

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

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

محمد مهدی شریف بیگی  
MohammadMahdi Sharifbeigy

۲۰ شهریور ۱۴۰۴

## 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 (مثلاً 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 مبتنی بر جمع‌آوری اطلاعات است، و اکتشاف تصادفی که ناشی از تغییرپذیری رفتاری و نویز در سیستم عصبی است. مطالعه حاضر با بهره‌گیری از continuous theta burst stimulation (cTBS) روی قشر پیش‌پیشانی دورسولترال راست (rDLPFC) تلاش کرده است نقش علی این ناحیه را در اکتشاف تصادفی روشن کند.

## ۲ مروری بر پیشینه

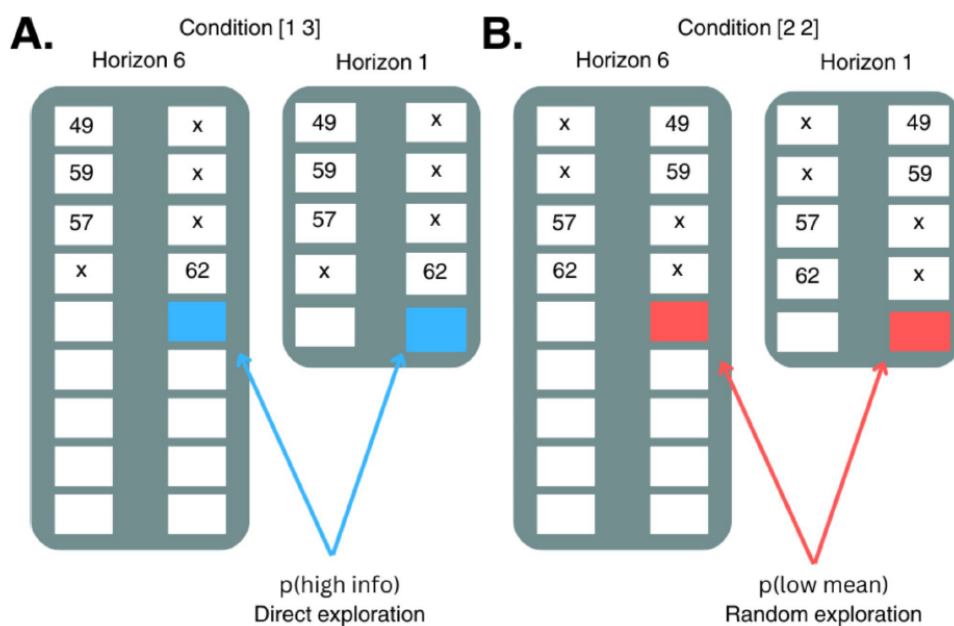
مطالعات تصویربرداری عصبی نشان داده‌اند که rFPC و dACC بیشتر با اکتشاف هدایت‌شده مرتبط هستند، در حالی که rDLPFC بیشتر در اکتشاف تصادفی فعال است. با این حال، پیش از این پژوهش، شواهد علی مستقیم درباره نقش rDLPFC در اکتشاف تصادفی وجود نداشت. همین شکاف دانشی، زمینه‌ساز انجام این آزمایش شد.

## ۳ روش پژوهش

در این مطالعه ۲۵ فرد سالم راست‌دست (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 گاوسی با میانگین‌های متفاوت استخراج می‌شد. بدین ترتیب داده‌های پژوهش از توزیع

آماري گاوسي توليد شدند. آزمودني‌ها در ابتدا چند بار به صورت اجباري از هر ماشين استفاده مي‌کردند (شرط [۳ ۱] يا [۲ ۲]) و سپس در بخش انتخاب آزاد بايد تصميم مي‌گرفتند. توضيح شرايط:

