

## **A Cognitive Model of Spatial Navigation: Hippocampus and Prefrontal Cortex Interaction**

**Moghadam, Maryam<sup>1</sup> / Towhidkhan, Farzad<sup>2\*</sup> / Baghdadi, Golnaz<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> - Ph.D. Candidate, Cybernetics and Modeling of Biological Systems Lab, Department of Biomedical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> - Professor, Cybernetics and Modeling of Biological Systems Lab, Department of Biomedical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> - Postdoc Researcher, Cybernetics and Modeling of Biological Systems Lab, Department of Biomedical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### **ARTICLE INFO**

DOI: 10.22041/IJBME.2021.522727.1660

Received: 11 January 2021

Revised: 16/4/2021 – 20/5/2021 – 27/5/2021

Accepted: 28 May 2021

### **KEYWORDS**

*Navigation  
Interaction  
Hippocampus  
Medial Prefrontal Cortex  
Vanderpol  
Rules Base*

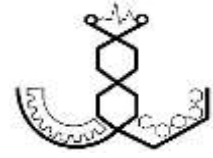
### **ABSTRACT**

In cognition physiology and neuroscience, spatial memory is responsible for the maintenance and recall of information related to environmental details, orientation, and spatial navigation. The brain's cognitive functions including navigation are executed through correlated and sequential activities of different regions. According to previous research, navigation is largely related to the activities of the Hippocampus (HPC) and the Medial Temporal Lobe (MTL), and retrieval of spatial memories from these regions is controlled by the frontal region and specifically medial prefrontal cortex (mPFC). In this paper we attempt to provide a navigation cognitive model based on computational concepts focusing on bidirectional interaction between HPC and mPFC. This model is provided considering 1. The lack of a comprehensive cognitive model of navigation on a previously learned path and ambiguities regarding the information transferring between the regions, and 2. Disagreement between available models and the currently known actual information flow occurring within the brain. The model is inclusive of the active brain regions engaged in navigation using the cognitive map. Furthermore, we propose a computational model based on van-der-pol neuron pools and controlling rule-base, which is naturally related to the actual brain activity through the synchrony mechanism for information transfer and the mPFC rule-based control of the medial temporal lobe. Finally, by analyzing and presenting evidence, we have shown that the model can be beneficial and practical for describing cognitive and functional disorders in navigation, also for design and prediction of the outcomes of therapeutic and rehabilitation protocols in diseases related to spatial navigation, such as the Alzheimer's disease.

### **\*Corresponding Author**

<b>Address</b>	Cybernetics and Modeling of Biological Systems Lab, Department of Biomedical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran		
<b>Postal Code</b>	15875-4413	<b>Tel</b>	+98-21-64542363
<b>E-Mail</b>	towhidkhan@aut.ac.ir	<b>Fax</b>	+98-21-64542363





## مدل شناختی ناوبری: تعامل هیپوکمپ و پیش‌پیشانی

مقدم، مریم<sup>۱</sup> / توحیدخواه، فرزاد<sup>۲\*</sup> / بغدادی، گلناز<sup>۳</sup>

- <sup>۱</sup> - دانشجوی دکتری، آزمایشگاه سایبرنتیک و مدل‌سازی سیستم‌های بیولوژیکی، دانشکده‌ی مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- <sup>۲</sup> - استاد، آزمایشگاه سایبرنتیک و مدل‌سازی سیستم‌های بیولوژیکی، دانشکده‌ی مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- <sup>۳</sup> - محقق پسادکتری، آزمایشگاه سایبرنتیک و مدل‌سازی سیستم‌های بیولوژیکی، دانشکده‌ی مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### مشخصات مقاله

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22041/IJBME.2021.522727.1660

پذیرش: ۷ خرداد ۱۴۰۰

بازنگری: ۱۴۰۰/۱/۲۷ - ۱۴۰۰/۲/۳۰ - ۱۴۰۰/۳/۶

ثبت در سامانه: ۲۲ دی ۱۳۹۹

واژه‌های کلیدی	چکیده
ناوبری	در فیزیولوژی شناختی و علوم اعصاب، حافظه‌ی مکانی بخشی از حافظه بوده که مسئول ثبت و بازخوانی
تعامل	اطلاعات درباره‌ی اجزای محیط، جهت‌گیری و ناوبری است. اعمال شناختی مغز از جمله ناوبری، از طریق
هیپوکمپ	فعالیت‌های دارای همبستگی و دنباله‌ای نواحی مختلف مغز شکل گرفته و اجرا می‌شوند. طبق تحقیقات
قشر پیش‌پیشانی میانی	انجام شده، فرایند ناوبری عمدتاً به عمل کرد هیپوکمپ و بخش گیج‌گاهی میانی مرتبط است و بازیابی
وندریل	حافظه‌ی مکانی از این نواحی تحت کنترل ناحیه‌ی پیشانی و مشخصاً قشر پیش‌پیشانی میانی انجام
پایگاه قواعد	می‌شود. با توجه به عدم وجود یک مدل شناختی و محاسباتی جامع از فرایند ناوبری در مسیر یاد گرفته
	شده، مبهم بودن اطلاعات انتقالی بین واحدها و هم‌چنین دور بودن بسیاری از مدل‌های ارائه شده با
	واقعیت اتفاق افتاده در تبادل اطلاعات در این فرایند شناختی مغز، در این مقاله سعی شده است تا مدلی
	شناختی از این فرایند بر اساس رویکردهایی از مفاهیم محاسباتی و با تمرکز بر تعامل دوطرفه بین HPC
	و mPFC ارائه شود. مدل پیشنهادی در بر گیرنده‌ی مهم‌ترین نواحی مغزی فعال در ناوبری با استفاده از
	نقشه‌ی شناختی بوده و بر اساس نحوه‌ی عمل کرد و تعاملات بین نواحی مختلف مغزی، توصیف‌هایی را
	بر مبنای مفاهیم سنکرونی بین نوسان‌گرها ارائه می‌کند. در این مدل بر اساس فرایند سنکرونی در انتقال
	اطلاعات و ماهیت عمل کرد مبتنی بر قواعد واحد mPFC در کنترل واحدهای گیج‌گاهی میانی، ایده‌ی
	استفاده از مجموعه‌های نورونی وندریل و پایگاه قواعد کنترلی مطرح شده است. هم‌چنین با تحلیل و
	ارائه‌ی شواهد نشان داده شده است که این مدل در راستای توجیه اختلالات عمل کردی و شناختی در
	ناوبری و طراحی و پیش‌بینی اثر پروتکل‌های درمانی و توان‌بخشی در بیماری‌های مرتبط با این عمل کرد
	شناختی نظیر آلزایمر می‌تواند مفید و کاربردی باشد.

### \*نویسنده‌ی مسئول

نشانی: آزمایشگاه سایبرنتیک و مدل‌سازی سیستم‌های بیولوژیکی، دانشکده‌ی مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

کد پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳      تلفن: +۹۸-۲۱-۶۴۵۴۲۳۶۳

پست الکترونیک: towhidkhal@aut.ac.ir      دورنگار: +۹۸-۲۱-۶۴۵۴۲۳۶۳



## ۱- مقدمه

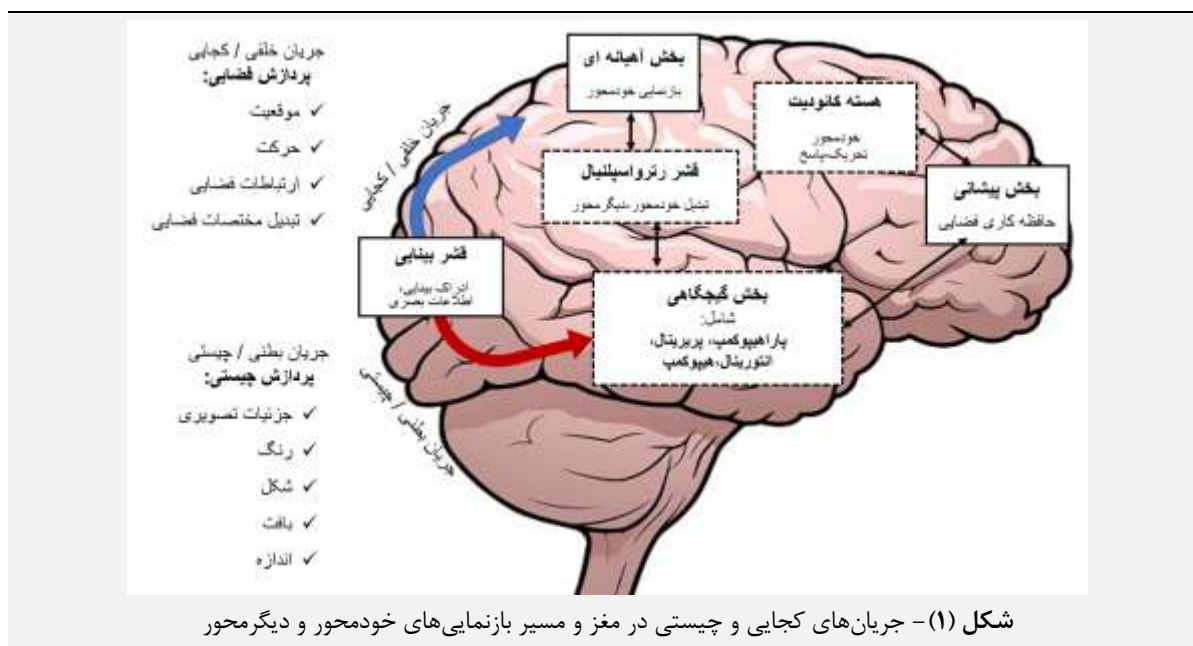
یکی از چالش‌ها در زمینه‌ی علم شناخت، پی بردن به این موضوع اساسی است که چگونه یک فعالیت ذهنی سطح بالا مانند حافظه می‌تواند از فعالیت نورون‌ها، سیناپس‌ها و لوب‌های مختلف در مغز حاصل شود. دست‌یابی به این دانش می‌تواند پلی بین توصیفات نوروفیزیولوژیکی و رفتاری در این زمینه باشد. علاوه بر این، فرضیه‌ای که سطوح سلولی و رفتاری را با هم پیوند می‌دهد، می‌تواند امکان پیش‌گویی را از یک سطح به سطح دیگر فراهم ساخته و توانایی مرتبطسازی نشانه‌های رفتاری به نتایج آسیب‌شناسی‌های مربوطه را افزایش دهد. بر این اساس بررسی حافظه یکی از گسترده‌ترین مباحث علم شناخت اعصاب محسوب می‌شود [۱].

