

## There is a Threshold for Decision's Confidence in Hierarchical Perceptual Decision-Making

Amir Mahmood Mousavi Harris<sup>1</sup>, Jamal Esmaily<sup>2,3</sup>, Sajjad Zabbah<sup>4</sup>, Reza Ebrahimpour<sup>1,4,5\*</sup><sup>1</sup>Faculty of Computer Engineering, Shahid Rajaee Tarbiat University, Tehran, Iran<sup>2</sup>Department of General Psychology and Education, Ludwig Maximilian University, Munich Germany<sup>3</sup>Graduate School of Systemic Neuroscience, Ludwig Maximilian University of Munich, Munich, Germany<sup>4</sup>Research Institute of Cognitive Sciences, Institute of Basic Sciences (IPM), Tehran, Iran<sup>5</sup>Center for Cognitive Science, Institute for Convergence Science and Technology, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

## Article Info:

Received: 6 Sep 2022

Revised: 25 Dec 2022

Accepted: 29 Dec 2022

## ABSTRACT

**Introduction:** Decision-making is one of the high orders of the brain's cognitive functions. Most real-world decisions must be made in the face of uncertainty, and human's process received information from the environment hierarchically. However, in the presence of hierarchy, the sources of the received negative feedback are ambiguous. Therefore, understanding how people reason with incomplete and ambiguous information is one of the main problems of cognitive psychology. People resolve this ambiguity after one or more attempts by evaluating the number of negative feedbacks, the choice confidence, and the expected accuracy of their choice. However, it is not well understood how confidence in lower-level decisions affects higher-level decisions. **Materials and Methods:** We tested this hypothesis with a hierarchical decision-making task in which the subjects participated in a psychophysical experiment to determine the direction of random points and report their confidence about the decision. They were also instructed to make a high-level decision called "environment". From the collected behavioral data, the effects of each factor in hierarchical decisions were statistically isolated and studied by a logistic regression model. **Results:** We observed that the average confidence of individuals in the face of consecutive negative feedback has an increasing trend as they approach the switch trial. In the switch trial, it reaches its highest value, which is also higher than the overall average of confidence. **Conclusion:** The present study indicates that decision confidence-In the consecutive errors- modulate the switch profile and encodes the probability of switches. These results highlight the critical rule of confidence in hierarchical decision-making and point out that it has a threshold for high-level decision.

## Keywords:

1. Psychology
2. Environment
3. Probability

\*Corresponding Author: Reza Ebrahimpour

Email: ebrahimpour@ipm.ir

## وجود حد آستانه برای قطعیت تصمیم در تصمیم‌گیری ادراکی سلسله‌مراتبی

امیر محمود موسوی هریس<sup>۱</sup>، جمال اسماعیلی<sup>۲</sup>، سجاد ذباح<sup>۳</sup>، رضا ابراهیم‌پور<sup>۴\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>گروه روانشناسی عمومی و آموزش، دانشگاه لودویگ ماکسیمیلیان، مونیخ آلمان  
<sup>۳</sup>دانشکده تحصیلات تکمیلی علوم اعصاب سیستمیک، دانشگاه لودویگ ماکسیمیلیان مونیخ، مونیخ، آلمان  
<sup>۴</sup>دانشکده علوم شناختی (SCS)، پژوهشکده علوم بنیادی (IPM)، نیاوران، تهران، ایران  
 \*مرکز علوم شناختی، پژوهشکده علوم و فناوری همگرایی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### اطلاعات مقاله:

پذیرش: ۸ دی ۱۴۰۱

اصلاحیه: ۴ دی ۱۴۰۱

دریافت: ۱۵ شهریور ۱۴۰۱

## چکیده

**مقدمه:** تصمیم‌گیری یکی از بالاترین سطوح شناختی مغز محسوب می‌شود. اکثر تصمیمات در دنیای واقعی باید در شرایط عدم قطعیت اتخاذ شوند و انسان‌ها اطلاعات دریافتی از محیط را به صورت سلسله‌مراتبی پردازش می‌کنند. اما در صورت وجود سلسله‌مراتب، منابع بازخورد منفی دریافت شده، مبهم است. بنابراین درک اینکه چگونه افراد با اطلاعات ناقص و مبهم استدلال می‌کنند، یکی از مشکلات اصلی روانشناسی شناختی است. انسان‌ها با ارزیابی تعداد بازخوردهای منفی و میزان قطعیت و دقت مورد انتظار یک انتخاب خود نسبت به تصمیم‌شان، پس از یک یا چند تلاش این ابهام را برطرف می‌کنند. اما اینکه قطعیت تصمیمات سطح پایین‌تر به چه‌صورتی بر تصمیمات سطح بالاتر تاثیر می‌گذارد، به‌خوبی درک نشده است. **مواد و روش‌ها:** به‌منظور پاسخ به این مسئله، آزمودنی‌ها در یک آزمایش روان-فیزیک تعیین جهت نقاط تصادفی که همراه با گزارش مستقیم قطعیت بود، شرکت کرده‌اند. در تصمیمات سطح بالا از یک اصطلاح به نام "محیط" استفاده شده است. با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، پارامترهای موثر در تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی به‌طور آماری مطالعه شدند. **یافته‌ها:** نتایج ما نشان داد که میانگین قطعیت افراد در مواجهه با بازخوردهای منفی متوالی نیز هرچه به آزمایش تعویض نزدیک می‌شوند، روندی افزایشی دارد. در آزمایش‌های که تصمیم به تعویض می‌گیرند به بالاترین حد خود می‌رسد که این نیز میانگینش از میانگین کلی قطعیت بیشتر است. **نتیجه‌گیری:** در این مطالعه، ما نشان دادیم که قطعیت تصمیم (در خطاهای متوالی)، احتمال تعویض‌ها را رمزگذاری می‌کند. این نتایج، نقش حیاتی قطعیت در تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی را برجسته می‌کند و اشاره می‌کند که قطعیت برای تعیین راهبرد در تصمیم‌گیری در سطح بالا، دارای حد آستانه است.

