The Relationship Between Pupil Diameter Data and Confidence in Multi-Stage Decisions

Shirin Vafaei[1], Reza Ebrahimpour[1, 2*], Sajjad Zabbah[2]

[1]Faculty of Computer Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
[2]School of Cognitive Sciences, Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), Tehran, Iran

Article Info:

Received: **22 Feb 2019** ***Revised:*** **4 Aug 2019** ***Accepted:*** **9 Oct 2019**

ABSTRACT

Introduction: The basic human decision involves several stages of consecutive decisions. In the presence of multi-stage decisions, to avoid interruption in the sequence of decisions, there is no possibility to request a confidence report on the middle stages. This inevitably makes to estimate the confidence of the decision. The challenges involved in applying behavioral data to determine confidence, make it more important to use other types of data. Since eye data is associated with the decision process, this study examined the dynamics of involuntary information, in the context of multi-stage decisions. The pupil size was applied as a valuable source to estimate the decision confidence. ***Material and Methods:*** A two-stage psychophysical experiment was designed. In this experiment, participants were instructed to decide about the direction of moving dots in two successive stimuli (right or left for the first stage and up or down for the second stage). Participants were received correct feedback in a trial when they reported the correct direction of both stimuli. During the experiment, the eye movement data of the participants were recorded by an eye-tracking device. ***Results:*** The latency of the pupil diameter signal positive peak and pupil diameter at the time of response were meaningfully associated with decision confidence. Furthermore, the results demonstrated that pupil size was altered in the current decision based on the confidence of the previous decision. ***Conclusion:*** This research establishes that in the multis tage decision making, the confidence of a decision is represented in involuntary information that can reflect the individual's strategy in complex situations. In addition, the confidence of the previous decision can significantly change voluntary and involuntary behaviors in the same manner.

Key words:

1. Reaction Time
2. Humans
3. Pupil

***Corresponding Author:** Reza Ebrahimpour

E-mail: *rebrahimpour@srttu.edu*

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]

ارتباط بین داده‌های چشمی مردمک و قطعیت در تصمیم‌های چند مرحله‌ای

شیرین وفایی[۱]، رضا ابراهیم پور[۱،۲*]، سجاد ذباح[۲]

[۱]دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

[۲]پژوهشکده علوم شناختی، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۳ اسفند ۱۳۹۷ **اصلاحیه:** ۱۳ مرداد ۱۳۹۸ **پذیرش:** ۱۷ مهر ۱۳۹۸

چـــــکیده

مقدمه: تصمیم‌های اساسی انسان شامل چندین مرحله از تصمیم‌های متوالی است. در این‌گونه تصمیمات چندمرحله‌ای، به‌منظور جلوگیری از ایجاد وقفه در توالی تصمیمات، امکان درخواست گزارش قطعیت بین مراحل وجود ندارد. نیاز است که قطعیت تصمیم تخمین زده شود. چالش‌های موجود در به‌کارگیری داده‌های رفتاری برای تخمین قطعیت، استفاده از نوع داده‌های دیگری را مهم‌تر کرده است. از آنجا که داده‌های چشمی با فرایند تصمیم در ارتباطند، این پژوهش به بررسی چگونگی رفتار اطلاعات غیرارادی در بستر تصمیمات چندمرحله‌ای پرداخت. اندازهٔ مردمک به‌عنوان یک منبع ارزشمند برای تخمین قطعیت تصمیم استفاده شد. ***مواد و روش‌ها:*** یک آزمایش روان‌فیزیک دو مرحله‌ای طراحی شد. در این آزمایش شرکت‌کننده‌ها در مورد جهت حرکت نقاط در دو محرک متوالی (راست یا چپ برای مرحلهٔ اول و بالا یا پایین برای مرحلهٔ دوم) تصمیم‌گیری می‌کردند. هنگامی که شرکت‌کننده‌ها جهت درست هر دو محرک را گزارش کردند در یک آزمایه بازخورد درست دریافت کردند. در طول آزمایش داده‌های حرکت چشمی شرکت‌کنندگان توسط یک دستگاه ردیاب چشمی ثبت گردید. ***یافته‌ها:*** زمان بیشینه شدن قطر مردمک و اندازهٔ قطر مردمک در لحظهٔ پاسخ به صورت معنی‌داری با قطعیت تصمیم در ارتباطند. علاوه بر این نتایج نشان داد که اندازهٔ مردمک چشم در تصمیم فعلی بر اساس قطعیت تصمیم قبلی تغییر خواهد کرد. ***نتیجه‌گیری:*** این پژوهش مشخص می‌کند که در تصمیمات چند مرحله‌ای، قطعیت تصمیم در داده‌های غیرارادی چشمی نیز مشهود است که می‌تواند بازتاب استراتژی فرد تحت شرایط پیچیده باشد. به‌علاوه تصمیم قبلی به صورت معنی‌داری می‌تواند رفتارهای ارادی و غیرارادی را به طریق مشابه تغییر دهد.

کلید واژه‌ها:

۱. زمان پاسخ
۲. انسان‌ها
۳. مردمک چشم

* **نویسنده مسئول:** رضا ابراهیم پور

آدرس الکترونیکی: *rebrahimpour@srttu.edu*

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]

مقدمه

تصمیم‌گیری یکی از بالاترین سطوح فعالیت‌های شناختی مغز است که از دیرباز مورد توجه دانشمندان حوزهٔ علوم اعصاب شناختی قرار گرفته است (۳-۱). این فرایند به انتخاب یک گزینه از بین چندین گزینهٔ موجود اطلاق می‌گردد. انسان برای اخذ تصمیم به جمع‌آوری اطلاعات می‌پردازد؛ متناسب با اطلاعاتِ جمع‌آوری‌شده، به گزینه‌های ممکن در تصمیم وزن داده و در نهایت یک گزینه را انتخاب می‌کند (۶-۴).

برای بررسی سازوکار عصبی تصمیم‌گیری در مغز، مستقل از متغیرهای رفتاری از جمله عواطف انسانی، موقعیت اجتماعی و ... محققان به مطالعهٔ تصمیم‌گیری‌های ادراکی می‌پردازند. در تصمیم‌گیری ادراکی تصمیم‌ها صرفاً دربارهٔ محرکی است که از طریق یکی از حواس پنج‌گانه درک می‌شود و لذا تأثیر کمی از متغیرهای شخصیتی می‌پذیرند. مطالعات بسیاری با به‌کارگیری این آزمایش‌های ادراکی و استفاده از ابزارهای مختلف تهاجمی و غیرتهاجمی از جمله ثبت الکتروفیزیولوژی، ثبت سیگنال‌های مغزی ، مدل‌های محاسباتی -توصیفی و داده‌های چشمی سعی داشته‌اند چگونگی جمع‌آوری اطلاعات تا رسیدن به آستانهٔ تصمیم و بازنمایی آن در نواحی مختلف مغز را نشان دهند (۱۱-۷). به‌علاوه پارامترهای تصمیم از جمله احتمال پیشین، قطعیت انتخاب و تعداد گزینه‌های موجود در تصمیم‌گیری از جمله موضوعات مورد بررسی در انواع تصمیم‌گیری‌های ادراکی طی سال‌های گذشته بوده است (۱۵-۱۲).

