‌ی ۵، به طور مشخصی افزایش می‌یابد [۱۰]. در سال ۲۰۱۰، نلکن و مالمریکا، با انجام آزمایشی در MGN، نشان دادند که نورون‌های تالاموسی نیز دارای قابلیت تطبیق‌پذیری به محرک خاص هستند. آن‌ها مشخص کردند که SSA در MGm و MGd به خوبی دیده می‌شود، اما در MGv وجود ندارد [۱۱]. در سال ۲۰۱۱، گروه نلکن، به بررسی گسترده‌تری روی تطبیق‌پذیری پرداخته و با ۶ الگوی متفاوت، برای پی بردن به اثر وجود فرکانس‌های دیگر روی پاسخ یک فرکانس، تلاش نمودند. نتایج این مطالعه

بیان‌گر تاثیر‌پذیری یک محرک با یک فرکانس خاص، توسط فرکانس‌های همسایه بوده و نشان می‌دهد که تطبیق به یک فرکانس خاص، روی پاسخ فرکانس‌های دیگر اثر می‌گذارد. در سال ۲۰۱۵، نشان داده شد که تطبیق‌پذیری به یک محرک خاص، باعث کاهش پاسخ فرکانس‌های جانبی و به طور کلی جابه‌جایی منحنی پاسخ به سمت دامنه‌های بالاتر می‌شود [۱۲]. مکانیسم تطبیق‌پذیری با کاهش پاسخ به محرک تکراری، به نوعی بار فعالیت مغز را کاهش می‌دهد. اما این سوال مطرح می‌شود که تطبیق به یک محرک خاص، چگونه روی رمزگشایی اطلاعات محرک‌های همسایه، تاثیر می‌گذارد. در مقاله‌ی حاضر، سعی شد تا با طراحی دو الگوی معمول و تطبیقی از تن‌های صدا و مقایسه‌ی قدرت رمزگشایی مغز در این دو الگو، به این سوال، پاسخ داده شود. در مطالعات گذشته، گزارش‌های مختلفی از تاثیر تطبیق‌پذیری بر قدرت تفکیک مغز ارائه شده است. تطبیق‌پذیری بسته به مکانیسم مورد استفاده، محرک تست و ناحیه‌ی مورد مطالعه، می‌تواند دقت کدگذاری را افزایش یا کاهش دهد [۱۳]. در برخی از مطالعات، نشان داده شد که تطبیق‌پذیری باعث افزایش دقت رمزگشایی در طبقه‌بندی عددی [۱۴] یا تشخیص چهره [۱۵] می‌شود. همچنین در مطالعاتی، کاهش اهمیت محرک، یا قدرت تفکیک‌پذیری بعد از تطبیق‌پذیری در نواحی مختلف [۱۶]، و یا کاهش قدرت تفکیک‌پذیری بین جهت‌های مختلف محرک بینایی در ناحیه‌ی V1 [۱۷]، که تنها در محرک‌های نزدیک به محرک تطبیقی صورت می‌گیرد، مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه‌ی [۱۸]، نشان داده شد که تطبیق‌پذیری بر میزان رمزگشایی مقادیر اشیا در ناحیه‌ی PFC، تاثیری ندارد. همچنین، نشان داده شد که تطبیق‌پذیری در محرک‌های دور از محرک تطبیقی، باعث ارتقای تفکیک و در محرک‌های نزدیک به تطبیق، باعث کاهش تفکیک می‌شود [۱۹]. به طور کلی، موضوع تاثیر تطبیق‌پذیری بر قدرت تفکیک، به عنوان یکی از مسائل چالشی در این حوزه، مطرح است.

## ۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌های عملی این مطالعه، در مرکز فناوری عصبی ایران (INTC) در دانشگاه علم و صنعت ایران و با استفاده از روش‌هایی مطابق با استانداردهای وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی انجام شده است.

### ۲-۱- الگوی آزمایش

هدف اصلی این مطالعه، بررسی اثر تطبیق‌پذیری بر رمزگشایی پاسخ قشر شنوایی موش صحرایی است. برای این منظور،

<sup>۱</sup> Hallpike, Hood

<sup>۲</sup> Anderson, Malmerca

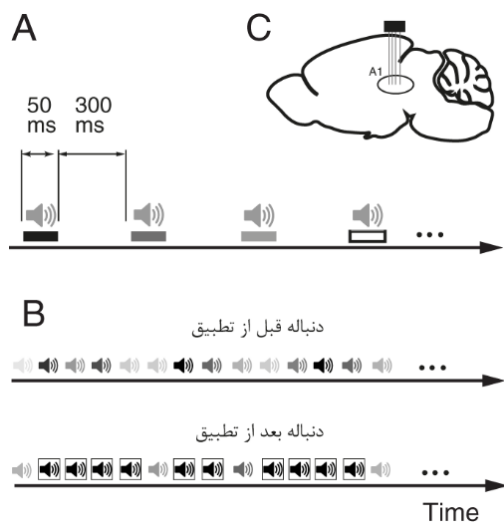
<sup>۳</sup> Auditory Thalamus

<sup>۴</sup> Medial Geniculate Body

<sup>۵</sup> Szymanski FD, Schnupp JWH

<sup>۶</sup> Current Source Density Analysis (CSD)

میان نوروهای مناطق مختلف شنوایی، نوروهای ناحیه‌ی اولیه‌ی شنوایی، به دلیل ناحیه‌ی پاسخ مناسب، نرخ آتش مشخص و همچنین قابلیت تنوتوپیک، برای بررسی‌های شنوایی مناسب هستند [۲۱-۲۳]. از این رو، به دلیل حساسیت نوروهای این ناحیه، همانند نواحی اولیه‌ی بینایی و لامسه، به بررسی پاسخ نورونی و منحنی پاسخ آن در مواجهه با محرک تطبیق‌یافته پرداخته شده است [۲۴].



