

# گزارشی در حوزه الکتروفیزیولوژی شناختی: نقش قشر پیش‌پیشانی دورسولترال راست در اکتشاف تصادفی

بر اساس مقاله: (۲۰۲۴) Khosrowabadi Chizari, Toghi,

محمد Mehdi شریف بیگی  
MohammadMahdi Sharifbeigy

۱۴۰۴ شهریور

## ۱ مقدمه

یکی از پرسش‌های بنیادی در علوم اعصاب شناختی این است که مغز انسان چگونه میان گزینه‌های آشنا با پاداش مشخص و گزینه‌های جدید با پاداش نامعلوم تصمیم می‌گیرد. این وضعیت که «تجارت میان اکتشاف و بهره‌برداری» نام دارد، هم در زندگی روزمره (مثلًاً انتخاب غذای جدید در مقابل غذای همیشگی) و هم در پژوهش‌های تصمیم‌گیری اهمیتی اساسی دارد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که دو نوع اصلی اکتشاف در مغز وجود دارد: اکتشاف هدایت‌شده که مبنی بر جمع‌آوری اطلاعات است، و اکتشاف تصادفی که ناشی از تغییرپذیری رفتاری و تغییر در سیستم عصبی است.

مطالعه حاضر با بهره‌گیری از (cTBS) continuous theta burst stimulation روش پیش‌پیشانی دورسولترال راست (rDLPFC) تلاش کرده است نقش علیّ این ناحیه را در اکتشاف تصادفی روشن کند.

## ۲ مروری بر پیشینه

مطالعات تصویربرداری عصبی نشان داده‌اند که rACC و dACC بیشتر با اکتشاف هدایت‌شده مرتبط هستند، در حالی که rDLPFC بیشتر در اکتشاف تصادفی فعال است. با این حال، پیش از این پژوهش، شواهد علیّ مستقیم درباره نقش rDLPFC در اکتشاف تصادفی وجود نداشت. همین شکاف دانشی، زمینه‌ساز انجام این آزمایش شد.

## ۳ روش پژوهش

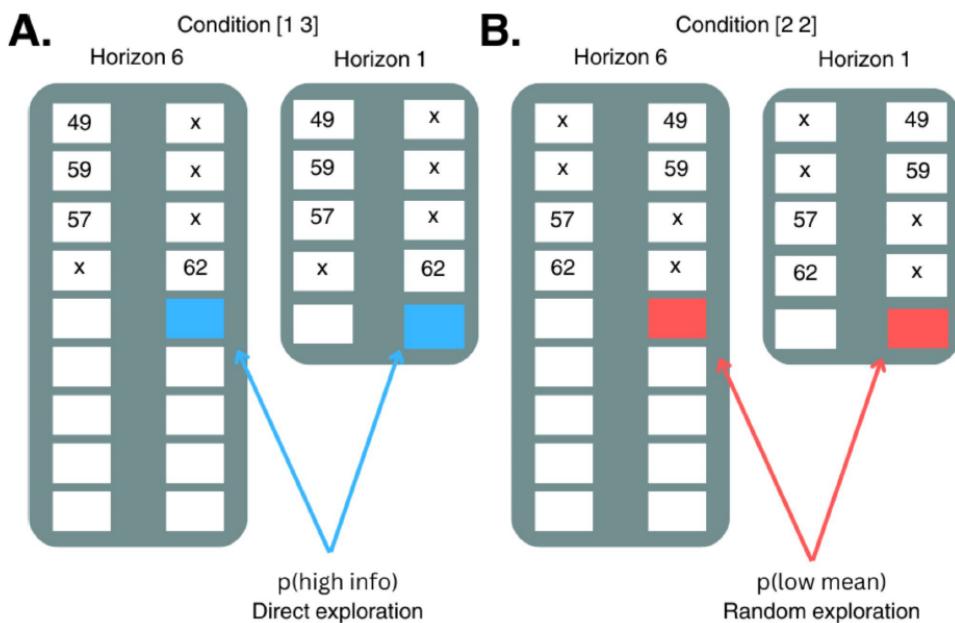
در این مطالعه ۲۵ فرد سالم راست دست (۱۱ زن، میانگین سنی: ۲۳/۸۴ سال) شرکت کردند. برای مهار فعالیت قشر rDLPFC از پروتکل cTBS استفاده شد. در این پروتکل، طی ۴۰ ثانیه ۶۰۰ پالس با فرکانس تتا به مغز اعمال شد. برای مقایسه، یک جلسه کنترل نیز در محل Vertex اجرا گردید.