### واژه‌های کلیدی:

- ۱- روانشناسی
- ۲- محیط
- ۳- احتمال

\*نویسنده مسئول: رضا ابراهیم‌پور

پست الکترونیک: ebrahimpour@ipm.ir

## مقدمه

تصمیم‌گیری یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین بخش‌های زندگی انسان است و همچنین یکی از بالاترین سطوح فعالیت‌های شناختی مغز محسوب می‌شود که مطالعه فرآیند آن می‌تواند نقش مهمی در شناخت نحوه عملکرد مغز انسان داشته باشد. تصمیم‌گیری فرآیند انتخاب از بین گزینه‌های دیگر است. با این تعریف، بیشتر رفتارهای انسان و حیوان ناشی از اخذ یک یا چند تصمیم است. این امر باعث می‌شود تا دانش تصمیم‌گیری برای آن دسته از زمینه‌های علمی که با انسان یا حیوانات مانند روانشناسی (۲، ۱)، علوم اعصاب (۵-۳)، علوم پزشکی (۶)، اقتصاد (۸، ۷)، فلسفه (۹) و غیره سر و کار دارند، بسیار مهم باشد. مطالعه فرآیند و نحوه شکل‌گیری آن در مغز، از دیرباز مرکز توجه محققان بسیاری بوده و می‌باشد (۱۲-۱۰). به‌طور کلی، انسان‌ها در زندگی روزمره خود، اغلب براساس اطلاعاتی که از طریق حواس خود در محیط اطرافشان دریافت می‌کنند، در مورد گزینه‌های پیش رو تصمیم‌گیری می‌کنند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فرآیند تصمیم‌گیری، ابتدا نیازمند به یک سری شواهد<sup>۱</sup> اولیه است (۱۳). در هنگام تصمیم‌گیری (فارغ از مدت زمان آن)، شواهد به صورت پیوسته و متوالی تجمیع<sup>۲</sup> می‌شوند (۱۴). حال اگر این شواهد در حال تجمیع، به یک حد مشخصی برسند، می‌توان گفت که تصمیم گرفته شده است. به این حد مشخص، حد آستانه تصمیم<sup>۳</sup> گفته می‌شود (۱۲).

تصمیم‌های انسان در زندگی روزمره و دنیای واقعی می‌تواند به عوامل بسیاری وابسته باشد. عواملی مانند جنسیت، فرهنگ، مذهب، عقاید شخصی و غیره می‌توانند در یک تصمیم ساده تاثیرگذار باشند. وجود همه این عوامل کار محققان را برای مطالعه فرآیند تصمیم‌گیری و شناخت مغز بسیار دشوار کرده است. یکی از راه‌حل‌هایی که می‌تواند مطالعه فرآیند تصمیم‌گیری را آسان‌تر کند، استفاده از مجموعه آزمایش‌های تصمیم‌گیری بسیار ساده و ادراکی است. یکی از آزمایش‌های معروف و کاربردی برای مطالعه تصمیم‌گیری، آزمایش نقاط متحرک (RDM)<sup>۴</sup> می‌باشد. در این آزمایش، یک سری نقاط به صورت اتفاقی در صفحه به حرکت در می‌آیند، از افراد شرکت‌کننده خواسته می‌شود که جهت حرکت نقاط در صفحه را مشخص کنند. سختی آزمایش بر اساس درصدی از نقاط که به صورت هم جهت<sup>۵</sup> حرکت می‌کنند، مشخص می‌شود. هرچه این درصد بیشتر باشد، سختی محرک کمتر است (۱۵). در این نوع تصمیم، شخص می‌تواند بدون درگیر کردن متغیرهایی مانند جنسیت، مذهب و غیره در مورد سوال پرسیده

شده، تصمیم‌گیری کند. از آنجا که اینگونه آزمایش‌ها، از طریق یکی از حواس پنج‌گانه درک می‌شود و سیستم ادراکی مغز را فعال می‌کنند (۱۳)، با انجام آن‌ها می‌توان بسیاری از عوامل یادشده را از تصمیم‌گیری حذف نمود و فرآیند تصمیم‌گیری در مغز را به شکل آسان‌تر و تخصصی‌تری مطالعه کرد. با استفاده از همین آزمایش‌های ادراکی ساده می‌توان بسیاری از فضا‌های تصمیم‌گیری پیچیده‌تر مانند تصمیم‌گیری در فضای گسسته (۱۶)، تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای (۱۸)، تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی (۲۰، ۱۹)، تصمیم‌گیری در مورد چند گزینه (۲۱) و غیره را مورد مطالعه قرار داد.

تا به حال برخلاف مطالعات گسترده‌ای که بر روی سازوکار رفتاری و نورونی تصمیمات ادراکی انجام شده (۲۵-۲۲)، در حوزه تصمیم‌گیری‌های سطح بالا هنوز هم سوالات و ابهامات زیادی وجود دارد. یکی از انواع تصمیم‌گیری‌های سطح بالا در زندگی روزمره انسان‌ها، تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی است که فرد بصورت همزمان چند تصمیم مرتبط به هم در سطوح مختلف (تصمیم‌گیری با اطلاعات حسی<sup>۶</sup> (سطح پایین) را همزمان با تصمیم‌گیری برای تعیین راهبرد (سطح بالا)) را اخذ می‌نماید. بسیاری از تصمیمات سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و غیره از این نوع هستند. از این رو، اخیراً تمرکز محققان حوزه تصمیم‌گیری به مسائل دنیای واقعی و تصمیمات سطح بالا نزدیک شده است (۲۱-۱۸). از جمله مطالعاتی که سازوکار تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی را مورد بررسی قرار داده‌اند، می‌توان به مطالعه پورسل<sup>۷</sup> (۱۹) و صرافیزد (۲۰) اشاره کرد. در این دو مطالعه با ارائه یک چارچوب محاسباتی، فرآیند شکل‌گیری تصمیم‌های سلسله‌مراتبی و نحوه عملکرد مغز در این نوع تصمیم‌گیری‌ها، مورد آزمایش قرار گرفته است.

همانطور که گفته شد، تصمیمات سلسله‌مراتبی به عنوان یکی از پیچیده‌ترین و واقع‌بینانه‌ترین تصمیمات نزدیک به دنیای واقعی، اخیراً مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. در تحقیقات اخیر نشان داده شده است که در تصمیم‌گیری ادراکی با توجه به اینکه مدار تصمیم‌گیرنده در مغز، شواهد را تجمیع می‌کند تا به حد آستانه برسد ولی شواهد فقط شواهد حسی خام نیست و جزئیات بیشتری درگیر هستند که باید در مدل‌های محاسباتی در نظر گرفته شود. اگرچه، مطالعات گذشته شروع به استفاده از تکنیک‌هایی برای استنباط ویژگی‌های موجود در فرآیند تصمیم‌گیری کرده‌اند (۲۹-۲۶). ولی مطالعه (۳۰) نشان می‌دهد که یک دیدگاه مجزا، رفتار را به‌طور دقیق توصیف نمی‌کند و ترکیب جزئیات و شواهد مختلف و

<sup>1</sup> Evidence<sup>2</sup> Accumulation<sup>3</sup> Decision Bound<sup>4</sup> Random Dot Motion (RDM)<sup>5</sup> Coherent<sup>6</sup> Sensory Information<sup>7</sup> Purcell

به صورت کامل برای شرکت کننده شرح داده می شود.