شکل (۱) - الگوی آزمایش و ثبت الکتروفیزیولوژی. (A) محرک‌های صوتی از ترکیب‌های مختلفی از تن‌های صدا از شش فرکانس در چهار شدت صوت مختلف تشکیل می‌شوند. محرک‌ها با طول ۵۰ میلی‌ثانیه و فاصله‌ی بین محرکی ۳۰۰ میلی‌ثانیه در یک دنباله‌ی صدا پخش می‌شوند. (B) الگوی آزمایش، شامل دو دنباله‌ی مختلف صدا است. در دنباله‌ی اول، محرک‌های صوتی به صورت تصادفی پخش می‌شوند. دنباله‌ی دوم شامل محرک‌های صدا با مشخصاتی مانند دنباله‌ی اول است با این تفاوت که یک محرک به عنوان محرک تطبیقی، ۸۰٪ از کل صداها را به خود اختصاص می‌دهد (صدای درون جعبه). در واقع، یک دنباله از صداها در زمینه‌ای از صدای تطبیقی فرکانس میانه پخش می‌شوند. (C) محل ثبت داده‌های خارجی سلولی، ناحیه‌ی اولیه‌ی شنوایی (A1) موش صحرایی ویستار توسط چهار الکتروود به طور هم‌زمان می‌باشد

سیگنال‌های اسپایک و پتانسیل میدانی محلی (LFP)، توسط دستگاه ۶۴ کاناله‌ی MCS، از طریق ۴ کانال الکتروودهای FHC، به طور هم‌زمان از ناحیه‌ی اولیه‌ی قشر شنوایی موش صحرایی در حالت بیهوش ثبت گردید، که در این مطالعه، سیگنال‌های پتانسیل میدانی محلی مورد بررسی قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها، توسط نرم‌افزار متلب ۲۰۱۶ انجام شد. ابتدا، تک‌تک کانال‌ها به صورت مجزا بارگذاری شده و بعد از فیلترینگ، قسمت پتانسیل میدانی محلی و اسپایک سیگنال جدا شدند. در مرحله‌ی اول، یک پنجره از سیگنال، شامل ۱۰

سیگنال‌های خارج سلولی از ناحیه‌ی اولیه‌ی شنوایی ۱۵ موش صحرایی نر و ماده‌ی بالغ، از نوع ویستار و با وزن میانگین بین ۲۵۰-۴۰۰ گرم ثبت شده است. بدین منظور، از یک آرایه‌ی الکتروود خطی چهارتایی، شامل چهار الکتروود تنگستن (FHC، USA، 5M) با فاصله‌ی ۲۰۰ میلی‌متر، برای ثبت خارج سلولی استفاده شد. این آرایه در ناحیه‌ی اولیه‌ی شنوایی وارد شده و ثبت خارج سلولی صورت گرفت (برای آگاهی از نحوه و روش انجام آزمایش، به مرجع [۲۰] مراجعه شود). محرک‌های صوتی در این مطالعه، تن‌های صدا به طول ۵۰ میلی‌ثانیه با فاصله‌ی بین محرکی ۳۰۰ میلی‌ثانیه هستند که در یک دنباله از صدا، پشت سر هم به صورت تصادفی پخش می‌شوند (شکل ۱-۱A).

قبل از شروع آزمایش اصلی در هر ناحیه‌ی ثبت، ابتدا تن‌های صدا با دامنه و فرکانس‌های مختلف پخش شده و منطقه‌ی پاسخ فرکانسی، تعیین می‌گردد. بر اساس منطقه‌ی پاسخ، ۶ فرکانس با فاصله‌ی فرکانسی یک‌سان انتخاب می‌شوند. آزمایش اصلی شامل دو الگو از دنباله‌های صدا برای تحریک است (شکل ۱-۱B). در الگوی اول (دنباله‌ی معمول)، این شش فرکانس در چهار دامنه‌ی ۴۰-۷۰ دسی بل، هر کدام ۲۵ بار به صورت تصادفی پخش می‌شوند. سپس در الگوی دوم، یک محرک در نزدیکی فرکانس مرکزی، به عنوان محرک تطبیقی و ۵ فرکانس دیگر، به عنوان محرک‌های همسایه در نظر گرفته می‌شوند. پنج تن صدا، مانند دنباله‌ی اول پخش می‌شوند، با این تفاوت که به ازای هر تن صدا با دامنه و فرکانس مشخص، چهار مرتبه از محرک تطبیقی با فرکانس مشخص و دامنه‌ی ۶۰ دسی بل پخش می‌شود. به عبارت دیگر، محرک تطبیقی ۸۰٪ از الگوی دوم را به خود اختصاص می‌دهد (دنباله‌ی تطبیقی). بنابراین در الگوی اول، هر ترکیب دامنه-فرکانس به نسبت برابر و در الگوی دوم، پاسخ هر کدام از این ترکیب‌ها در زمینه‌ای از محرک تطبیقی پخش می‌شوند. لازم به ذکر است که این تن‌ها به صورت تصادفی پخش می‌شوند. هم‌زمان با پخش تن‌های صدا، فعالیت نورونی از ناحیه‌ی اولیه‌ی شنوایی موش صحرایی ویستار (شکل ۱-۱C) ثبت می‌شود.