با وجود بررسی‌ها و پیشرفت‌های گسترده در حوزهٔ تصمیم‌گیری ادراکی، همچنان دانش کافی در مورد نحوهٔ عملکرد و راهبرد انسان در تصمیمات پیچیده و سطح بالای دنیای واقعی از جمله تصمیمات چندمرحله‌ای وجود ندارد. از این‌رو، اخیراً تمرکز مطالعات تصمیم‌گیری به مسائل دنیای واقعی و تصمیم‌گیری‌های سطح بالا نزدیک‌تر شده است (۱۶، ۱۲). تصمیماتِ زندگی روزمره طیف وسیعی از تصمیمات موازی، گسسته، چندگزینه‌ای و چندمرحله‌ای را در برمی‌گیرد. به طور مثال، در برخی از شرایط دنیای واقعی، انسان در یک زمان مشخص در حال جمع‌آوری اطلاعات به صورت موازی برای چندین تصمیم متفاوت است (۱۷). گاهی نیز اخذ یک تصمیم ممکن است به جمع‌آوری اطلاعات در بازه‌های زمانی مختلف نیاز داشته باشد (۱۹، ۱۸). نوع دیگری از تصمیمات پیچیده که در زندگی روزمره تجربه می‌شوند، تصمیم‌های چندمرحله‌ای است بدین شکل که برای رسیدن به یک هدف خاص باید دنباله‌ای از تصمیمات متوالی اتخاذ گردد (۲۰). وجه مشترک تمامی این تصمیمات عملکرد متفاوت انسان نسبت به شرایط ساده‌تر برای اتخاذ یک تک تصمیم است. نحوهٔ اثرگذاری تصمیمات متوالی بر یکدیگر و تغییر رویهٔ انسان بر اساس تصمیمات پیشین خود، از جمله یافته‌های محققان در سال‌های اخیر بوده است (۲۲، ۲۱).

یکی از موضوعات چالش‌برانگیز در مطالعهٔ این‌گونه تصمیمات ادراکی پیچیده، بررسی نقش قطعیت به‌عنوان پارامتری از تصمیم است (۲۴، ۲۳). قطعیتِ انتخاب، درجه‌ای از اطمینانِ تصمیم‌گیرنده نسبت به درستی انتخاب مورد نظر است که بر رویِ انواع عملکردهایِ شناختی تأثیر می‌گذارد. این موضوع اهمیت خود را در تصمیم‌های دومرحله‌ای بیشتر نشان می‌دهد. کیانی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ در یک آزمایش ادراکی دومرحله‌ای نشان دادند در شرایطی که پاداش تنها در صورت درست بودن هر دو مرحله به شرکت‌کننده تعلق می‌گرفت، قطعیت تصمیم مرحلهٔ اول باعث تغییر در زمان پاسخ تصمیم دوم شده و رابطهٔ بین دقت و سرعت تصمیم دوم را کنترل می‌کند (۲۲). از آنجا که در این مطالعه بازخوردی از تصمیم اول داده نمی‌شد، قطعیت به‌عنوان تنها منبع اطلاعاتی فرد از تصمیم پیشین خود است. از این رو بازنمایی قطعیت تصمیم در این مرحله می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد راهبرد فرد در تصمیم‌گیری دومرحله‌ای به دست دهد.

از آنجا که به دلیل عدم ایجاد وقفه در فرایند تصمیم‌گیری، امکان درخواست گزارش قطعیت از افراد بین مراحل تصمیم‌گیری وجود ندارد؛ در دست داشتن این پارامتر در چنین شرایطی مستلزم تخمین است. یکی از روش‌های تخمین و بازنمایی قطعیت، استفاده از داده‌های رفتاری است. در این رویکرد می‌توان از آزمایه‌های کمکی که برای همین هدف در بین دیگر آزمایه‌ها قرار داده شده‌اند، استفاده کرد تا قطعیت تصمیم را تخمین زد (۲۲). اما این روش با افزایش تعداد مراحل تصمیم‌گیری با محدودیت آزمایشگاهی مواجه است و عملاً استفاده از آن ممکن نیست. به عبارت دیگر، در این رویکرد، تعداد آزمایه‌های کمکی که برای تخمین قطعیت استفاده می‌گردند، در صورت افزایش مراحل، به صورت تصاعدی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین ارائهٔ روشی برای پیش‌بینی مقدار قطعیت با استفاده از نوع داده‌های دیگر در چنین مواقعی حائز اهمیت است. تحقیقات پیشین داده‌های چشمی از جمله اندازهٔ قطر مردمک را مرتبط با فرایند تصمیم‌گیری دانسته‌اند (۲۶، ۲۵). در یک آزمایش RDM تک تصمیم، چندین مشخصه از داده‌های مردمک مرتبط یا قطعیت تصمیم استخراج شد که قادر بودند به خوبی سطوح قطعیت را از یکدیگر متمایز کنند (۲۷). بنابراین اگر این اطلاعات چشمی بتوانند با دقت بالایی همانند داده‌های رفتاری قطعیت را پیش‌بینی کنند، نه تنها ضعف و محدودیت روش‌های قبلی را جبران کرده بلکه نشان می‌دهند اطلاعات قطعیت می‌توانند در داده‌های غیرارادی فرد حتی در چارچوب تصمیمات پیچیده نیز حضور داشته باشد. در این مقاله سعی شده است با معرفی مشخصه‌هایی از سیگنال قطر مردمک چشم به تخمین قطعیت تصمیم پرداخته و در ادامه نقش قطعیت را در تغییر رفتار داده‌های غیرارادی چشمی علاوه بر

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]

داده‌های رفتاری در چارچوب تصمیمات چندمرحله‌ای نشان دهیم.

مواد و روش‌ها

روان -فیزیک

به‌منظور مطالعهٔ ارتباط تصمیم‌ها در تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای با استفاده از داده‌های چشمی، از آزمایش روان -فیزیک استفاده شد. روان -فیزیک، رشته‌ای علمی است که در حوزهٔ روانشناسی مطرح بوده و هدف آن، مطالعهٔ کمی ظرفیت‌ها و قابلیت‌های ادراکی -شناختی مغز به وسیلهٔ اندازه‌گیری پاسخ انسان و موجودات زندهٔ قابل آزمایش است. به‌منظور بررسی و ارزیابی عملکرد شرکت‌کننده در آزمایش روان -فیزیک از معیاری به نام «تابع روانسنجی » استفاده شد (۶). این تابع، احتمال انتخاب یک گزینه را به ازای سختی‌های مختلف محرک ورودی نشان می‌دهد.

دستگاه ردیاب چشمی

به‌منظور ثبت حرکات چشمی شرکت‌کنندگان از سیستم ردیاب چشمی EyeLink 1000 (SR-Reaserach plus استفاده گردید که فرکانس نمونه‌برداری آن ۱۰۰۰ هرتز است. در ابتدای هر بلاک آزمایش از یک صفحه -که بر روی نمایشگر دستگاه و همچنین نمایشگر شرکت‌کننده ظاهر می‌گردد- به‌منظور تنظیم دستگاه استفاده شد. در این صفحه ۹ نقطه با فاصله زمانی‌های ۲ ثانیه به نمایش در می‌آمد. از شرکت‌کننده خواسته می‌شد که با حرکات چشم نقاط نمایش داده شده را دنبال کند و چشم خود را بر روی آن نقاط نگه دارد. بیشینه ۰/۷۵ درجهٔ بینایی و میانگین نیم درجهٔ بینایی به ازای ۹ نقطه نمایش داده شده به‌عنوان خطای قابل‌قبول در نظر گرفته می‌شد. در حین آزمایش کلیهٔ اطلاعات مربوط به حرکت چشمی شرکت‌کننده ثبت می‌گردید. گفتنی است در کلیهٔ تحلیل‌های انجام‌شده حرکات پلک حذف شده است. سیگنال مردمک نمایش داده شده توسط یک فیلتر میانگین‌گیر با اندازهٔ پنجرهٔ ۲۰ میلی‌ثانیه نرم شده است.