وظیفه شناختی مورد استفاده Horizon Task بود. این تکلیف شامل بازی‌های متوالی با «ماشین‌های اسلات» بود که پاداش آنها از توزیع‌های گاوی با میانگین‌های متفاوت استخراج می‌شد. بدین ترتیب داده‌های پژوهش از توزیع

آماری گاوی تولید شدند. آزمودنی‌ها در ابتدا چند بار به صورت اجباری از هر ماشین استفاده می‌کردند (شرط [۱] یا [۲]) و سپس در بخش انتخاب آزاد باید تصمیم می‌گرفتند.

**توضیح شرایط:**

- افق تصمیم‌گیری (Horizon): در حالت کوتاه (h1) فرد بعد از مرحله اجباری فقط یک انتخاب آزاد دارد. بنابراین انگیزه‌ای برای جمع‌آوری اطلاعات جدید وجود ندارد. در حالت بلند (h6) فرد شش انتخاب آزاد دارد و اطلاعاتی که به دست می‌آورد در انتخاب‌های بعدی هم مفید است. این تفاوت باعث می‌شود h6 بیشتر با اکتشاف مرتبط باشد.
- نوع تحریک (Stimulation site): تحریک rDLPFC برای بررسی نقش قشر پیش‌پیشانی دورسولتال راست انجام شد. تحریک Vertex نیز به عنوان شرط کنترل استفاده شد تا اثرات عمومی تحریک مغناطیسی از اثرات اختصاصی rDLPFC جدا شود.
- شرایط اطلاعات (Information condition): دو حالت اصلی وجود داشت: مساوی [۲ ۲] و نامساوی [۳ ۱]. در حالت مساوی اطلاعات برابر است و اگر فرد گزینه کم‌پاداش‌تر را انتخاب کند، نشانه اکتشاف تصادفی است. در حالت نامساوی، یک گزینه اطلاعات کمتری دارد و انتخاب آن به معنی اکتشاف هدایت شده است.



شکل ۱: وظیفه Horizon و نحوه ارائه شرایط اطلاعات نامساوی (۱-۳) و مساوی (۲-۲).

## ۴ متغیرهای پژوهش

### ۱.۴ متغیر مستقل

- نوع تحریک: rDLPFC در مقابل Vertex (اسمی).



شکل ۲: پروتکل تحریک مغناطیسی TBS و محل قرارگیری کویل روی Vertex و rDLPFC.

- افق تصمیم‌گیری: کوتاه (h1) یا بلند (h6) (اسمی). در حالت h1 انگیزه کمی برای اکتشاف وجود دارد، در حالی که h6 شرایط فراهم می‌کند که اکتشاف سودمند باشد.
- شرایط اطلاعات: مساوی [۲۲] یا نامساوی [۳۱] (اسمی). این شرایط بیانگر میزان اطلاعات اولیه درباره هر دستگاه هستند و کلید اصلی در تمایز میان اکتشاف هدایت شده و تصادفی به شمار می‌روند.

#### ۲.۴ متغیر وابسته

- احتمال انتخاب گزینه‌ی با اطلاعات بیشتر = شاخص اکتشاف هدایت شده (کمی نسبی).
- احتمال انتخاب گزینه‌ی با میانگین پاداش کمتر = شاخص اکتشاف تصادفی (کمی نسبی).
- نویز تصمیم‌گیری (Decision Noise) از مدل انتخاب لجستیک (کمی پیوسته).
- ضریب پاداش اطلاعاتی (Information Bonus) (کمی پیوسته).
- سوگیری فضایی (Spatial Bias) (کمی پیوسته).

جدول ۱: شرح پارامترهای مدل (Table 1). این جدول پارامترهای آزاد مدل انتخاب لجستیک را توصیف می‌کند. معرف گرایش به کسب اطلاعات (Bonus Information)، directed exploration (directed exploration)، و Bias Spatial (random exploration) ترجیح مکانی انتخاب‌ها را نشان می‌دهد.