آزمایش تصمیم گیری سلسله مراتبی طراحی شده (۱۹)، بدین صورت است که از آزمودنی خواسته می شود که علاوه بر تشخیص جهت حرکت نقاط (چپ یا راست)، محیط آن را نیز مشخص کند. محیط بدین صورت است که آزمودنی، ابتدا به صورت پیش فرض در یک محیط قرار دارد و باید تشخیص دهد که در کدام محیط می باشد، که خود محیط به دو دسته «محیط بالا» و «محیط پایین» تقسیم می شوند. سپس محیط برای چندین آزمایش با توجه به توزیع هندسی کوتاه<sup>۸</sup> (با دامنه ۲ تا ۱۵ آزمايه، میانگین ۶) ثابت می ماند و سپس تغییر می کرد (به طور مثال از «محیط بالا» به «محیط پایین» تغییر داده می شود). آزمودنی باید تشخیص دهد که آیا محیط تغییر کرده یا خیر. اگر به این اطمینان رسید که در محیط اشتباهی است و محیطش تغییر کرده، او هم باید محیطش را تغییر دهد و در محیط درست قرار گیرد (یعنی قبلاً در «محیط بالا» بوده و حال باید به «محیط پایین» تعویض<sup>۹</sup> کند). آزمودنی برای فهم اینکه چه زمانی در محیط درستی است، باید توجه کند که تنها زمانی بازخورد مثبت دریافت خواهد کرد، که هم تشخیص جهت حرکت نقاط (تصمیم اول) درست باشد و هم اینکه در محیط درست باشد (تصمیم دوم). ولی اگر یکی از این ها را غلط پاسخ دهد (یعنی یا تشخیص اشتباه جهت حرکت نقاط و یا قرار داشتن در محیط غلط) به او بازخورد منفی داده می شود. در تصویر ۱ شماتیک کلی آزمایش، نمایش داده شده است.

در این آزمایش، قدرت محرک نقاط از بین ۰، ۳/۲، ۶/۴، ۱۲/۸، ۲۵/۶ و ۵۱/۲ درصد تعیین می گردید. محرک به مدت ۵۰۰ میلی ثانیه نمایش داده می شد و پس از نمایش محرک، صفحه دریافت پاسخ برای آزمودنی ظاهر می گردید. شرکت کنندگان می بایست تصمیم نهایی و قطعیت خود را به صورت هم زمان گزارش می کردند. قطعیت، در واحد پیوسته (بین صفر الی یک) در قالب یک نوار رنگی ارائه شده، گزارش می گردید (از سبز به قرمز، سبز بیشترین میزان قطعیت و قرمز کمترین میزان است) (تصویر ۱). گفتنی است انتخاب این مرحله توسط حرکت و فشار دادن کلیک چپ موس<sup>۱۰</sup> صورت می پذیرفت. پس از انتخاب، بازخورد صوتی تصمیم، برای شرکت کننده ارائه می شد. لازم به ذکر است که به آزمودنی تاکید می شد که فقط قطعیت تصمیم سطح پایین را اعلام کنند نه تصمیم کلی را.

تجمیعشان تا یک حد آستانه باعث شکل گیری تصمیم و توجیه دقیق تر از رفتار است. مطالعه انجام شده بر روی تصمیمات ادراکی دو گزینه ای و سطح پایین است. اما بررسی این یافته در مورد تصمیمات سطح بالاتر و تعیین راهبرد به خوبی درک نشده است. لذا این سوال درباره یکی از مهم ترین عوامل تعیین راهبر در تصمیم گیری سلسله مراتبی یعنی میزان قطعیت همچنان باقی است که «آیا قطعیت نیز به عنوان شواهد برای تعیین راهبرد تصمیم سطح بالا تجمیع می شود؟»، «حد آستانه ای برای تعیین راهبر انتخاب سطح بالا در تصمیم گیری سلسله مراتبی وجود دارد؟» و «اهمیت قطعیت در کدام آزمایش های تصمیم گیری سلسله مراتبی اهمیت بیشتری پیدا می کند؟». از این رو در این مقاله، برای درک بهتر تعاملات تصمیم های سطح پایین با تصمیم های سطح بالا در تصمیم گیری های سلسله مراتبی، به طراحی آزمایش تصمیم گیری سلسله مراتبی استفاده شده در (۱۹) به همراه گزارش میزان قطعیت تصمیم، پرداخته شده است. در ادامه برخلاف تحقیق (۱۹) با استفاده از تحلیل داده های رفتاری جمع آوری شده از میزان قطعیت افراد در هنگام تصمیم گیری و مدل رگرسیونی، به درک بیشتر تعاملات تصمیمات سطح پایین با تصمیم های سطح بالا، نقش و نحوه تغییر قطعیت در سطوح مختلف تصمیم گیری سلسله مراتبی پرداخته خواهد شد.

## مواد و روش ها

به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد شرکت کننده در آزمایش روان فیزیکی، از معیاری به نام "تابع روان سنجی"<sup>۱۱</sup> استفاده شد (۳۱). در این پژوهش، از یک آزمایش روان فیزیکی مشابه آنچه در (۱۹) انجام شده، استفاده شده است. داده جمع آوری شده به اندازه ۱۰۵۰۰ داده و از ۹ شرکت کننده (۵ خانم ۴ آقا) که محدوده سنی آن ها از ۲۱ تا ۳۲ سال بوده است، اخذ شده است. تمامی شرکت کنندگان بینایی سالم داشتند و قبل از شروع آزمایش از تمامی شرکت کنندگان رضایت نامه کتبی دریافت شده است. این مطالعه با شناسه اخلاق IR.IUMS.REC.1400.1230 در کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی ایران مصوب گردیده. قبل از انجام آزمایش اصلی، شرکت کنندگان یک مرحله آموزشی گسترده<sup>۱۲</sup> را پشت سر می گذارند. در این مرحله نیاز بود که آن ها به یک حد مشخصی از دقت و سرعت پاسخ در RDM برسند. پس از این مرحله، شرکت کنندگان آماده انجام مرحله اصلی آزمون می باشند. شایان ذکر است، قبل از انجام هرگونه آزمایش دستورالعمل<sup>۱۳</sup> انجام آزمایش