## ۲-۲- تجزیه و تحلیل

سیگنال‌های ثبت شده، به منظور استخراج اسپایک و LFP، به ترتیب از فیلترهای بین ۳۰۰-۳۰۰۰ هرتز و زیر ۳۰۰ هرتز عبور داده می‌شوند. در این مطالعه، از فعالیت‌های پتانسیل میدانی محلی (LFP) برای پی بردن به تاثیر تطبیق‌پذیری بر قدرت رمزگشایی محرک‌های صوتی استفاده شده است. در

تخمین پرریودوگرام حاصل می‌شود، که در فرمول (۱) نشان داده شده است.

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x(n) e^{-j2\pi fn} \right|^2 \quad (1)$$

در این رابطه،  $x$  سیگنال مورد نظر در هر آزمایش،  $f$  فرکانس مربوطه در حوزه‌ی فرکانس و در نتیجه  $P_{xx}$  طیف توان سیگنال حاصله می‌باشد.

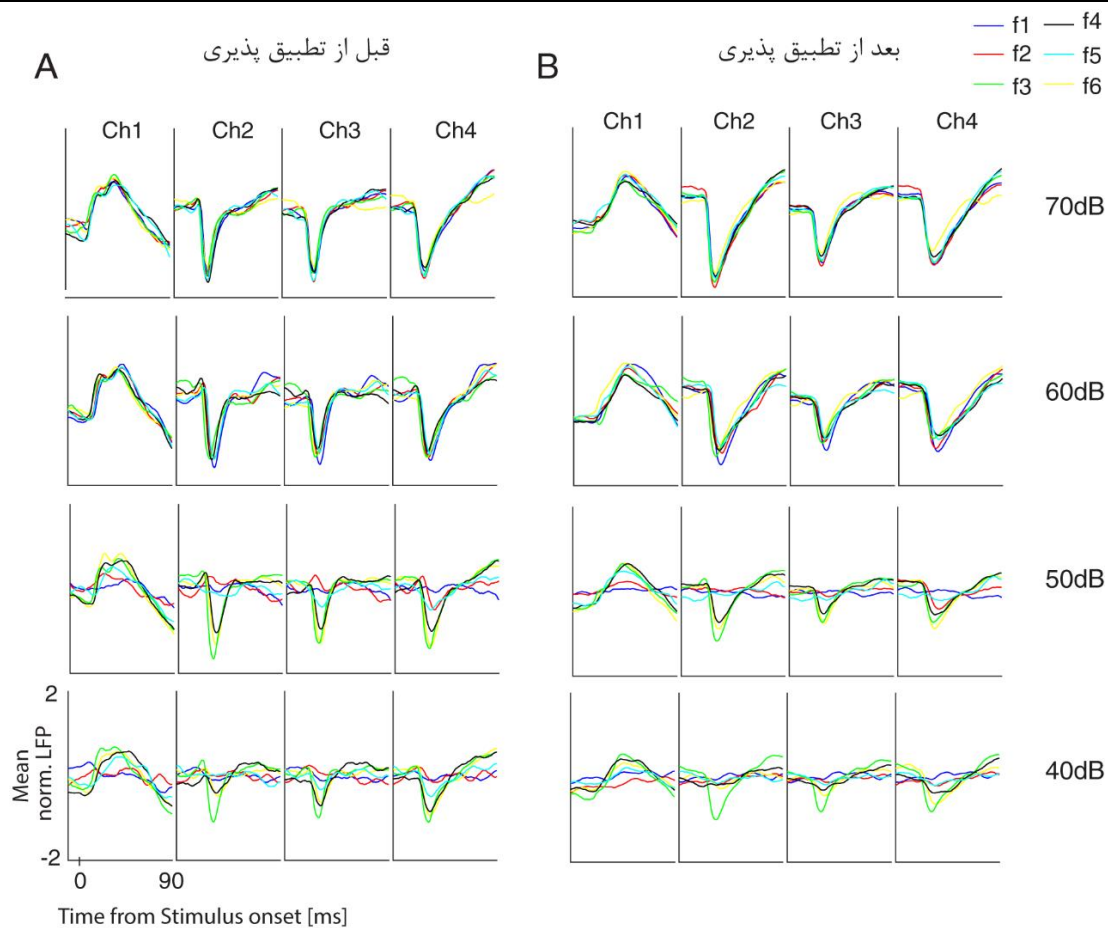
در مجموع، ۱۵۰ مولفه‌ی طیف توان از چهار کانال در اختیار خواهد بود (به ازای فرکانس ۱-۱۵۰ هرتز). پس از استخراج ویژگی طیف توان در هر باند فرکانسی، مقدار اختلاف ماکزیمم از مینیمم توان در آن باند، به عنوان ویژگی در نظر گرفته شد (قدر مطلق مینیمم توان-ماکزیمم توان). سپس به کمک طبقه‌بند LDA، دقت رمزگشایی سیگنال‌های پاسخ، در دو فاز قبل و پس از پدیده‌ی تطبیق‌پذیری محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند. این مقایسه، امکان بررسی اثر پدیده‌ی تطبیق‌پذیری روی رمزگشایی نرونی را در سیستم شنوایی مهیا می‌نماید.