- افق تصميم‌گيري (Horizon): در حالت کوتاه (h1) فرد بعد از مرحله اجباري فقط يك انتخاب آزاد دارد. بنابر اين انگيزه‌اي براي جمع‌آوري اطلاعات جديد وجود ندارد. در حالت بلند (h6) فرد شش انتخاب آزاد دارد و اطلاعاتي كه به دست مي‌آورد در انتخاب‌هاي بعدي هم مفيد است. اين تفاوت باعث مي‌شود h6 بيشتر با اكتشاف مرتبط باشد.
- نوع تحريك (Stimulation site): تحريك rDLPFC براي بررسي نقش قشر پيش‌پيشاني دوسولترال راست انجام شد. تحريك Vertex نيز به عنوان شرط كنترل استفاده شد تا اثرات عمومي تحريك مغناطيسي از اثرات اختصاصي rDLPFC جدا شود.
- شرايط اطلاعات (Information condition): دو حالت اصلي وجود داشت: مساوي [۲ ۲] و نامساوي [۳ ۱]. در حالت مساوي اطلاعات برابر است و اگر فرد گزينه كم‌پاداش‌تر را انتخاب كند، نشانه اكتشاف تصادفي است. در حالت نامساوي، يك گزينه اطلاعات كم‌تر دارد و انتخاب آن به معني اكتشاف هدايت‌شده است.



شكل ۱: وظيفه Horizon و نحوه ارائه شرايط اطلاعات نامساوي (۳-۱) و مساوي (۲-۲).

## ۴ متغيرهاي پژوهش

### ۱.۴ متغير مستقل

- نوع تحريك: rDLPFC در مقابل Vertex (اسمي).



شکل ۲: پروتکل تحریک مغناطیسی cTBS و محل قرارگیری کوئل روی rDLPFC و Vertex.

- افق تصمیم‌گیری: کوتاه (h1) یا بلند (h6) (اسمی). در حالت ۱h انگیزه کمی برای اکتشاف وجود دارد، در حالی که ۶h شرایطی فراهم می‌کند که اکتشاف سودمند باشد.
- شرایط اطلاعات: مساوی [۲ ۲] یا نامساوی [۳ ۱] (اسمی). این شرایط بیانگر میزان اطلاعات اولیه درباره هر دستگاه هستند و کلید اصلی در تمایز میان اکتشاف هدایت‌شده و تصادفی به شمار می‌روند.

## ۲.۴ متغیر وابسته

- احتمال انتخاب گزینه‌ی با اطلاعات بیشتر = شاخص اکتشاف هدایت‌شده (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 آزادِ مدل انتخاب لجستیک را توصیف می‌کند. Bonus Information معرف گرایش به کسب اطلاعات (directed exploration)، Noise Decision معرف کاوش تصادفی (random exploration)، و Bias Spatial ترجیح مکانی انتخاب‌ها را نشان می‌دهد.

پارامتر	شرح
Information Bonus ( $\alpha$ )	گرایش فرد به انتخاب گزینه‌هایی که اطلاعات بیشتری می‌دهند (معیار directed exploration). این پارامتر وابسته به horizon است و شامل دو مقدار جداگانه (۱h Info و ۶h 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 و uncertainty چهار پارامتر جداگانه وجود دارد.
Bias Spatial (B)	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 گاوسی تولید شده بودند، فرض نرمال بودن داده‌ها برای آزمون‌های پارامتری برقرار است.

### ۱.۵ آنالیز مدل آزاد (Model-free)

در تحلیل مدل آزاد، دو شاخص اصلی محاسبه شد:

- احتمال انتخاب گزینه پُر اطلاعات‌تر در شرایط [۳ ۱]: شاخص اکتشاف هدایت‌شده.
  - احتمال انتخاب گزینه با میانگین پاداش کمتر در شرایط [۲ ۲]: شاخص اکتشاف تصادفی.
- برای مقایسه شرایط تحریک و افق تصمیم‌گیری از آنالیز واریانس استفاده شد:

$$F = \frac{MS_{\text{بین شرایط}}}{MS_{\text{خطا}}}$$

که در آن  $MS$  میانگین مربعات است. اثرات اصلی و تعامل‌ها با سطح معناداری  $\alpha = 0.05$  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 مدل محور (Model-based)

انتخاب‌های شرکت‌کنندگان با یک مدل انتخاب لجستیک برازش 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).