شرکت‌کننده‌ها

۹ شرکت‌کنندهٔ راست دست (۴ خانم ۵ آقا) که محدودهٔ سنی آن‌ها از ۲۱ تا ۳۷ سال بوده است، در آزمایش شرکت کردند. تمامی شرکت‌کنندگان از نظر حدت و فیلد بینایی سالم بودند و هیچ‌یک از آن‌ها سابقهٔ بیماری‌های عصبی و روانی نداشتند. قبل از شروع آزمایش از تمامی شرکت‌کنندگان رضایت‌نامهٔ کتبی دریافت شد. شرکت‌کنندگان برای ورود به مرحلهٔ اصلی آزمایش، ۳ مرحلهٔ آموزشی را به‌منظور آشنایی با رویهٔ آزمایش، تنظیم معیار تصمیم‌گیری خود در حالت مناسب و همچنین برقراری تعادل خوبی میان دقت و سرعت عمل انتخاب پشت سر می‌گذاشتند. مرحلهٔ اصلی آزمون شامل ۴ بلاک ۱۴۳ تایی از آزمایه‌ها بود که به طور میانگین هر فرد حدود ۲۲۸۸ آزمایه در طی روزهای متفاوت انجام می‌داد. شایان ذکر است، قبل از انجام هرگونه آزمایش دستورالعمل انجام آزمایش به صورت کامل برای شرکت‌کننده شرح داده می‌شد.

محرک بینایی

محرک بینایی استفاده شده در این آزمایش، همانند پژوهش ون دن برگ و همکاران است (۲۲). در این آزمایش نقاط متحرک در یک دایره به قطر ۴ درجهٔ بینایی در مرکز تصویر، حول نقطهٔ تثبیت‌کنندهٔ تمرکز ظاهر می‌شد. نقاط متحرک سفید رنگ هرکدام در سایز ۲ در ۲ پیکسل (هر ضلع به اندازهٔ ۰/۰۸۸ درجهٔ بینایی) روی زمینهٔ مشکی رنگ با میانگین تراکم ۱۷/۹ نقطه بر درجهٔ بینایی در واحد مربع در هر ثانیه (نقطه/درجهٔ ۲/ثانیه) قرار می‌گرفتند. هر محرک از مجموعه‌های مستقل نقاط متحرک تشکیل شده است که به صورت فریم‌های ویدئویی متوالی بر روی صفحه نمایش ظاهر می‌شدند.

طراحی آزمایش

آزمایش در یک اتاق نیمه‌تاریک و ایزوله شده در برابر نور انجام شده است. به این صورت که شرکت‌کننده روی یک صندلی قابل تنظیم به فاصلهٔ ۵۷ سانتیمتر از یک صفحه نمایش CRT با قطر ۱۷ اینچ و وضوح تصویر ۷۶۸ در ۱۰۲۴ با فرکانس ۷۵ هرتز قرار می‌گرفت. فاز اصلی آزمایش شامل سه دسته آزمایهٔ مختلف بود: آزمایه‌های دو تصمیم، آزمایه‌های تک تصمیم اول (D1*) و آزمایه‌های تک تصمیم کچ (D1st-catch) که در ادامه هرکدام به تفصیل توضیح داده خواهند شد.

بخش عمدهٔ آزمایه‌ها در یک بلاک، دو تصمیم بودند که در طی آن شرکت‌کننده می‌بایست دو تصمیم مجزا در مورد محرک بصری RDM می‌گرفت. تصمیم اول (D1st) در مورد چپ یا راست بودن جهت حرکت نقاط و تصمیم بعدی در مورد بالا یا پایین بودن جهت حرکت نقاط صورت می‌گرفت. در یک آزمایه دو تصمیم در ابتدا یک نقطهٔ آبی‌رنگ به قطر ۰/۴۲ درجهٔ بینایی در مرکز صفحه نمایش نشان داده می‌شد. دو نقطهٔ آبی‌رنگ دیگر با اندازه‌ای مشابه با نقطهٔ آبی مرکزی و به فاصلهٔ ۶ درجهٔ بینایی از آن برای نشان دادن نقاط هدف افقی، در سمت چپ و راست قرار می‌گرفتند. علاوه بر این، چهار مربع سفیدرنگ توخالی به ابعاد ۰/۴۲ درجهٔ بینایی در بالا و پایین نقاط هدف افقی به فاصلهٔ ۶ درجهٔ بینایی ظاهر می‌شدند که نشان‌دهندهٔ نقاط هدف عمودی بودند. از شرکت‌کننده خواسته می‌شد که چشم خود را روی دایرهٔ مرکزی آبی‌رنگ ثابت نگه دارد تا محرک نشان داده شود. پس از طی یک زمان تصادفی (توزیع نمایی بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه)، محرک که شامل نقاط تصادفی متحرک با

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]

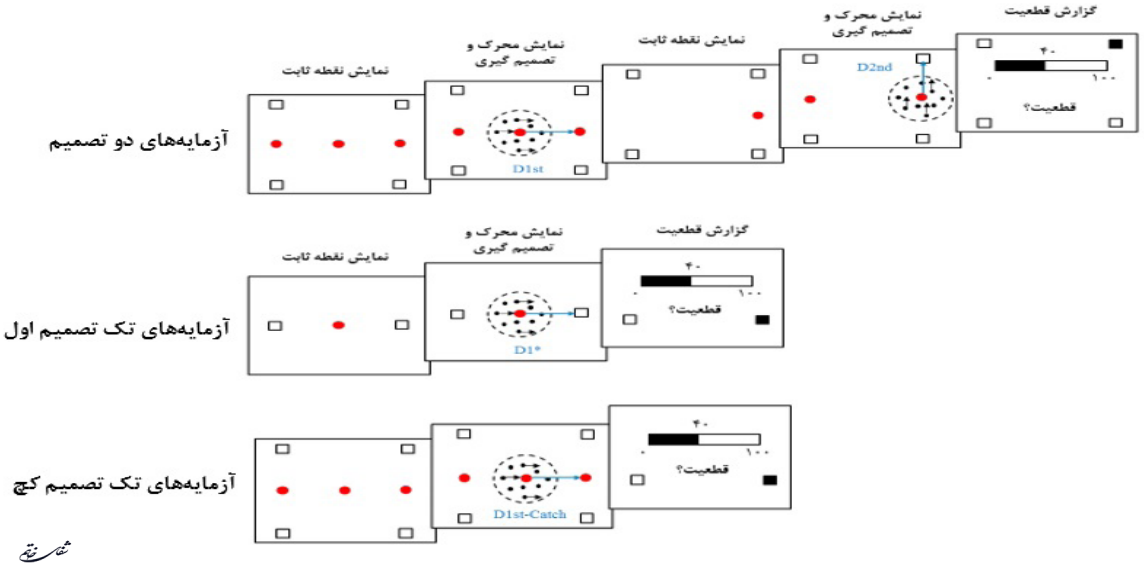
قدرت مشخص بود، نمایش داده می‌شد. شرکت‌کننده هر زمان که آمادهٔ پاسخگویی بود پاسخ خود را با حرکت چشمی سریع به یکی از اهداف چپ یا راست اعلام می‌کرد. نقطه هدفی که فرد به‌عنوان جهت نقاط در مرحلهٔ اول انتخاب کرده بود به منزلهٔ نقطهٔ مرکزی برای تصمیم دوم (D2nd) تلقی می‌شد. نحوهٔ نمایش محرک و پاسخ‌دهی در مرحلهٔ دوم نیز همانند مرحلهٔ اول بود (بر اساس بالا/پایین بودن جهت حرکت نقاط به یکی از اهداف بالا یا پایین نقطهٔ مرکزی فعلی، حرکت چشمی سریع انجام می‌شد). بعد از گذشت ۵۰۰ میلی‌ثانیه یک مستطیل افقی سفیدرنگ توخالی به اندازهٔ ۵ درجهٔ بینایی بالاتر از هدف نهایی انتخابی ظاهر می‌شد تا شرکت‌کننده میزان اطمینان خود را در مورد تصمیم کلی خود (هر دو تصمیم) با پر کردن طول بار قطعیت اعلام کند. گزارش قطعیت با استفاده از موس صورت می‌گرفت. پس از گزارش قطعیت، سیگنال صوتی آگاهی از پاسخ در مورد نتیجهٔ نهایی به فرد داده می‌شد. زمان پاسخگویی هر تصمیم از لحظهٔ شروع محرک تا زمان خاموش شدن محرک در نظر گرفته می‌شد.

