

الگوریتم تصمیم‌گیری سطح بالا با تحلیل سیگنال‌های قطر مردمک

لیلا یحیایی^۱، دانشجوی دکتری، رضا ابراهیم‌پور^۲، استاد، عباس کوچاری^۳، استادیار

۱- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده: محققین سعی دارند با پیاده‌سازی الگوریتم‌های تصمیم‌گیری مشابه عملکرد مغز، به قدرت قابل توجه ذهن انسان دست یابند. تصمیم‌های سلسله‌مراتبی، تصمیمات پیچیده‌ای هستند که نیاز به مکانیزم‌های استدلال فراشناختی در مغز دارند. بازخورد منفی، قطعیت و قدرت محرک، پارامترهایی هستند که در شکل‌گیری این نوع تصمیمات نقش دارند. در این پژوهش به منظور ساخت یک چارچوب محاسباتی مشابه عملکرد مغز برای سیستم‌های هوشمند، درک ماهیت بیولوژی شکل‌گیری تصمیمات سطح بالا، استفاده از انواع دیگر داده‌ها علاوه بر داده‌های رفتاری نیز مهم خواهد بود. از آنجایی که پاسخ‌های غیرارادی چشمی حاصل از خروجی آزمایش روان-فیزیک، نماینده معتبری از عملکرد ساز و کار نوروئی مغز می‌باشند، در این پژوهش علاوه بر تحلیل داده‌های رفتاری به این مسئله پرداخته شد که آیا با تحلیل داده‌های غیرارادی انسان (سیگنال‌های چشمی) می‌توان به دینامیک حاکم بر تغییرات تصمیمات سطح بالا پی برد. مشاهده شده که اندازه قطر مردمک، احتمال تغییر در پارامترهای تصمیم‌های سطح بالا را پیش‌بینی می‌کند و بازتاب استراتژی تصمیم سطح بالای فرد تحت شرایط پیچیده است. سپس در راستای توسعه ابزارهای مشابه عملکرد مغز در محیط‌های پیچیده، چارچوبی برای تصمیمات سلسله‌مراتبی ارائه شده است.

کلید واژه‌ها: سیستم‌های هوشمند، تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی، مردمک چشم، انسان.

High-level Decision Algorithm with Analysis of Pupil Diameter Signals

Leyla Yahyaie, Phd.student, Reza Ebrahimpour, Full Professor², Abbas Koochari, Assistant Professor³

1- Department of Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, L.yahyaie@iausalmas.ac.ir

2-School of Cognitive Sciences, Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), Tehran, Iran, rebrahimpour@sru.ac.ir

3- Department of Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Koochari@srbiau.ac.ir

Abstract: Researchers are trying to achieve the power of the human mind by implementing decision-making algorithms similar to brain function. Hierarchical decisions are complex decisions that require metacognitive reasoning mechanisms in the brain. Negative feedback, certainty, and motion strength are the parameters that play a role in shaping such decisions. In this study, in order to design a computational framework similar to brain function for intelligent systems, it will be important to understand the biology nature of high-level decision-making, using other types of data in addition to behavioral data. Since involuntary eye responses resulting from the output of psychophysical experiments are a reliable representative of the function of the neuronal mechanism in the brain, in this study addition to the analysis of behavioral data, this issue has been addressed whether it is possible to understand the dynamics of changes in high-level decisions by analyzing involuntary human data (eye signals). We found that pupil diameter size predicts the likelihood of changes in the parameters of high-level decisions, and reflects the individual's high-level decision strategy under complex conditions. Then, in order to design systems similar to brain function in complex environments, we provide a framework for hierarchical decisions.

Keywords: Intelligent systems, hierarchical decision making, pupil, human.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۹ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

نام نویسنده مسئول: رضا ابراهیم‌پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه شهید رجایی - دانشگاه مهندسی کامپیوتر - گروه هوش مصنوعی.



۱- مقدمه

بسیاری از تصمیمات تحت عدم قطعیت، نتیجه فرآیندی است که در آن مغز شواهد حسی-تصادفی دریافتی از محیط بیرون را در طول زمان برای انتخاب قطعی یک گزینه جمع‌آوری و وزن‌گذاری می‌کند [۳-۱]. ابزارها و الگوریتم‌های مختلفی برای تصمیم‌گیری در دنیای کامپیوتر مطرح شده است [۶-۴]. ابزارهای تصمیم‌گیری موجود سعی دارند به قدرت قابل توجه ذهن انسان در تصمیم‌گیری، در یک محیط توأم با عدم قطعیت، دست یابند و مشابه انسان استنتاج کنند. برای ساخت کامپیوترهای هوشمندتر باید اطلاعاتی درباره ادراکات، زبان، نحوه یادگیری، توجه، خلاقیت حل مسئله و تصمیم‌گیری انسان داشته باشیم [۷]. بنابراین شناخت سازوکار نورونی مغز در این زمینه‌ها حائز اهمیت است.

برای توسعه ابزارهای تصمیم‌گیری موجود در سیستم‌های مشابه عملکرد انسان، مطالعه تصمیم‌گیری در مغز کمک زیادی در این زمینه خواهد کرد. تصمیم‌گیری در مغز یک فرآیند پیچیده است و پارامترهای زیادی در آن دخیل هستند که آنالیز آن را پیچیده می‌کند. مطالعه فرآیند اخذ تصمیم در مغز نیازمند طراحی آزمایشی دقیق و قابل کنترل است که از پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به آزمایش نقاط متحرک تصادفی (RDM^۱) اشاره کرد [۸]. RDM یک آزمایش ادراکی است که مبتنی بر متغیرهای حسی است و آزمودنی‌ها از اطلاعات گیرنده‌های حسی خود، در ارتباط با محرک‌های بینایی استفاده می‌کنند. در این آزمایش، تعدادی نقطه در حال حرکت، که تنها بخشی از آن‌ها جهت حرکت یکسانی دارند، به آزمودنی‌ها نشان داده می‌شود. در پایان نمایش محرک، از آزمودنی‌ها خواسته می‌شود که جهت حرکت نقاط همسو را گزارش کنند [۱۰-۹]. خروجی این آزمایش‌ها چگونگی جمع‌آوری شواهد حسی-تصادفی تا رسیدن به یک حد آستانه تصمیم را بازنمایی کنند. خروجی‌های حاصل از این آزمایش‌ها می‌توانند داده‌های رفتاری، سیگنال‌های چشمی یا مغزی باشد. [۱۱-۱۲].

با وجود مطالعات و تحقیقات گسترده در چگونگی پردازش اطلاعات ادراکی در مغز، همچنان دانش کافی در مورد ساز و کار نورونی مغز انسان در تصمیمات پیچیده در محیط‌های توأم با عدم قطعیت وجود ندارد. از این رو، اخیراً مطالعات تصمیم‌گیری ادراکی در مسائل دنیای واقعی و تصمیم‌های سلسله‌مراتبی اهمیت پیدا کرده است. تصمیمات زندگی روزمره، شامل طیف وسیعی از تصمیمات هم‌زمان [۱۳]، چندگزینه‌ای و متوالی [۱۵-۱۴] و یا گسسته در زمان است [۱۶]. تصمیمات در برخی موارد، شامل سلسله‌ای از تصمیم‌های مختلف است و نتایج تصمیمات سطح بالا نشأت گرفته از خروجی تصمیم‌های سطح پایین خواهد بود [۱۷]. درک اساس فرآیند اخذ تصمیم سلسله‌مراتبی در مغز و سازوکار نورونی این نوع تصمیمات به‌منظور ارائه الگوریتم‌هایی برای ابزارهای شناختی در جهت کنترل و

مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده از جمله مواردی است که توجه محققان را در سال‌های اخیر جلب کرده است [۲۰-۱۸].