### ۳- یافته‌ها و بحث

هدف اصلی این مطالعه، بررسی تاثیر پدیده‌ی تطبیق‌پذیری به یک محرک خاص (یک تن صدا در دامنه و فرکانس مشخص)، روی قدرت رمزگشایی محرک‌های مجاور است. برای بررسی این موضوع، با طراحی یک آزمایش، شامل دو الگو (دنباله‌ی معمول و دنباله‌ی تطبیقی) و ثبت از نرونها‌ی ناحیه‌ی اولیه‌ی شنوایی موش صحرایی در حالت بیهوش، به بررسی قدرت رمزگشایی فرکانس‌های صدا و تاثیر تطبیق‌پذیری بر آن پرداخته شد. تجزیه و تحلیل روی سیگنال‌های پتانسیل محلی به منظور رمزگشایی فرکانس‌های صدا، در قبل و بعد از تطبیق‌پذیری، به طور مجزا صورت گرفت و نتایج حاصل از رمزگشایی فرکانس‌های صدا در دو دنباله، به منظور بررسی اثر تطبیق بر رمزگشایی مغز، مقایسه گردید. در شکل (۲)، میانگین پاسخ پتانسیل‌های محلی چهار کانال ثبتي هم‌زمان در شش فرکانس صوت نشان داده شده است. این شکل، میانگین پاسخ پتانسیل‌های محلی نرمال شده را در دنباله‌ی قبل از تطبیق‌پذیری (شکل ۲-A) و بعد از تطبیق‌پذیری (شکل ۲-B) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش دامنه‌ی صدا از ۴۰ به ۷۰ دسی‌بل، قدرت پاسخ میانگین پتانسیل‌های محلی افزایش و قدرت تمایز بین پاسخ فرکانس‌های صوتی مختلف کاهش می‌یابد.

میلی‌ثانیه قبل و ۹۰ میلی‌ثانیه بعد از شروع محرک، در نظر گرفته شد. این کار برای محرک‌ها در هر دو الگوی قبل و بعد از تطبیق صورت گرفت [۲۰]. در این مقاله، سیگنال‌های LFP حاصل از زمان نمونه‌گیری ۱۰۰ میلی‌ثانیه و فرکانس نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز، در اختیار قرار گرفت که هزار نمونه سیگنال را شامل می‌شد. سیگنال‌های ۴ کانال از محرک‌های پخش شده، در ۶ فرکانس (۱۰۰۰-۲۳۰۰-۴۰۰۰-۷۰۰۰-۹۳۰۰-۱۲۴۰۰ هرتز) و در ۴ دامنه‌ی ۴۰ تا ۷۰ دسی‌بل می‌باشند. در مرحله‌ی اول، به منظور کاهش نرخ نمونه‌برداری و ابعاد فضای ویژگی، فرکانس نمونه‌برداری از ۱۰۰۰۰ به ۱۰۰۰ هرتز کاهش داده شد تا تعداد نمونه‌ها از هر کانال الکتروود به ۱۰۰ نمونه برسد. بعد از پیش‌پردازش و حذف آزمایش‌ها، با توان بیش از سه برابر توان میانگین در هر جلسه، ۲۰ آزمایش از هر ترکیب فرکانس-دامنه انتخاب شد. سپس با اعمال فیلتر FIR به سیگنال پاسخ، سیگنال‌ها در باندهای تتا تا گامای بالا، دسته‌بندی شدند. مرتبه‌ی فیلتر، یک‌سوم طول سیگنال و فرکانس قطع نیز نصف فرکانس نمونه‌برداری انتخاب گردید. پس از اعمال فیلتر، از روش k-fold cross validation برای ارزیابی رمزگشایی استفاده گردید که در آن مجموعه‌ی آزمایش‌ها به ۵ قسمت مساوی تقسیم می‌شد. در هر بار (۳۰ تکرار) اجرای دسته‌بندی، یکی از قسمت‌ها برای مرحله‌ی تست انتخاب شده و از سایر قسمت‌ها در مرحله‌ی آموزش استفاده می‌شود. در این حالت، در هر تکرار ۸۰٪ آزمایش‌ها به عنوان دیتای آموزش و ۲۰٪ آن‌ها به عنوان دیتای تست در نظر گرفته می‌شوند. در انتها، میانگین دقت طبقه‌بندی گزارش می‌شود.

پاسخ نرونی ثبت شده از ۴ کانال ثبت و در بازه‌ی زمانی ۴۰۰ میلی‌ثانیه در کنار یک‌دیگر برای تمامی فرکانس‌ها و در ۴ دامنه‌ی مختلف محرک به صورت مجزا نمایش داده می‌شود. در شکل‌ها، میانگین سیگنال‌ها در این دامنه به صورت مجزا برای تمامی فرکانس‌ها قابل مشاهده می‌باشد. از آن‌جا که در حوزه‌ی فرکانس، مشخصه‌های مختلف طیف توان مورد بررسی قرار می‌گیرند، از ویژگی طیف توان، به منظور پردازش آماری داده‌ها و به عنوان یکی از مولفه‌های سیگنال که حاوی اطلاعات می‌باشد، استفاده شده است. در این مطالعه، برای تخمین زدن چگالی طیف توان، از روش پرریودوگرام استفاده شده است. این روش یکی از روش‌های مرسوم برای بررسی ارتباط اطلاعات دامنه‌ی سیگنال در حوزه‌ی فرکانس است. در این روش، توزیع توان در واحد فرکانس و تبدیل فوریه‌ی گسسته، در زمان نمونه‌های فرایند و مجذور کردن اندازه با