دو نوع آزمایهٔ اضافی دیگر در فاز اصلی به کار گرفته شدند که در آن‌ها فقط یک تصمیم در مورد جهت حرکت (همانند تصمیم مرحلهٔ اول آزمایه‌های دو تصمیم) گرفته می‌شد. قبل از پخش سیگنال صوتی بازخورد، شرکت‌کننده باید میزان اطمینان خود را در مورد درستی تک تصمیم خود اعلام می‌کرد. در آزمایه‌های D1st-catch، از آنجا که ساختار شروع آزمایه همانند آزمایه‌های دو تصمیم بود (وجود نقاط هدف بالا و پایین علاوه بر نقاط افقی چپ و راست) شرکت‌کننده تصور می‌کرد که قرار است در این آزمایه دو تصمیم پشت سر هم اتخاذ کند. در حالی که پس از اتمام محرک تصمیم اول، همانند آزمایه‌های D1* مرحلهٔ دومی وجود نداشت. این دو دسته آزمایه، امکان مقایسهٔ قطعیت را در تصمیمات تکی با تصمیم اول از آزمایه‌های دو تصمیم در اختیار می‌گذارد و برای تخمین قطعیت مرحلهٔ اول در آزمایه‌های دو تصمیم استفاده خواهند شد.

در هر آزمایه، قدرت محرک (تعداد نقاط متحرکی که در یک جهت خاص حرکت می‌کنند) برای هر تصمیم به صورت تصادفی از مجموعهٔ {۰، ۳/۲+-، ۶/۴+-، ۱۲/۸+- ، ۲۵/۶+- و ۵۱/۲+-} درصد انتخاب می‌شد. قدرت‌های محرک منفی مربوط به جهت چپ/بالا و قدرت‌های محرک مثبت مربوط به جهت راست/پایین است. در قدرت محرک ۰٪، جهت حرکت درست به صورت تصادفی انتخاب می‌شد. یک بلاک آزمایش شامل همهٔ ترکیبات آزمایه‌های دو تصمیم، تک تصمیم اول و تک تصمیم کچ می‌شود (۱۴۳ آزمایه).

آنالیزها و تحلیل‌های آماری

در تصمیمات چندمرحله‌ای، به‌منظور عدم ایجاد وقفه در توالی تصمیمات، گزارش قطعیت در بین مراحل امکان‌پذیر نخواهد بود و بنابراین در دست داشتن این مشخصه در هر یک از مراحل میانی مستلزم تخمین مقدار قطعیت با استفاده از روش‌های مختلف است. در مطالعهٔ (۲۲) ون دن برگ و همکارانش برای به دست آوردن قطعیت تصمیم اول در آزمایه‌های دو تصمیم، از الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایگی روی مجموعه



تصویر ۱- طراحی آزمایش اصلی (۲۲). سطر بالا نشان‌دهندهٔ آزمایهٔ دو تصمیم است که در طی آن از آزمودنی خواسته می‌شود در هر مرحله، زمانی که آمادهٔ پاسخگویی بود جهت حرکت نقاط را با حرکت سریع چشمی به نقاط هدف مشخص کند. در انتهای آزمایه نیز قطعیت خود را در مورد تصمیم کلی گزارش می‌کرد. سطر وسط طراحی تصمیم‌های تکی اول را نشان می‌دهد که در آن آزمودنی تنها یک تصمیم در مورد راست یا چپ بودن جهت نقاط اتخاذ می‌کند. سطر پایین نشان‌دهندهٔ طراحی آزمایش برای آزمایه‌های تک تصمیم کچ است که همانند آزمایه‌های تک تصمیم اول است با این تفاوت که آزمودنی تصور دارد که قرار است دو مرحله تصمیم‌گیری انجام دهد. نکته: محل قرارگیری بار قطعیت به صورت شماتیک نشان داده شده است.

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]

آزمایه‌های D1* و D1st-catch استفاده کردند. بدین شیوه که برای هر آزمایهٔ دوتایی، از بین این دو دسته آزمایه، آن‌هایی که دارای قدرت محرک یکسان و دقت مشابه (درست یا غلط بودن) با تصمیم اول در آزمایه‌های دو تصمیم (D1st) بودند انتخاب می‌شدند. سپس از بین این مجموعه، K نزدیک‌ترین آزمایه‌ها به زمان پاسخ تصمیم اول در نظر گرفته شده و با میانگین‌گیری از مقادیر قطعیت آن‌ها، قطعیت مرحلهٔ اول آزمایهٔ دو تصمیم به دست می‌آمد. مقدار K برای تصمیمات درست و غلط به ترتیب برابر با ۳۰ و ۱۵ اتخاذ گردید. برای ارزیابی صحت این روش از آنالیز Leave-one-out بر روی آزمایه‌های D1* و D1st-catch استفاده شد. این آنالیز دقیقاً همانند روش K نزدیک‌ترین همسایگی که در بالا شرح داده شد، انجام می‌پذیرد با این تفاوت که برای تخمین قطعیت هر آزمایه از این دو دسته، خود آزمایهٔ مورد نظر از مجموعه داده‌های آموزشی ما (آزمایه‌های D1*,D1st-catch) کنار گذاشته می‌شود. در این پژوهش برای تخمین قطعیت با استفاده از داده‌های رفتاری (نمودار ۱ قسمت ج) از روش K نزدیک‌ترین همسایگی استفاده شده است. از آنجا که دقت و قطعیت شرکت‌کننده‌ها در آزمایه‌های D1* و D1st-catch از لحاظ معنی‌داری متفاوت نبود (دقت: $P=0.11$ و قطعیت: $P=0.63$ آزمون Wilcoxon Rank sum)، برای بالا بردن دقت تخمین از هر دو دسته آزمایه استفاده شد.