تصمیمات سلسله‌مراتبی دارای سه پارامتر قطعیت، قدرت محرک و بازخورد منفی هستند. یکی از موضوعات چالش‌برانگیز در مطالعه این تصمیمات ادراکی پیچیده سطح بالا، بررسی نقش این سه پارامتر است. پس از اخذ تصمیم سطح بالا، پاسخ دریافتی می‌تواند یک بازخورد مثبت یا یک بازخورد منفی باشد. از آنجایی که تشخیص استراتژی صحیح از نتایج تصمیم‌های سطح پایین استنتاج می‌شود علت بازخورد منفی نامعلوم و مبهم است. عوامل تأثیرگذار در تعویض استراتژی در تصمیمات سطح بالا بدون هشدار تغییر می‌کنند، این تغییر ارتباط بین انتخاب‌های سطح پایین و یک استراتژی صحیح موجود را به هم می‌زند و باعث می‌شود ابهام بازخورد منفی به راحتی قابل حل نباشد. برای حل ابهام بازخورد منفی باید از ارتباط بین سطوح مختلف سلسله‌مراتب اطلاعات کافی داشته باشیم [۲۱-۲]. ولی راه و روش این ارتباطات به‌طور کامل شناخته شده نیست، از آنجایی که نحوه شکل‌گیری این ارتباط مهم و حیاتی است این موضوع همواره مورد توجه محققان بوده است. در این راستا بررسی نحوه شکل‌گیری تصمیمات سطح بالا و تأثیر این تصمیمات در سیگنال‌های چشمی و مغزی کمک زیادی برای حل ابهام بازخورد منفی خواهد کرد.

از آنجایی که شناخت سازوکار نورونی و بررسی ویژگی‌های تصمیم‌های سطح بالا در انسان سخت است، استفاده از انواع داده‌ها می‌تواند این موضوع را آشکارتر کند [۱۶]. در نتیجه یکی از روش‌های تحلیل، استفاده از داده‌های رفتاری در راستای تشخیص چگونگی شکل‌گیری تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی است. پورسل با ارائه یک چارچوب محاسباتی و تحلیل داده‌های رفتاری بر اساس سه پارامتر مربوط به تصمیمات سطح بالا نشان داده است که تجمع شواهد بازخوردهای منفی متوالی وزن‌گذاری شده با قطعیت منجر به شکل‌گیری متغیر تغییر تصمیم سطح بالا می‌شود [۲۱]. زمانی که مقدار این متغیر به یک حد آستانه می‌رسد تصمیم سطح بالا تغییر می‌کند. ولی داده‌های رفتاری نمی‌توانند یک پیش‌بینی مشخصی از احتمال تغییر تصمیم سطح بالا ارائه دهند. در نتیجه ارائه روشی برای پیش‌بینی احتمال تغییر تصمیم سطح بالا، بدون بررسی و تحلیل ویژگی‌های پنهان حائز اهمیت است. فعالیت‌های چشمی از جمله اندازه قطر مردمک با فرایندهای تصمیم‌گیری در ارتباطند [۲۲-۲۳]. در یک مطالعه نشان داده شده است که پاسخ‌های مردمک قبل از دریافت بازخورد می‌توانند قطعیت شکل گرفته شده را بازنمایی کنند [۱۵]. همچنین ارتباط بین پاسخ‌های مردمک در آزمایش‌های با دریافت بازخورد مثبت و منفی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۴]. بنابراین اگر پاسخ‌های مردمک بتوانند با دقت بالایی احتمال تغییر تصمیمات سطح بالا را پیش‌بینی کنند نه تنها ضعف و محدودیت روش‌های قبلی (تحلیل داده‌های رفتاری، ثبت نورونی) را جبران کرده بلکه نشان می‌دهند اطلاعات مربوط به تصمیمات سطح بالا و پیچیده می‌تواند در

فرکانس ۷۵ هرتز قرار گرفتند. سیگنال‌های چشمی با استفاده از دستگاه ردیاب چشمی (EyeLink Plus 1000 (SR-Research) با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰۰ هرتز ثبت شد. در طول آزمایش‌ها، ردیاب چشم می‌تواند داده‌ها را از هر دو چشم ثبت کند که داده‌های مربوط به چشم سمت چپ ثبت شد. داده‌های چشم چپ از طریق لینک اترنت به دستگاه ردیاب چشمی متصل شده بود. دستگاه ردیاب چشمی توسط کامپیوتر میزبان کنترل می‌شد و اندازه قطر مردمک و مختصات چشم روی محور y, x ثبت شد. قبل از شروع هر آزمایش موقعیت چشم در ابتدای هر بلوک از آزمایش اعتبارسنجی و تنظیم شد. برای اعتبارسنجی، آزمودنی‌ها برای مدت کوتاهی چشمان خود را روی ۹ نقطه از صفحه نمایش، ثابت نگه می‌داشتند. پس از انجام این مراحل، آزمایش اصلی آغاز می‌شد. به منظور محاسبه خطای چشم بیشینه ۷۵٪ درجه بینایی و میانگین نیم درجه بینایی به ازای ۹ نقطه اعتبارسنجی نمایش داده شده، به‌عنوان خطای قابل قبول پذیرفته شد. داده‌های ثبت شده از چشم سمت چپ در تمام آزمایش‌ها در یک فایل قابل بازبازی در نرم‌افزار متلب ذخیره شدند. در کلیه تحلیل‌ها حرکت‌های پلک با درون‌یابی خطی حذف شده است.

۲-۲-آزمودنی‌ها

۹ آزمودنی (۷ زن؛ همه راست دست) با دید نرمال یا تصحیح شده به نرمال در این مطالعه شرکت کردند. این آزمایش با شرکت‌کنندگان سالم انسانی که هیچ سابقه بیماری روانی و عصبی نداشتند و دارو مصرف نمی‌کردند، انجام شد. کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی ایران این مطالعه را تأیید کرده است و تمامی شرکت‌کنندگان قبل از شروع آزمایش رضایت‌نامه کتبی آگاهانه دریافت کردند. تمام آزمایش‌ها (حدود ۵۳۰۰۰ آزمایش) مطابق با دستورالعمل‌ها و مقررات اخلاقی انجام شدند. در این آزمایش ابتدا همه آزمودنی‌ها در چند جلسه آموزشی با آزمون RDM آشنا شدند. سپس چند جلسه آموزشی تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی، را به‌منظور تنظیم معیار تصمیم‌گیری خود در حالت مناسب و همچنین برقراری تعادل مناسب میان دقت و سرعت عمل انتخاب، پشت سر گذاشتند. سپس مراحل اصلی آزمایش شروع شد. در پایان هر بلوک از آزمایش، افراد از میانگین دقت عملکرد مربوطه مطلع شدند. شایان ذکر است که، قبل از انجام هر آزمایش توضیح دستورالعمل انجام آزمایش به صورت فایل کتبی در اختیار آزمودنی‌ها قرار گرفت.

۲-۳- پروتکل آزمایش

چارچوب محاسباتی استفاده شده در این آزمایش سلسله‌مراتبی همانند پژوهش پورسل و همکاران است [۲۱] و در سایکو تولباکس ۲ متلب پیاده‌سازی شد. در این آزمایش دو تصمیم‌گیری ادراکی سطح پایین و سطح بالا هم‌زمان انجام شد. تصمیم‌گیری سطح پایین مربوط به انتخاب جهت نقاط متحرک تصادفی (چپ یا راست) است و تصمیم‌گیری سطح بالا در مورد انتخاب محیط بالا یا پایین است.