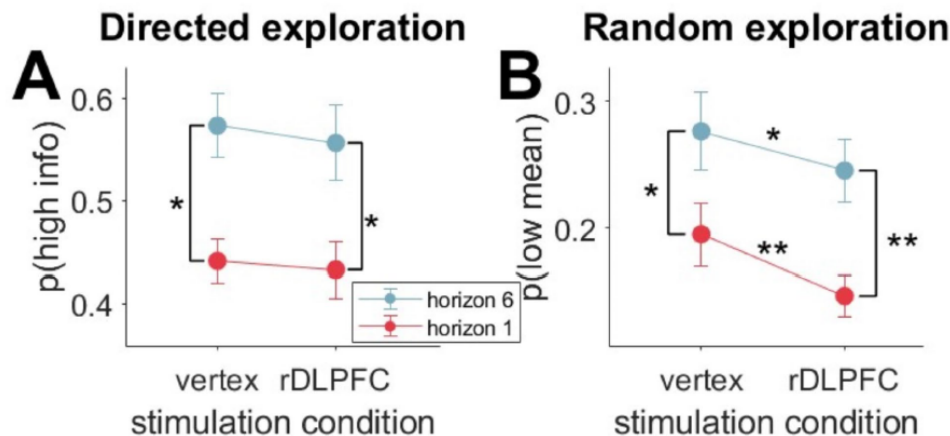
احتمال انتخاب گزینه  $a$  به جای  $b$  با تابع لجستیک زیر محاسبه شد:

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

که در آن  $\sigma_d$  پارامتر نویز تصمیم‌گیری (Decision Noise) است. پارامترها با روش بیشینه‌پسین (MAP Estimation) برازش 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 هدایت‌شده ندارد. این یعنی شرکت‌کنندگان پس از تحریک کمتر تمایل داشتند گزینه‌های کم‌پاداش‌تر را انتخاب کنند.