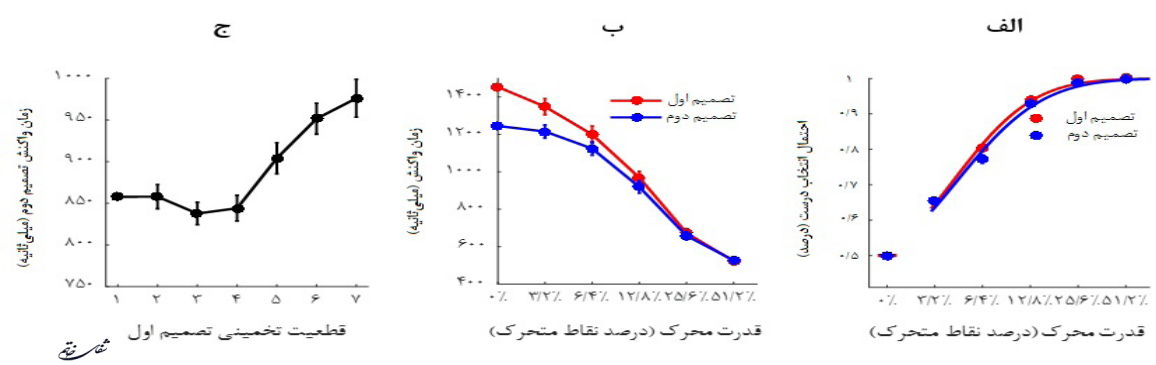
در تحلیل داده‌های رفتاری (نمودار ۱)، برای بررسی معنی‌داری یافته‌ها از آزمون Wilcoxon Ranksum استفاده شده است. اندازهٔ نمونه‌های هر گروه مقایسه، به اندازهٔ تعداد آزمایه‌های آن گروه در نظر گرفته شده است. در تحلیل نمودار ۲ از روش همبستگی (Pearson correlation) بر روی همهٔ ۷ گروه از قطعیت‌های تخمینی استفاده شده است. مقادیر گزارش شده در قسمت ج همین نمودار R2 هستند. در این نمودار به‌منظور بررسی روش پیشنهادی با استفاده از داده‌های چشمی و مقایسه با روش k نزدیک‌ترین همسایگی از آزمایه‌های D1* و D1st-catch که قطعیت آن‌ها توسط شرکت‌کننده گزارش شده و در دسترس است استفاده گردید. کلیهٔ شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار متلب R2016a انجام پذیرفته است.

یافته‌ها

در قدم اول برای بررسی تصمیمات چندمرحله‌ای و چگونگی تأثیرگذاری مراحل تصمیمات بر یکدیگر به تحلیل داده‌های رفتاری به دست آمده از آزمایش روان-فیزیک پرداخته شد.

نمودار ۱ قسمت الف و ب، به ترتیب رابطهٔ دقت و زمان پاسخ را با سختی محرک (تابع روانسنجی) برای هر دو مرحلهٔ تصمیم‌گیری در آزمایه‌های دو تصمیم نشان می‌دهد. منحنی رسم شده بر روی داده‌های رفتاری، تابع توزیع تجمعی Weibull است. همانطور که مشخص است، زمان تصمیم اول -که به رنگ قرمز نشان داده شده است- به طور کلی نسبت به تصمیم دوم بیشتر است ($P<10^{-9}$ آزمون Wilcoxon Ranksum) که خود نشان‌دهندهٔ اهمیت تصمیم اول در این قبیل تصمیمات متوالی است. نمودار ۱ قسمت ج تأثیر قطعیت مرحلهٔ قبل را که با استفاده از روش K نزدیک‌ترین همسایگی به دست آمده است بر روی زمان تصمیم فعلی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش قطعیت تصمیم اول، زمان پاسخ تصمیم دوم نیز افزایش یافته است.

به‌منظور تحلیل داده‌های چشمی و مقایسه با داده‌های رفتاری، در ابتدا دو مؤلفهٔ زمان بیشینهٔ قطر مردمک و اندازهٔ قطر مردمک در لحظهٔ پاسخ از آزمایه‌های D1* و D1st-catch استخراج شد. در نهایت همبستگی هر یک از این مؤلفه‌ها با قطعیت گزارش شده توسط آزمودنی محاسبه گردید (نمودار ۲ الف-ب). از طرفی برای ارزیابی روش نزدیک‌ترین همسایگی، از آنالیز leave one out استفاده شد (قسمت آنالیزها) و همبستگی قطعیت تخمین زده شده با این روش نیز با قطعیت واقعی گزارش شده به دست آمد. نمودار ۲ نتیجهٔ این ارزیابی را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار ۲ دیده می‌شود مشخصه‌های مردمک دارای همبستگی منفی با قطعیت بوده بدین معنی که رابطهٔ معکوس با میزان قطعیت دارند (مردمک در لحظهٔ پاسخ: $P<10^{-5}$, $R2=0.96$ و زمان بیشینهٔ مردمک: $R2=0.99$, $P<10^{-7}$). مشخصهٔ زمان بیشینه شدن اندازهٔ قطر مردمک بالاترین



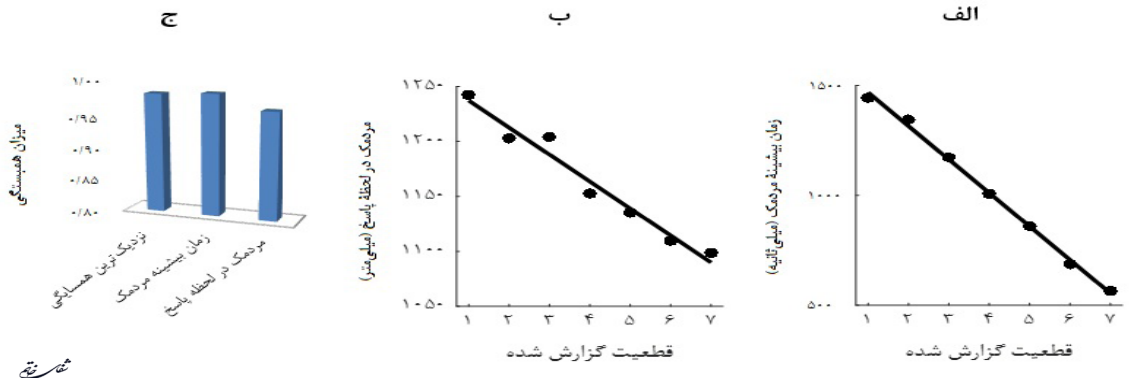
نمودار ۱- نتایج رفتاری. الف) مقایسهٔ دقت تصمیم‌های اول و دوم. ب) مقایسهٔ زمان واکنش تصمیم اول و دوم. ج) مقایسهٔ زمان واکنش تصمیم دوم نسبت به قطعیت تخمینی تصمیم اول (یافتهٔ اصلی ون دن برگ و همکاران (۲۲)). در تمامی قسمت‌ها خطوط خطا، خطای استاندارد میانگین (SEM) هستند.