داده‌های غیرارادی چشمی نمایان شود. بنابراین برای رسیدن به هدف دستیابی به سیستم‌های مشابه عملکرد مغز انسان، مغز تنها مرجع در حال کار است و تلاش برای درک چگونگی عملکرد دقیق آن می‌تواند مسیر تقریباً تضمین‌شده‌ای به سوی شبیه‌سازی این سیستم‌های ارائه دهد.

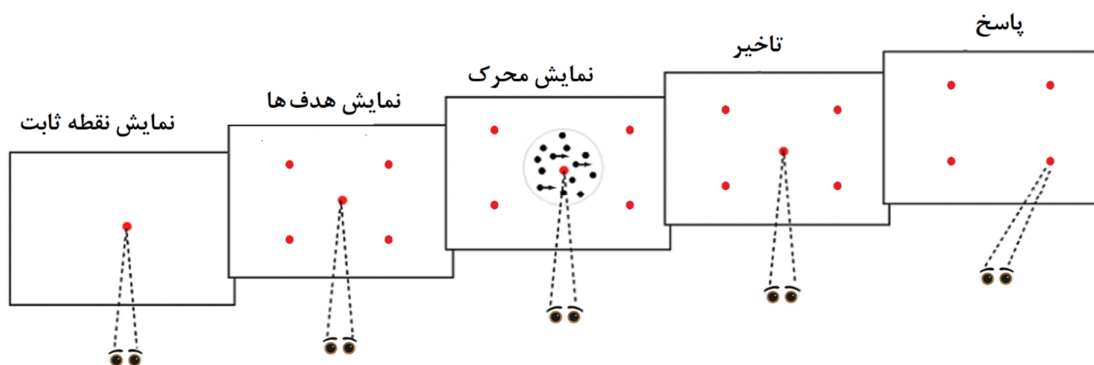
هرچند الگوریتم‌های تصمیم‌گیری در مقایسه با تصمیم‌گیری انسان دارای ضعف‌هایی هستند لیکن با سرعت خوبی پیشرفت کرده‌اند. از جمله این پیشرفت‌ها می‌توان به ظهور شبکه‌های عمیق، که الهام گرفته از سیستم بینایی مغز انسان است، اشاره کرد که بسیاری از این ضعف‌ها را برطرف نموده است [۲۵]. از آنجایی که فرآیندهای پیچیده، شامل تصمیم‌های سازمان یافته سلسله‌مراتبی هستند که در بازه‌های زمانی مختلف اخذ می‌شوند، روش‌های موجود نمی‌توانند بدون دخالت فرد متخصص و به‌صورت هوشمند یک سلسله‌مراتب از گزینه‌های تصمیم‌گیری را تشکیل دهند. به‌عنوان مثال یک پزشک می‌خواهد به یک بیمار کمک کند، این پزشک باید بیماری را تشخیص دهد و سپس داروی متناسب با تشخیص خود را تجویز کند. حال اگر پس از مصرف داروهای تجویزی درمان حاصل نشود و بیماری بدون هیچ تغییری در بیمار وجود داشته باشد، سؤالی که پیش می‌آید این است که آیا پزشک بیماری را اشتباه تشخیص داده است؟ یا مشکلی در تشخیص وجود نداشته، بلکه دارو اشتباهی تجویز شده‌اند. دریافت بازخورد منفی ممکن است به علت استراتژی نادقیق (تشخیص اشتباه پزشک) یا به علت تصمیم‌های ادراکی سطوح پایین نادقیق (تجویز اشتباه دارو) باشد [۲۱].

در این مقاله سعی شده است در راستای غلبه بر چالش درک دینامیک حاکم بر تغییرات تصمیمات سلسله‌مراتبی از داده‌های غیرارادی انسان (داده‌های چشمی) استفاده شود که با بررسی پارامترهایی تصمیمات سلسله‌مراتبی در مشخصه‌های استخراج شده از سیگنال‌های مربوط به قطر مردمک، نشان داده شد که قطر مردمک می‌تواند به عنوان یک نماینده معتبر از عملکرد نورون‌های بخشی از نواحی پیش‌پیشانی قشر مغز انسان در تغییرات تصمیمات پیچیده در نظر گرفته شود. سپس با ارائه چارچوبی از نحوه اجرای تصمیمات سلسله‌مراتبی سعی کردیم ایده‌ای برای توسعه الگوریتم‌های تصمیم‌گیری سیستم‌های پیچیده ارائه دهیم، که بر اساس سلسله‌ای از اطلاعات با قطعیت کم و داده‌های نادقیق مشابه انسان بتوانند تصمیمی نزدیک به بهینه اتخاذ کنند.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱- پروتکل ثبت داده‌های چشمی

آزمودنی‌ها آزمایش‌ها را در یک اتاق نیمه‌تاریک و عایق در برابر صدا انجام داده‌اند. برای ثبت داده‌ها ابتدا آزمودنی‌ها روی یک صندلی قابل تنظیم با ثابت‌کننده چانه و پیشانی به فاصله ۵۷ سانتیمتر از صفحه نمایش CRT با قطر ۱۷ اینچ و وضوح تصویر ۸۰۰ در ۶۰۰ با



شکل ۱. طراحی آزمایش سلسله مراتبی [۲۱]. دو جفت هدف در بالا و پایین نقطه تثبیت‌کننده تمرکز نشان دهنده محیط بالا و پایین است. اهداف چپ یا راست در هر محیط جهت حرکت نقاط متحرک را تعیین می‌کنند. آزمودنی‌ها تصمیم سطح بالا و تصمیم سطح پایین را هم‌زمان با حرکت چشمی گزارش می‌کردند. جهت حرکت نقاط متحرک و قدرت محرک و مدت زمان نمایش آن‌ها در آزمایش‌ها متفاوت بود.

همچنین به منظور بررسی تأثیر قدرت محرک بر سیگنال‌های قطر مردمک از رگرسیون خطی^۴ (رابطه ۱) استفاده شده است (دستور در محیط متلب: regression).

$$Pupil = \beta_0 + \beta_1 * coherence + \epsilon \quad (1)$$

در این رابطه، متغیر مستقل *coherence* به‌منزله قدرت محرک و *Pupil* متغیر وابسته نمایانگر میانگین پاسخ‌های قطر مردمک در ۶ قدرت محرک است. پارامترهای β_0 عرض از مبدا، β_1 شیب خط و ϵ جمله خطا است. برای پیش‌بینی احتمال تغییر تصمیم سطح بالا در تغییرات قطر مردمک از رگرسیون لجستیک^۵ (رابطه ۲) استفاده شده است (دستور در محیط متلب: mnrfit).

$$P_{switch} = (1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 * Pupil)})^{-1} \quad (2)$$

در این رابطه، متغیر P_{switch} احتمال تغییر استراتژی، *Pupil* میانگین اندازه قطر مردمک در یک آزمایش و β_i ضرایب رگرسیون برازش شده هستند. در تحلیل داده‌های رفتاری، برای گزارش فاصله اطمینان از خطای استاندارد میانگین (SEM^6) مطابق رابطه ۳ استفاده شده است.

$$SE_x = s/n \quad (3)$$

در رابطه بالا SE خطای استاندارد، s انحراف معیار نمونه و n تعداد کل نمونه است. کلیه شبیه‌سازی‌ها و مقایسات آماری در محیط نرم‌افزار متلب انجام پذیرفته است.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج تحلیل داده‌های رفتاری