یکی از انواع حافظه که جنبه‌های شناختی مختلفی را نیز در بر می‌گیرد، حافظه‌ی مکانی<sup>۱</sup> است. حافظه‌ی مکانی یک پردازش شناختی بوده که مسئول کد کردن، ذخیره‌سازی، بازشناسی و بازیابی اطلاعات مکانی در مورد محیط و اشیا و عوامل موجود در آن است [۲] که این امکان را به عامل می‌دهد تا مکان‌های مختلف و نیز ارتباطات فضایی بین اشیا را به خاطر آورده و مسیر خود را به سمت هدف پیدا کند. طبق تحقیقات انجام شده، این نوع حافظه عمدتاً به عمل کرد هیپوکمپ<sup>۲</sup> (HPC) و بخش گیج‌گاهی میانی<sup>۳</sup> (MTL) مرتبط است [۳]. مساله‌ی مهمی که به عنوان یک عامل اثرگذار در این حوزه مطرح شده،

نقشه‌ی شناختی<sup>۴</sup> است که اغلب حافظه‌های مکانی در قالب نقشه‌ی شناختی خلاصه و ذخیره می‌شود [۴]. مفهوم نقشه‌ی شناختی اولین بار در سال ۱۹۴۸ توسط ادوارد تالمن طی آزمایش ناوبری<sup>۵</sup> موش در ماز مطرح شده است. طبق این نظریه، مغز یک بازنمایی منحصر به فرد از محیط فضایی ساخته و از آن برای پشتیبانی از حافظه، راهنمایی اقدامات بعدی و حل مسائل جدید استفاده می‌کند [۵].

هدف این مقاله، مدل‌سازی فرایند ناوبری است. به طور خلاصه فرایند حرکت از محل فعلی (مبدا) به مقصد از پیش مشخص شده در مسیر حاصل از فرایند طرح‌ریزی، ناوبری نامیده شده که در این فرایند از نقشه‌ی شناختی استفاده می‌شود. نتایج تحقیقات نشان داده که نقشه‌ی شناختی توسط سلول‌های مکانی<sup>۶</sup>، شبکه<sup>۷</sup>، مرزی<sup>۸</sup> و جهت‌ساز<sup>۹</sup> در HPC و ساختارهای مرتبط ذخیره و عرضه شده که این بازنمایی‌ها هسته‌ی کدهای HPC که اطلاعات مربوط به جنبه‌های فضایی و غیرفضایی یک حافظه به آن می‌پیوندند را تشکیل می‌دهند [۶-۱۰].

در یک دسته‌بندی کلی می‌توان گفت فرایند ناوبری وابسته به دو بازنمایی خودمحور و دیگرمحور است (شکل ۱). در بازنمایی خودمحور، اطلاعات فضایی از محیط اطراف از طریق گیرنده‌های حسی به صورت خودمحور یا وابسته به نقطه‌ی دید به مغز رسیده و بازنمایی اطلاعات مکانی نسبت به چارچوب مرجعی با مبدا بدن فرد انجام می‌شود.

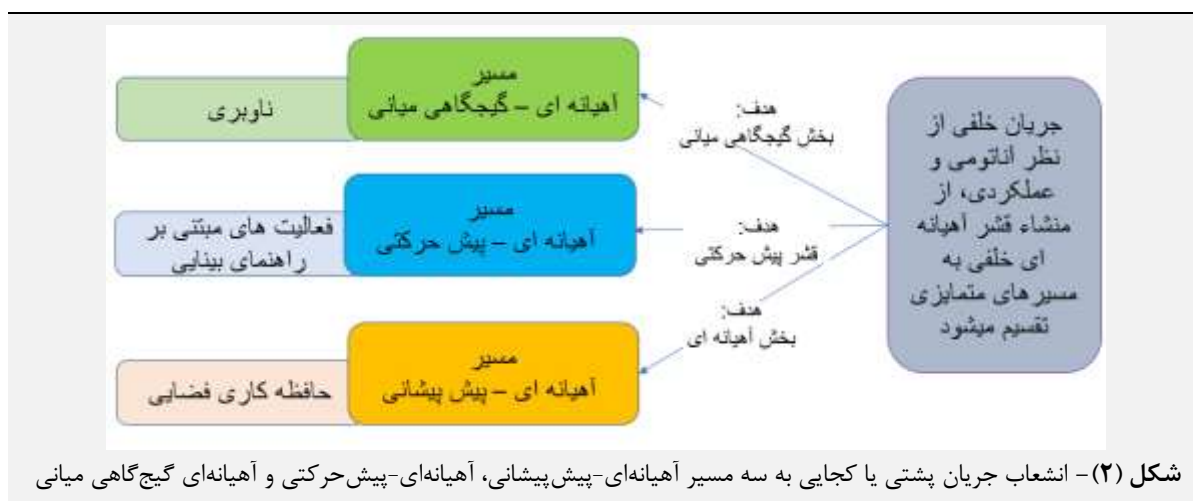
<sup>۶</sup> Place Cells<sup>۷</sup> Grid Cells<sup>۸</sup> Boundary Cells<sup>۹</sup> Head Direction Cells<sup>۱</sup> Spatial Memory<sup>۲</sup> Hippocampus (HPC)<sup>۳</sup> Medial Temporal Lobe (MTL)<sup>۴</sup> Cognitive Map<sup>۵</sup> Spatial Navigation

می‌دهند. مسیر این دو جریان اطلاعاتی در حافظه‌ی مکانی و فرایند ناوبری در شکل (۱) نشان داده شده است. جریان بطنی<sup>۲</sup> یا چپستی<sup>۴</sup> مسئول انتقال و یا پردازش اطلاعات اشیا شامل رنگ، بافت، شکل، اندازه و جزئیات تصویری است. اطلاعات ادراکی راجع به اشیا و وقایع ابتدا در مسیرهای ویژه‌ی انواع مودالیت‌های حسی پردازش شده، به چندین ناحیه‌ی انجمنی قشری در بخش گیج‌گاهی و آهیانه‌ای فرستاده شده، چپستی از پردازش‌های قشری حاصل شده و به پریرینال<sup>۵</sup> و انتورینال<sup>۶</sup> جانبی<sup>۶</sup> هدایت می‌شود [۱۲]. تمام نواحی جریان بطنی دارای اتصالات قوی با نواحی زیرقشری به ویژه پولوینار<sup>۷</sup>، کلاستروم<sup>۸</sup> و عقده‌ی قاعده‌ای<sup>۹</sup> هستند [۱۳]. جریان پشتی<sup>۱۰</sup> یا کجایی<sup>۱۱</sup> مسئول انتقال و یا پردازش اطلاعات مکانی شامل مکان، حرکت، تبدیل فضایی و ارتباطات فضایی است. این جریان، خود به سه شاخه تقسیم شده که هر جریان به نوعی در فرایند مسیریابی و ناوبری دخیل بوده و بسیار حائز اهمیت است (شکل ۲).

ارائه دهندگان تئوری نقشه‌ی شناختی ادعا می‌کنند که با توجه به کافی نبودن اطلاعات خودمحور و تجمیع مسیر<sup>۱</sup>، بازنمایی دیگرمحور که در حقیقت حاصل پردازش و ذخیره‌ی اطلاعات توسط سلول‌های مختلف HPC بوده برای یافتن یک مسیر صحیح به مقصدی که از نقطه‌ی شروع قابل رویت نیست مورد نیاز است. شواهد نشان دهنده‌ی نقش بخش‌های آهیانه‌ای و پیش‌پیشانی<sup>۲</sup> در فراهم ساختن بازنمایی‌های خودمحور و حافظه‌ی کوتاه‌مدت و نقش لوب مدیال تمپورال در فراهم کردن بازنمایی‌های دیگرمحور و حافظه‌ی بلندمدت است [۱۱].

### ۱-۱- نواحی مغزی فعال در ناوبری

در انسان و سایر پستان‌داران، بینایی اولین حالت ادراکی است که بزرگ‌ترین ناحیه‌ی قشر مغز را برای پردازش‌های خود در اختیار دارد. مسیرهایی وجود دارد که از قشر بینایی سرچشمه گرفته و جریان‌های کجایی و چپستی را در مغز تشکیل



امر باعث یادگیری و یادآوری دقیق‌تر و سریع‌تر می‌شود. از کدهای فضایی HPC و MEC در اتصال با سازوکارهای قشر پیشانی<sup>۱۷</sup> برای طرح‌ریزی مسیر<sup>۱۸</sup> در طول ناوبری استفاده می‌شود [۶]. با توجه به این که یکی از نوآوری‌های اصلی این مقاله در نظر گرفتن تعامل HPC و mPFC در مدل ناوبری بوده، در بخش بعد به تشریح نحوه‌ی تعامل این دو ناحیه پرداخته شده است.

اطلاعات درباره‌ی کجایی در یک رشته‌ی قشری مجزا شامل آهیانه‌ای خلفی<sup>۱۲</sup> و رترواسپلنیل<sup>۱۳</sup> پردازش شده که به پاراهیپوکمپ<sup>۱۴</sup> و MEC هدایت می‌شود. نواحی آهیانه‌ای خلفی، موقعیت اشیا نسبت به عامل را از اطلاعات حسی استخراج می‌کند. نواحی پشتی مغز مانند PHC و قشر RSC، ورودی‌های پایه‌ای را فراهم کرده که به نقشه‌ی شناختی اجازه می‌دهد به نشانه‌های محیطی تثبیت شده قلاب<sup>۱۶</sup> شود. این

<sup>۱۰</sup> Dorsal Stream

<sup>۱۱</sup> Where Stream

<sup>۱۲</sup> Posterior Parietal

<sup>۱۳</sup> Retrosplenial (RSC)

<sup>۱۴</sup> Parahippocampal (PHC)

<sup>۱۵</sup> Landmark (LM)

<sup>۱۶</sup> Landmark Enchoring

<sup>۱۷</sup> PFC

<sup>۱۸</sup> Rout Planning

<sup>۱</sup> Path Integration

<sup>۲</sup> Medial Prefrontal Cortex (mPFC)

<sup>۳</sup> Ventral Stream

<sup>۴</sup> What Stream

<sup>۵</sup> Perirhinal Cortex (PRC)

<sup>۶</sup> Lateral Entorhinal Cortex (LEC)

<sup>۷</sup> Pulvinar

<sup>۸</sup> Claustrum

<sup>۹</sup> Basal Ganglia

## ۱-۲- ارتباط HPC و mPFC در حافظه‌ی مکانی و ناوبری

در تکالیف حافظه‌ی کاری فضایی نشان داده شده است که آسیب PFC باعث تخریب آتش شدن سلول‌های مکانی HPC می‌شود. در مقابل، آسیب HPC فعالیت پیش‌بینی شده‌ی نورون‌های mPFC در تکالیف حافظه‌ی کاری را مختل می‌کند [۱۴]. این دو ناحیه به صورت خیلی جدی در کدگذاری و بازیابی حافظه‌های اپیزودیک مشارکت دارند [۱۴].

طبق مطالعات پیشین HPC در حافظه‌ی بلندمدت نقش قابل توجهی ایفا کرده و در عین حال حافظه‌ی کوتاه‌مدت نیز برای فرم‌های مشخص پردازش فضایی در زمان‌های بسیار کوتاه مورد نیاز است [۱۵].