<sup>8</sup> Psychometric function

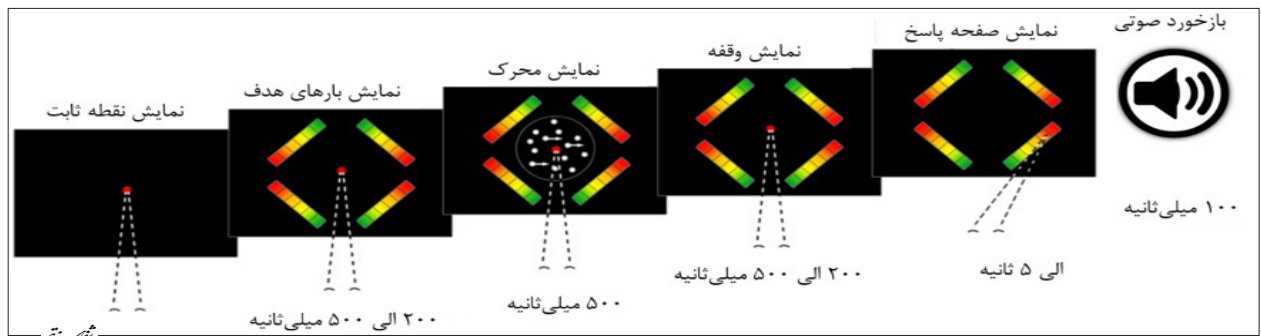
<sup>9</sup> Extensive Training

<sup>10</sup> Instruction

<sup>11</sup> Truncated Geometric Distribution

<sup>12</sup> Switch

<sup>13</sup> Mouse



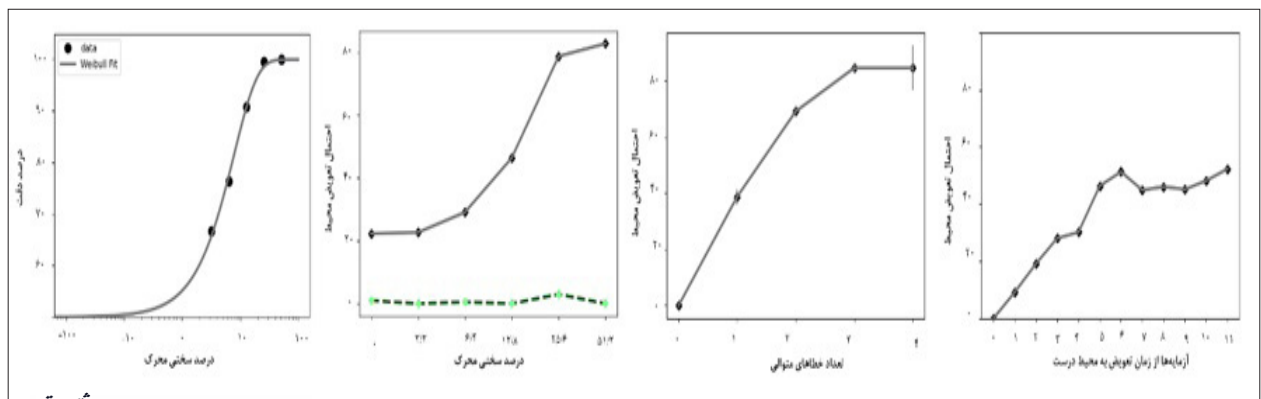
تصویر ۱- طراحی آزمایش اصلی در حالت انفرادی. (الف) پارادایم آزمایش. نوارهای رنگی بالا و پایین نقطه ثابت مرکز دو محیط را نشان می‌دهند. نوارهای رنگی راست و چپ در هر محیط نشان دهنده دو جهت ممکن حرکت است. افراد برای انتخاب هدفی که با محیط صحیح و جهت حرکت صحیح مطابقت داشت، بازخورد مثبتی دریافت می‌کردند.

## یافته‌ها

انتخاب محیط‌های آینده، برای چندین آزمایش توسعه داده شد. به دلیل عدم اطمینان آزمودنی‌ها در مورد جهت حرکت صحیح، آن‌ها همیشه پس از یک بازخورد منفی، بلافاصله محیط را تغییر نمی‌دهند. هنگامی که محیط توسط آزمون‌گر تغییر می‌کرد، افراد غالباً به انتخاب محیط قبلی (نادرست) برای دو تا چهار آزمایش ادامه می‌دادند. باین‌حال، افراد با افزایش تعداد بازخوردهای منفی متوالی (تصویر ۲ (ج)) بیشتر احتمال دارد محیط را تعویض کنند. این امر نشان می‌دهد، تأثیر بازخورد منفی برای چندین آزمایش متوالی ادامه دارد (۳۳، ۳۴).

الگوهای انتخاب محیط توسط افراد، ویژگی‌های کلیدی تجمیع شواهد تعویض محیط را در آزمایشات نشان می‌دهد (۱۹). تحلیل‌های بیشتر نشان داد که افراد پس از بازخورد منفی، هنگامی که در محیطی به مدت طولانی برای آزمایش‌های متوالی می‌مانند، با احتمال بالاتری، محیط را تغییر می‌دادند (تصویر ۲ (د)). این افزایش نرخ تعویض محیط، احتمال فوریت فزاینده‌ای<sup>۱۵</sup> را برای تغییر محیط نشان می‌دهد. این فوریت فزاینده برای تغییر محیطی، مشابه فوریت<sup>۱۶</sup> پاسخگویی است که در آزمایشات تصمیم‌گیری ادراکی مشاهده می‌شود (۳۷)، (۲۱)، با این تفاوت که در بازه‌های زمانی بسیار طولانی‌تر

با انجام آزمایش، داده‌های رفتاری آزمودنی‌ها ثابت می‌گردد. دقت، قطعیت و تعویض محیط از جمله داده‌های رفتاری جمع‌آوری شده در این آزمایش‌ها بودند. تابع روان‌سنج استفاده شده در این پژوهش، تابع توزیع تجمعی ویبول<sup>۱۴</sup> است (۳۲). تعویض و انتخاب محیط، با تجمیع بازخوردها و قطعیت در مورد جهت حرکت در طی آزمایش‌ها شکل می‌گیرد. نتایج ما نشان داد که افراد به ندرت پس از بازخورد مثبت محیط را تغییر می‌دهند (احتمال تعویض: ۰/۰۵؛ تصویر ۲ (ب))، نشان می‌دهد که آن‌ها ثبات نسبی محیط‌ها را درک کرده‌اند. در مقابل، افراد اغلب پس از بازخورد منفی (احتمال تعویض: ۰/۴۶) محیط را تغییر می‌دهند. این موضوع زمانی که بازخورد منفی در آزمایش‌هایی با قدرت محرک بالاتر داده می‌شود، بیشتر به چشم می‌خورد (تصویر ۲ (ب)). یعنی آزمایش‌هایی که در آن‌ها احتمال پاسخ‌گویی درست جهت، بالاتر بود (تصویر ۲ (الف)). درواقع، بازخورد و دقت انتخاب جهت مورد انتظار، عوامل مهمی در تعیین اینکه آزمودنی محیط را تعویض می‌کند یا خیر، بودند. احتمال تغییر محیط پس از بازخورد منفی با دقت افراد به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد. تأثیر بازخورد و قدرت محرک بر روی تعویض و



تصویر ۲- نتایج داده‌های رفتاری در تصمیم سطح بالا. (الف) دقت انتخاب. نقاط موجود، داده‌های انتخاب صحیح جهت (سطح پایین) را بدون توجه به انتخاب محیط نشان می‌دهد. خط رسم شده نیز تابع توزیع تجمعی ویبول است که پارمتر  $\alpha$  برابر ۸/۲۵۱ است و  $\beta$  برابر ۰/۸۷۲ است. (ب) احتمال تعویض‌های محیطی پس از دریافت یک بازخورد منفی. تعداد تعویض‌های محیطی در آزمایش‌های با محرک قوی‌تر (نقاط رنگی) افزایش یافته و به دنبال بازخورد مثبت (نقاط سبز) به طور مداوم پایین‌تر بوده. (ج) بازخوردهای منفی متوالی. (د) میزان مخاطره.