پارامتر	شرح
Information ( $\alpha$ ) Bonus	گرایش فرد به انتخاب گزینه‌هایی که اطلاعات بیشتری می‌دهند (معیار- exploration). این پارامتر وابسته به horizon است و شامل دو مقدار جداگانه (1h Info و 6h Info) می‌شود.
Noise Decision ( $\sigma_d$ )	معیار رفتاری تصادفی بودن انتخاب‌ها (random exploration). این پارامتر حساسیت تصمیم‌گیری به اختلاف میانگین پاداش‌ها را کاهش می‌دهد. در مدل ما برای شرایط مختلف horizon uncertainty و horizon چهار پارامتر جداگانه وجود دارد.
(B) Bias Spatial	ترجیح انتخاب براساس مکان (مثلاً سمت چپ یا راست) به صورت وابسته به تاریخچه نمایش، که می‌تواند تصمیم‌گیری را بدون توجه به ارزش واقعی گزینه‌ها جهت دهد.

## ۵ روش‌های آماری

برای تحلیل داده‌ها از ترکیبی از روش‌های model-free و model-based استفاده شد. ابتدا داده‌های رفتاری (انتخاب‌ها) با استفاده از آنالیز واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر (Repeated Measures ANOVA) بررسی شدند. از آنجایی که داده‌های انتخابی از توزیع گاوی تولید شده بودند، فرض نرمال بودن داده‌ها برای آزمون‌های پارامتری برقرار است.

### ۱.۵ آنالیز مدل‌آزاد (Model-free)

در تحلیل مدل‌آزاد، دو شاخص اصلی محاسبه شد:

- احتمال انتخاب گزینه پراطلاعات‌تر در شرایط [۱]: شاخص اکتشاف هدایت شده.
  - احتمال انتخاب گزینه با میانگین پاداش کمتر در شرایط [۲]: شاخص اکتشاف تصادفی.
- برای مقایسه شرایط تحریک و افق تصمیم‌گیری از آنالیز واریانس استفاده شد:

$$F = \frac{MS_{\text{بين شرایط}}}{MS_{\text{خطای}}}$$

که در آن  $MS$  میانگین مربعات است. اثرات اصلی و تعامل‌ها با سطح معناداری  $0.05 = \alpha$  ارزیابی شدند. برای آزمون‌های دنباله‌دار از آزمون  $t$  زوجی استفاده شد:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n} + \frac{s_2^2}{n}}}$$

### ۲.۵ آنالیز مدل‌محور (Model-based)

انتخاب‌های شرکت‌کنندگان با یک مدل انتخاب لجستیک برآش داده شد.تابع ارزش هر گزینه به شکل زیر تعریف شد:

$$Q_a = R_a + \alpha I_a + B s_a$$

که در آن:

- $R_a$  = پاداش مورد انتظار گزینه  $a$ ,
- $I_a$  = ارزش اطلاعاتی گزینه  $a$ ,
- $s_a$  = موقعیت مکانی گزینه  $a$ ,
- $\alpha$  = ضریب اطلاعاتی (Information Bonus),
- $B$  = سوگیری فضایی (Spatial Bias).

احتمال انتخاب گزینه  $a$  به جای  $b$  با تابع لجستیک زیر محاسبه شد:

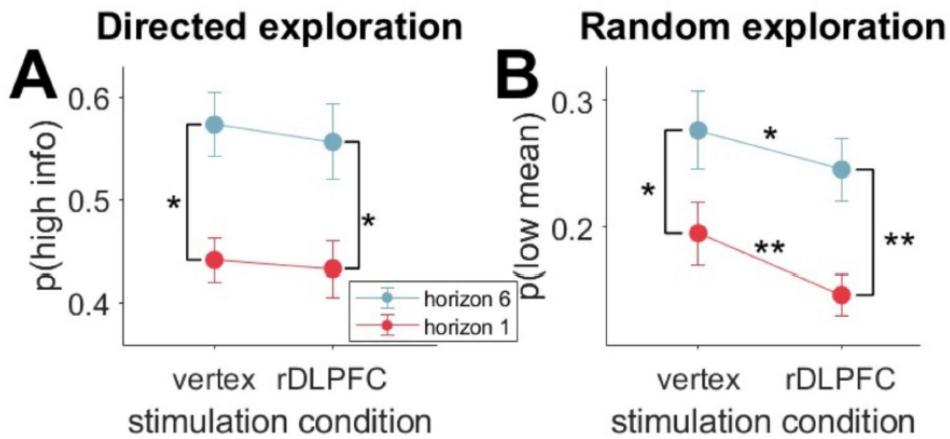
$$P(a) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{Q_b - Q_a}{\sigma_d}\right)}$$

که در آن  $\sigma_d$  پارامتر نویز تصمیم‌گیری (Decision Noise) است.