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]

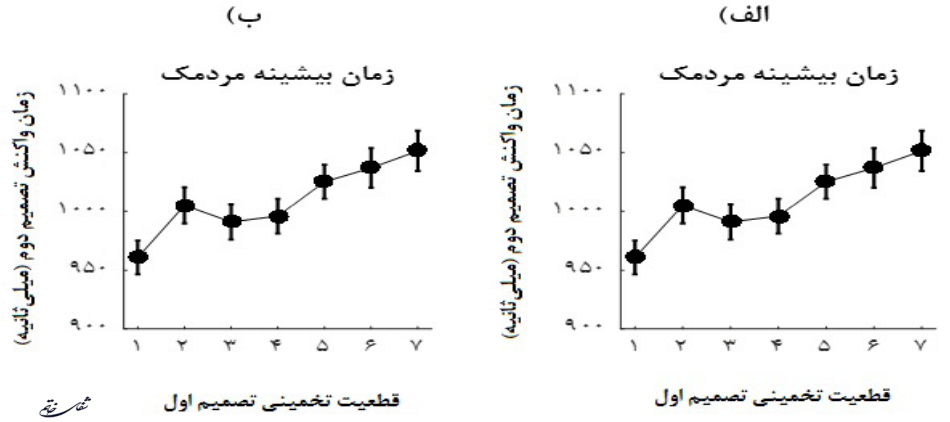
همبستگی را با قطعیت گزارش شده دارد و حتی توانسته از روش نزدیک‌ترین همسایگی ($P<10\text{-}5$, $R2=0.98$) بهتر عمل کند. نمودار ۲ قسمت ج نشان می‌دهد که به صورت کلی مؤلفه‌های پیشنهادی می‌توانند به خوبی روش نزدیک‌ترین همسایگی، قطعیت را تخمین بزنند. در ادامه به بررسی ارتباط و تأثیرگذاری مراحل تصمیم بر یکدیگر در بستر تصمیمات دومرحله‌ای با استفاده از داده‌های چشمی پرداخته خواهد شد.

نمودار ۳ ارتباط مستقیم قطعیت تخمینی تصمیم اول با استفاده از مؤلفه‌های چشمی پیشنهادی با زمان پاسخ در تصمیم دوم در آزمایه‌های دوتایی را نشان می‌دهد (مشابه با آنچه در داده‌های رفتاری مشاهده گردید). در این تحلیل از شبکهٔ عصبی رگرسیونی (GRNN) استفاده شد. مؤلفه‌های مردمک استخراجی از آزمایه‌های D1* و D1st-catch به‌عنوان داده‌ی آموزشی این شبکهٔ عصبی استفاده شدند. سپس دو مؤلفهٔ مربوطه را از سیگنال مردمک تصمیم اول در تصمیم‌های دوگانه استخراج کرده و به‌عنوان دادهٔ آزمایشی به GRNN داده شد تا قطعیت‌های تخمینی به دست آیند. پس از دسته‌بندی قطعیت‌های تخمینی به دست آمده در ۷ گروه، زمان واکنش آزمایه‌های هر گروه را محاسبه و نتایج نمایش داده شده در نمودار ۳ به دست آمد.

همچنین به‌منظور بررسی نقش داده‌های چشمی با دینامیک تصمیم‌های دومرحله‌ای، اندازهٔ قطر مردمک در دو شرایط زمانی متفاوت یکی نسبت به زمان شروع محرک و دیگری نسبت به زمان پاسخ به دست آورده شد. نمودار ۴ الف و ب، به ترتیب سیگنال قطر مردمک تصمیم دوم را از ۱۰۰ میلی‌ثانیه قبل از شروع محرک تا ۵۰۰ میلی‌ثانیه بعد از آن و نیز از ۵۰۰ میلی‌ثانیه قبل از پاسخ تا ۱۰۰ میلی‌ثانیه بعد از آن نشان می‌دهد. این تحلیل تأثیر قطعیت تصمیم مرحلهٔ قبلی -که با روش نزدیک‌ترین همسایگی به سه دستهٔ کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی شده است- بر روی اندازهٔ قطر مردمک تصمیم بعدی مورد بررسی قرار می‌دهد. همانطور که مشخص است، در هر دو بازهٔ زمانی (شروع محرک و لحظهٔ تصمیم) اندازهٔ قطر مردمک تصمیم دوم در سطح مختلف قطعیت تصمیم اول به صورت معنی‌داری از یکدیگر جدا شده‌اند که این خود حاکی از تأثیر قطعیت تصمیم اول بر روی داده‌های غیرارادی چشم در تصمیم دوم است. در واقع اندازهٔ قطر مردمک چشم در تصمیم دوم رابطهٔ مستقیمی با قطعیت تصمیم اول دارد. اندازهٔ مردمک تصمیم دوم، به ازای قطعیت بالا در تصمیم اول دارای بیشترین مقدار و برای قطعیت پایین تصمیم اول دارای کمترین مقدار خود است.

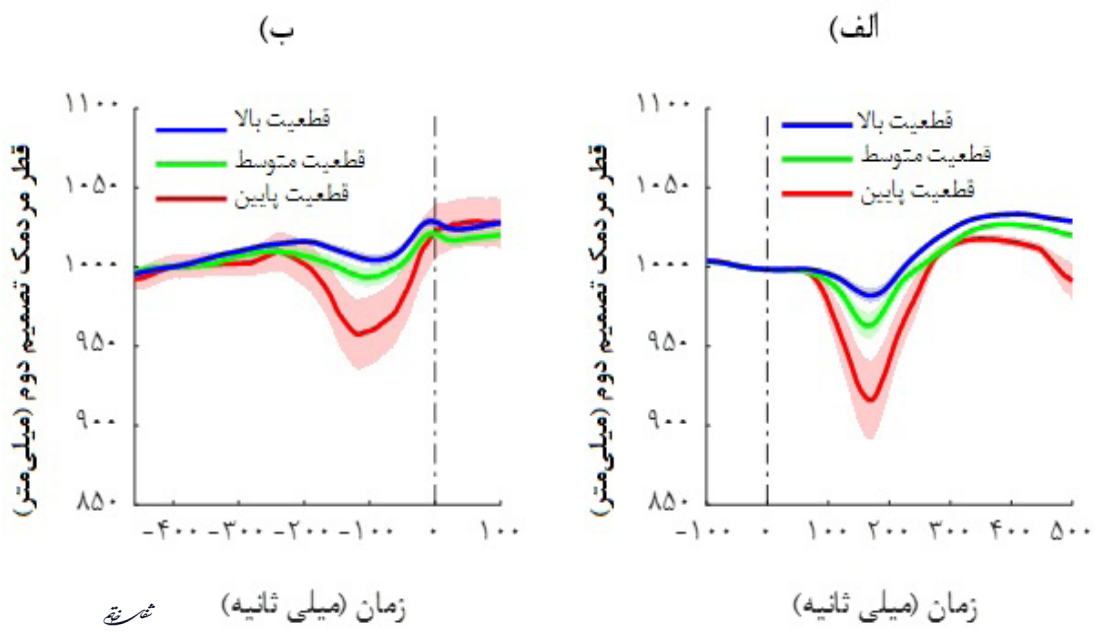


نمودار ۲- مؤلفه‌های مردمک وابسته به قطعیت. الف) رابطهٔ زمان بیشینهٔ اندازهٔ مردمک و قطعیت گزارش شده توسط آزمودنی. ب) رابطهٔ اندازهٔ مردمک در لحظهٔ پاسخ و قطعیت گزارش شده توسط آزمودنی. ج) مقایسهٔ میزان همبستگی (R2) مؤلفه‌های یاد شده و روش نزدیک‌ترین همسایگی.