<sup>14</sup> Weibull

<sup>15</sup> Growing Urgency

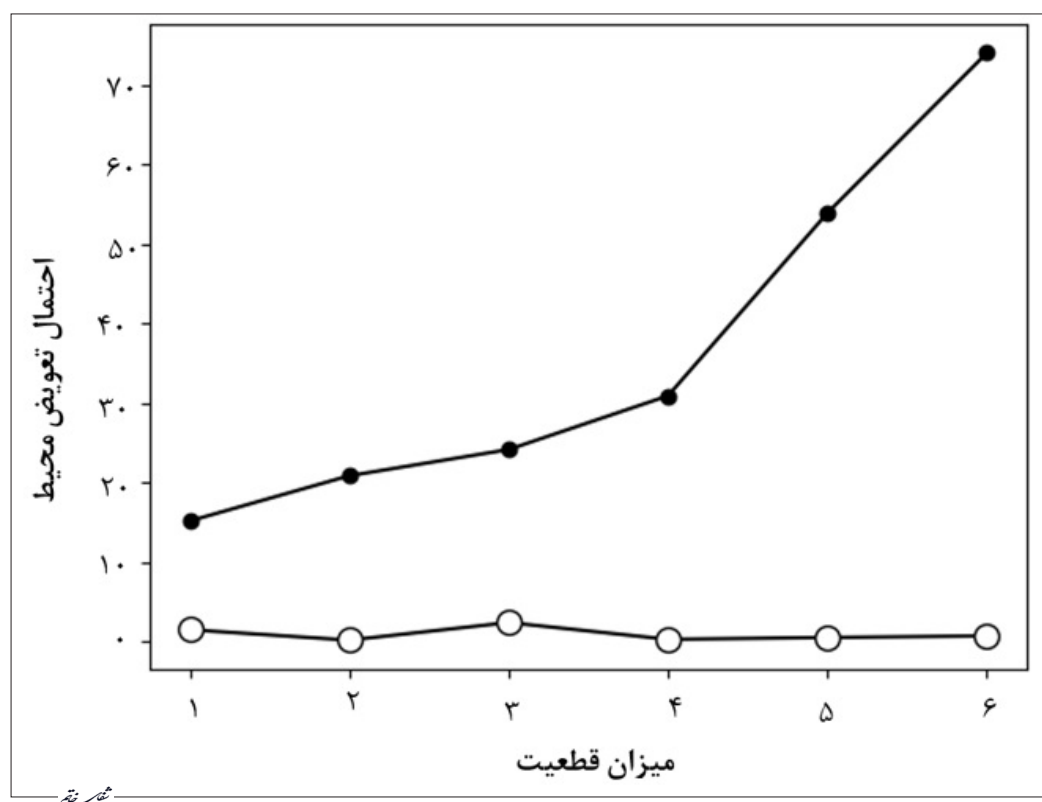
<sup>16</sup> Urgency



اتفاق می‌افتد (در طی آزمایش‌ها، نه در یک آزمایش). پس از بررسی نتایج سطح بالا و پایین تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی، به بررسی بیشتر نقش قطعیت در تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی پرداخته شد. همانطور که پورسل (۱۹) هم در پژوهش گفته بود، "قطعیت پلی است بین تصمیمات سطح پایین و تصمیمات سطح بالا". آزمودنی در هنگام دریافت بازخورد منفی، با استفاده از میزان قطعیت خود از تصمیم سطح پایین، تصمیم به تعویض محیط در سطح بالا می‌گیرد. یا به عبارتی دیگر شرکت‌کنندگان به دنبال بازخورد منفی در آزمایش‌هایی که در آن‌ها قطعیت و اطمینان بالاتری را گزارش کردند، احتمال بیشتری داشت که انتخاب‌های تعویض محیط را تغییر دهند (تصویر ۳).

همانطور که از داده‌های رفتاری مشاهده شد، میزان قطعیت رابطه مستقیمی با احتمال تعویض محیط دارد که مدل رگسیون هم همین موضوع را به‌طور معنی‌داری تایید می‌کند (معادله ۱)،  $P_1 = 0/000$ .

$\beta_1 = 2/458$ . سپس به بررسی میزان قطعیت آزمایش‌هایی که با دریافت یک بازخورد منفی، تعویض محیط در آن‌ها رخ داده و رخ نداده پرداخته شد. همانطور که مورد انتظار بود، قطعیت افراد بر حسب افزایش میزان شواهد دریافتی (کوهرنسی)، یک روند افزایشی داشت ولی نتایج جالبی که بدست آمد، حاکی از این بود که قطعیت افراد زمانی که تصمیم به تعویض محیط داشتند، بیشتر از میزان قطعیت کلی افراد بود (مقادیر تست آماری رنگ-سام برای کوهرنسی‌های  $0/4$ ،  $3/2$ ،  $0$ ،  $12/8$ ،  $25/6$ ،  $51/2$  به ترتیب برابر است با  $P = 0/008$ ،  $P = 0/000$ ،  $P = 0/001$ ،  $P = 0/003$ ،  $P = 0/006$  و  $P = 0/478$ ). از طرفی دیگر، زمانی که یک بازخورد منفی دریافت می‌کردند و محیط را تعویض نمی‌کردند، میزان قطعیتشان کمتر از میزان قطعیت کلی بود (شکل ۴) (مقادیر تست آماری رنگ-سام برای کوهرنسی‌های  $0/4$ ،  $3/2$ ،  $0$ ،  $12/8$ ،  $25/6$ ،  $51/2$  به ترتیب برابر است با  $P = 0/058$ ،  $P = 0/000$ ،  $P = 0/000$ ،  $P = 0/000$ ،  $P = 0/000$  و  $P = 0/015$ ).



تصویر ۳- تاثیر قطعیت در تصمیم سطح بالا. محور افقی، قطعیت گزارش شده افراد را نشان می‌دهد که به شش کمیت تقسیم شدند. محور عمودی، احتمال تعویض محیط را بعد از دریافت یک بازخورد منفی نشان می‌دهد. نقاط توخالی احتمال تعویض در هنگام دریافت بازخورد مثبت است و نقاط توپر، احتمال تعویض بعد از دریافت یک بازخورد منفی است.