ابتدا برای بررسی چگونگی تأثیرگذاری بازخورد منفی و قدرت محرک در تصمیمات سلسله مراتبی، به تحلیل داده‌های رفتاری به‌دست‌آمده از آزمایش روان-فیزیک پرداخته شد. رابطه بین قدرت محرک در یک آزمایش قبلی از تغییر محیط و احتمال تغییر به‌طور جداگانه در آزمایش‌های با پاسخ درست و نادرست در شکل ۲-الف نشان داده شد. در آزمایش‌های با پاسخ درست- که با رنگ سبز نشان داده شده است-

روند آزمایش به این صورت است که ابتدا یک نقطه ثابت قرمز رنگ به دایره قطر ۳/۰ درجه بینایی در مرکز صفحه نمایش به‌منظور ثابت نگه داشتن تمرکز آزمودنی‌ها ظاهر می‌شد. پس از یک تاخیر زمانی ۲۰۰ الی ۵۰۰ میلی ثانیه‌ای دو جفت هدف قرمز رنگ به طول ۵ درجه بینایی در دو طرف بالا و پایین، ۸ درجه خارج از حول نقطه تثبیت‌کننده تمرکز ظاهر می‌شد. پس از یک تاخیر زمانی ۲۰۰ - ۵۰۰ میلی‌ثانیه‌ای دیگر، نقاط متحرک سفید رنگ مربعی شکل در یک دایره به قطر ۵ درجه بینایی در مرکز تصویر حول نقطه تثبیت‌کننده تمرکز ظاهر می‌شد. روی زمینه مشکی رنگ نقاط متحرک سفید رنگ هرکدام در سایز 4×4 پیکسل (هر ضلع به اندازه 0.096 درجه بینایی) با میانگین تراکم $16/7$ نقطه بر مربع درجه بینایی در هر ثانیه قرار می‌گرفتند. نقاط متحرک با ۶ قدرت محرک $(0.0, 0.3, 0.6, 1.2, 2.5, 5.0)$ تعبیه شده و محیط برای چندین آزمایش مطابق یک توزیع هندسی بریده شده در محدوده ۲ الی ۲۰ آزمایش با میانگین ۶ ثابت می‌ماند. تغییر محیط بدون علامت است. آزمودنی‌ها پاسخ‌های خود را در اسرع وقت با حرکت چشم در محیط بالا یا پایین به سمت یکی از دو جفت هدف قرمز رنگ گزارش می‌دادند. بلافاصله پس از گزارش تصمیم، بازخورد دریافت می‌شد. در ست یا نادرست بودن تصمیم توسط دو بازخورد شنیداری (دو صدای بوق: فرکانس ۲۵۰ هرتز برای پاسخ درست و فرکانس ۱۰۰۰ هرتز برای پاسخ نادرست) به آزمودنی‌ها اعلام می‌گردید. در صورتی که هر دو تصمیم صحیح بود، بازخورد مثبت و در غیر این صورت بازخورد منفی بود. آزمایش بعدی بدون تاخیر بلافاصله بعد از آزمایش قبلی شروع می‌شد. آزمایش‌های انجام شده حدود ۵۳۰۰۰ آزمایش است.

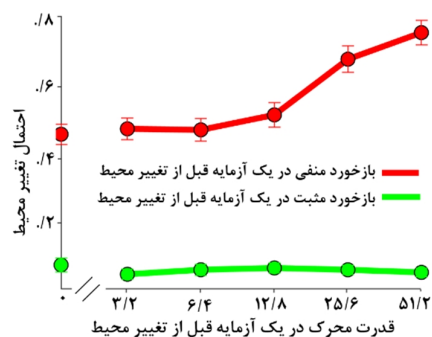
۴-۲- آنالیز و تحلیل آماری داده‌ها

به‌منظور ارزیابی تأثیر بازخورد های منفی متوالی، در بازه پس از بازخورد-تصمیم بر روی سیگنال‌های مردمک از آزمون کروسکال-والیس^۳ (دستور در محیط متلب: kruskalwallis) استفاده شده است.

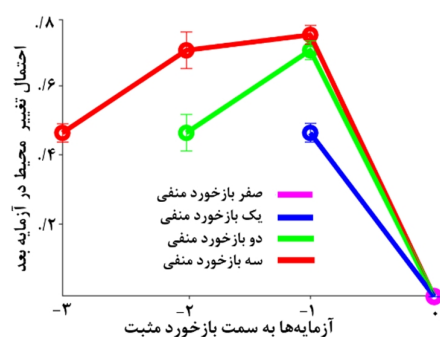
احتمال تغییر محیط پس از دریافت بازخورد مثبت صفر است. شکل ۲-ب نشان می‌دهد اگر نتیجه تصمیم بازخورد مثبت باشد، از آنجایی که مقدار متغیر تغییر محیط بعد از دریافت بازخورد مثبت فوراً به صفر بارگذاری می‌شود، علیرغم دریافت بازخوردهای منفی متوالی قبل از یک بازخورد مثبت، احتمال تغییر محیط صفر خواهد بود. وقتی آزمودنی بازخورد منفی دریافت می‌کند همان لحظه محیط را تغییر نمی‌دهد، چون در مورد انتخاب‌های جهت حرکت نقاط نامطمئن است، معمولاً دو یا چهار آزمایش در یک محیط باقی می‌ماند. افزایش تعداد بازخوردهای منفی، احتمال تغییر محیط را افزایش می‌دهد. ماندن در یک محیط یا تغییر آن، علاوه بر دریافت بازخورد منفی به پارامتر قدرت محرک نیز بستگی دارد. رخ دادن قدرت محرک پایین در توالی بازخوردهای منفی احتمال تغییر محیط را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر تغییر استراتژی تصمیم سطح بالا زمانی رخ می‌دهد که بازخوردهای منفی وزن گذاری شده با قطعیت تصمیم‌های سطح پایین به یک حد آستانه برسد. این مسئله برای یک آزمایش قبل و برای زیرمجموعه‌ای از آزمایش‌ها در شکل ۲-ج نشان داده شد ($P < 0.05$ آزمون Wallis-Kruskal).

۳-۲- نتایج تحلیل سیگنال قطر مردمک

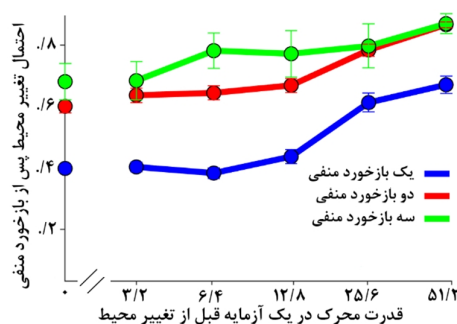
به منظور تحلیل سیگنال‌های چشمی و مقایسه با داده‌های رفتاری، تأثیر پارامترهای تصمیمات سلسله مراتبی بر اندازه قطر مردمک در آزمایش‌های بازخورد منفی بررسی شد. تحلیل سیگنال‌های چشمی در بازه پس از بازخورد-تصمیم صورت گرفته است. دو مؤلفه مقدار بیشینه مردمک و مقدار میانگین قطر مردمک استخراج شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده این مؤلفه‌ها ارتباط متناسب با پارامترهای بیان شده دارند. این مؤلفه‌ها برای پارامتر قدرت محرک (بالا متوسط و پایین) و همچنین توالی بازخوردهای منفی (یک، دو و سه) برای هر آزمودنی رسم شده است. مؤلفه‌های قطر مردمک در آزمایش‌های منفی ارتباط مستقیمی با قدرت محرک دارند. شکل ۳ قسمت الف و ب نشان می‌دهند در قدرت‌های محرک پایین، آزمایش سخت‌تر است. از آنجایی که در این نوع آزمایش‌ها جهت اخذ تصمیم درست شواهد بیشتری جمع‌آوری نشده است در نتیجه مقدار میانگین قطر مردمک و بیشینه مقدار مردمک کوچک‌تر است. ولی در قدرت محرک بالاتر زمانی که در آزمایش آسان بازخورد منفی دریافت می‌شود، به احتمال زیاد تصمیم سطح پایین درست انتخاب شده است و آزمودنی سعی کرده است با جمع‌آوری شواهد بیشتر در آزمایش‌های بعدی محیط را درست انتخاب کند که این امر منجر به افزایش اندازه قطر مردمک در دو حالت مقدار بیشینه مردمک و مقدار میانگین مردمک شده است. از آنجایی که برای رفع ابهام بازخورد منفی، آزمودنی چندین آزمایش در یک محیط باقی می‌ماند، تجمیع شواهد برای تغییر تصمیم سطح بالا عامل افزایش بار اطلاعاتی متغیر تغییر تصمیم می‌شود. این تغییرات بار اطلاعاتی در سیگنال‌های ثبت شده از مردمک نمود پیدا می‌کند. در شکل ۳ قسمت ج و د نشان