شواهد اخیر نشان می‌دهد که وقایع جدید در قالب و زمینه‌های از ارتباطات خود با حافظه‌های موجود یاد گرفته می‌شوند. در HPC و mPFC، حافظه‌های مرتبط توسط کدهای تجمیع شده<sup>۱</sup> که وقایع تجربه شده در زمان‌ها و مکان‌های مختلف را به هم متصل می‌کند، بازنمایی شده که پایه‌ی نقشه‌های فضایی، زمانی و مفهومی تجارب را تشکیل می‌دهند [۱۶].

تصمیم‌گیری نیز از دیگر مسائل اصلی در مسالهی مسیریابی به منظور انتخاب مسیر درست در چندراهی‌ها است. این فرایند، نیازمند سنجش مزایا و معایب هر یک از گزینه‌های مد نظر بوده که این وابسته به حافظه‌های عمل‌های قبلی و خروجی‌های متناظر آن‌ها است. مطالعات نشان داده که HPC و PFC برای کد کردن، بازیابی اطلاعات و تصمیم‌گیری مورد نیاز است [۱۷]. بخش‌های CPN و PFC از طریق سنکرونیزاسیون نوسانی در باند تتا تعامل می‌کنند [۱۸]. فعالیت باند تتا در PFC با افزایش بار حافظه‌ی کاری افزایش می‌یابد [۱۹].

در یک مطالعه در سال ۲۰۱۳ ایچنباوم و هم‌کارانش نشان دادند که mPFC و MEC نقش‌های مجزایی در بازیابی بازنمایی‌های حافظه‌ی دارای زمینه در HPC ایفا می‌کنند، به طوری که mPFC کنترل زمینه‌ای مبتنی بر قواعد را روی بازیابی حافظه‌های مکان اشیا انجام می‌دهد در حالی که MEC اطلاعات لازم برای نقشه‌برداری HPC از زمینه‌ی فضایی شامل این که وقایع مهم کجا اتفاق افتاده‌اند را فراهم می‌کند [۱۲].

در ادامه‌ی این مطالعات در سال ۲۰۱۶ ایچنباوم و هم‌کارانش با بررسی دینامیک تعامل بین HPC و PFC در موش در هنگام استفاده از زمینه‌ی فضایی برای راهنمایی بازیابی حافظه‌ی اشیا، نشان دادند که با ورود به زمینه (مکانی که اشیا در آن قرار دارند) جریان اطلاعات زمینه‌ای از HPC به سمت PFC خواهد

بود. به محض شروع بررسی و نمونه‌برداری از اشیا، جهت جریان اطلاعاتی برعکس شده که در تطابق با این موضوع است که PFC روی بازیابی بازنمایی‌های حافظه‌های HPC متناسب با زمینه، کنترل دارد [۱۸]. در سال ۲۰۱۵ چرسی و برگز با تمرکز بر مشارکت سیستم‌های HPC و جسم مخطط<sup>۲</sup> و با بهره‌گیری از نتایج مطالعات پیشین، معماری شناختی ساده شده‌ای ارائه نمودند که شامل یادگیری تقویتی جسم مخطط بر پایه‌ی بازنمایی‌های حالات حسی و عملی، ارتباط‌های ضمنی اطلاعات حسی با بازنمایی‌های حالات دیگر محور در HPC و مقایسه و داوری خروجی‌های هر دو سیستم بر مبنای اطمینان/عدم قطعیت در mPFC می‌باشد [۲۰].

با وجود برطرف نمودن کاستی مدل‌های پیشین از طریق در نظر گرفتن نقش جسم مخطط، از اشکالات این مدل می‌توان به عدم اشاره به ارتباطات اثرگذار و اثرپذیر بین HPC و PFC و همچنین محدود کردن نقش PFC تنها بر داوری بین دو ورودی از جسم مخطط و HPC اشاره کرد که در این مطالعه سعی بر ارائه‌ی مدلی کامل‌تر شده است. به طور خلاصه نوآوری‌های این مطالعه را می‌توان به صورت زیر مطرح نمود.

۱- با تجمیع داده‌ها و اطلاعات بیولوژیک و شناختی پراکنده‌ی موجود در مطالعات قبلی، یک مدل شناختی کامل‌تر از نواحی و شبکه‌های مغزی فعال در فرایند ناوبری با استفاده از نقشه‌ی شناختی ارائه شده است. مدل شناختی ارائه شده در این مطالعه به طور خاص دارای بخش‌های جدید زیر نسبت به مدل‌های شناختی پیشین است.

- اضافه نمودن تعاملات بین HFC و PFC

- وارد کردن واحد حافظه‌ی کوتاه‌مدت و در نتیجه‌ی آن حافظه‌ی کاری فضایی

- وارد کردن ناحیه‌ی پیش‌پیشانی میانی در نقش کنترلر بازیابی حافظه‌ی نقشه‌ی شناختی در ناوبری

- لحاظ کردن مسیر اصلی فیدبک کنترلی بازیابی از پیش‌پیشانی میانی به پریرینال و سپس هیپوکمپ

۲- ارائه‌ی تحلیل‌ها و ایده‌هایی در خصوص متناظرسازی اجزای مدل شناختی ارائه شده با رهیافت‌های محاسباتی که در مطالعات آینده می‌تواند جهت پیاده‌سازی این مدل شناختی به صورت یک مدل محاسباتی راه‌گشا باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

با بهره‌گیری از بخش‌های قبل، در ادامه به تشریح مدل پیشنهادی این مقاله پرداخته شده است. به این منظور ابتدا به

<sup>۱</sup> Striatum

<sup>۲</sup> Integrated

فاز و فرایندهای سنکرونی محلی‌تر می‌توانند بر مبنای اندازه‌گیری توان مانند دسنکرونی و سنکرونی وابسته به رویداد (ERS و ERD) مورد مطالعه قرار گیرند [۲۱]. بر این اساس، پایه‌ی طراحی مدل پیشنهادی این پژوهش بر مبنای تئوری ارتباطات فرکانسی در کد کردن و بازیابی است.

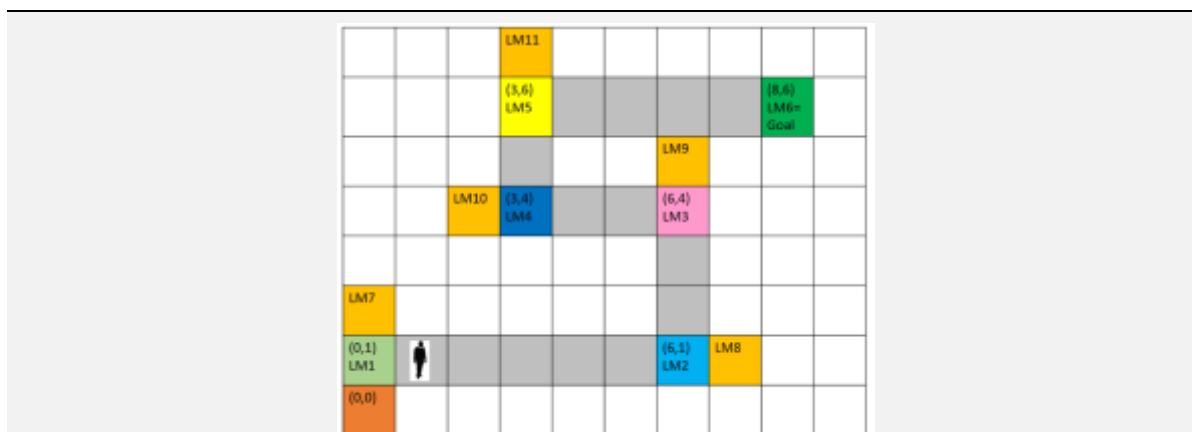
## ۲-۲- مدل شناختی ناوبری به سمت هدف غیرقابل رویت از نقطه‌ی آغاز

در این بخش از مطالعه با توجه به اطلاعات بیولوژیک و شناختی اثبات شده و موجود در مقالات از عمل کرد بخش‌های فعال مغز انسان در فرایند ناوبری با استفاده از نقشه‌ی شناختی، تمرکز اصلی روی ارائه‌ی یک مدل شناختی یا مفهومی از اجزای درگیر در فرایند ناوبری و نحوه‌ی تعاملات این اجزا با یکدیگر است. در این راستا کل مدل شناختی به صورت گام به گام و پیوسته از ورود اطلاعات تا پردازش نهایی و اجرا در یک حلقه‌ی عمل کرد کامل با استفاده از مدل‌های پیشنهادی تشریح شده و هم‌زمان با شاهد مطالعات پیشین، اعتبارسنجی شده است. هم‌چنین در انتهای این بخش، تحلیل‌ها و ایده‌هایی نیز جهت پیاده‌سازی و شبیه‌سازی این مدل شناختی به صورت یک مدل محاسباتی با قابلیت‌های بیش‌تر ارائه شده است (شکل ۳).

توضیح مکانیسم سنکرونی در تعاملات مغزی پرداخته و سپس مدل شناختی پیشنهادی این مقاله در راستای تکمیل و رفع نقایص مدل‌های پیشین از فرایند ناوبری با بیان ایده‌هایی جهت مدل‌سازی بخش‌های مختلف تشریح شده است. در ادامه نیز ایده‌ی استفاده از مدل وندریل برای مدل‌سازی بلوک‌های مسیر چپستی در فرایند ناوبری مطرح شده و نتایج اولیه‌ی مدل‌سازی محاسباتی شرح داده شده است.

## ۲-۱- نظریه‌ی ارتباطات مغزی بر اساس مکانیسم سنکرونی

یکی از مسائل محوری علوم اعصاب شناختی این است که چه فرایندهایی زمینه‌ساز ارتباطات درون و بین شبکه‌های عصبی مختلف می‌شود. فرضیه‌ی پایه این است که سنکرونی فاز نوسان نقش مهمی را در اتصال فرایند<sup>۱</sup> ایفا کرده که ممکن است یک نوع خاص از ارتباطات مقیاس‌بزرگ در نظر گرفته شود. یافته‌های مطالعات نشان می‌دهد که جفت شدن فاز تتا و آلفا، بازتاب دهنده‌ی فرایندهای کنترلی در سیستم بزرگ حافظه بوده و سنکرونی فاز تتا، دسترسی کنترل شده به حافظه‌ی اپیزودیک را فراهم می‌کند [۲۱]. طبق مطالعات، تجمیع‌های مقیاس‌بزرگ می‌توانند به وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های سنکرونی



شکل (۳) - مسیر فرضی حرکت عامل، ۶ نشانه‌ی اصلی (به صورت انتخابی) از مبدا تا مقصد در نظر گرفته شده با این فرض که از محل قرارگیری عامل در هر نشانه، نشانه‌ی بعدی قابل رویت بوده و نشانه‌ها نقاط کلیدی هستند که در آن‌ها جهت حرکت تغییر می‌کند (نقاط چرخش مسیر)، اعداد داخل پرانتز بیان‌گر مختصات مکانی نشانه نسبت به نقطه‌ی مبدا صفحه است، خانه‌های طوسی حدفاصل نشانه‌های اصلی، بیان‌گر مسیر درست و بهینه است، خانه‌های نارنجی مسیرهای نادرست بوده که در صورت عدم توجه عامل در محل نشانه‌های کلیدی به چرخش مسیر، به صورت اشتباه در آن‌ها قرار خواهد گرفت

تحت کنترل واحد کنترل (mpFC)، گام‌های بعد به سمت هدف را بازیابی کرده تا به عنوان داده‌ی مورد انتظار با داده‌های محیطی مقایسه شده و درست یا غلط بودن مسیر حرکت فرد به سمت هدف مشخص شود.