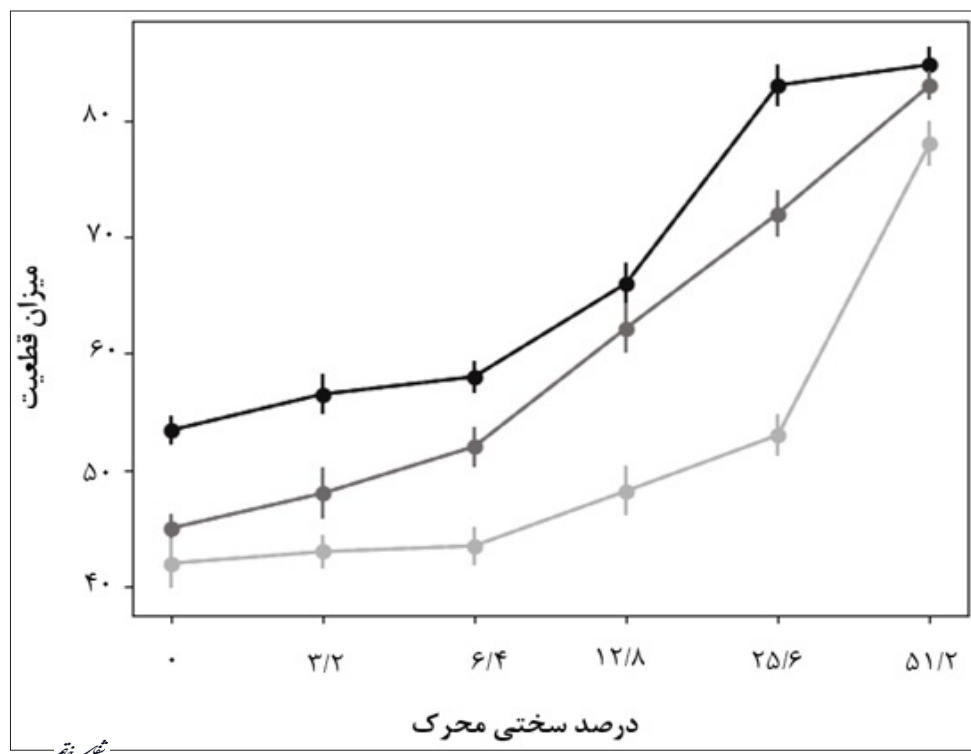
$\beta_3 = -0.241, P_3 = 0.37, (4)$  و معادله  $\beta_1 = 3/415, P_1 = 0.37, (4)$  و معادله  $\beta_2 = -0.467, P_2 = 0.732, \beta_2 = -0.51, P_2 = 0.646, P_2 = 0.205, \beta_2 = -0.467, P_2 = 0.732, \beta_2 = -0.51, P_2 = 0.646, P_2 = 0.205$

همین‌طور از معادله (۵) نیز برای دو خطای متوالی استفاده شد تا بررسی شود که تاثیر کدام آزمایش (آزمایه منجر به تعویض یا آزمایش پیش از آن) تاثیر بیشتر بر احتمال تعویض دارد. که در تایید نتایج بدست آمده، مشخص شد که آزمایش منجر به تعویض تاثیر بیشتری دارد. بدین صورت که اگر شود، تاثیر آزمایش منجر به تعویض بیشتر است و اگر برعکس شود، آزمایش قبل از آن تاثیر بیشتری دارد (برای سه و چهار خطای متوالی نیز بررسی شد و همین نتایج مشاهده شد). معادلات استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ و نتایج و پارامترهای مدل رگرسیون لجستیک استفاده شده در جدول ۲ آمده است. که  $Conf(T_1)$  - نشان دهنده قطعیت آزمایشی قبل از تعویض محیط است  $Conf(T_2)$  -  $Conf(T_3)$  - و  $Conf(T_4)$  - به ترتیب نشان دهنده قطعیت دو، سه و چهار آزمایشی قبل از تعویض محیط است و معادلات (۲)، (۳) و (۴) به ترتیب برای دو، سه و چهار خطای متوالی می‌باشند.

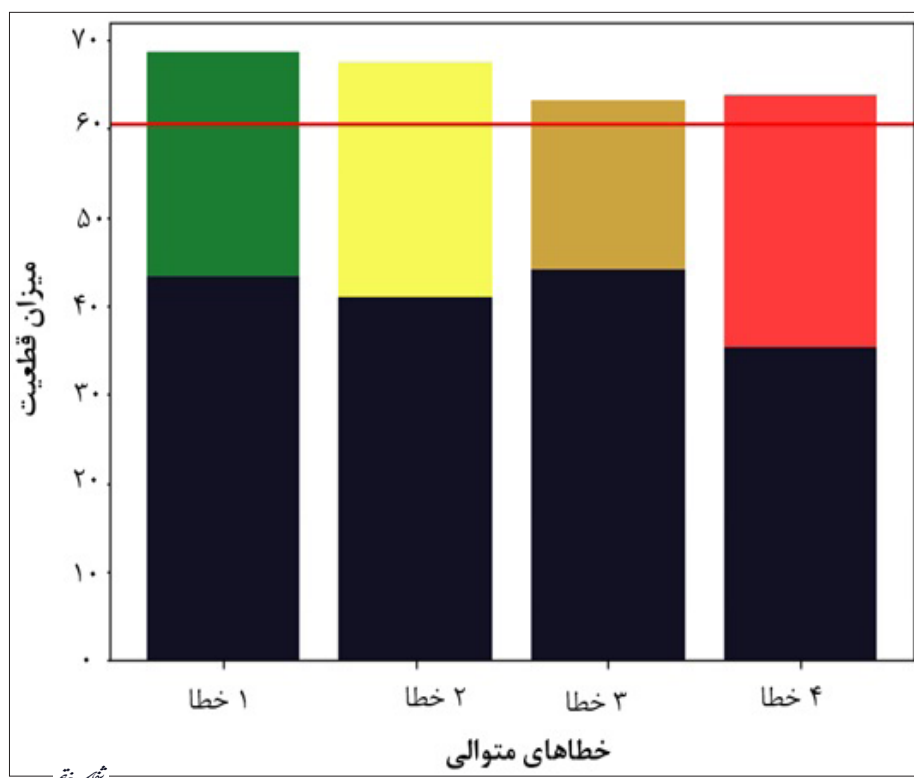
### بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مطالعه و بررسی اثر اطلاعات