(الف)



(ب)



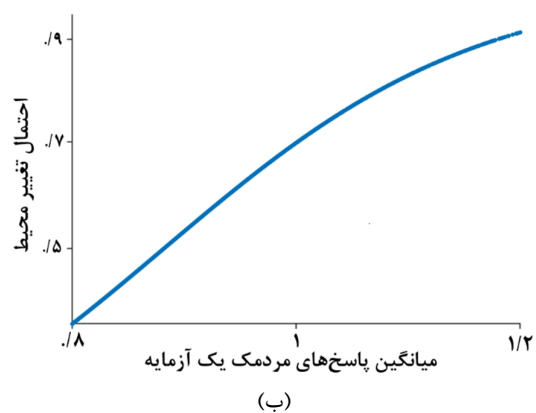
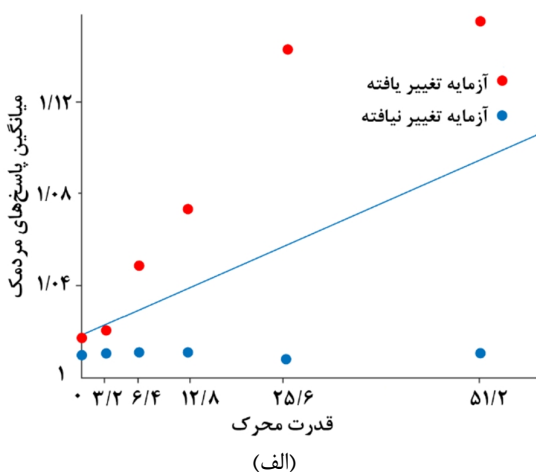
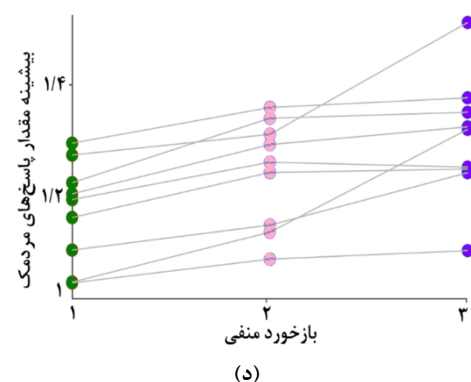
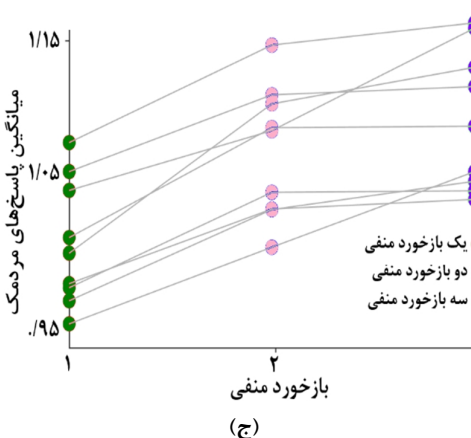
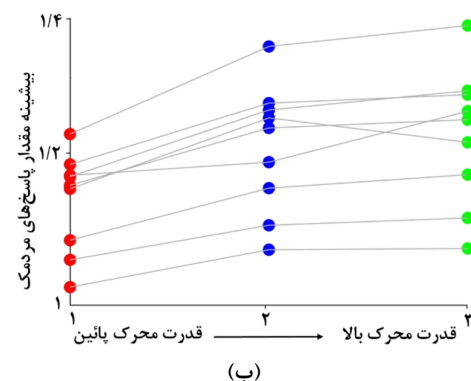
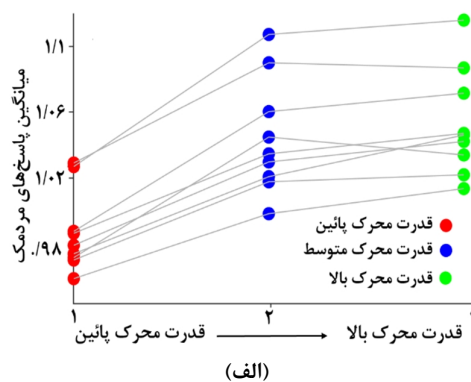
(ج)

شکل ۲. الف. احتمال تغییر محیط در دریک آزمایش قبل از تغییر با دریافت پاسخ نادرست و درست در قدرت‌های محرک مختلف. ب. احتمال تغییر محیط پس از دریافت یک بازخورد مثبت. ج. احتمال تغییر محیط در آزمایش‌های با توالی بازخورد منفی در قدرت محرک مختلف در تمامی قسمت‌ها دایره‌ها میانگین داده‌ها و خطوط SEM است (رابطه ۳).

از آنجایی که آزمودنی‌ها از درست بودن انتخاب محیط و تصمیم سطح پایین خود مطمئن بودند تمایلی برای تغییر محیط نداشتند ولی در آزمایش‌های نادرست که منجر به دریافت بازخورد منفی شده بود، به منظور تلاش برای دریافت بازخورد مثبت در آزمایش‌های بعدی با افزایش قطعیت (افزایش قطعیت با قدرت محرک متناسب هست) در مورد جهت نقاط انتخابی، احتمال تغییر محیط افزایش یافت.

داده شده است که با افزایش توالی بازخوردهای منفی و تجمیع شواهد بیشتر، میانگین اندازه قطر مردمک و همچنین مقدار بیشینه مردمک نیز افزایش خواهد یافت.

در ادامه به بررسی وجود رابطه قدرت‌های محرک و میانگین اندازه قطر مردمک در یک آزمایشه قبل از تغییر محیط و دیگر آزمایشه‌ها می‌پردازیم (رابطه ۱). همان‌گونه که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، میانگین اندازه قطر مردمک در آزمایشه‌های که در آن‌ها تغییر رخ داده است بزرگ‌تر از دیگر آزمایشه‌ها است ($P < 0.058$ $R^2 = 0.3$). بنابراین برای پاسخ دادن به این سؤال که آیا رابطه‌ای بین پارامترهای سیگنال‌های چشمی و تغییر تصمیم سطح بالا وجود دارد یا خیر، میانگین اندازه قطر مردمک با احتمال تغییر تصمیم سطح بالا بررسی شد. به عبارت دیگر میانگین اندازه قطر مردمک، در یک آزمایشه قبل از تغییر محیط و بقیه آزمایشه‌ها را بدون تفکیک اثر هر دو عامل (قدرت محرک و تعداد بازخوردهای منفی) با رگرسیون لجستیک بررسی کردیم (رابطه ۲). همان‌طور که در شکل ۴-ب مشاهده می‌شود، هر چقدر میانگین اندازه قطر مردمک بیشتر می‌شود احتمال تغییر تصمیم سطح بالا نیز افزایش می‌یابد ($P < 0.05$ $\beta = 5.189$).