پارامترها با روش بیشینه پسین (MAP Estimation) برآش داده شدند. برای مقایسه پارامترها بین شرایط تحریک، از آزمون  $t$  زوجی و مقادیر  $p$  گزارش شده استفاده شد.

## ۶ یافته‌ها

نتایج مدل آزاد نشان داد که مهار rDLPFC اکتشاف تصادفی را به طور معناداری کاهش می‌دهد، اما اثری بر اکتشاف هدایت شده ندارد. این یعنی شرکت‌کنندگان پس از تحریک کمتر تمایل داشتند گزینه‌های کم‌پاداش‌تر را انتخاب کنند.



شکل ۳: تحلیل مدل محور آزاد نشان می‌دهد که مهار exploration directed rDLPFC، به طور معناداری کاهش یافت. تفاوت‌ها در  $p(\text{low mean})$  برای ۱h و ۶h به ترتیب  $p = 0.003$  و  $d = 0.44$  ( $p = 0.04$ ) بودند؛ بنابراین اثر روی اکتشاف تصادفی قوی‌تر و مداوم‌تر است. این الگو نشان می‌دهد که rDLPFC نقش ویژه‌ای در تولید تغییرپذیری رفتاری (random exploration) دارد، در حالی که گرایش به کسب اطلاعات (directed exploration) توسط نواحی دیگری مدیریت می‌شود.

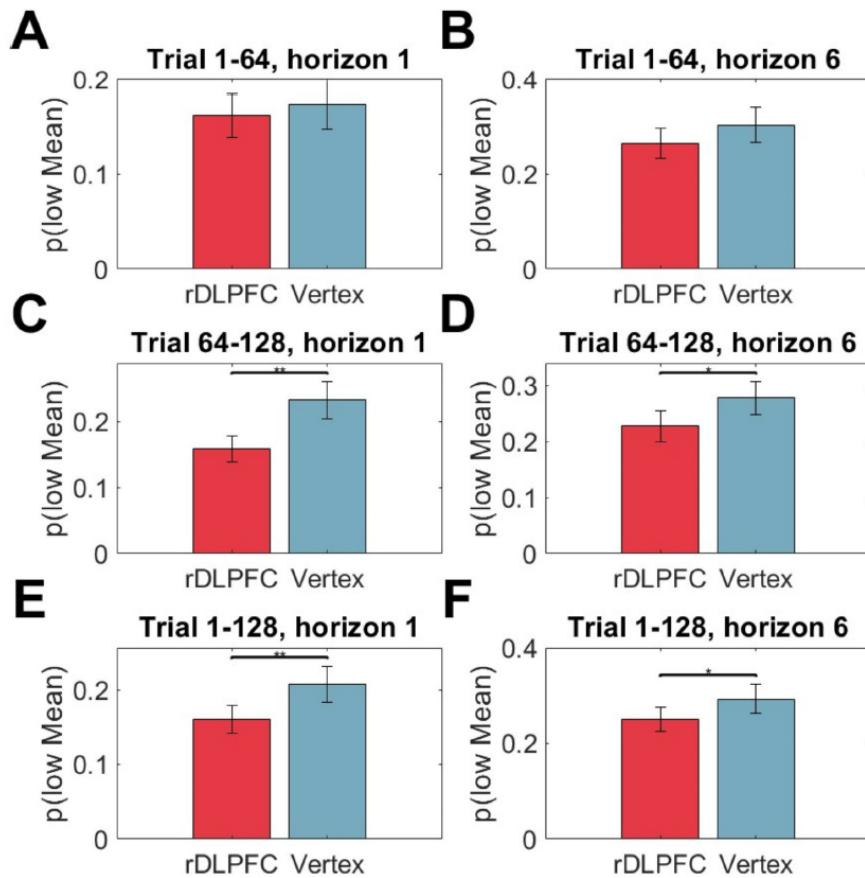
تحلیل مدل محور نشان داد که تنها پارامتر «نویز تصمیم‌گیری» در شرایط عدم قطعیت کامل ([۲۲]) کاهش یافت، در حالی که ضریب اطلاعات و سوگیری فضایی بدون تغییر باقی ماندند. این امر بیانگر افزایش حساسیت به پاداش متوسط و کاهش رفتارهای تصادفی است.