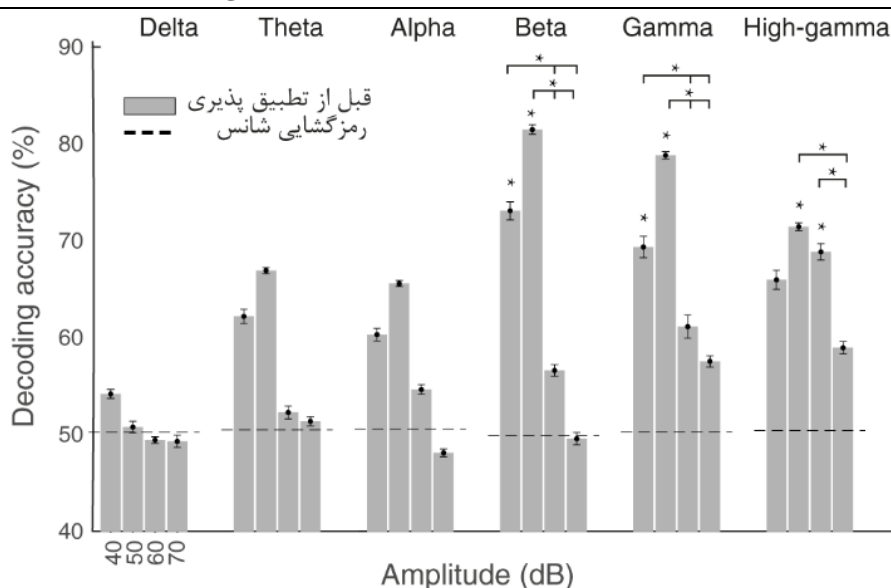
**شکل (۲)** - مقایسه‌ی سیگنال‌های پتانسیل محلی در چهار کانال ثبت هم‌زمان برای شش فرکانس مورد آزمایش در چهار دامنه‌ی صدا (۴۰-۷۰ دسی‌بل) در دنباله‌های قبل (A) و بعد از تطبیق‌پذیری (B). هر پنل، میانگین سیگنال‌های پتانسیل محلی یک کانال ثبت در طول زمان ۱۰ تا ۹۰ میلی‌ثانیه پس از پخش محرک صوتی برای شش فرکانس صدا را نشان می‌دهد. (B) میانگین پاسخ پتانسیل‌های محلی فرکانس‌های مختلف صدا در دنباله‌ی تطبیقی

تمامی دامنه‌ها دیده می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل قدرت تفکیک‌پذیری در باندهای فرکانسی مختلف، حاکی از دقت طبقه‌بندی فرکانس‌های صوت در باند فرکانسی گاما می‌باشد. نتیجه‌ی به دست آمده، با یافته‌های اخیر سایر محققان، که به صورت مشابه بیش‌ترین دقت رمزگشایی را در فرکانس گاما گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی دارد (کاوازاکی و هم‌کارانش، ۲۰۱۶). سه باند فرکانسی بتا، گاما و گامای بالا، با دقت تفکیک میانگین ۷۸٪، ۷۵٪ و ۶۹٪، در شدت صوت‌های ۴۰ و ۵۰ دسی‌بل، برای مقایسه و بررسی اثر تطبیق انتخاب شدند.

شکل (۳)، حامل دو نتیجه‌ی مهم است:

- ۱- افزایش قابلیت تفکیک فرکانس‌های صوتی در باندهای فرکانسی بالا (<math>15</math> هرتز)
- ۲- تفکیک‌پذیری بیش‌تر فرکانس‌های صوتی در دامنه‌های میانی صوت (۴۰ و ۵۰ دسی‌بل) در مقایسه با دامنه‌های بالای آن (۷۰ دسی‌بل)

برای کمی‌سازی و مقایسه‌ی میزان تفکیک‌پذیری دو دنباله‌ی قبل و بعد از تطبیق‌پذیری، با استفاده از ویژگی طیف توان و به کمک طبقه‌بند LDA، میزان تفکیک بین هر جفت فرکانس صدا محاسبه شد. در ابتدا، برای انتخاب باند فرکانسی مناسب، میزان قدرت طبقه‌بندی دو کلاسه بین جفت فرکانس‌ها، از میان شش فرکانس صوت موجود در چهار دامنه و بدون در نظر گرفتن اثر تطبیق‌پذیری، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا سیگنال‌های پتانسیل محلی در شش باند دلتا (۱-۴ Hz)، تتا (۴-۸ Hz)، آلفا (۸-۱۲ Hz)، بتا (۱۲-۳۰ Hz)، گامای پایین (۳۰-۶۰ Hz) و گامای بالا (۶۰-۱۲۰ Hz) فیلتر شدند. سپس قدرت تفکیک میان پاسخ جفت فرکانس‌های صوتی در چهار دامنه‌ی صوت، به طور مجزا در دنباله‌ی قبل از تطبیق‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت و میانگین قدرت تفکیک جفت فرکانس‌ها در چهار دامنه‌ی صوت، در شش باند فرکانسی به دست آمد (شکل ۳). همان‌طور که مشاهده می‌شود، در باندهای فرکانسی بالا، افزایش دقت رمزگشایی در