شکل ۴. الف. رابطه میانگین اندازه قطر مردمک با احتمال تغییر محیط در قدرت‌های محرک مختلف. ب. رابطه میانگین اندازه قطر مردمک با احتمال تغییر محیط

شکل ۳. الف. رابطه میانگین اندازه قطر مردمک و ب. رابطه بیشینه مقدار مردمک با قدرت محرک (بالا، متوسط، پایین). ج. رابطه میانگین اندازه قطر مردمک و د. رابطه بیشینه مقدار مردمک با بازخوردهای منفی متوالی (یک، دو و سه).

1. Input: random sensory evidence (direction of motion)
2. Output: feedback
3. Decision (low level: left or right and high level: environment)
4. If feedback is positive go to 1
5. Else $SE = SE + \text{signal} (\text{certainty} * \text{negative feedback})$
6. If $SE < \text{threshold}$ go to 1
7. Else switch to a new environment
8. $SE = 0$ go to 1

شکل ۵. الگوریتم تصمیم سلسله مراتبی

یک دست‌سور پخت، غذایی را آماده کند ولی اگر نتیجه‌ی مورد قبولی حاصل نشود، این سؤال پیش می‌آید که آیا آشپز اشتباه کرده است؟ یا دست‌سور پخت اشتباه بوده است؟ [۲].

تصمیمات توسط شواهد و استراتژی‌های موجود هدایت می‌شوند که اطلاعات را به عمل تبدیل می‌کنند. برای انتخاب‌های عاقلانه و درست، یک سیستم هو شمند باید یک استراتژی تصمیم مناسب اتخاذ کند. تغییرات در تصمیمات سطح بالا ممکن است پنهان باشد در نتیجه عدم تشخیص تغییرات در این نوع تصمیم‌ها، منبع اصلی دریافت بازخورد منفی در دنیای واقعی است. به دنبال یک نتیجه نادرست، دو منبع بالقوه دریافت بازخورد منفی (استراتژی ناقص موجود در تصمیم‌های سطح بالا و یا عملکرد نادرست در اتخاذ تصمیم سطح پایین) باید متمایز شوند تا عملکرد در آینده بهبود یابد [۲، ۲۱].

نتایج داده‌های رفتاری نشان دادند ابهام‌زدایی از علت دریافت بازخورد منفی نیاز به یک استنتاج فعال دارد. برای استنتاج، بازخوردهای منفی انتخاب‌های گذشته با قطعیت مربوط به تصمیم‌های سطح پایین وزن‌گذاری می‌شود تا یک اطمینان در مورد تغییر یا عدم تغییر تصمیم سطح بالا به دست بیاید. جدول ۱ نتایج حاصل از تحلیل پارامترهای مؤثر در تغییر استراتژی در تصمیمات سطح بالا مستخرج از داده‌های رفتاری) را در مقایسه با مطالعات قبلی نشان می‌دهد.

سیگنال‌های مثبت شده از آزمودنی‌ها، نماینده‌ای از عملکرد نورون‌های مغز هستند [۲۳-۲۴]. در این پژوهش در کنار تحلیل داده‌های رفتاری، به مطالعه و بررسی سیگنال‌های مردمک چشم و

۳-۳ الگوریتم تصمیم‌گیری سلسله مراتبی

برای روشن شدن ساختار تصمیمات سطح بالا مغز انسان، ما الگوریتمی را بر پایه سازوکار نورون‌ها پیشنهاد می‌کنیم. این الگوریتم دارای دو بخش است که شبیه‌ساز دو ناحیه مغز برای اخذ تصمیم است. بخش اول شامل دو جمع‌کننده مجزا است که هر کدام از آن‌ها شواهد ورودی را به نفع یکی از گزینه‌ها به سمت راست یا چپ تجمیع می‌کند. برای تجمیع شواهد تصمیم سطح پائین مدل‌های مختلفی مبتنی بر بیولوژی مغز وجود دارد [۲۶-۳۰]. ما از مدل رقابتی استفاده کردیم [۳۰]. هر کدام از جمع‌کننده‌ها که زودتر به حد آستانه برسند، تصمیم به نفع آن گزینه (چپ یا راست) اخذ می‌شود. قطعیت نیز هم‌زمان با اخذ تصمیم سطح پایین محاسبه می‌شود [۳۱-۳۲]. اختلاف عددی بین دو جمع‌کننده برنده و بازنده منعکس‌کننده قطعیت خواهد بود [۳۰]. بخش دوم برای تصمیم سطح بالا است. اگر بازخورد مثبت باشد متغیر تغییر تصمیم سطح بالا (SE') صفر خواهد بود و هیچ سیگنالی به بخش سطح بالا ارسال نخواهد شد و آزمایش بعدی شروع خواهد شد. ولی اگر نتیجه بازخورد منفی باشد، سیگنال بازخورد منفی وزن‌گذاری شده همراه با قطعیت به بخش سطح بالا منتقل می‌شود و اطلاعات این سیگنال‌ها در SE در چندین آزمایش تجمیع می‌شود. اگر متغیر به حد آستانه برسد در آزمایش بعدی محیط تغییر می‌کند و سپس SE به صفر بارگذاری می‌شود، در غیر این صورت بدون تغییر محیط آزمایش بعدی شروع می‌شود. شکل ۵ شبه-کدی از این نوع تصمیمات است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نوآوری این تحقیق آنالیز سیگنال‌های مربوط به داده‌های چشمی (به صورت ویژه تغییرات قطر مردمک انسان) در هنگام انجام آزمایش سلسله مراتبی برای غلبه بر چالش دینامیک حاکم بر تغییرات تصمیمات سطح بالا است. مشاهده شد که عوامل مؤثر در تغییر استراتژی (قدرت محرک، قطعیت، بازخورد منفی) در این نوع تصمیمات در تغییرات قطر مردمک بازنمایی می‌شود. در سال‌های اخیر توانایی بالای مغز در پردازش داده‌ها و نحوه عملکرد آن مورد توجه قرار گرفته و الهام بخش طراحی بسیاری از سیستم‌های مشابه عملکرد انسان است [۸]. به عنوان نمونه، یک آشپز می‌خواهد بر اساس

جدول ۱: مقایسه نتایج تحلیل داده‌های رفتاری با پژوهش‌های جدید

پژوهش	بازخورد منفی			بازخورد مثبت		
	افزایش بازخورد منفی	آزمایه سخت	آزمایه آسان	تعداد بازخورد	آزمایه سخت	آزمایه آسان
[۲۱]	افزایش احتمال تغییر استراتژی (شکل 3B)	کم (شکل 2B)	زیاد (شکل 2B)	بی‌تاثیر (شکل 5D)	صفر (شکل 2B)	صفر (شکل 2B)
[۲]	افزایش احتمال تغییر استراتژی (شکل 2G)	کم (شکل 1H)	زیاد (شکل 1H)	بی‌تاثیر	صفر (شکل 1H)	صفر (شکل 1H)
این پژوهش	افزایش احتمال تغییر استراتژی (شکل ۲-ج)	کم (شکل ۲-الف) رنگ قرمز	زیاد (شکل ۲-الف) رنگ قرمز	بی‌تاثیر (شکل ۲-ب)	صفر (شکل ۲-الف) رنگ سبز	صفر (شکل ۲-الف) رنگ سبز

جدول ۲: مقایسه نتایج تحلیل سیگنال‌های قطر مردمک با پژوهش‌های جدید

اندازه قطر مردمک					
پژوهش	آزمایه	تغییر استراتژی	بازخورد منفی		بازخورد مثبت
			آزمایه آسان	آزمایه سخت	آزمایه آسان
[۲۴]	RDM	--	کوچکتر	کوچکتر	بزرگتر
[۳۶]	RDM	--	کوچکتر	کوچکتر	بزرگتر
[۳۷]	آزمایه شنیداری		کوچکتر	کوچکتر	بزرگتر
[۳۸]	آزمایه شنیداری	بزرگتر	کوچکتر		--
این پژوهش	RDM سلسله مراتبی	بزرگتر	کوچکتر		--

نخواهد بود در نتیجه اندازه میانگین قطر مردمک کوچکتر خواهد بود.