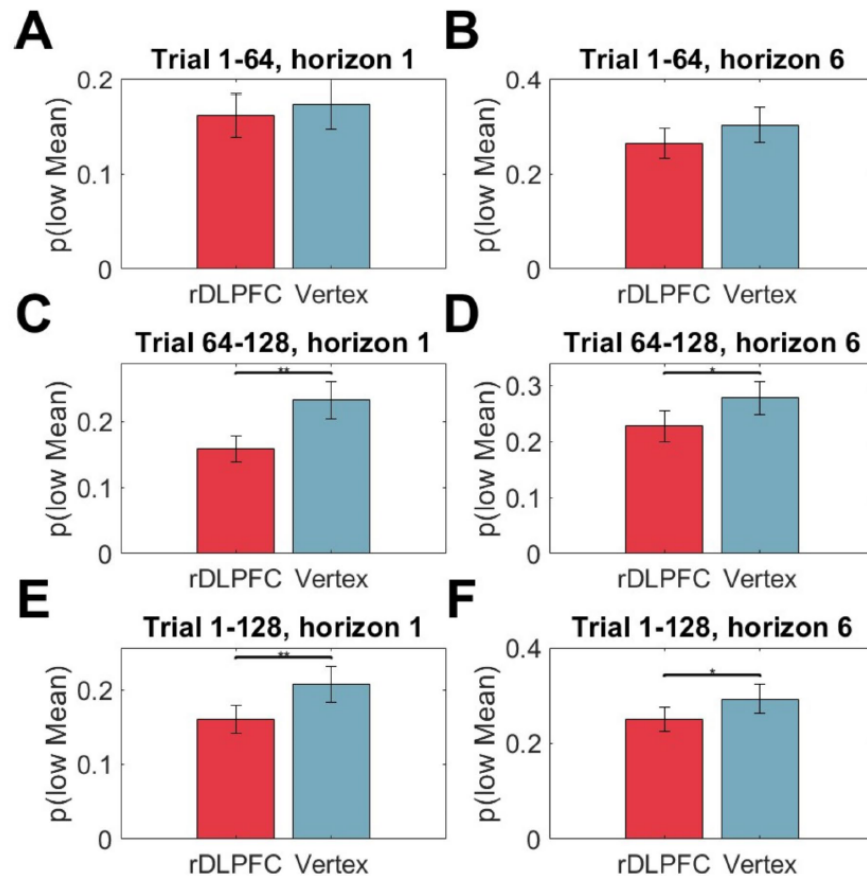


شکل ۳: تحلیل مدل محور آزاد نشان می‌دهد که مهار rDLPFC exploration directed را تغییر نداد اما random exploration به طور معناداری کاهش یافت. تفاوت‌ها در p(low mean) برای ۱h و ۶h به ترتیب  $p = 0.003$  و  $p = 0.04$  ( $d=0.69$ ) و  $d=0.44$  بودند؛ بنابراین اثر روی اکتشاف تصادفی قوی‌تر و مداوم‌تر است. 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

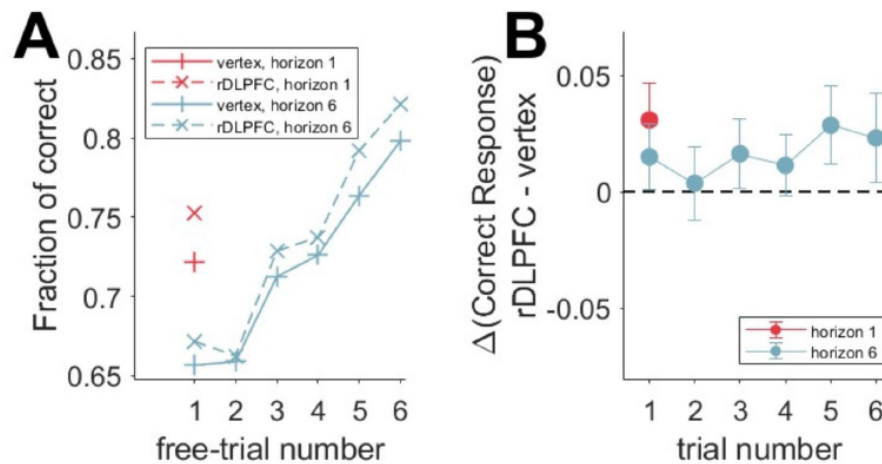
یافته‌ها نشان می‌دهند که rDLPFC به طور مستقیم مسئول ایجاد تغییرپذیری رفتاری در تصمیم‌گیری است. کاهش اکتشاف تصادفی پس از مهار این ناحیه بیانگر آن است که مغز در غیاب فعالیت کامل rDLPFC بیشتر به سمت بهره‌برداری از گزینه‌های پاداش‌دهنده سوق پیدا می‌کند. این نتایج هم‌راستا با پژوهش‌های fMRI هستند که rDLPFC را به نویز رفتاری و اکتشاف غیرهدفمند مرتبط دانسته‌اند. در مقابل، اکتشاف هدایت‌شده 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.