مجموعه‌ی فعالیت و کدگذاری سلول‌های مکانی، شبکه، مرزی، سرعت و جهت سر طی مرحله‌ی یادگیری، نقشه‌ی شناختی را تشکیل داده که این نقشه با به‌روزرسانی اطلاعات لحظه به لحظه‌ی سلول‌های جهت سر، مختصات محل فرد و نشانه‌ها،

<sup>۱</sup> Process Binding

صورت غیراختصاصی هر دو دسته‌ی بازنمایی‌های حافظه‌ی اشیای مرتبط و غیرمرتبط را بازیابی می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که HPC توانایی بازیابی حافظه‌ها حتی در غیاب ورودی از mPFC را داشته و نقش mPFC انتخاب حافظه‌ی متناسب برای آن زمینه یا محتوای مشخص است.

بر پایه‌ی این سناریو، رویدادهای اتفاق افتاده در یک زمینه علاوه بر نشانه‌های محیطی تعریف کننده‌ی آن زمینه، توسط Anterior/Ventral HPC پردازش می‌شوند [۱۲]. اطلاعات مکان فعلی و ترژکتوری محلی [۱۴] از طریق نگاشت و اتصال مستقیم به mPFC فرستاده شده که در آن‌جا مجموعه‌های نورونی<sup>۶</sup> در طول فرایندهای یادگیری، مجموعه‌ی قواعد زمینه‌ای<sup>۷</sup> مجزایی را ایجاد می‌کنند. به این ترتیب پس از فرایند یادگیری، وقتی عامل<sup>۸</sup> در همان زمینه گذاشته شده و اطلاعات پردازش شده‌ی حسی از بخش Anterior/Ventral HPC به صورت مستقیم به mPFC فرستاده شود، mPFC قواعد متناسب با آن زمینه را برای به کارگیری بازنمایی‌های متناسب با زمینه در بخش Dorsal/Posterior HPC اعمال کرده و در عین حال حافظه‌های غیرمرتبط با زمینه را سرکوب می‌کند [۱۲].

داده‌ها نشان می‌دهد که تعامل HPC-mPFC در طول کدگذاری و بازیابی حافظه‌ی اپیزودیک پویا بوده و این نواحی به صورت جدی در کدگذاری و بازیابی حافظه‌های اپیزودیک (در این مدل همان LandMark-ها) نقش داشته [۱۴] و یک مدل تعاملی دوطرفه بین HPC و mPFC وجود دارد که از کد کردن و بازیابی حافظه‌ی وابسته به محتوا پشتیبانی می‌کند [۱۲]. مطالعات EEG انسانی نشان داده که سنکرونی mPFC و HPC مربوط به بازخوانی حافظه<sup>۹</sup> است [۱۴].

نتایج مطالعات نشان داده که فعالیت باند تتا به طور خاص در زمان مشاهده‌ی نشانه‌ها افزایش یافته که می‌تواند در برنامه‌ریزی مسیر به سمت مکان هدف (زمانی که کدگذاری و بازیابی اطلاعات فضایی مورد نیاز است) مورد استفاده قرار گیرد. به صورت مشابه، افزایش و تقویت تتا در طول ناوبری به سمت هدف در مقایسه با ناوبری بی‌هدف، بیان‌گر نقش نوسانات تتا در بازیابی حافظه‌ی فضایی و برنامه‌ریزی مسیر<sup>۱۰</sup> است [۲۲]. چنین افزایشی هم‌چنین در ناوبری مسیرهای طولانی‌تر در مقایسه با مسیرهای کوتاه‌تر مشاهده شده که به دلیل نیاز به بازیابی اطلاعات فضایی بیش‌تر و برنامه‌ریزی مسیر طولانی‌تر

اطلاعات ادراکی راجع به اشیاء و وقایع ابتدا در مسیرهای ویژه‌ی انواع مدالیت‌های حسی پردازش شده و جریان‌های چپستی و کجایی را تشکیل می‌دهند. جریان اطلاعات چپستی به PRC و LEC هدایت شده، اطلاعات کجایی پس از پردازش در نواحی آهیانه‌ای خلفی و RSC به PHC و MEC هدایت شده و سپس این دو رشته در HPC هم‌گرا می‌شوند. در HPC در بخش پشتی<sup>۱</sup> (در حیوانات) یا خلفی<sup>۲</sup> (در انسان‌ها) جمعیت‌های نورونی، اشیای خاص و مکان‌هایی که در زمینه اتفاق افتاده را ذخیره می‌کنند. در مقابل، جمعیت‌های نورونی در بخش بطنی<sup>۳</sup> (در حیوانات) یا قدامی<sup>۴</sup> (در انسان‌ها) HPC، وقایع داخل زمینه را به هم وصل کرده و به این ترتیب بین زمینه‌های مختلف تمایز ایجاد می‌کنند [۱۲].

شواهد زیادی مبنی بر وجود جریان اطلاعات دوطرفه بین mPFC و HPC وجود داشته که در آن وقایع آغاز کننده‌ی کنترل PFC روی بازیابی حافظه در HPC، نشات گرفته از ventral/anterior HPC بوده که اطلاعات از آن‌ها به صورت مستقیم به mPFC فرستاده شده و mPFC بازیابی نمایه‌های جسم خاص را از طریق اتصالات قوی مخصوص به قشر PRC و LEC تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۲، ۲۲]. بخش HPC به عنوان تشکیل دهنده و بازیابی کننده‌ی حافظه‌های خاص شناخته شده در حالی که PFC ویژگی‌های حافظه‌های مرتبط را جمع‌بندی کرده که زمینه‌ی مجموعه‌ای از تجارب پیوسته را تشکیل می‌دهد مانند مکان مشترکی که در آن چندین واقعه اتفاق افتاده یا مجموعه‌ی مشترکی از تکالیف قوانین در حال اجرا که تصمیمات چند حافظه‌ای<sup>۵</sup> را مدیریت کرده و بر آن حاکم است. به این ترتیب وقتی PFC به یک زمینه یا محتوا اشاره کند مشاهده می‌شود که حافظه‌های مرتبط با آن زمینه یا محتوا در HPC را علاوه بر سایر نواحی مغزی بایاس کرده و حافظه‌های غیرمرتبط را خاموش می‌کند. در واقع mPFC از این بازنمایی‌های زمینه‌ای برای کنترل بازیابی حافظه‌های جزئیات در HPC استفاده می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که جمعیت‌های نورونی در mPFC به صورت اختصاصی در زمینه‌های رفتاری مختلف آتش شده و این الگوهای فعالیت نورونی mPFC، پیش‌بینی کننده‌ی سوئیچ بین یادآوری استراتژی‌های مکان و پاسخ در دامنه‌ی حافظه‌ی مکانی است. زمانی که mPFC غیرفعال شود، نورون‌های Dorsal HPC به

<sup>۶</sup> Neural Ensembles

<sup>۷</sup> Contextual

<sup>۸</sup> Agent

<sup>۹</sup> Memory-Recall

<sup>۱۰</sup> Rout Planning

<sup>۱</sup> Dorsal

<sup>۲</sup> Posterior

<sup>۳</sup> Ventral

<sup>۴</sup> Anterior

<sup>۵</sup> Multiple Memory Decisions

مربوط به گام و زیرهدف بعدی (LM-Code(next step)) در قالب توالی یک قانون ذخیره شده و مجموعه‌ی این گام‌ها از مبدا به مقصد در قالب مجموعه‌ی قواعد به صورت اختصاصی برای هر زمینه و مسیر در mPFC وجود دارد. به این ترتیب در هر گام، با توجه به اطلاعات محیطی ارسالی از HPC به mPFC و بر اساس میزان توجه عامل، در تطبیق با قانون ذخیره شده‌ی مربوطه، کد مربوط به نشانه و گام مورد انتظار بعدی از قانون استخراج شده و به HPC ارسال می‌شود تا حافظه‌ی ذخیره شده‌ی متناظر با آن کد در HPC بازخوانی شود.

این بازخوانی اطلاعات متناظر با کد ارسالی از mPFC از روی نقشه‌ی شناختی ذخیره شده در حافظه‌ی بلندمدت انجام شده که در بر گیرنده‌ی مکان نشانه‌ها در محیط علاوه بر ارتباطات و فواصل بین نشانه‌ها از منظر پیمایش است [۲۵]. با این توضیح، در این مقاله نقشه‌ی شناختی ذخیره شده در حافظه به صورت یک ماتریس با ساختار رابطه‌ی (۲) در نظر گرفته شده است.

$$\begin{bmatrix} X - LM(next step) & Y - LM(next step) \\ W - LM(next step) & X - motor & Y - motor \end{bmatrix} \quad (2)$$

در این رابطه X-LM و Y-LM مختصات محل نشانه‌ی بعدی، W-LM فرکانس نوسان کدکننده‌ی ماهیت نشانه‌ی مورد انتظار بعدی و X-motor و Y-motor مختصات محل حضور عامل بوده و تمام ارتباطات و فواصل در مختصات خودمحور و دیگرمحور با استفاده از این اطلاعات در مراکز محاسباتی مغز محاسبه شده و در درک لحظه به لحظه‌ی فضا و فرمان حرکتی مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین رابطه‌ی (۲) نشان دهنده‌ی نقشه‌ی شناختی ذخیره شده و اطلاعات در حال پردازش مکانی در بلوک حافظه‌ی مکانی و پاسخ (Spatial and Response Memory) در شکل (۴) است.

پس از تطبیق کد ارسالی نشانه‌ی مورد انتظار بعدی از mPFC با نقشه‌ی شناختی، اطلاعات بازخوانی و یادآوری شده با اطلاعات ورودی از محیط از مسیر چپستی مقایسه می‌شود. اگر عامل در حال انتخاب مسیر مغایر باشد، در اثر تناقض به وجود آمده، پیام مسیر اشتباه صادر شده تا عامل به دنبال تصحیح مسیر و ادامه‌ی ناوبری به سمت هدف باشد. در صورت تطبیق نشانه‌ی مورد انتظار بعدی (حاصل از پیش‌بینی واحد کنترل و یادآوری آن از روی نقشه‌ی شناختی) با اطلاعات وارد شده از محیط، اطلاعات نشانه‌ی بعدی شامل مکان و چپستی و نیز اطلاعات مکان فعلی عامل در بافر مربوط به زیرهدف بعدی حافظه‌ی کوتاه‌مدت بارگذاری شده و اطلاعات قبلی آن به بافر

است. توان تتای بالاتر در محیط‌های آشنا ممکن است مربوط به این حقیقت باشد که اطلاعات فضایی بیش‌تری در دسترس بوده که می‌تواند برای هدایت حرکت بازیابی شود [۲۳].