در نهایت ما توانستیم الگوریتمی برای تصمیم‌های سلسله مراتبی ارائه دهیم که می‌تواند مبنی بر عملکرد مغز انسان باشد. پس از رمزگشایی از شواهد حسی در قشر گیجگاهی میانی (MT^A) [۸] اخذ تصمیم سطح پایین در ناحیه قشر آهیانه‌ای خلفی (LIP^A) مغز انجام می‌پذیرد [۹]. همچنین هم دامنه و هم زمان فعالیت نورون‌های این ناحیه منعکس‌کننده قطعیت تصمیم است [۳۵]. در صورتی که نتیجه تصمیم بازخورد منفی باشد، سیگنال به نواحی دیگر مغز ارسال می‌شوند. با ثبت نورونی از میمون نشان داده شده که دو ناحیه قشر سینگولیت قدامی (ACC¹) و قشر پیشانی داخلی پشتی (DMFC¹) در تصمیم‌های سطح بالا فعال هستند. DFMC به‌عنوان ورودی برای ACC عمل می‌کند و داده‌های لحظه‌ای مربوط به تصمیم سطح پایین را به ACC انتقال می‌دهد که در واقع قطعیت حیوان در تصمیم سطح پایین و تعداد بازخوردهای منفی را نشان می‌دهد. در عمل جمع این داده‌ها که مربوط به زیرمجموعه‌ای از آزمایش‌ها است انجام می‌پذیرد و زمانی که این تجمیع به یک حد آستانه می‌رسد تغییر استراتژی برای تصمیم سطح بالا انجام می‌شود [۲].

نکته حائز اهمیت این است که در مقایسه با تحلیل داده‌های رفتاری حاصل از مطالعه پورسل و همکاران [۲۱] و ثبت نورونی از میمون [۲] تغییر استراتژی تصمیم سطح بالا به‌درستی در سیگنال‌های استخراج شده از قطر مردمک انسان انعکاس می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان از مدل مبتنی بر مردمک به دست آمده در این تحقیق به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی احتمال تغییر تصمیم‌های سطح بالا استفاده کرد.

سپاسگزاری

این پژوهش از پایان‌نامه مورد حمایت ستاد علوم شناختی با شماره ۹۱۱۴ استخراج شده است.

مراجع

- [1] P. R. Murphy, N. Wilming, D. C. Hernandez-Bocanegra, G. Prat-Ortega, and T. H. Donner, "Adaptive circuit dynamics across human cortex during evidence accumulation in

ارتباط آن‌ها با بازخورد منفی و قدرت محرک (قطعیت) در تصمیم‌های سلسله مراتبی پرداخته شد. از آنجایی که تغییرات استراتژی مربوط به تصمیمات سطح بالا پنهان هستند داده‌های رفتاری پیش‌بینی‌کننده خوبی برای تغییرات استراتژی تصمیمات سطح بالا نیستند. بنابراین معرفی روش جدید با استفاده از انواع داده‌های دیگر به غیر از داده‌های رفتاری برای پیش‌بینی احتمال تغییر تصمیم می‌تواند بسیار مورد توجه باشد.

در این پژوهش دو مؤلفه از سیگنال‌های مردمک، در آزمایش‌های بازخورد منفی در بازه پس از بازخورد-تصمیم معرفی شدند. (مقدار بیشینه قطر مردمک و میانگین اندازه قطر مردمک). نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که اطلاعات استخراجی از داده‌های مردمک، رابطه متناسب با قدرت‌های محرک آزمایش‌ها دارند (شکل ۳-الف و ب). همچنین در توالی بازخورد های منفی تفاوت متناسبی در سیگنال‌های استخراج شده مردمک دیده می‌شود. زمانی که توالی بازخوردهای منفی افزایش می‌یابد به این معنی است که اطلاعات زیادی از انتخاب‌های پیشین برای اتمام توالی بازخوردهای منفی جمع‌آوری شده است. افزایش بار اطلاعاتی مربوط به تغییر تصمیم در مغز منجر به افزایش اندازه قطر مردمک و همچنین مقدار بیشینه آن خواهد شد (شکل ۲-ج و د). در واقع می‌توان به این نکته اشاره کرد که در مجموع مؤلفه‌های معرفی شده همبستگی معنی‌داری با پارامترهای تصمیم‌های سلسله مراتبی دارند و ترکیب مسئله می‌تواند درک جامع‌تری از چگونگی شکل‌گیری تصمیم سلسله مراتبی ارائه دهد. در جدول ۲ نتایج حاصل از تحلیل سیگنال‌های مردمک با مطالعات قبلی مقایسه شد و نشان داده شد تحلیل حاصل در این پژوهش با مطالعات دیگر مطابقت دارد.

این مطالعه علاوه بر اینکه، تغییرات سیگنال قطر مردمک را در قدرت‌های محرک مختلف نشان داد، همچنین مشخص کرد که اندازه قطر مردمک قبل از تغییر محیط بزرگتر است (شکل ۳-الف و ب). این مسئله نشان از اهمیت پارامتر قدرت محرک و بازخورد منفی توأم در تغییر تصمیم سطح بالا دارد. تعامل این دو پارامتر مهم در تغییر تصمیم‌های سطح بالا در میانگین اندازه قطر مردمک در تک‌تک آزمایش‌ها، در شکل ۳-ب قابل مشاهده است. این تحلیل نشان داد بعد از تغییر تصمیم، فعالیت و تلاشی برای جمع‌آوری اطلاعات لازم