## ۷ بحث

یافته‌ها نشان می‌دهند که rDLPFC به طور مستقیم مسئول ایجاد تغییرپذیری رفتاری در تصمیم‌گیری است. کاهش اکتشاف تصادفی پس از مهار این ناحیه بیانگر آن است که مغز در غیاب فعالیت کامل rDLPFC بیشتر به سمت بهره‌برداری از گزینه‌های پاداش دهنده سوق پیدا می‌کند.

این نتایج هم‌راستا با پژوهش‌های fMRI است که rDLPFC را به نویز رفتاری و اکتشاف غیرهدفمند مرتبط دانسته‌اند. در مقابل، اکتشاف هدایت شده به نواحی دیگر مانند rFPC و dACC وابسته است. این جداسازی کارکردی نشان می‌دهد که مغز مسیرهای متفاوتی برای دو نوع اکتشاف دارد.

از منظر بالینی، این یافته‌ها می‌توانند در درک اختلالاتی مانند اسکیزوفرنی و افسردگی مفید باشند؛ چرا که در این بیماران غالباً افزایش اکتشاف تصادفی یا کاهش تعادل میان اکتشاف و بهره‌برداری مشاهده می‌شود.

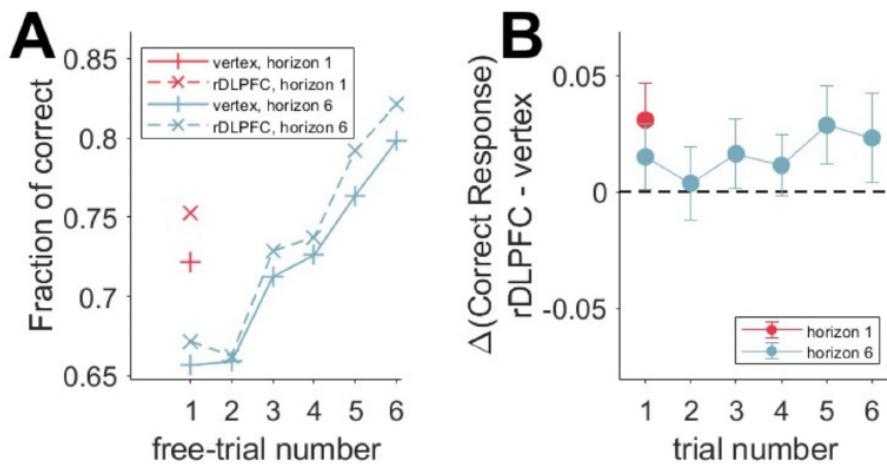


شکل ۴: تحلیل بلوکی نشان می دهد کاهش exploration random پس از مهار rDLPFC در بلوک دوم (و مجموع بلوک های اول و دوم) ظاهر می شود، اما در بلوک اول دیده نمی شد. این الگو می تواند به دو دلیل باشد: (۱) اثر دینامیک TBS بر جمعیت های عصبی که ممکن است دیرتر آشکار شود، و (۲) یادگیری/کاهش نویز رفتاری با پیشرفت بازی که تعامل با تاثیر تحریک را تغییر می دهد.