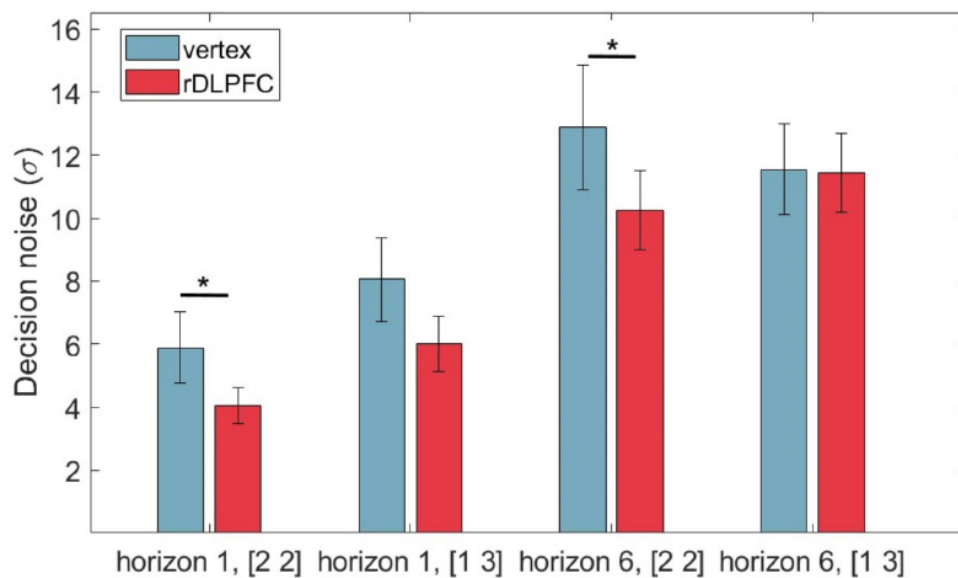
شکل ۴: تحلیل بلوکی نشان می‌دهد کاهش exploration random پس از مهار rDLPFC در بلوک دوم (و مجموع بلوک‌های اول و دوم) ظاهر می‌شود، اما در بلوک اول دیده نمی‌شود. این الگو می‌تواند به دو دلیل باشد: (۱) اثر دینامیک cTBS بر جمعیت‌های عصبی که ممکن است دیرتر آشکار شود، و (۲) یادگیری/کاهش نویز رفتاری با پیشرفت بازی که تعامل با تاثیر تحریک را تغییر می‌دهد.

## ۸ جمع‌بندی

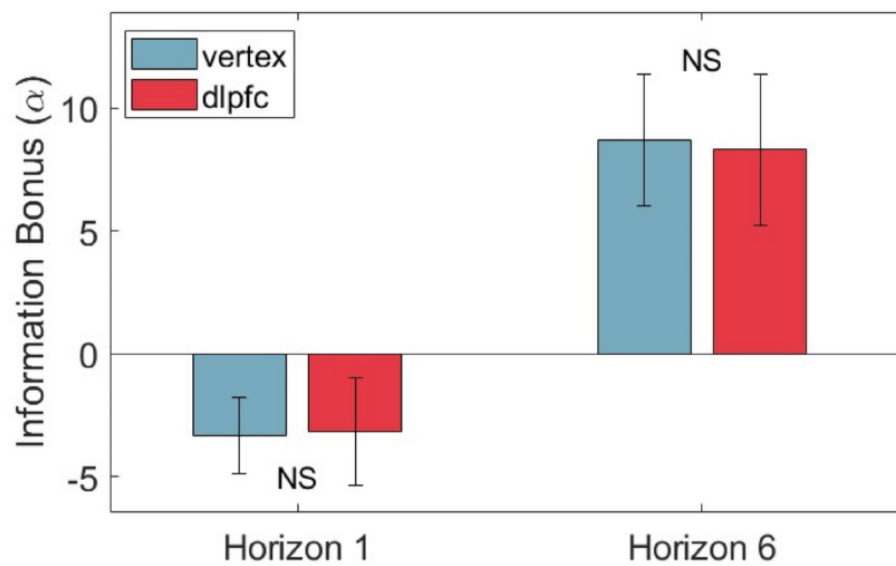
این پژوهش نخستین شواهد علی از نقش قشر پیش‌پیشانی دوسولترال راست در اکتشاف تصادفی ارائه کرد. داده‌ها که از توزیع‌های گاوسی تولید شده بودند نشان دادند که مهار این ناحیه موجب کاهش نویز تصمیم‌گیری و انتخاب‌های تصادفی می‌شود، در حالی که انتخاب‌های مبتنی بر اطلاعات دست‌نخورده باقی می‌مانند. شرایط اطلاعات مساوی [۲] و نامساوی [۳۱] به همراه افق‌های کوتاه (h1) و بلند (h6) و همچنین شرایط تحریک rDLPFC و Vertex ابزار اصلی طراحی بودند که امکان تمایز 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: Model-free analysis first of trials. free-choice (A) تحریک rDLPFC با پروتکل cTBS تغییر در exploration directed در هیچیک از شرایط horizon ایجاد نکرد. (B) در مقابل، exploration random به طور معناداری پس از تحریک rDLPFC کاهش یافت (در مقایسه با شرط کنترل). (vertex در هر دو حالت، میزان exploration با افزایش horizon بیشتر شد. (\* نشان دهنده  $p < 0.05$  و \*\* نشان دهنده  $p < 0.005$ ; خطاها نمایانگر انحراف معیار میانگین هستند).