شکل (۳) - میانگین دقت رمزگشایی جفت فرکانس‌های صدا، مبتنی بر ویژگی توان و طبقه‌بند خطی LDA. میانگین دقت طبقه‌بندی در دنباله‌ی معمول، میان جفت فرکانس‌های مختلف صدا در چهار دامنه‌ی صدا به صورت مجزا، وجود تفاوت معنادار میان قدرت تفکیک فرکانس‌های صدا در مقایسه با مقدار شانس در باند بتا (دامنه‌ی ۴۰ و ۵۰)، گاما (دامنه‌ی ۴۰ و ۵۰) و گامای بالا (دامنه‌ی ۵۰ و ۶۰) (Wilcoxon rank sum,  $p < 0.01$ ). همچنین، اختلاف معنادار میان دی‌کدینگ فرکانس‌ها در دامنه‌های مختلف نشان داده شده است (ANOVA, multiple comparison Bonferroni criteria:  $0.05/24 \sim 0.002$ ,  $p < 0.002$ )

کاهش قدرت طبقه‌بندی در دنباله‌ی تطبیقی نسبت به دنباله‌ی معمول، در باندهای گاما و گامای بالا است. این کاهش دقت اندازه‌گیری، در دامنه‌ی اول و دوم (۴۰ و ۵۰ دسی‌بل) در باند گاما و دامنه‌ی سوم (۶۰ دسی‌بل) در باند گامای بالا، به صورت معناداری زیاد می‌باشد (Statistical t-test,  $P < 0.05$ ,  $** P < 0.01$ ,  $*** P < 0.001$ ). در باند گامای بالا، رمزگشایی بعد از تطبیق نسبت به قبل از آن، در تمامی دامنه‌ها کاهش پیدا کرده و بالاترین دقت اندازه‌گیری در دامنه‌ی ۵۰ دسی‌بل و در حدود ۷۰٪ می‌باشد. در این دامنه از صدا، کاهش معنادار رمزگشایی بعد از تطبیق مشاهده می‌شود (Statistical t-test,  $p < 0.05$ ). همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، با افزایش دامنه‌ی (شدت) صدا، پاسخ در فرکانس‌های مختلف به یک‌دیگر نزدیک‌تر شده و قدرت تفکیک کاهش می‌یابد.

کاهش دقت تفکیک صوت در دنباله‌ی تطبیقی نسبت به دنباله‌ی معمول را می‌توان به تاثیر محرک تطبیقی بر پاسخ محرک‌های مجاور نسبت داد. این موضوع در مطالعات اخیر نشان داده شده است که محرک تطبیقی باعث تاثیر پاسخ محرک‌های مجاور می‌شود. این تاثیر با جابه‌جایی منحنی پاسخ نورونی به سمت دامنه‌های بالا از صدا نمایان می‌شود [۲۰]. در آن مطالعه نیز نشان داده شد که قدرت تفکیک بین جفت فرکانس‌ها در دنباله‌ی تطبیقی نسبت به دنباله‌ی معمول

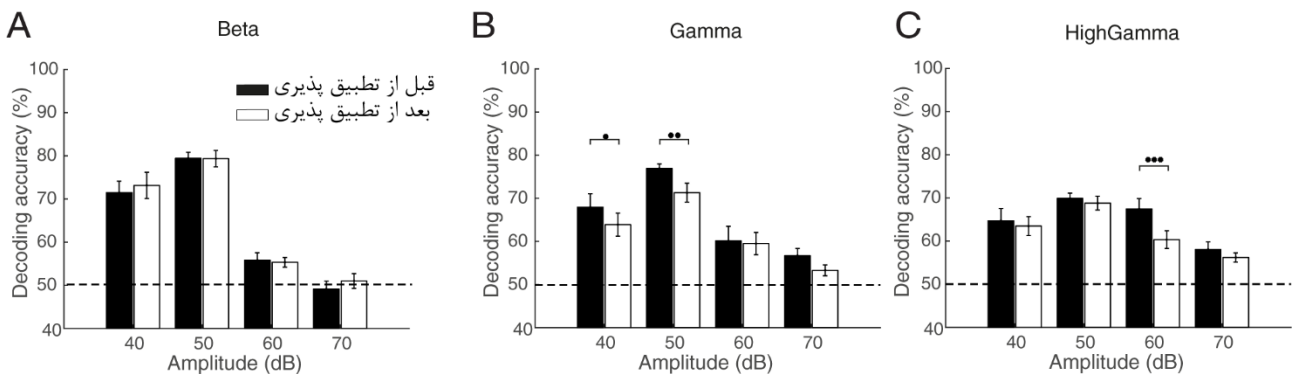
رمزگشایی فرکانس‌های صوتی در باندهای فرکانسی بالای سیگنال، می‌تواند به خاطر سریع بودن پاسخ تن‌های صوت باشد که در بازه‌ی حدود ۳۰ میلی‌ثانیه رخ می‌دهد. بنابراین، انتظار نمی‌رود که این تاثیر در فرکانس‌های پایین، مانند تتا، مشاهده شود. همچنین، وجود بیش‌ترین دقت رمزگشایی که عموماً در دامنه‌های میانی رخ می‌دهد، می‌تواند به دلیل پاسخ مشابه ضعیف میان فرکانس‌های صوتی در دامنه‌های پایین و پاسخ مشابه قوی میان فرکانس‌های صوتی در دامنه‌ی بالای صدا باشد. پاسخ مشابه ضعیف یا قوی میان فرکانس‌های مختلف، منجر به رمزگشایی یا تفکیک ضعیف‌تر می‌شود. در نتیجه، نفکیک‌پذیری فرکانس‌های صوتی در شدت‌های صوتی میانی نسبت به شدت صوت‌های بالا، مطلوب‌تر می‌باشد.