مطالعات چند دهه‌ی اخیر هم‌چنین نشان داده که هم در انسان و هم در حیوانات، فعالیت دو ناحیه‌ی mPFC و HPC برای بازیابی زمینه حیاتی و ضروری است به طوری که قطع ارتباط در شبکه‌ی HPC-mPFC منجر به نقص عمل کرد در بازیابی حافظه‌هایی که نیازمند حافظه‌های مرجع یا اطلاعات زمینه‌ای هستند، می‌شود. این نتایج موید این دیدگاه بوده که اتصال بین این دو ناحیه، پشتیبان بازیابی زمینه‌ی<sup>۱</sup> است [۱۴]. بازیابی زمینه‌ی هم‌چنین برای سازمان‌دهی رفتارهای مربوط به حافظه‌های احساسی ضروری است [۱۴]. اختلال در سنکرونی HPC-mPFC در اختلال عمل کرد حافظه‌ی کاری و بیماری‌های روانی مانند شیذوفرنی، PTSD، افسردگی و ... مشاهده شده و دخیل است [۱۴]. هم‌چنین طبق مقاله‌ی [۲۴] افزایش فعالیت vHPC-mPFC در اوتیسم مشاهده شده است.

بخش PFC یک ساختار حیاتی و پشتیبان حافظه‌ی کاری و توابع اجرایی بوده که فعال شدن آن به صورت کلی در طول تکلیف ناوبری است [۲۲] خصوصاً زمانی که عامل مجبور بوده برای رسیدن به هدف، خط سیر را منحرف کند [۲۵]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قواعد ذخیره شده در mPFC در نشانه‌های موثر که چرخش و تغییر مسیر در آن‌ها اتفاق می‌افتد شکل گرفته و با رسیدن به آن‌ها فرمان صادر می‌شود.

اطلاعات راجع به ترتیب زمانی رویارویی با نشانه‌ها در طول ناوبری برای تشکیل خطوط ارتباطی<sup>۲</sup> بین نشانه‌های متعاقب<sup>۳</sup> و پاسخ‌های رفتاری انجمنی<sup>۴</sup> مورد نیاز است. طبق مطالعات، در طول تکلیف مسیریابی که نیازمند به خاطر آوردن ترتیب توالی نشانه‌ها بوده، فعالیت Medial Frontal Gyrus مشاهده شده و قشر پیشانی در به خاطر سپاری ترتیب زمانی نشانه‌ها نقش داشته است [۲۵]. طبق این یافته‌های محققان، نظریه‌ی این مقاله این است که ترتیب رویارویی در قواعد شکل گرفته حین یادگیری، در قالب رابطه‌ی (۱) در ناحیه‌ی پیش‌بینی (بلوک کنترل mPFC در شکل ۴) ذخیره می‌شود.

$$\begin{bmatrix} LM - Code(here) & LM - Code(Goal) \\ Attention level & LM - Code(next step) \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این راستا طبق رابطه‌ی (۱) در هر مرحله با توجه به موقعیت فعلی عامل (LM-Code(here)) و نشانه‌های حاضر در میدان دید او و با توجه به هدف نهایی مسیر (LM-Code(goal))، کد

<sup>۳</sup> Subsequent Landmarks

<sup>۴</sup> Associative Behavioral Responses

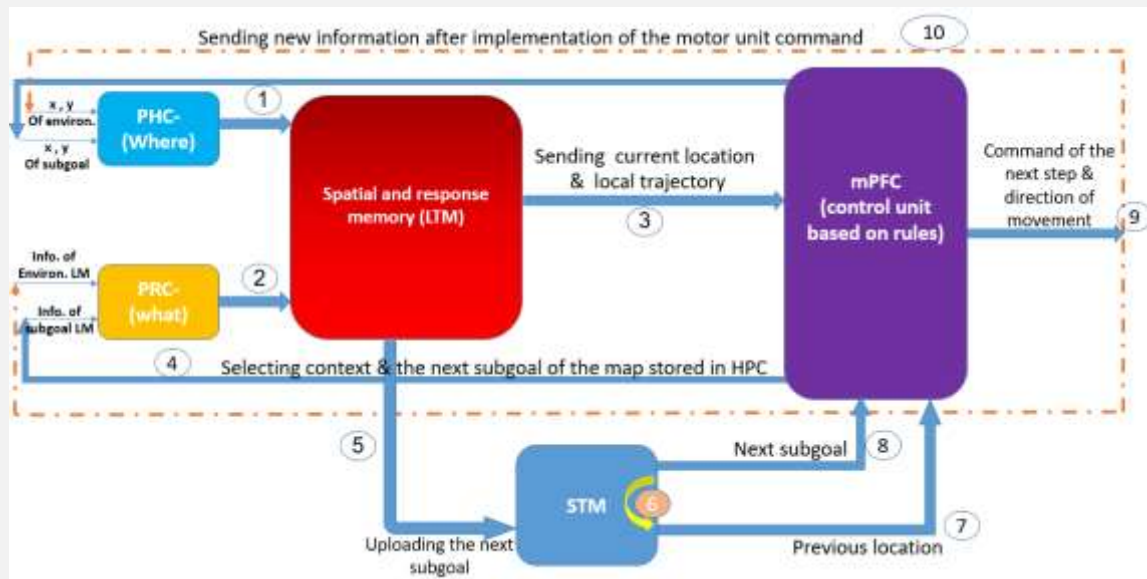
<sup>۱</sup> Contextual Retrieval

<sup>۲</sup> Associative Links



ارسال شود. پس از اجرای فرمان حرکتی توسط عامل، اطلاعات مکان جدید عامل و نشانه‌های محیطی، وارد ورودی‌های حسی شده و این چرخه تا رسیدن به هدف ادامه می‌یابد.

مکان قبلی منتقل می‌شود که این اطلاعات در اختیار حافظه‌ی کاری فضایی و واحد کنترل قرار گرفته تا با اتصال آن‌ها به حافظه‌های پاسخ، فرمان گام بعدی و جهت آن به واحد حرکتی



**شکل (۴) - مدل شناختی پیشنهادی، اطلاعات محیطی از کجایی عامل و کجایی و چیستی اشیاء از مسیرهای کجایی و چیستی به پاره‌پیچ‌کمپ و پری‌رینال می‌رسد.** این اطلاعات پس از پردازش‌های اولیه در این نواحی از مسیرهای ۱ و ۲ وارد ساختارهای مربوط به حافظه‌ی مکانی و پاسخ می‌شود. سلول‌های مکانی، شبکه و جهت سر در این ناحیه قرار دارند. در ادامه پس از پردازش و تجمیع اطلاعات مکانی در این ناحیه، اطلاعات مربوط به مکان فعلی و ترژکتوری محلی از مسیر ۳ وارد PFC به عنوان واحد کنترل بازیابی اطلاعات می‌شود. در آن‌جا اطلاعات مکانی با پایگاه قواعد شکل گرفته در mPFC در زمان یادگیری، تطبیق داده شده و از مجموعه‌ی اطلاعات ورودی، زمینه و کد آدرس نشانه‌ی مورد انتظار بعدی از mPFC از مسیر ۴ و از طریق ناحیه‌ی پری‌رینال به محل ذخیره‌ی نقشه‌ی شناختی (هیپوکامپ) فیدبک می‌شود. در HPC این کد با نقشه‌ی شناختی تطبیق داده شده و نشانه‌ی مورد انتظار بعدی در حافظه یادآوری شده و با اطلاعات ورودی از محیط از مسیر چیستی مقایسه می‌شود. چنانچه مغایرت وجود داشته باشد، در اثر تناقض به وجود آمده پیام مسیر اشتباه صادر شده تا عامل به دنبال تصحیح مسیر و ادامه‌ی ناوبری به سمت هدف باشد. در صورت تطبیق نشانه‌ی مورد انتظار بعدی (حاصل از پیش‌بینی واحد کنترل و یادآوری آن از روی نقشه‌ی شناختی) با اطلاعات وارد شده از محیط، اطلاعات نشانه‌ی بعدی شامل مکان و چیستی و همچنین اطلاعات مکان فعلی عامل از مسیر ۵ در بافر مربوطه به زیرهدف بعدی حافظه‌ی کوتاه‌مدت بارگذاری شده و اطلاعات قبلی موجود در آن از مسیر ۶ به بافر مکان قبلی منتقل می‌شود که این اطلاعات از مسیرهای ۷ و ۸ در اختیار حافظه‌ی کاری فضایی و واحد کنترل قرار می‌گیرد تا با اتصال این اطلاعات به حافظه‌های پاسخ، فرمان گام بعدی و جهت آن به واحد حرکتی ارسال شود. پس از اجرای فرمان حرکتی توسط عامل، اطلاعات مکان جدید عامل و نشانه‌های محیطی از مسیر ۱۰ وارد ورودی‌های حسی شده و این چرخه تا رسیدن به هدف ادامه می‌یابد

بازشناسی می‌شود. در صورتی که اطلاعات حسی با هیچ‌کدام از آیتم‌های موجود در حافظه رزونانس نکند، فرایند یادگیری آغاز می‌شود [۲۶].

اطلاعات حسی ارائه شده سعی می‌کند منابع پردازشی مغز را در سطوح مختلف تحت تاثیر قرار دهد. در مراکز پردازشی سطح پایین بینایی و شنوایی، خوشه‌های مختلفی از نورون‌ها وجود دارد که هر کدام به یکی از ویژگی‌های محرک پاسخ‌گو هستند. به این ترتیب می‌توان گفت که مجموعه‌هایی از این خوشه‌های نورونی در مراکز پردازشی سطح پایین به صورت مجزا به

در ادامه به تشریح نتایج مدل‌سازی بلوک دریافت و پردازش اطلاعات چیستی پرداخته شده است.

## ۲-۲-۱- مدل‌سازی جریان چیستی با تئوری رزونانس تطبیقی

طبق تئوری رزونانس تطبیقی<sup>۱</sup> (ART) که در بحث بازشناسی الگو اولین بار توسط کارپنتر و گراسبرگ مطرح شده است، اطلاعات حسی با اطلاعات مشابه در حافظه سنکرون شده، در حالت رزونانس قرار گرفته و به این ترتیب آن اطلاعات

<sup>۱</sup> Adaptive Resonance Theory (ART)

اطلاعات به صورت فرکانسی در مغز، از رابطه‌ی وندریل با ورودی رابطه‌ی (۴) استفاده شده که در آن  $B_1$  ضریب کوپلینگ بین ورودی نوسانی وارد شونده و واحدهای عصبی است.

$$stimulus = B_1 \times A_s \sin(\omega_s t) \quad (4)$$

طبق این مدل، میدان گیرندگی در واقع فرکانس نوسان مجموعه‌ی نورونی بوده و در مراحل پردازش، نورون‌هایی که فرکانس نوسان آن‌ها نزدیک فرکانس کد شده‌ی تحریک ورودی (نشانه‌های مسیر ناوبری) است، بیش‌تر از سایر نورون‌ها به آن پاسخ می‌دهند [۳۱].