نمودار ۳- تأثیر قطعیت تصمیم اول بر روی زمان پاسخ تصمیم دوم با استفاده از قطعیت تخمینی به دست آمده توسط مؤلفه‌های پیشنهادی. الف) با استفاده از مؤلفهٔ زمان بیشینهٔ مردمک. ب) با استفاده از مؤلفهٔ اندازهٔ مردمک در لحظهٔ تصمیم. خطوط خطای نمایش داده شده SEM هستند.

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]



نمودار ۴- رابطهٔ اندازهٔ مردمک تصمیم دوم با توجه به قطعیت تصمیم اول. الف) سیگنال مردمک نسبت به زمان شروع محرک. ب) سیگنال قطعیت نسبت به زمان پاسخ. قسمت‌های سایه نمایش داده شده SEM هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج داده‌های رفتاری نشان داد در تصمیم‌های دومرحله‌ای از آنجایی که پاداش تنها زمانی تعلق می‌گیرد که هر دو تصمیم به درستی گرفته شوند، قطعیت تصمیم اول می‌تواند زمان پاسخ تصمیم دوم را دستخوش تغییر کند (۲۲). بدین معنی که اگر قطعیت تصمیم اول پایین باشد، از آنجا که احتمال گرفتن پاداش (به دلیل پایین بودن تخمین احتمال درستی تصمیم اول از روی قطعیت) پایین است لذا اگر فرد به صورت بهینه عمل کند زمان زیادی برای تصمیم دوم صرف نخواهد کرد. به طور معکوس اگر میزان قطعیت در تصمیم اول بالا باشد، سعی می‌شود با سپری کردن زمان بیشتر در تصمیم دوم برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر احتمال درستی تصمیم کلی و پاداش را افزایش داد. به‌علاوه به طور میانگین مدت زمان و دقت تصمیم اول نسبت به تصمیم دوم بالاتر است. به عبارتی اگر تصمیم اول از دست برود پاداشی دریافت نخواهد شد بنابراین فرد تلاش می‌کند تا با صرف زمان بیشتری در تصمیم اول دقت خود و در واقع احتمال دریافت پاداش را افزایش دهد.

در این پژوهش در کنار تحلیل داده‌های رفتاری، به مطالعه و بررسی داده‌های مردمک چشم و ارتباط آن‌ها با قطعیت گزارش شده توسط آزمودنی در تصمیم‌های دومرحله‌ای پرداخته شد. استفاده از داده‌های رفتاری برای تخمین قطعیت، نیاز به آزمایه‌های زیادی دارد تا بتواند یک تخمین مناسب از قطعیت تصمیم اول به دست دهد و در صورت تعداد مراحل تصمیم بیشتر، با محدودیت تعداد آزمایه‌های کافی روبه‌رو است. به‌عنوان مثال دنباله‌ای از سه تصمیم متوالی را در نظر بگیرید، برای تخمین قطعیت در هر یک از مراحل اول و دوم باید آزمایه‌هایی همانند آنچه پیش‌تر توضیح داده شد (D1* و D1st-catch) -علاوه بر تک تصمیم- به شکل دو تصمیم نیز به تعداد کافی اضافه کرد. به همین دلیل تعداد بلاک‌ها برای هر آزمودنی به‌منظور تخمین مناسب قطعیت، بسیار زیاد خواهد بود و امکان ثبت داده‌های رفتاری بدین طریق با مشکل مواجه خواهد شد. بنابراین معرفی روش جدید با استفاده از انواع داده‌ها بجز داده‌های رفتاری برای تخمین قطعیت در چنین شرایطی که امکان گزارش قطعیت وجود ندارد می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد.

نتایج این مطالعه نشان داد که اطلاعات استخراجی از داده‌های مردمک چشم قادر است با کیفیت مناسبی قطعیت شرکت‌کننده را تخمین بزند (نمودار ۲). نکتهٔ حائز اهمیت این است که تخمین یاد شده کاملاً با تخمین ارائه شده در مطالعهٔ ون دن برگ و همکاران (۲۲) قابل مقایسه است. بدین ترتیب می‌توان از مدل مبتنی بر مردمک به دست آمده در این مطالعه به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی قطعیت استفاده کرد. بر این اساس، دیگر نیازی به آزمایه‌های بیشتر برای تخمین قطعیت وجود ندارد. این مدل ما را قادر می‌سازد تا دینامیک قطعیت تصمیم‌های مراحل بالاتر (برای مثال سه مرحله‌ای و بیشتر) را به خوبی مورد بررسی قرار دهیم. این مهم برای روش ارائه شده در پژوهش (۲۲) عملاً غیرقابل دستیابی است چرا که با افزایش مراحل تصمیم آزمایه‌های اضافی همانند D1* و D1st-catch و به‌علاوه آزمایه‌های مشابه با آزمایه‌های دو تصمیم برای تخمین قطعیت مرحلهٔ دوم و... می‌بایست به

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]

صورت تصاعدی افزایش پیدا کنند.

از بین کلیهٔ مؤلفه‌های بررسی شده از داده‌های مردمک، دو مؤلفه در این پژوهش معرفی شدند. (مقدار قطر مردمک در لحظهٔ پاسخ و زمانی که در آن مقدار مردمک چشم بیشینه می‌شود). از آنجایی که اندازهٔ مردمک در زمان نمایش محرک به طور کلی به صورت صعودی افزایش می‌یابد تا اطلاعات بیشتری را به مغز ارسال کند، زمانی که مردمک به بیشترین اندازهٔ خود می‌رسد با زمان واکنش و در نتیجه قطعیت (۲۸) ارتباط بسیار خوبی پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، زمان بیشینهٔ سیگنال مردمک می‌تواند قطعیت آزمودنی را به خوبی بازنمایی کند. نشان داده شده است که آزمایه‌های سخت باعث افزایش قطر مردمک می‌شوند (۳۰، ۲۹). این موضوع می‌تواند باعث شود آزمایه‌هایی با سختی محرک متفاوت مقادیر متفاوتی در هنگام تصمیم از خود نشان دهند. از آنجا که سختی محرک با قطعیت رابطهٔ بسیار قوی دارد (۳۱، ۲۴)، مؤلفهٔ دوم معرفی شده (اندازهٔ مردمک در لحظهٔ پاسخ) نیز قادر است قطعیت شرکت‌کننده را به خوبی بازنمایی کند. در مجموع مؤلفه‌های معرفی شده با همبستگی معنی‌داری که با قطعیت ایجاد می‌کنند، می‌توانند به‌عنوان یک ابزار بازنمایی قطعیت مورد استفاده قرار گیرند.