در ادامه، به بررسی و مقایسه‌ی قدرت تفکیک بین دو دنباله‌ی قبل و بعد از تطبیق، در سه باند فرکانسی بتا، گاما و گامای بالا پرداخته شد (شکل ۴). در این شکل، میله‌های مشکی، قدرت رمزگشایی در دنباله‌ی معمول (قبل از تطبیق‌پذیری-BA) و میله‌های سفید، قدرت تفکیک فرکانسی در دنباله‌ی تطبیقی (بعد از تطبیق‌پذیری) را نشان داده و خط‌چین، محدوده‌ی قدرت تفکیک شانس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در دامنه‌ی فرکانسی بتا مشاهده می‌شود، دقت طبقه‌بندی فرکانس‌ها، پیش و پس از پدیده‌ی تطبیق‌پذیری، اختلاف معناداری ندارند (Statistical t-test,  $p > 0.05$ ). نتایج، حاکی از



همسایه شده و به نوعی کاهش دقت طبقه‌بندی فرکانس‌های صدا را به همراه دارد.

در باندهای گاما و گامای بالا کاهش می‌یابد. در واقع، محرک تطبیق‌پذیر مانند یک پیش‌زمینه در یک دنباله‌ی صدا، باعث کاهش پاسخ نورونی خود محرک تطبیقی و محرک‌های



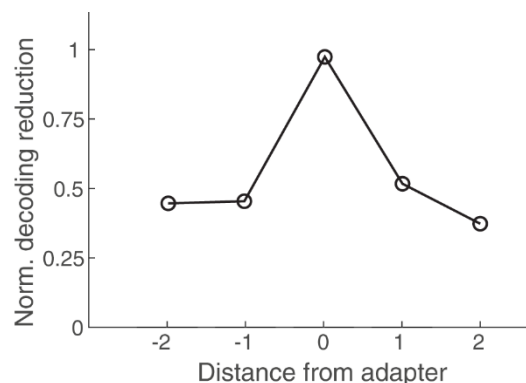
شکل (۴) - مقایسه‌ی قدرت تفکیک فرکانس‌های صدا، قبل و بعد از تطبیق‌پذیری، در سه باند فرکانسی بتا، گاما و گامای بالا

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در مطالعات مختلف، اثر متفاوتی از تطبیق‌پذیری بر میزان تفکیک محرک‌ها گزارش شده است. این موضوع می‌تواند به دلیل چگونگی انتخاب محرک تطبیقی، آزمایش مورد نظر، ناحیه‌ی مورد آزمایش و یا عوامل دیگری باشد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان دهنده‌ی کاهش قدرت تفکیک در حالت کلی میان فرکانس‌های مختلف صدا در دنباله‌ی تطبیقی است. این موضوع در حالی است که محرک تطبیقی، به عنوان محرک ارجح در منحنی پاسخ انتخاب شده است. کاهش پاسخ این محرک به معنای نزدیک شدن به پاسخ محرک‌های همسایه است، اما اگر محرکی با پاسخی به قدرت مشابه محرک ارجح، به عنوان محرک نادر پخش شود، مکانیسم تطبیق باعث تفکیک واضح‌تر این محرک جدید می‌شود. در واقع، تطبیق‌پذیری به نوعی با کاهش پاسخ محرک تطبیق و محرک‌های همسایه، به تشخیص محرک جدید کمک می‌کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی تاثیر مکانیسم تطبیق‌پذیری بر قدرت رمزگشایی مغز و تفکیک بین محرک‌های صوتی مجاور پرداخته شد. نتایج، حاکی از کاهش معنادار دقت طبقه‌بندی پس از تطبیق‌پذیری در باند گاما و گامای بالا می‌باشد. به علاوه، نشان داده شد که با افزایش باند فرکانسی، دقت طبقه‌بندی افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که بیش‌ترین دقت طبقه‌بندی (میانگین) در باند گاما ملاحظه می‌شود. هم‌چنین، طبقه‌بندی در شدت‌های میانی صوت (۴۰-۵۰ دسی‌بل) با دقت بالاتری نسبت به شدت‌های بالا و پایین صورت می‌پذیرد.

شکل (۵)، میزان اختلاف تفکیک‌پذیری میان یک فرکانس با سایر فرکانس‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار، میزان اختلاف تفکیک‌پذیری (نرمال شده به مقدار ماکسیمم تفکیک‌پذیری) را در فرکانس تطبیقی (۰) و دو فرکانس پایین‌تر (۱- و ۲-) و دو فرکانس بالاتر (۱ و ۲) از آن را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که هنگامی که محرک ارجح به عنوان محرک تطبیقی در نظر گرفته می‌شود، تطبیق‌پذیری، بیش‌ترین میزان کاهش تفکیک‌پذیری را در آن محرک خواهد داشت. هم‌چنین، این تاثیر بر محرک‌های مجاور باقی مانده و روندی کاهشی را نشان می‌دهد. با توجه به مطالعات قبل و نتایج این مطالعه، انتظار می‌رود که اگر محرک تطبیقی از میان محرک‌های غیر ارجح انتخاب شود، این کاهش تفکیک‌پذیری کم‌تر شده و یا حتی به صورت افزایشی در محرک‌های ارجح نمایان گردد.