طبق توضیحات بالا و نتایج حاصل از مدل‌سازی در شکل (۵)، با رسیدن عامل به هر یک از نشانه‌های ۱ تا ۶ مشخص شده در شکل (۳) (نقشه‌ی مسیر)، واحد مربوطه با تابع فعالیت رابطه‌ی (۵) فعال شده و فعالیت زمینه‌ای سایر واحدها زیر آستانه است.

$$\begin{cases} \dot{X}_l = (\lambda_l - Y_l^2)X_l - P_l^2 Y_l + stimulus \\ \dot{Y}_l = X_l \end{cases} \quad (5)$$

فعالیت فرکانسی مجموعه‌های نورونی در این حالت نیز در شکل (۶) نشان داده شده است. تفاوت در دامنه‌ی پوش فعالیت در شکل (۵) به جهت تاثیر مقدار عددی فرکانس مربوط به نشانه در رابطه‌ی وندریل با ورودی (رابطه‌ی ۵) بوده اما نکته‌ی مهم عبور از عدد ۱ به عنوان آستانه است. مقادیر پارامترهای معادله‌ی وندریل در مدل پیشنهادی رابطه‌ی (۵) برای بلوک پردازش اطلاعات چيستی به صورت زیر است.

$$\lambda = 0.2, B_{1, \dots, 6} = 1.5, A_s = 1, P_{1, \dots, 6} = 4, 5, 6, 7, 8, 9, \omega_{s_{1, \dots, 6}} = 4, 5, 6, 7, 8, 9 \quad (6)$$

هم‌چنین فعالیت فرکانسی و پوش دامنه‌ی فعالیت مجموعه‌های نورونی مسیر چيستی برای دو مقصد دیگر از شکل (۳) با مسیرهای متفاوت در شکل (۷) نشان داده شده است. فرکانس‌های ۴ تا ۹ در شکل (۷) معادل نشانه‌های اصلی ۱ تا ۶ در شکل (۳) است.

از ویژگی‌های ناوبری با استفاده از نقشه‌ی شناختی این است که فرد از هر نقطه از نقشه‌ی شناختی ذخیره شده در حافظه به عنوان نقطه‌ی شروع به هر نقطه‌ی دیگر از همان نقشه به عنوان مقصد می‌تواند طرح‌ریزی مسیر و ناوبری انجام دهد (نه صرفاً همیشه از یک مبدا ثابت به یک مقصد ثابت). با توجه به این نکته، نتایج شبیه‌سازی‌های ارائه شده در شکل (۷) توانایی مدل پیشنهادی برای پردازش اطلاعات چيستی در ناوبری در زمینه‌های مختلف از نقشه‌ی شناختی را نشان می‌دهد.

نشانه‌های مسیر در طول ناوبری پاسخ می‌دهند. بر این اساس در مسیر فرضی این مقاله (شکل ۳)، شش نوسان‌گر وندریل (به صورت انتخابی) معادل با شش نشانه‌ی اصلی (LM1-LM6) در نظر گرفته شده است. به این ترتیب سایر نشانه‌هایی که در مسیر انتخابی برای ناوبری به سمت هدف، از قبل در نقشه‌ی مربوط به این مسیر ذخیره نشده باشند به عنوان عوامل غیرهدف یا اغتشاش در نظر گرفته خواهند شد.

هر ویژگی از یک نشانه را می‌توان با یک فرکانس، معادل و مدل کرد اما جهت ساده‌سازی در مدل محاسباتی، نشانه‌ها با فرکانس غالب طیف و در واقع هارمونیک اصلی کد می‌شوند. هم‌چنین فرض مساله بر این است که یادگیری قبلاً انجام شده و اطلاعات در قالب نقشه‌ی شناختی ذخیره شده است.

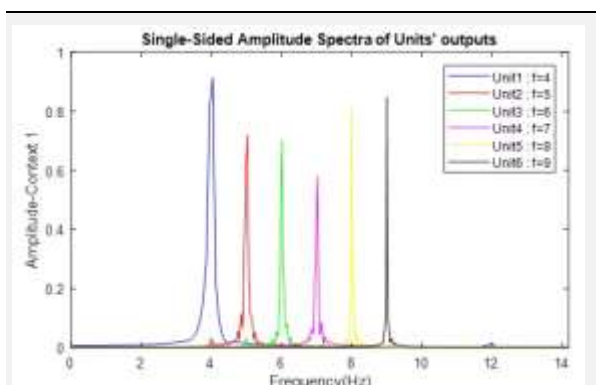
دلایل انتخاب معادله‌ی وندریل به شرح زیر است. ۱- از بین نوسان‌گرهای مختلف معرفی شده در مطالعات متعدد، وندریل از جمله نوسان‌گرهایی بوده که برای مدل کردن نوسانات نورونی استفاده شده است.

۲- در معادله‌ی وندریل از جزئیات فعالیت‌های شیمیایی و الکتریکی اجزای مختلف مجموعه‌های نورونی صرف نظر شده و نحوه‌ی نوسانات نورونی با یک دید سراسری مدل می‌شود. از این رو استفاده از وندریل نسبت به سایر مدل‌های نوسان‌گر مورد استفاده برای مدل کردن فعالیت نورون، مانع از پیچیده شدن بیش از اندازه‌ی مدل کلی پیشنهادی می‌شود. اگرچه ممکن است استفاده از مدل‌های دقیق‌تر و پیچیده‌تر بر حسب نیاز بتواند غنای بیش‌تری به مدل دهد.

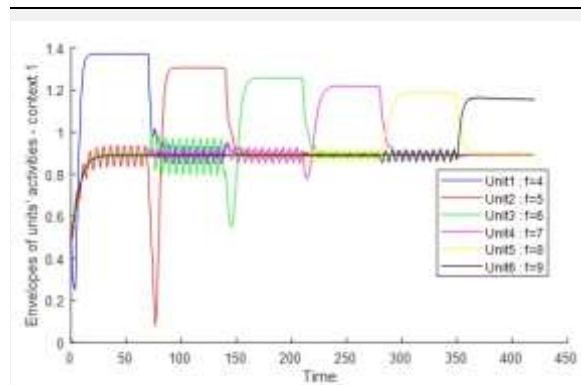
در اسیلاتور وندریل در رابطه (۳)،  $X$  و  $Y$  به ترتیب متغیر حالت و خروجی مجموعه‌ی نورونی هستند. زمانی که مقدار  $\lambda$  کوچک‌تر از صفر باشد، نوسانی در رفتار مجموعه وجود نداشته و زمانی که مقدار  $\lambda$  بین صفر و یک باشد، مجموعه‌ی نورونی به ترتیب با فرکانس  $P$  و دامنه‌ی  $2\sqrt{\lambda}$  نوسان خواهد کرد [۲۷].

$$\begin{cases} \dot{X}_l = (\lambda_l - Y_l^2)X_l - P_l^2 Y_l \\ \dot{Y}_l = X_l \end{cases} \quad (3)$$

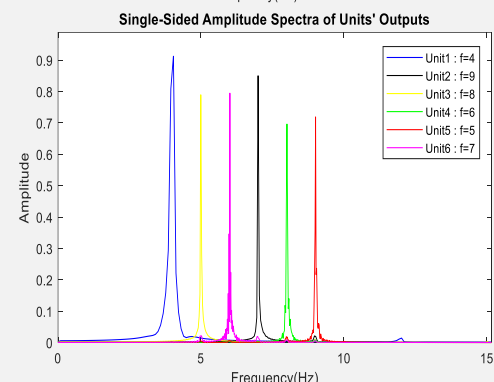
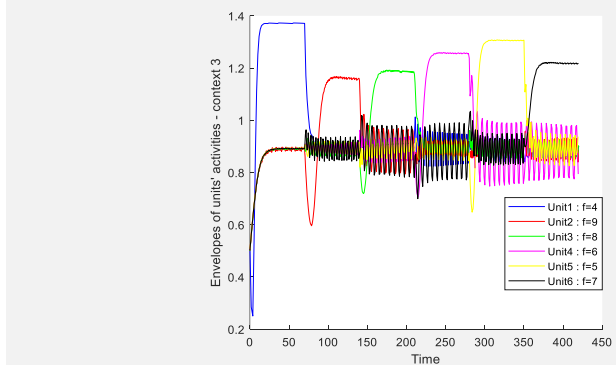
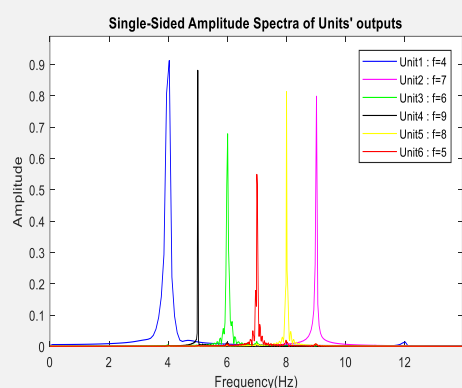
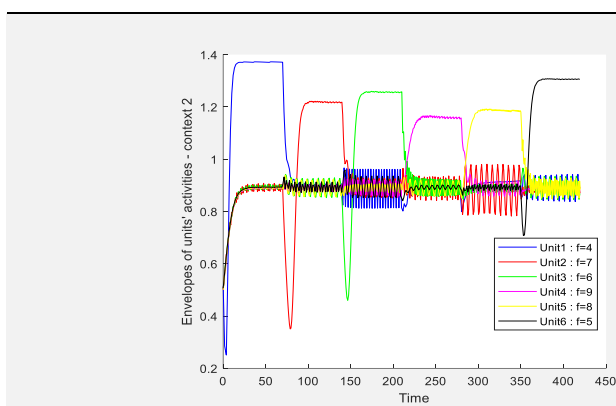
طبق رابطه‌ی (۳) مشاهده می‌شود که نوسان‌گر وندریل یک نوسان‌گر ذاتی است و ورودی ندارد. در این مقاله مانند مرجع [۲۸] از نوسان‌گر وندریل به عنوان یک مجموعه‌ی نورونی که به نشانه‌های ورودی پاسخ می‌دهد استفاده شده است. بنابراین با در نظر گرفتن هر نشانه‌ی مسیر به عنوان یک تحریک ورودی در قالب یک موج سینوسی با دامنه‌ی  $A_s$  به عنوان شدت تحریک (رویداد) و فرکانس  $\omega_s$  به عنوان نمایشی از ویژگی‌های تحریک، طبق نظریه‌های [۲۹] و [۳۰] مبنی بر کد شدن



شکل (۶) - طیف فرکانسی پاسخ واحدهای نورونی به نشانه‌ها به عنوان عوامل تحریک که فرکانس آن‌ها به فرکانس ذاتی واحد نورونی متناظر نزدیک است



شکل (۵) - پوش پاسخ واحدهای نورونی به تحریک‌های ورودی با فرکانس ذاتی نزدیک به فرکانس ذاتی هر واحد نورونی