- flexibility and reward sensitivity following nicotinic receptor stimulation in dependent smokers: a randomized trial," *JAMA psychiatry*, vol. 74, no. 6, pp. 632-640, 2017.
- [21] B. A. Purcell, and R. Kiani, "Hierarchical decision processes that operate over distinct timescales underlie choice and changes in strategy," *Proceedings of the national academy of sciences*, vol. 113, no. 31, pp. E4531-E4540, 2016.
- [22] W. Keung, T. A. Hagen, and R. C. Wilson, "Regulation of evidence accumulation by pupil-linked arousal processes," *Nature Human Behaviour*, vol. 3, no. 6, pp. 636-645, 2019.
- [23] J. C. Van Slooten, S. Jahfari, T. Knapen, and J. Theeuwes, "How pupil responses track value-based decision-making during and after reinforcement learning," *PLoS computational biology*, vol. 14, no. 11, pp. e1006632, 2018.
- [24] O. Colizoli, J. W. de Gee, A. E. Urai, and T. H. Donner, "Task-evoked pupil responses reflect internal belief states," *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1-13, 2018.
- [25] L. C. Yan, B. Yoshua, and H. Geoffrey, "Deep learning," *nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, 2015.
- [26] X.-J. Wang, "Probabilistic decision making by slow reverberation in cortical circuits," *Neuron*, vol. 36, no. 5, pp. 955-968, 2002.
- [27] K.-F. Wong, and X.-J. Wang, "A recurrent network mechanism of time integration in perceptual decisions," *Journal of Neuroscience*, vol. 26, no. 4, pp. 1314-1328, 2006.
- [28] D. Vickers, "Evidence for an accumulator model of psychophysical discrimination," *Ergonomics*, vol. 13, no. 1, pp. 37-58, 1970.
- [29] R. Ratcliff, "A diffusion model account of response time and accuracy in a brightness discrimination task: Fitting real data and failing to fit fake but plausible data," *Psychonomic bulletin & review*, vol. 9, no. 2, pp. 278-291, 2002.
- [30] R. Bogacz, E. Brown, J. Moehlis, P. Holmes, and J. D. Cohen, "The physics of optimal decision making: a formal analysis of models of performance in two-alternative forced-choice tasks," *Psychological review*, vol. 113, no. 4, pp. 700, 2006.
- [31] F. Majdabadi, and R. Ebrahimpour, "The role of explicit and implicit confidence in multi-stage decisions," *Advances in Cognitive Science*, pp. 37, 2020.
- [32] S. Vafaei, R. Ebrahimpour, and S. Zabbah, "The Relationship Between Pupil Diameter Data and Confidence in Multi-Stage Decisions," *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*, pp. 70-79, 2020.
- [۳۳] حسن‌پور خ، سیدعربی م، دانشور س. کنترل صدلی چرخ‌دار بر پایه سیگنال‌های EEG به وسیله واسط مغز و ماشین. پردازش سیگنال پیشرفته. ۲۰۱۷؛ ۱(۱): ۷-۱۵.
- [۳۴] مقدری م، زلفی لبقوان م، دانشور س. تشخیص تصور گفتار کلمات بازی سنگ، کاغذ، قیچی با استفاده از سیگنال های EEG پردازش سیگنال پیشرفته. ۲۰۲۱ :-
- [35] R. Kiani, and M. N. Shadlen, "Representation of confidence associated with a decision by neurons in the parietal cortex," *science*, vol. 324, no. 5928, pp. 759-764, 2009.
- [36] A. E. Urai, A. Braun, and T. H. Donner, "Pupil-linked arousal is driven by decision uncertainty and alters serial choice bias," *Nature Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 1-11, 2017.
- [37] K. M. Lempert, Y. L. Chen, and S. M. Fleming, "Relating pupil dilation and metacognitive confidence during auditory decision-making," *PLoS One*, vol. 10, no. 5, p. e0126588, 2015.
- [38] A. L. Filipowicz, C. M. Glaze, J. W. Kable, and J. I. Gold, "Pupil diameter encodes the idiosyncratic, cognitive complexity of belief updating," *Elife*, vol. 9, p. e57872, 2020.
- changing environments," *Nature Neuroscience*, pp. 1-11, 2021.
- [2] M. Sarafyazd, and M. Jazayeri, "Hierarchical reasoning by neural circuits in the frontal cortex," *Science*, vol. 364, no. 6441, 2019.
- [3] D. Peixoto, J. R. Verhein, R. Kiani, J. C. Kao, P. Nuyujukian, C. Chandrasekaran, J. Brown, S. Fong, S. I. Ryu, and K. V. Shenoy, "Decoding and perturbing decision states in real time," *Nature*, vol. 591, no. 7851, pp. 604-609, 2021.
- [4] G. M. Stine, A. Zylberberg, J. Ditterich, and M. N. Shadlen, "Differentiating between integration and non-integration strategies in perceptual decision making," *Elife*, vol. 9, pp. e55365, 2020.
- [5] G. Kyriakarakos, K. Patlitzianas, M. Damasiotis, and D. Papastefanakis, "A fuzzy cognitive maps decision support system for renewables local planning," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 209-222, 2014.
- [6] J. L. Salmeron, A. Ruiz-Celma, and A. Mena, "Learning FCMs with multi-local and balanced memetic algorithms for forecasting industrial drying processes," *Neurocomputing*, vol. 232, pp. 52-57, 2017.
- [7] L. Yahyaie, and S. Khanmohammadi, "A new multi-criteria decision making based on fuzzy-TOPSIS theory," *Journal of Advances in Computer Engineering and Technology*, vol. 2, no. 4, pp. 39-48, 2016.
- [8] E. Daglarli, "Computational Modeling of Prefrontal Cortex for Meta-Cognition of a Humanoid Robot," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 98491-98507, 2020.
- [9] K. H. Britten, M. N. Shadlen, W. T. Newsome, and J. A. Movshon, "The analysis of visual motion: a comparison of neuronal and psychophysical performance," *Journal of Neuroscience*, vol. 12, no. 12, pp. 4745-4765, 1992.
- [10] M. N. Shadlen, and W. T. Newsome, "Neural basis of a perceptual decision in the parietal cortex (area LIP) of the rhesus monkey," *Journal of neurophysiology*, vol. 86, no. 4, pp. 1916-1936, 2001.
- [11] L. Van Maanen, R. P. Grasman, B. U. Forstmann, M. C. Keuken, S. D. Brown, and E.-J. Wagenmakers, "Similarity and number of alternatives in the random-dot motion paradigm," *Attention, Perception, & Psychophysics*, vol. 74, no. 4, pp. 739-753, 2012.
- [12] C. Strauch, L. Greiter, and A. Huckauf, "Pupil dilation but not microsaccade rate robustly reveals decision formation," *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1-9, 2018.
- [13] A. Mognon, J. Jovicich, L. Bruzzone, and M. Buiatti, "ADJUST: An automatic EEG artifact detector based on the joint use of spatial and temporal features," *Psychophysiology*, vol. 48, no. 2, pp. 229-240, 2011.
- [14] J. A. Lorteije, A. Zylberberg, B. G. Ouellette, C. I. De Zeeuw, M. Sigman, and P. R. Roelfsema, "The formation of hierarchical decisions in the visual cortex," *Neuron*, vol. 87, no. 6, pp. 1344-1356, 2015.
- [15] R. Van den Berg, A. Zylberberg, R. Kiani, M. N. Shadlen, and D. M. Wolpert, "Confidence is the bridge between multi-stage decisions," *Current Biology*, vol. 26, no. 23, pp. 3157-3168, 2016.
- [16] S. V. Shooshtari, J. E. Sadrabadi, Z. Azizi, and R. Ebrahimpour, "Confidence representation of perceptual decision by eeg and eye data in a random dot motion task," *Neuroscience*, vol. 406, pp. 510-527, 2019.
- [17] A. Zylberberg, J. A. Lorteije, B. G. Ouellette, C. I. De Zeeuw, M. Sigman, and P. Roelfsema, "Serial, parallel and hierarchical decision making in primates," *Elife*, vol. 6, pp. e17331, 2017.
- [18] J. A. Reggia, G. E. Katz, and G. P. Davis, "Humanoid cognitive robots that learn by imitating: Implications for consciousness studies," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 5, pp. 1, 2018.
- [19] S. Fatahi, and H. Moradi, "A fuzzy cognitive map model to calculate a user's desirability based on personality in e-learning environments," *Computers in Human Behavior*, vol. 63, pp. 272-281, 2016.
- [20] E. Lesage, S. E. Aronson, M. T. Sutherland, T. J. Ross, B. J. Salmeron, and E. A. Stein, "Neural signatures of cognitive

زیر نویس ها

1 Random Dot Motion
2 Psychtoolbox
3 Kruskal Wallis Test
4 Linear Regression
5 Logistic Regression
6 Standart Error of Mean

7 Switch evidence
8 Medial Temporal
9 Lateral Intraparietal Cortex
10 Anterior Cingulate Cortex
11 Dorsal Medial Frontal Cortex