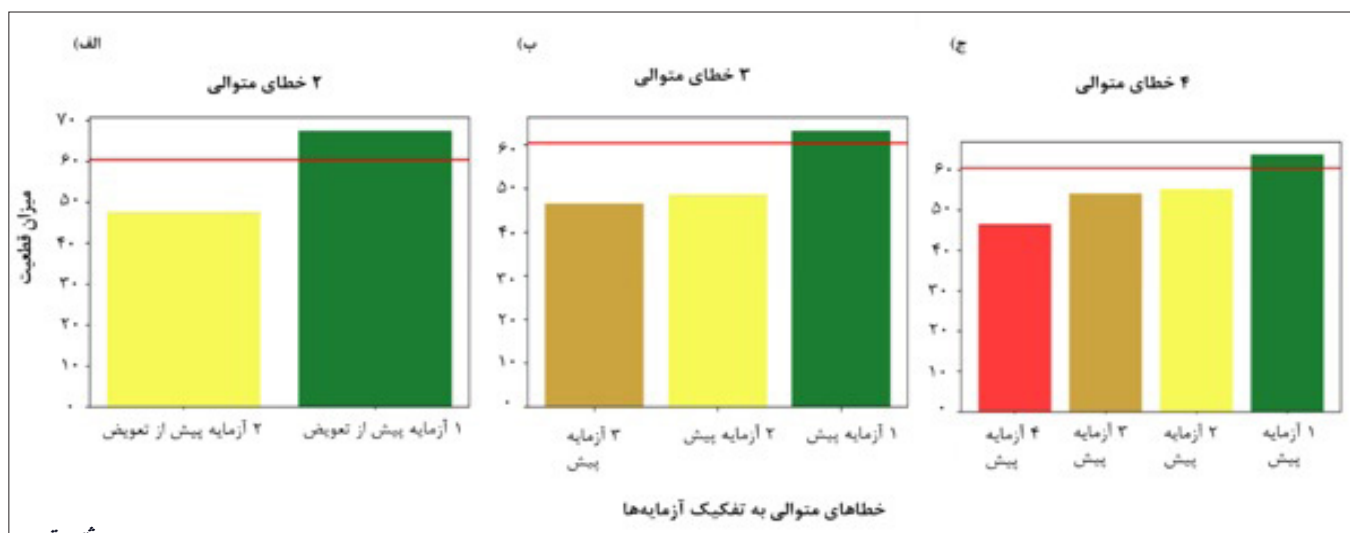
تاثیر مشاهده شده در تصویر ۴ را در میزان قطعیت زمانی که آزمودنی، خطاهای متوالی دریافت می‌کرده نیز مشاهده شد. نتایج نشان دادند که میانگین قطعیت افراد در خطاهای متوالی در آزمایشی که منجر به تعویض محیط شده بیشتر از میانگین قطعیت آزمایش‌های تعویض نشده و بیشتر از میانگین قطعیت کلی افراد است. مشاهده این اثر در بازخوردهای منفی متوالی، باعث برانگیخته شدن این سوال شد که "در آزمایش‌های منجر به تعویض، میزان قطعیت در آزمایش‌های قبل از آن که بازخورد منفی دریافت می‌شده به چه صورت است؟". لذا براین اساس، به بررسی و مقایسه میزان قطعیت در تمام آزمایش‌های خطاهای متوالی (از دو خطا الی چهار خطا) پرداخته شد. اثر قابل توجهی مشاهده شد این بود که آزمودنی در طول خطاهای متوالی، هرچه به آزمایش منجر به تعویض نزدیک‌تر می‌شده، میزان قطعیت بالاتری را گزارش می‌کرده (تصویر ۶). علاوه بر داده‌های رفتاری، مدل محاسباتی نیز همین اثر را تایید می‌کند و در بازخوردهای متوالی، قطعیت آزمایش منجر به تعویض نیز به‌طور معنی‌داری بر روی احتمال تعویض محیط تاثیر دارد (معادله (۲)،  $\beta_1 = 2/458, P_1 = 0.00, \beta_2 = 0.29, P_2 = 0.928, \beta_1 = 2/458, P_1 = 0.00, \beta_2 = 0.29, P_2 = 0.928$  و معادله (۳)،  $\beta_1 = 1/576, P_1 = 0.005, \beta_2 = -0.16, P_2 = 0.826, \beta_1 = 1/576, P_1 = 0.005, \beta_2 = -0.16, P_2 = 0.826$ )



تصویر ۴- میزان قطعیت در هنگام دریافت یک بازخورد منفی. محور افقی، نشانگر میزان کورنسی است و محور عمودی میزان قطعیت را نمایش می‌دهد. نقاط مشکی رنگ نشان دهنده قطعیت زمانی است که با یک بازخورد منفی تعویض محیط انجام شده، نقاط خاکستری کم‌رنگ نشان دهنده قطعیت زمانی است که با یک بازخورد منفی تعویض محیط انجام نشده و نقاط خاکستری پررنگ نشان دهنده قطعیت کلی آزمودنی در تمامی آزمایش‌ها است. در تمام حالات خطای رسم شده SEM می‌باشد.



**تصویر ۵-** میزان قطعیت در هنگام دریافت بازخوردهای منفی متوالی. میزان قطعیت، تا چهار بازخورد منفی متوالی نمایش داده شده. بارهای رنگی (سبز: یک خطا، زرد: دو خطای متوالی، نارنجی: سه خطای متوالی، قرمز: چهار خطای متوالی) میانگین قطعیت آزمایه آخر منجر به تعویض را نمایش می‌دهد. بار مشکی رنگ میانگین قطعیت آزمایه آخر منجر به تعویض نشدن را نمایش می‌دهد. خط قرمز میانگین کلی آزمودنی در تمامی آزمایه‌ها می‌باشد.



**تصویر ۶-** میانگین قطعیت در آزمایه‌های بازخوردهای منفی متوالی. (الف) میانگین قطعیت در دو خطای متوالی. میانگین قطعیت در آزمایه منجر به تعویض بیشتر از میانگین قطعیت دو آزمایه پیش از تعویض است. (ب) میانگین قطعیت در سه خطای متوالی. میانگین قطعیت در آزمایه منجر به تعویض بیشتر از میانگین قطعیت دو آزمایه پیش از تعویض است و میانگین قطعیت در دو آزمایه پیش از تعویض بیشتر از میانگین قطعیت سه آزمایه پیش از تعویض است. (ج) میانگین قطعیت در چهار خطای متوالی. میانگین قطعیت در آزمایه منجر به تعویض بیشتر از میانگین قطعیت دو آزمایه پیش از تعویض است و میانگین قطعیت در دو آزمایه پیش از تعویض بیشتر از میانگین قطعیت سه آزمایه پیش از تعویض است و همچنین میانگین قطعیت در سه آزمایه پیش از تعویض بیشتر از تعویض بیشتر از میانگین قطعیت چهار آزمایه پیش از تعویض است. بار آبی پررنگ، میانگین آزمایه منجر به تعویض است. بار آبی کم‌رنگ، آزمایه‌های قبل از آزمایه منجر به تعویض است. خط قرمز رنگ، میانگین کلی آزمودنی در همه آزمایه‌ها است.



جدول ۱- معادلات رگرسیون لجستیک

#	معادلات
۱	$\text{Logit} (PT_{F-}(\text{Switch})) = \beta_0 + \beta_1. \text{Conf}$
۲	$\text{Logit} (PT_{F-}(\text{Switch})) = \beta_0 + \beta_1. \text{Conf}(T-1) + \beta_2. \text{Conf}(T-2)$
۳	$\text{Logit} (PT_{F-}(\text{Switch})) = \beta_0 + \beta_1. \text{Conf}(T-1) + \beta_2. \text{Conf}(T-2) + \beta_3. \text{Conf}(T-3)$
۴	$\text{Logit} (PT_{F-}(\text{Switch})) = \beta_0 + \beta_1. \text{Conf}(T-1) + \beta_2. \text{Conf}(T-2) + \beta_3. \text{Conf}(T-3) + \beta_4. \text{Conf}(T-4)$
۵	$\text{Logit} (PT_{F-}(\text{Switch})) = \beta_0 + \beta_1. (\text{Conf}(T-1) + \text{Conf}(T-2)) + \beta_2. (\text{Conf}(T-2) - \text{Conf}(T-1))$

جدول ۲- پارامترهای معادله‌های رگرسیون لجستیک

#	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
۱	-۱/۱۸۵ (P=۰/۰۰۰)	۲/۴۵۸ (P=۰/۰۰۰)	-----	-----	-----
۲	-۰/۱۶۶ (P=۰/۴۴۰)	۲/۲۷۱ (P=۰/۰۰۰)	۰/۰۲۷ (P=۰/۹۲۸)	-----	-----
۳	۱/۲۲۲ (P=۰/۰۱۹)	۱/۵۷۶ (P=۰/۰۰۵)	-۰/۱۶۰ (P=۰/۸۲۶)	-۰/۲۴۱ (P=۰/۷۲۲)	-----
۴	۲/۲۹۱ (P=۰/۰۳۷)	۳/۴۱۵ (P=۰/۰۳۱)	-۱/۰۵۱ (P=۰/۴۳۴)	-۰/۴۵۷ (P=۰/۷۳۲)	-۲/۶۴۶ (P=۰/۲۰۵)
۵	-۰/۱۶۶ (P=۰/۴۴۰)	۱/۱۴۹ (P=۰/۰۰۰)	-۱/۱۲۲ (P=۰/۰۰۰)	-----	-----