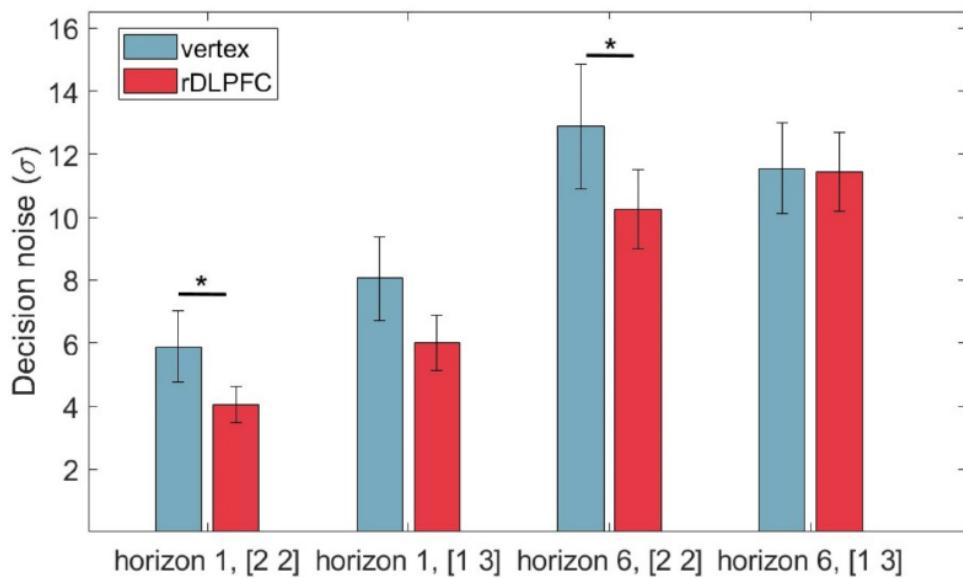
## ۸ جمع‌بندی

این پژوهش نخستین شواهد علی از نقش قشر پیش‌پیشانی دورسولتال راست در اکتشاف تصادفی ارائه کرد. داده‌ها که از توزیع‌های گاوی تولید شده بودند نشان دادند که مهار این ناحیه موجب کاهش نویز تصمیم‌گیری و انتخاب‌های تصادفی می‌شود، در حالی که انتخاب‌های مبتنی بر اطلاعات دست‌نخورده باقی می‌مانند. شرایط اطلاعات مساوی [۲] و نامساوی [۳] به همراه افق‌های کوتاه (h1) و بلند (h6) و همچنین شرایط تحریک rDLPFC و Vertex ابزار اصلی طراحی بودند که امکان تمايز دقیق میان انواع اکتشاف را فراهم کردند.

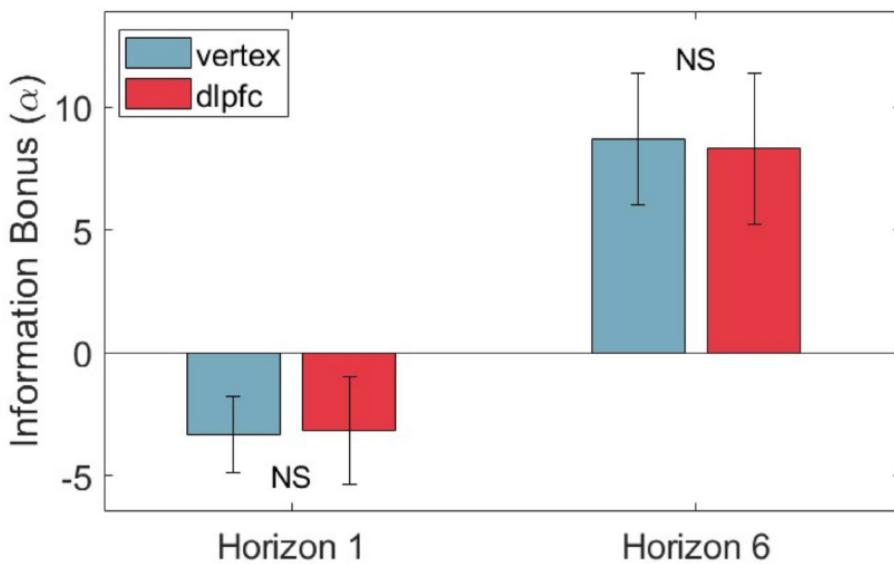
این نتیجه، درک ما را از مکانیسم‌های عصبی تصمیم‌گیری و تعادل میان اکتشاف و بهره‌برداری گسترش می‌دهد و می‌تواند الهام‌بخش مداخلات بالینی آینده باشد.



شکل ۵: تحریک rDLPFC با پروتکل cTBS trials. free-choice first of analysis Model-free (A) تحریک rDLPFC در هیچ یک از شرایط exploration random ایجاد نکرد. (B) در مقابل، در مقابله با شرط کنترل vertex، rDLPFC کاهش یافت (در مقایسه با شرط کنترل vertex). طور معناداری پس از تحریک rDLPFC با افزایش exploration با بیشتر شد. (\* نشان دهنده  $p < 0.05$  و \*\* نشان دهنده  $p < 0.005$ : خطاهای نمایانگر انحراف معیار میانگین هستند).