شکل (۵) - ارتباط اختلاف دقت تفکیک در دنباله‌های قبل و بعد از تطبیق‌پذیری با فاصله گرفتن از محرک تطبیقی. بیش‌ترین کاهش تفکیک متعلق به محرک تطبیقی بوده و این اختلاف با فاصله گرفتن از محرک تطبیقی کاهش می‌یابد

- [12] N. Taaseh, A. Yaron, & I. Nelken "Stimulus-specific adaptation and deviance detection in the rat auditory cortex" *PLoS One*, 6, no. 8: e23369, 2011.
- [13] J.M. Cortes, D. Marinazzo, P. Series, M.W. Oram, T.J. Sejnowski, and M.C. Van Rossum. "The effect of neural adaptation on population coding accuracy." *Journal of computational neuroscience*, 32, no. 3: 387-402, 2012.
- [14] E. Castaldi, D. Aagten-Murphy, M. Tosetti, D. Burr, and M.C. Morrone. "Effects of adaptation on numerosity decoding in the human brain." *NeuroImage*, 143: 364-377, 2016.
- [15] H. Yang, J. Shen, J. Chen, and F. Fang. "Face adaptation improves gender discrimination." *Vision Research*, 51, no. 1: 105-110, 2011.
- [16] F. Pestilli, G. Viera, and M. Carrasco, "How do attention and adaptation affect contrast sensitivity?." *Journal of Vision*, 7, no. 7: 9-9, 2007.
- [17] E. Zavitz, H.H. Yu, E.G. Rowe, M.G. Rosa, and N.S. Price. "Rapid adaptation induces persistent biases in population codes for visual motion." *Journal of Neuroscience*, 36, no. 16: 4579-4590, 2016.
- [18] A. Ghazizadeh, S. Hong, and O. Hikosaka, "Prefrontal Cortex Represents Long-Term Memory of Object Values for Months." *Current Biology*, 28, no. 14: 2206-2217, 2018.
- [19] P. Seriès, A.A. Stocker, and E.P. Simoncelli. "Is the homunculus "aware" of sensory adaptation?." *Neural Computation*, 21, no. 12: 3271-3304, 2009.
- [20] M. Parto-Dezfouli, & MR. Daliri. "The effect of adaptation on the tuning curves of rat auditory cortex". *PloS one*, 10, no. 2: e0115621, 2015.
- [21] I. Nelken. "Stimulus-specific adaptation and deviance detection in the auditory system: experiments and models." *Biological cybernetics* 108, no. 5: 655-663, 2014.
- [22] N. Ulanovsky, L. Las, & I. Nelken, "Processing of low-probability sounds by cortical neurons." *Nature Neuroscience*, 6, no. 4: 391-398, 2003.
- [23] B.J. Kelly and L.S. Sally. "Organization of auditory cortex in the albino rat: binaural response properties." *Journal of neurophysiology* 59, no. 6: 1756-1769, 1988.
- [24] L.S. Sally, and B.J. Kelly. "Organization of auditory cortex in the albino rat: sound frequency." *Journal of Neurophysiology* 59, no. 5: 1627-1638, 1988.
- [1] A. Muralidharan, and J. R. Patrick. "Decoding of auditory cortex signals with a LAMSTAR neural network." *Neurological research* 27, no. 1: 4-10, 2005.
- [2] H. Luo, and D. Poeppel. "Phase patterns of neuronal responses reliably discriminate speech in human auditory cortex." *Neuron* 54, no. 6: 1001-1010, 2007.
- [3] K.S. Hong, and H. Santosa. "Decoding four different sound-categories in the auditory cortex using functional near-infrared spectroscopy." *Hearing research* 333: 157-166, 2016.
- [4] T.I. Shiramatsu, T. Noda, R. Kanzaki, and Hirokazu Takahashi. "Decoding of the sound frequency from the steady-state neural activities in rat auditory cortex." In 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 5598-5601. IEEE, 2013.
- [5] F.D. Szymanski, N.C. Rabinowitz, C. Magri, S. Panzeri, and J.W. Schnupp. "The laminar and temporal structure of stimulus information in the phase of field potentials of auditory cortex." *Journal of Neuroscience* 31, no. 44: 15787-1580, 2011.
- [6] F.D. Szymanski, J.A. Garcia-Lazaro, and J.W. Schnupp. "Current source density profiles of stimulus-specific adaptation in rat auditory cortex." *Journal of neurophysiology* 102, no. 3: 1483-1490, 2009.
- [7] J.C. Dahmen, P. Keating, F.R. Nodal, A.L. Schulz, and A.J. King "Adaptation to stimulus statistics in the perception and neural representation of auditory space." *Neuron* 66, no. 6: 9F-948, 2010.
- [8] L.A. Anderson, G.B. Christianson, and J.F. Linden, "Stimulus-specific adaptation occurs in the auditory thalamus." *The Journal of Neuroscience* 29, no. 22: 7359-7363, 2009.
- [9] I. Nelken, and N. Ulanovsky. "Mismatch negativity and stimulus-specific adaptation in animal models." *Journal of Psychophysiology* 21, no. 3-4: 214-223, 2007.
- [10] F.D. Szymanski, J.A. Garcia-Lazaro, and J.W. Schnupp. "Current source density profiles of stimulus-specific adaptation in rat auditory cortex." *Journal of neurophysiology* 102, no. 3: 1483-1490, 2009.
- [11] F.M. Antunes, I. Nelken, E. Covey, and M. S. Malmierca. "Stimulus-specific adaptation in the auditory thalamus of the anesthetized rat." *PLoS One* 5, no. 11: e14071, 2010.