شکل ۶: براساس مدل لجستیک برازش شده، تنها پارامترهایی که به صورت معنادار تغییر کردند، مؤلفه های decision noise در شرط [۲ ۲] برای ۱h و ۶h بودند ( $h1: p = 0.04$   $h6: p = 0.02$ ). سایر پارامترها از جمله Infor-Bonus mation و Bias Spatial تغییر معنادار نشان ندادند. کاهش در decision noise معادل افزایش حساسیت شرکت کنندگان به اختلاف میانگین پاداش هاست — یعنی مهار rDLPFC موجب شد انتخاب ها کمتر تصادفی و بیشتر مبتنی بر پاداش باشند.



شکل ۷: پارامتر Bonus Information 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 دست نخورده باقی می ماند و نشان می دهد سازوکارهای اطلاعات محور احتمالاً در مناطق دیگری مانند rFPC یا dACC میزبانی می شوند.



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 آزمون‌های آماری همراه با اندازه اثر (Cohen's d).

پارامتر	(M vertex (SD))	(M rDLPFC (SD))	p-value	d Cohen's
parameters Model-free				
1h info) p(high	۴۴.۰ (۱۰.۰)	۴۳.۰ (۱۳.۰)	۷۸.۰	۰.۵.۰
6h info) p(high	۵۷.۰ (۱۵.۰)	۵۵.۰ (۱۷.۰)	۴۵.۰	۱۵.۰
1h mean) p(low	۱۹.۰ (۱۱.۰)	۱۴.۰ (۰۷.۰)	*۰.۰۳.۰	۶۹.۰
6h mean) p(low	۲۷.۰ (۱۴.۰)	۲۴.۰ (۱۱.۰)	*۰.۴.۰	۴۴.۰
parameters Model-based				
1h bonus Information	۳۲.۳- (۳۶.۷)	۱۰.۳- (۶۲.۱۰)	۹۵.۰	۰۱.۰-
6h bonus Information	۷۰.۸ (۷۷.۱۲)	۳۰.۸ (۸۱.۱۴)	۸۵.۰	۰۳.۰
1h [۲ ۲] noise Decision	۸۸.۵ (۴۵.۵)	۰۵.۴ (۷۴.۲)	*۰.۴.۰	۴۴.۰
1h [۳ ۱] noise Decision	۰۵.۸ (۴۵.۶)	۰۰.۶ (۲۰.۴)	۱۲.۰	۳۳.۰
6h [۲ ۲] noise Decision	۸۷.۱۲ (۴۷.۹)	۲۵.۱۰ (۰۰.۶)	*۰.۲.۰	۵۰.۰
6h [۳ ۱] noise Decision	۵۵.۱۱ (۸۵.۶)	۴۴.۱۱ (۸۷.۶)	۹۳.۰	۰۱.۰
1h [۲ ۲] bias Spatial	۴۴.۲ (۲۴.۶)	۲۰.۲ (۵۶.۲)	۸۳.۰	۰۴.۰
1h [۳ ۱] bias Spatial	۷۹.۲ (۶۶.۵)	۵۴.۱ (۶۵.۵)	۵۶.۰	۱۲.۰
6h [۲ ۲] bias Spatial	۲۹.۷ (۹۵.۸)	۱۶.۴ (۴۰.۷)	۰۷.۰	۳۹.۰
6h [۳ ۱] bias Spatial	۵۶.۴- (۲۴.۱۳)	۶۱.۲- (۱۸.۱۰)	۴۲.۰	۱۷.۰-

علامت \* و \*\* به ترتیب نشان‌دهنده  $p < ۰/۰۵$  و  $p < ۰/۰۱$  هستند.