شکل ۶: براساس مدل لجستیک برآذش شده، تنها پارامترهایی که به صورت معنادار تغییر کردند، مؤلفه‌های decision noise در شرط [۲ ۲] برای h1 و h6 بودند ( $h1: p = 0.02$   $h6: p = 0.04$ ). سایر پارامترها از جمله Infor-Bias Spatial و Bonus mation تغییر معنادار نشان ندادند. کاهش در noise decision معادل افزایش حساسیت شرکت‌کنندگان به اختلاف میانگین پاداش‌هاست — یعنی مهار rDLPFC موجب شد انتخاب‌ها کمتر تصادفی و بیشتر مبتنی بر پاداش باشند.



شکل ۷: پارامتر Bonus Information ( $\alpha$ ) در هر دو horizon (h1,h6) تفاوت معناداری بین شرایط تحریک نشان نداد (h1:  $p = 0.95$  h6:  $p = 0.85$ ). این نتیجه با مشاهدات مدل آزاد مطابقت دارد که exploration directed دست‌نخورده باقی می‌ماند و نشان می‌دهد سازوکارهای اطلاعات محور احتمالاً در مناطق دیگری مانند rFPC یا dACC میزبانی می‌شوند.

جدول ۲: پارامترهای مدل آزاد و مدل محور در دو شرایط تحریک. مقادیر میانگین (انحراف معیار) برای هر پارامتر در شرایط vertex و rDLPFC و آزمون های آماری همراه با اندازه اثر (Cohen's d).

d Cohen's	p-value	(SD)) (M vertex	(SD)) (M rDLPFC	پارامتر
parameters Model-free				
۰۵.۰	۷۸.۰	(۱۳.۰) ۴۳.۰	(۱۰.۰) ۴۴.۰	۱h info) p(high
۱۵.۰	۴۵.۰	(۱۷.۰) ۵۵.۰	(۱۵.۰) ۵۷.۰	۶h info) p(high
۶۹.۰	**۰.۰۳.۰	(۰۷.۰) ۱۴.۰	(۱۱.۰) ۱۹.۰	۱h mean) p(low
۴۴.۰	*۰.۴.۰	(۱۱.۰) ۲۴.۰	(۱۴.۰) ۲۷.۰	۶h mean) p(low
parameters Model-based				
۰۱.۰-	۹۰.۰	(۶۲.۱۰) ۱۰.۳-	(۳۶.۷) ۳۲.۳-	۱h bonus Information
۰۳.۰	۸۰.۰	(۸۱.۱۴) ۳۰.۸	(۷۷.۱۲) ۷۰.۸	۶h bonus Information
۴۴.۰	*۰.۴.۰	(۷۴.۲) ۰۵.۴	(۴۵.۵) ۸۸.۵	۱h [۲ ۲] noise Decision
۳۳.۰	۱۲.۰	(۲۰.۴) ۰۰.۶	(۴۵.۶) ۰۵.۸	۱h [۳ ۱] noise Decision
۵۰.۰	*۰.۲.۰	(۰۰.۶) ۲۵.۱۰	(۴۷.۹) ۸۷.۱۲	۶h [۲ ۲] noise Decision
۰۱.۰	۹۳.۰	(۸۷.۶) ۴۴.۱۱	(۸۰.۶) ۵۵.۱۱	۶h [۳ ۱] noise Decision
۰۴.۰	۸۳.۰	(۵۶.۲) ۲۰.۲	(۲۴.۶) ۴۴.۲	۱h [۲ ۲] bias Spatial
۱۲.۰	۵۶.۰	(۶۰.۵) ۰۴.۱	(۶۶.۵) ۷۹.۲	۱h [۳ ۱] bias Spatial
۳۹.۰	۰۷.۰	(۴۰.۷) ۱۶.۴	(۹۰.۸) ۲۹.۷	۶h [۲ ۲] bias Spatial
۱۷.۰-	۴۲.۰	(۱۸.۱۰) ۶۱.۲-	(۲۴.۱۳) ۵۶.۴-	۶h [۳ ۱] bias Spatial

علامت \* و \*\* به ترتیب نشان‌دهنده  $p < 0.05$  و  $p < 0.01$  هستند.