این مطالعه همچنین نشان داد که داده‌های مردمک نه تنها می‌تواند به‌عنوان یک ابزار بازنمایی قطعیت معرفی گردد، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارا و مفید برای مطالعهٔ چگونگی تأثیرگذاری و ارتباط دو تصمیم متوالی نیز عمل کند (نمودار ۴). این نمودار نشان می‌دهد که مردمک تصمیم دوم وابسته به پارامترهای تصمیم اول است. بر این اساس می‌توان از ارتباط اندازهٔ مردمک با مفهوم میزان بار شناختی (۳۳، ۳۲) بهره برد تا نتیجه گرفت که آزمودنی به چه اندازه به تصمیم دوم توجه نشان داده است. نتایج نشان دادند که آزمودنی هنگامی که قطعیت پایینی در تصمیم اول دارد، اندازهٔ مردمک پایین‌تری از خود نشان می‌دهد. این مقدار پایین باعث می‌شود که فرد شرکت‌کننده زمان کمتری به تصمیم دوم اختصاص دهد. این الگو در تصمیم‌های اول با قطعیت بالا برعکس می‌شود. بر این اساس، می‌توان با توجه به‌اندازهٔ مردمک تصمیم دوم (که وابسته به شرایط تصمیم اول است) همان یافتهٔ ارائه شده در مطالعهٔ ون دن برگ را استنباط کرد. از آنجا که مقادیر قطعیت مختلف تصمیم اول باعث تغییر معنی‌دار در اندازهٔ مردمک تصمیم دوم می‌گردد، می‌توان چنین برداشت کرد که قطعیت تصمیم اول احتمالاً تا حدودی قطعیت تصمیم دوم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در کارهای آینده می‌توان این تأثیر را با استفاده از مؤلفه‌های قطعیت برای هر دو تصمیم، به صورت دقیق‌تر مورد مطالعه قرار داد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی به شماره قرارداد ۲۸۳۰۶ انجام گردیده است.

منابع

1. Britten KH, Newsome WT, Shadlen MN, Celebrini S, Movshon JA. A relationship between behavioral choice and the visual responses of neurons in macaque MT. Vis Neurosci. 1996; 13(1): 87-100.

2. Esch T, Mesce KA, Kristan WB. Evidence for sequential decision making in the medicinal leech. J Neurosci. 2002; 22(24): 11045-54.

3. Hanks TD, Summerfield C. Perceptual decision making in rodents, monkeys, and humans. Neuron. 2017; 93(1): 15-31.

4. Gold JI, Shadlen MN. The neural basis of decision making. Annu Rev Neurosci. 2007; 30(1): 535-74.

5. Kiani R, Hanks TD, Shadlen MN. Bounded integration in parietal cortex underlies decisions even when viewing duration is dictated by the environment. J Neurosci. 2008; 28(12): 3017-29.

6. Roitman JD, Shadlen MN. Response of neurons in the lateral intraparietal area during a combined visual discrimination reaction time task. J Neurosci. 2002; 22(21): 9475-89.

7. Kelly SP, O'Connell RG. Internal and external influences on the rate of sensory evidence accumulation in the human brain. J Neurosci. 2013; 33(50): 19434-41.

8. Lorteije JA, Zylberberg A, Ouellette BG, De Zeeuw CI, Sigman M, Roelfsema PR. The formation of hierarchical decisions in the visual cortex. Neuron. 2015; 87(6): 1344-56.

9. Loughnane GM, Newman DP, Tamang S, Kelly SP, O'Connell RG. Antagonistic interactions between microsaccades and evidence accumulation processes during decision formation. J Neurosci. 2018; 38(9): 2163-76.

10. Ratcliff R, Rouder J. Modeling response times for decisions between two choices. Psychological Science. 1998; 9(5): 347-56.

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]

11. Shadlen MN, Newsome WT. Neural basis of a perceptual decision in the parietal cortex (area LIP) of the rhesus monkey. J Neurophysiol. 2001; 86(4): 1916-36.

12. Churchland AK, Kiani R, Shadlen MN. Decision-making with multiple alternatives. Nat Neurosci. 2008; 11(6): 693-702.

13. Hanks TD, Mazurek ME, Kiani R, Hopp E, Shadlen MN. Elapsed decision time affects the weighting of prior probability in a perceptual decision task. J Neurosci. 2011; 31(17): 6339-52.

14. Purcell BA, Kiani R. Neural mechanisms of post-error adjustments of decision policy in parietal cortex. Neuron. 2016; 89(3): 658-71.

15. Zizlsperger L, Sauvigny T, Händel B, Haarmeier T. Cortical representations of confidence in a visual perceptual decision. Nature Communications. 2014; 5: 3940.

16. Purcell BA, Kiani R. Hierarchical decision processes that operate over distinct timescales underlie choice and changes in strategy. Scientific Reports. 2016; 113(31): E4531-E40.

17. Otto TU, Mamassian P. Noise and correlations in parallel perceptual decision making. Current Biology. 2012; 22(15): 1391-6.

18. Kiani R, Churchland AK, Shadlen MN. Integration of direction cues is invariant to the temporal gap between them. J Neurosci. 2013; 33(42): 16483-9.

19. Tohidi-Moghaddam M, Zabbah S, Ebrahimpour R. The role of the primary information on importance of the last information in decision making. Shefaye Khatam. 2016; 4(4): 26-34.

20. Hayden BY, Pearson JM, Platt ML. Neuronal basis of sequential foraging decisions in a patchy environment. Nat Neurosci. 2011; 14(7): 933-9.

21. Olianezhad F, Zabbah S, Ebrahimpour R. The influence of pas t decision information on decision making in the present. Shefaye Khatam. 2016; 4(3): 1-8.

22. Van den Berg R, Zylberberg A, Kiani R, Shadlen MN, Wolpert DM. Confidence is the bridge between multi-stage decisions. Current Biology. 2016; 26(23): 3157-68.

23. Fetsch CR, Kiani R, Newsome WT, Shadlen MN. Effects of cortical microstimulation on confidence in a perceptual decision. Neuron. 2014; 83(4): 797-804.

24. Kiani R, Shadlen MN. Representation of confidence associated with a decision by neurons in the parietal cortex. Science. 2009; 324(5928): 759-64.

25. Lempert KM, Chen YL, Fleming SM. Relating pupil dilation and metacognitive confidence during auditory decision-making. PLoS One. 2015; 10(5): e0126588.

26. Strauch C, Greiter L, Huckauf A. Pupil dilation but not microsaccade rate robustly reveals decision formation. Scientific Reports. 2018; 8(1): 13165.

27. Vafaei Shooshtari S, Esmaily Sadrabadi J, Azizi Z, Ebrahimpour R. Confidence representation of perceptual decision by eeg and eye data in a random dot motion task. Neuroscience. 2019; 406: 510-27.

28. Kiani R, Corthell L, Shadlen MN. Choice certainty is informed by both evidence and decision time. Neuron. 2014; 84(6): 1329-42.

29. Brunyé TT, Eddy MD, Mercan E, Allison KH, Weaver DL, Elmore JG. Pupil diameter changes reflect difficulty and diagnostic accuracy during medical image interpretation. BMC Med Inform Decis Mak. 2016; 16(1): 77.

30. Urai AE, Braun A, Donner TH. Pupil-linked arousal is driven by decision uncertainty and alters serial choice bias. Nature Communications. 2017; 8(1): 14637.

31. Baranski JV, Petrusic WM. Probing the locus of confidence judgments: experiments on the time to determine confidence. J Exp Psychol Hum Percept Perform. 1998; 24(3): 929-45.

32. Chiew KS, Braver TS. Temporal dynamics of motivation-cognitive control interactions revealed by high-resolution pupillometry. Front Psychol. 2013; 4: 15. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00015.

33. Krejtz K, Duchowski AT, Niedzielska A, Biele C, Krejtz I. Eye tracking cognitive load using pupil diameter and microsaccades with fixed gaze. PloS One. 2018; 13(9): e0203629.

[Downloaded from shefayekhatam.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.29252/shefa.8.4.70]