شکل (۷) - ستون راست: طیف فرکانسی پاسخ واحدهای نورونی به نشانه‌ها برای زمینه‌های ۲ و ۳ با مسیرها و مقاصد متفاوت، ستون چپ: پوش دامنه‌ی پاسخ واحدهای نورونی به تحریک‌های ورودی برای زمینه‌های ۲ و ۳ با مسیرها و مقاصد متفاوت، فرکانس‌های ۴ تا ۹ در این شکل معادل نشانه‌های اصلی ۱ تا ۶ در شکل (۳) بوده که ترتیب آن‌ها در سه زمینه‌ی ۱، ۲ و ۳ متفاوت است،  $A_s=1, B_{1...6}=1/5, \lambda=0/2$

تعامل نواحی mPFC و HPC و نقش اساسی mPFC در کنترل بازیابی حافظه در HPC وجود دارد که یکی از موارد تعامل اساسی این دو ناحیه در تکلیف ناوبری است. در مطالعات قبل صرفاً به بحث فعالیت هم‌زمان برخی نواحی در طول تکلیف خاص و یا سنجش عمل‌کرد شناختی یک واحد بر اساس خروجی یک آزمایش خاص [۳۲-۳۵] پرداخته شده و ترافیک داده‌ها بین نواحی فعال در این فرایند به صورت مشخص و جامع موجود نیست. هم‌چنین در بحث مدل‌سازی، مدل‌های زیادی

### ۳- یافته‌ها و بحث

در این مقاله با مطالعات گسترده روی مجموعه‌ی مدل‌های موجود در بحث ناوبری، مدلی شناختی برای ناوبری با هدف بر طرف کردن کاستی‌های مدل‌های پیشین ارائه شده است. این مدل، حاصل مطالعه‌ی جنبه‌های مختلف مساله‌ی ناوبری بوده و تایید صحت عمل‌کرد این بخش‌ها با استناد بر شواهد و مستندات موجود در مقالات انجام شده است. شواهد زیاد و محکمی در حوزه‌ی تصویربرداری و ثبت الکتریکی مینی بر

توالی گام‌های قبلی دچار اختلال شده و بیمار دچار آلزایمر قادر به یادآوری و تصمیم درست در نقاط تقاطع (نشانه‌های کلیدی) برای انتخاب جهت درست نبوده و مسیر را گم می‌کند. هم‌چنین پارامتر B که ضریب کوپلینگ بین محرک ورودی و مجموعه‌ی نورونی مربوطه است، در واقع حساسیت مجموعه‌ی نورونی به ورودی را مشخص می‌کند. طبق مطالعات، سیستم کنترل توجه در تنظیم این حساسیت نقش داشته و این سیستم با تنظیم سطح نوروترنسمیترهای مصرفی نواحی کنترل توجه مانند دوپامین عمل کنترل توجه را انجام می‌دهد. سیستم کنترل توجه نیز از مراکز است که در بیماران دچار آلزایمر به شدت دچار آسیب شده و این اختلال با تغییرات مقدار پارامتر B در مدل این مقاله خود را نشان می‌دهد به طوری که افزایش مقدار B باعث افزایش سرعت سنکرونی و کاهش زمان واکنش واحدهای پردازش‌گر به محرک ورودی می‌شود. از دیدگاه بیولوژیکی، B می‌تواند به عنوان یک ناقل شیمیایی یا هر گونه انرژی که برای ایجاد سنکرونی یا دسنکرونی بین مجموعه‌های نورونی استفاده می‌شود در نظر گرفته شود. در نتیجه افزایش آن نمی‌تواند تا هر مقدار دل‌خواهی ادامه پیدا کرده و باید یک قید اشباع برای آن در نظر گرفته شود.

مدل شناختی ارائه شده در این مقاله و نظریه‌های ارائه شده، در آینده جهت مدل‌سازی محاسباتی آن برای تطبیق حداکثری با واقعیت عمل‌کرد مغز، قابلیت استفاده در توسعه‌ی مباحث نقشه‌برداری مغز و بررسی و پیش‌بینی اثر مداخلات دارویی و غیردارویی (نظیر تکالیف شناختی و تحریک‌های الکتریکی و مغناطیسی فراجمه‌ای) قابل بررسی است. تحلیل‌ها و ایده‌ها جهت پیاده‌سازی و شبیه‌سازی این مدل شناختی به شکل یک مدل محاسباتی با قابلیت‌های بیشتر به شرح زیر ارائه شده که می‌تواند در مطالعات آینده مد نظر قرار گیرد.

۱- بلوک دریافت و پردازش اولیه‌ی اطلاعات کجایی (لوب آهیانه‌ای و در ادامه پاراهیبوکمپ)

ره‌یافت محاسباتی پیشنهادی: در نظر گرفتن یک شبکه‌ی قطبی با تعداد نورون دل‌خواه بسته به رزولوشن مورد نظر به صورتی که هر نورون به وجود یک نشانه‌ی مکانی در فاصله و جهت خاصی نسبت به عامل حساس بوده و با قرارگیری نشانه در آن مختصات، آتش می‌کند. برای مدل نورون می‌توان از نورون RBF استفاده کرد.

۲- بلوک دریافت و پردازش اطلاعات چپستی (پری‌رینال)

ره‌یافت محاسباتی پیشنهادی: مدل‌سازی با استراتژی سنکرونی فرکانسی و مجموعه‌های نورونی حساس به نشانه‌ها. این بخش به تفصیل در مقاله تشریح شده است.

برای طرح‌ریزی مسیر و بعضاً جنبه‌هایی از ناوبری ارائه شده که غالباً این ارتباطات و ساختارها به صورت جعبه‌ی سیاه و با استفاده از انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی است [۲]. از اشکالات این روش‌ها این است که اکثراً با آنچه در واقعیت در مغز اتفاق می‌افتد تطبیق بیولوژیکی نداشته و بیش‌تر در برنامه‌ریزی حرکت ربات‌ها کاربرد دارند. هم‌چنین واقعیت عمل‌کرد نوسانی نورون‌های نواحی فعال در ناوبری در فرکانس‌های مغزی مانند تتا و سنکرونی نواحی مختلف مغزی در برقراری ارتباط جهت انتقال اطلاعات به یک‌دیگر در نظر گرفته نشده و تاکنون جنس این اطلاعات و نحوه‌ی انتقال آن‌ها در مدل‌های ارائه شده برای برخی بخش‌های کلیدی ذکر نشده است [۲، ۲۰، ۳۶، ۳۷]. در این مطالعه در راستای برطرف‌سازی اشکالات فوق سعی شده است تا مدلی شناختی ارائه شود که در آن ضمن در نظر گرفتن نواحی کلیدی در فرایند بازیابی نقشه‌ی شناختی در ناوبری، به لحاظ مدل‌سازی تطبیق بیش‌تری با واقعیت عمل‌کرد مغز در ناوبری داشته باشد. به این ترتیب این مدل قابلیت استفاده در مطالعات شناختی نقشه‌برداری مغز را داشته و هم‌چنین در بررسی اختلالات مغزی نظیر آلزایمر که در آن‌ها فرایندهای مسیریابی و ناوبری مختل می‌شود، راه‌گشا بوده و در طراحی و پیش‌بینی نتیجه‌ی مداخلات دارویی و تحریک‌های فراجمه‌ای پرکاربرد است. به عنوان مثال در بیماری آلزایمر در اثر آتروفی نواحی مغزی، مشاهده شده است که در سیگنال‌های مغزی ثبت شده، توان فرکانس‌های بالا کاهش یافته و توان فرکانس‌های پایین افزایش می‌یابد [۱۹، ۳۸-۴۱]. این موضوع معادل افزایش یافتن مقدار پارامتر  $\lambda$  و نزدیک شدن آن به عدد یک در رابطه‌ی وندریپل است که در آن در صورت  $0 < \lambda < 1$  رفتار مجموعه‌ی نورونی پرپودیک، خروجی دارای فرکانس تقریباً برابر با P و دامنه‌ی نوسان برابر با  $2\sqrt{\lambda}$  خواهد بود. با افزایش  $\lambda$  دامنه‌ی نوسانات افزایش یافته و فرکانس آن‌ها کم‌تر از P خواهد شد. به این ترتیب اگر افزایش مقدار  $\lambda$  معادل افزایش پلاک‌های آمیلوئید و افزایش میزان آتروفی مجموعه‌های نورونی در نظر گرفته شود، هم رفتار افزایش توان فرکانس‌های پایین با مدل ارائه شده و هم عدم توانایی به یاد آوردن نشانه‌های مسیرهای یاد گرفته شده هنگام مواجهه با آن‌ها قابل توجیه است زیرا دیگر فرکانس نوسان مجموعه‌ی نورونی مربوطه با فرکانس نشانه‌ی ورودی نزدیک نبوده و فرایند یادآوری مختل می‌شود. به این ترتیب مجموعه‌ی قواعد مربوطه در mPFC فعال نشده و یا اشتباهات مجموعه‌های دیگری فعال می‌شود که در نتیجه‌ی آن فرایند تداعی و پیش‌بینی گام‌های بعدی از روی مجموعه‌ی قواعد و

## ۵- مراجع

- [1] S. Saedi and F. Towhidkhan, "From grid cells to place cells: A radial basis function network model." 2008 Cairo Int. Biomed. Eng. Conf. CIBEC 2008, 2008, doi: 10.1109/CIBEC.2008.4786111.
- [2] T. Madl, K. Chen, D. Montaldi, and R. Trapp, "Computational cognitive models of spatial memory in navigation space: A review," *Neural Networks*, vol. 65, pp. 18-43, 2015, doi: 10.1016/j.neunet.2015.01.002.
- [3] N. Burgess, E. A. Maguire, and J. O'Keefe, "The human hippocampus and spatial and episodic memory," *Neuron*, vol. 35, no. 4, pp. 625-641, 2002, doi: 10.1016/S0896-6273(02)00830-9.
- [4] M. Moscovitch et al., "Functional neuroanatomy of remote episodic, semantic and spatial memory: a unified account based on multiple trace theory.," *J. Anat.*, vol. 207, no. 1, pp. 35-66, Jul. 2005, doi: 10.1111/j.1469-7580.2005.00421.x.
- [5] E. C. Tolman, "Cognitive maps in rats and men.," *Psychological Review*, vol. 55, no. 4. American Psychological Association, US, pp. 189-208, 1948, doi: 10.1037/h0061626.
- [6] R. A. Epstein, E. Z. Patai, J. B. Julian, and H. J. Spiers, "The cognitive map in humans: Spatial navigation and beyond," *Nat. Neurosci.*, vol. 20, no. 11, pp. 1504-1513, 2017, doi: 10.1038/nn.4656.
- [7] H. Eichenbaum, P. Dudchenko, E. Wood, M. Shapiro, and H. Tanila, "The hippocampus, memory, and place cells: is it spatial memory or a memory space?," *Neuron*, vol. 23, no. 2, pp. 209-226, Jun. 1999, doi: 10.1016/s0896-6273(00)80773-4.
- [8] M. Fyhn, S. Molden, M. P. Witter, E. I. Moser, and M.-B. Moser, "Spatial representation in the entorhinal cortex.," *Science*, vol. 305, no. 5688, pp. 1258-1264, Aug. 2004, doi: 10.1126/science.1099901.
- [9] M.-B. Moser, D. C. Rowland, and E. I. Moser, "Place cells, grid cells, and memory.," *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.*, vol. 7, no. 2, p. a021808, Feb. 2015, doi: 10.1101/cshperspect.a021808.
- [10] J. O'Keefe and J. Dostrovsky, "The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat.," *Brain Res.*, vol. 34, no. 1, pp. 171-175, Nov. 1971, doi: 10.1016/0006-8993(71)90358-1.
- [11] T. Hartley, I. Trinkler, and N. Burgess, "Geometric determinants of human spatial memory.," *Cognition*, vol. 94, no. 1, pp. 39-75, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.cognition.2003.12.001.
- [12] A. R. Preston and H. Eichenbaum, "Interplay of hippocampus and prefrontal cortex in memory,"

۳- بلوک حافظه‌ی کاری فضایی و کنترلر بازیابی اطلاعات از حافظه‌ی مکانی (بخش پیش‌پیشانی میانی)

استفاده از مدل مبتنی بر قواعد سیستم فازی با توجه به گزارش پژوهش‌های شناختی پیشین از ماهیت عمل‌کرد مبتنی بر قواعد این ناحیه

۴- بلوک حافظه‌ی کوتاه‌مدت

برای بلوک حافظه‌ی کوتاه‌مدت ۲ بافر در نظر گرفته شده است (طبق پژوهش‌های شناختی، این ناحیه می‌تواند تا ۷ بافر حافظه‌ی موقت در یک زمان داشته باشد که در مدل این مقاله ۲ بافر در هر گام در حال استفاده است)

۵- بلوک حافظه‌ی مکانی و حافظه‌ی پاسخ

با توجه به فرض مساله بر این اساس که یادگیری مسیرها و تشکیل نقشه‌ی شناختی قبلا صورت گرفته است، برای این ناحیه از یک ماتریس حاوی ویژگی‌های مکانی نشانه‌ها، مختصات محل فعلی عامل و ویژگی فرکانسی نشانه‌ی بعدی استفاده شده است.

هم‌چنین این مدل از جهاتی نظیر افزودن نقش واحد احساس<sup>۱</sup> در مواجهه با نشانه‌ها و اثر آن در ناوبری و نیز افزودن فرایند یادگیری مسیر و افزودن ناحیه‌ی جسم مخطط در موارد استفاده از حافظه‌های روندگرا و تحریک-پاسخ نیاز به تکمیل دارد که ساختار خاص این مدل به جهت مشخص بودن مسیرها و واضح بودن ماهیت اطلاعات انتقالی بین واحدها، پتانسیل بالایی را در تسهیل تکمیل موارد ذکر شده روی همین ساختار مهیا می‌کند.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل شناختی نسبتاً جامعی برای فرایند ناوبری با استفاده از نقشه‌ی شناختی در تکمیل مدل‌های شناختی فعلی ارائه شده و جهت تطابق حداکثری مدل محاسباتی آن با آنچه در مغز اتفاق می‌افتد، با ارائه‌ی شواهدی از مقالات، ایده‌هایی برای مدل‌سازی محاسباتی نواحی مختلف فعال در این فرایند نیز مطرح گردیده که اساس این مدل‌سازی بر مبنای فعالیت و انتقال اطلاعات با فرایند سنکرونی و کنترل فرایند بازیابی اطلاعات با استفاده از پایگاه قواعد مربوطه در mPFC است.

این مدل شناختی و محاسباتی ضمن توان‌مندی و قابلیت استفاده در توسعه‌ی مباحث نقشه‌برداری مغز و بررسی و پیش‌بینی اثر مداخلات دارویی و غیردارویی، از جهاتی نظیر افزودن نقش واحد احساس در مواجهه با نشانه‌ها و اثر آن در ناوبری و نیز افزودن فرایند یادگیری مسیر، نیاز به تکمیل دارد.

<sup>۱</sup> emotion

- Machine Learning, C. Sammut and G. I. Webb, Eds. Boston, MA: Springer US, 2010, pp. 22–35.
- [27] A. Balanov, N. Janson, D. Postnov, and O. Sosnovtseva, *Synchronization: From Simple to Complex* (Springer Series in Synergetics). 2008.
- [28] G. Baghdadi, F. Towhidkhan, and R. Rostami, “A mathematical model to mimic the shape of event related desynchronization/synchronization,” *J. Theor. Biol.*, vol. 453, pp. 117–124, 2018, doi: 10.1016/j.jtbi.2018.05.026.
- [29] A. Onken, P. P. C. R. Karunasekara, C. Kayser, and S. Panzeri, “Understanding Neural Population Coding: Information Theoretic Insights from the Auditory System,” *Adv. Neurosci.*, vol. 2014, no. December 2015, pp. 1–14, 2014, doi: 10.1155/2014/907851.
- [30] A. Kumar, S. Rotter, and A. Aertsen, “Spiking activity propagation in neuronal networks: Reconciling different perspectives on neural coding,” *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 11, no. 9, pp. 615–627, 2010, doi: 10.1038/nrn2886.
- [31] J. B. Fritz, M. Elhilali, S. V David, and S. A. Shamma, “Auditory attention—focusing the searchlight on sound,” *Curr. Opin. Neurobiol.*, vol. 17, no. 4, pp. 437–455, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.07.011>.
- [32] M. Jeanne Sholl, “The role of a self-reference system in spatial navigation,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 2205, pp. 217–232, 2001.
- [33] R. Wang and E. Spelke, “Human spatial representation: insights from animals,” *Trends Cogn. Sci.*, vol. 6, no. 9, p. 376, Sep. 2002, doi: 10.1016/s1364-6613(02)01961-7.
- [34] W. Mou, T. P. McNamara, C. M. Valiquette, and B. Rump, “Allocentric and egocentric updating of spatial memories,” *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.*, vol. 30, no. 1, pp. 142–157, Jan. 2004, doi: 10.1037/0278-7393.30.1.142.
- [35] E. Hodgson and D. Waller, “Lack of set size effects in spatial updating: Evidence for offline updating,” *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.*, vol. 32, no. 4, pp. 854–866, Jul. 2006, doi: 10.1037/0278-7393.32.4.854.
- [36] J. Droulez and A. Berthoz, “A neural network model of sensoritopic maps with predictive short-term memory properties,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 88, no. 21, pp. 9653–9657, Nov. 1991, doi: 10.1073/pnas.88.21.9653.
- [37] P. Byrne, S. Becker, and N. Burgess, “Remembering the past and imagining the future: a neural model of spatial memory and imagery,” *Psychol. Rev.*, vol. 114, no. 2, pp. 340–375, Apr. 2007, doi: 10.1037/0033-295X.114.2.340.
- [38] M. Biology, “Computational Models of Dementia and Neurological Problems Computational Models of Dementia and Neurological Problems,” no. February 2007, 2014, doi: 10.1007/978-1-59745-520-6.
- Curr. Biol.*, vol. 23, no. 17, pp. 1–21, 2013, doi: 10.1016/j.cub.2013.05.041.
- [13] L. Ungerleider, L. G. , Pessoa, “What and where pathways,” *Scholarpedia*, vol. 3, p. 5342, 2008.
- [14] J. Jin and S. Maren, “Prefrontal-hippocampal interactions in memory and emotion,” *Front. Syst. Neurosci.*, vol. 9, no. DEC, pp. 1–8, 2015, doi: 10.3389/fnsys.2015.00170.
- [15] T. Hartley et al., “The hippocampus is required for short-term topographical memory in humans,” *Hippocampus*, vol. 17, no. 1, pp. 34–48, 2007, doi: 10.1002/hipo.20240.
- [16] N. W. Morton, K. R. Sherrill, and A. R. Preston, “Memory integration constructs maps of space, time, and concepts,” *Curr. Opin. Behav. Sci.*, vol. 17, pp. 161–168, 2017, doi: 10.1016/j.cobeha.2017.08.007.
- [17] J. Y. Yu and L. M. Frank, “Hippocampal-cortical interaction in decision making,” *Neurobiol. Learn. Mem.*, vol. 117, pp. 34–41, 2015, doi: 10.1016/j.nlm.2014.02.002.
- [18] R. Place, A. Farovik, M. Brockmann, and H. Eichenbaum, “Bidirectional prefrontal-hippocampal interactions support context-guided memory,” *Nat. Neurosci.*, vol. 19, no. 8, pp. 992–994, 2016, doi: 10.1038/nn.4327.
- [19] O. Jensen and C. D. Tesche, “Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task,” *Eur. J. Neurosci.*, vol. 15, no. 8, pp. 1395–1399, Apr. 2002, doi: 10.1046/j.1460-9568.2002.01975.x.
- [20] F. Chersi and N. Burgess, “The Cognitive Architecture of Spatial Navigation: Hippocampal and Striatal Contributions,” *Neuron*, vol. 88, no. 1, pp. 64–77, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.neuron.2015.09.021.
- [21] W. Klimesch, R. Freunberger, and P. Sauseng, “Oscillatory mechanisms of process binding in memory,” *Neurosci. Biobehav. Rev.*, vol. 34, no. 7, pp. 1002–1014, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.neubiorev.2009.10.004.
- [22] H. S. Zangbar, T. Ghadiri, M. S. Vafae, and A. Ebrahimi-kalan, “Theta Oscillations through Hippocampal-Prefrontal Pathway: Importance in Cognitive Performances,” no. April, 2020, doi: 10.1089/brain.2019.0733.
- [23] N. A. Herweg and M. J. Kahana, “Spatial representations in the human brain,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 12, no. July, pp. 1–16, 2018, doi: 10.3389/fnhum.2018.00297.
- [24] M. L. Phillips, H. A. Robinson, and L. Pozzo-Miller, “Ventral hippocampal projections to the medial prefrontal cortex regulate social memory,” *Elife*, vol. 8, pp. 1–32, 2019, doi: 10.7554/eLife.44182.
- [25] S. Lithfous, A. Dufour, and O. Després, “Spatial navigation in normal aging and the prodromal stage of Alzheimer’s disease: insights from imaging and behavioral studies,” *Ageing Res. Rev.*, vol. 12, no. 1, p. 201–213, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.arr.2012.04.007.
- [26] G. A. Carpenter and S. Grossberg, “Adaptive Resonance Theory,” in *Encyclopedia of*



[41] J. Lisman, "The theta/gamma discrete phase code occurring during the hippocampal phase precession may be a more general brain coding scheme.," *Hippocampus*, vol. 15, no. 7, pp. 913–922, 2005, doi: 10.1002/hipo.20121.

[39] X. Zou, D. Coyle, K. F. Wong-Lin, and L. Maguire, "Computational study of Hippocampal-septal theta rhythm changes due to Beta-Amyloid-Altered ionic channels," *PLoS One*, vol. 6, no. 6, 2011, doi: 10.1371/journal.pone.0021579.

[40] A. A. Cutsuridis, V. and Moustafa, "No Title Computational models of Alzheimer's disease," *Scholarpedia*, vol. 12, no. 1, p. 32144, 2017.