که تست آماری نشان داد این تفاوت نیز به جز در کوهرنسی صفر، در تمامی کوهرنسی‌ها معنی‌دار بوده. (مقادیر تست آماری برای کوهرنسی‌های  $۶/۴$ ،  $۳/۲$ ،  $۰$  به ترتیب برابر است با  $P=۰/۰۵۸$ ،  $P=۰/۰۰۰$ ،  $P=۰/۰۰۰$ ،  $P=۰/۰۰۰$ ،  $P=۰/۰۰۰$  و  $P=۰/۰۰۰$ ). نتایج این بررسی نشان داد که افراد حتی زمانی که بازخورد منفی دریافت می‌کردند، بسته به میزان قطعیت‌شان، تصمیم می‌گرفتند که محیط‌شان را تعویض کنند یا خیر. که این مشاهده نتیجه، ما را به این فرضیه واداشت که به احتمال بالا، میزان قطعیت باید به یک حد آستانه‌ای برسد تا تعویض انجام شود.

بررسی بیشتر قطعیت در بازخوردهای منفی متوالی نتایج جالب توجهی را در پی داشت، مشاهده شد که میانگین قطعیت افراد در خطاهای متوالی، در آزمایشی که منجر به تعویض محیط شده نیز بیشتر از میانگین قطعیت کلی افراد است. زمانی که میانگین قطعیت بازخوردهای منفی متوالی را برای دو خطا، سه خطا و چهار خطا تفکیک شد، مشاهده شد که در تمام شرایط، آزمودنی هرچه به آزمایشی منجر به تعویض نزدیک‌تر می‌شده، میزان قطعیت بالاتری را گزارش می‌کرده (تصویر ۶). که این روند افزایشی اثر قابل توجهی بود که فرضیه مطرح‌شده را مبنی بر تجمیع میزان قطعیت به عنوان شواهد مورد نیاز برای تعویض محیط، تایید کند. نکته دیگری که مشاهده شد این بود که میانگین قطعیت تمامی آزمایش‌های پیش از آزمایشی منجر به تعویض، کمتر از میانگین کلی افراد بود و فقط آزمایشی منجر به تعویض بیشتر از میانگین کلی بود. برای اطمینان از صحت حدسی که مطرح شد، علاوه بر داده‌های رفتاری، از مدل محاسباتی رگرسیون لجستیک استفاده شد و مدل نیز همین اثر را تایید می‌کند و در بازخوردهای متوالی، مقدار همبستگی رگرسور آزمایش‌ها، یک روند افزایشی دارد و جالب‌تر اینکه قطعیت آزمایشی منجر به تعویض نیز به‌طور معنی‌داری بر احتمال تعویض محیط تاثیر دارد (معادله ۲)، (۳)، (۴) و معادله ۵. نتایج بدست آمده نشان داد که افراد زمانی که تصمیم به تعویض محیط داشتند، قطعیت بیشتری نسبت به میزان قطعیت کلی‌شان در تمام آزمایش‌ها گزارش کرده‌اند. تست آماری نشان داد که این تفاوت به جز کوهرنسی  $۱۲/۸$  و  $۵۱/۲$  معنی‌دار بود (مقادیر تست آماری برای کوهرنسی‌های  $۶/۴$ ،  $۳/۲$ ،  $۰$  به ترتیب برابر است با  $P=۰/۰۰۸$ ،  $P=۰/۰۰۰$ ،  $P=۰/۰۰۰$ ،  $P=۰/۰۰۰$  و  $P=۰/۰۰۰$ ). از طرفی دیگر، زمانی که یک بازخورد منفی دریافت می‌کردند و تصمیم به عدم تعویض محیط می‌گرفتند، میزان قطعیت‌شان کمتر از میزان قطعیت کلی بود (تصویر ۳).

اجتماعی بر روی تصمیم‌گیری اجتماعی پرداخته شد. ابتدا بر مطالعه و تصدیق پژوهش‌های انجام شده در (۲۰۱۹) تمرکز شد که مشاهده شد، فرآیند تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی، یک سلسله از مراحل را ایجاد می‌کند که در آن نتایج حاصل از انتخاب سطح پایین، تجدید نظر در مورد استراتژی تصمیم‌گیری در سطوح بالاتر را مطلع می‌کند. شناسایی خطاها و بازخوردهای منفی حاصل از تصمیم، غالباً بی‌اهمیت نیست، زیرا تغییرات در انتخاب محیط، به ندرت حس می‌شود. در عوض، تصمیم‌گیرندگان باید تغییرات را اغلب از طریق بازخورد انتخاب‌های گذشته‌ی خود استنباط کنند. استنتاج تغییرات محیط، یک تصمیم‌گیری با سلسله‌مراتب متعدد در مقیاس‌های مختلف ایجاد می‌کند که در آن نتایج انتخاب‌های سطح پایین، تجدیدنظر در راهبرد تصمیم‌گیری در سطوح بالاتر را نشان می‌دهد. در این بین مشاهده شد که قطعیت انتخاب افراد نقش مهمی را ایفا می‌کند و مانند پلی بین سطوح تصمیم‌گیری است. نتایج داده‌ها نشان داد که هر چه میزان قطعیت افراد نسبت به تصمیم‌شان بیشتر باشد، احتمال تعویض نیز افزایش می‌یابد و مدل محاسباتی یک رابطه مستقیم و معنی‌داری را نشان می‌دهد (معادله ۱)،  $\beta_1=۲/۴۵۸$ ،  $P_1=۰/۰۰۰$ . مشاهده این اثر سوالاتی مانند «آیا قطعیت نیز به عنوان شواهد برای تعیین راهبرد تصمیم سطح بالا تجمیع می‌شود؟»، «حد آستانه‌ای برای تعیین راهبرد انتخاب سطح بالا در تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی وجود دارد؟!»، و «اهمیت قطعیت در کدام آزمایش‌های تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؟». تحقیق (۱۹) پاسخ این سوالات را تا حدی در مدل محاسباتی‌شان بررسی کردند ولی همچنان این ابهامات (به‌خصوص در رابطه با قطعیت) به‌طور کامل رفع نشده. لذا در این مطالعه، برای پاسخ به این سوالات ابتدا به بررسی داده‌های رفتاری جمع‌آوری شده از میزان قطعیت افراد در هنگام تصمیم‌گیری و نحوه تغییر قطعیت آزمودنی‌ها در هنگام دریافت یک بازخورد منفی پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان داد که افراد زمانی که تصمیم به تعویض محیط داشتند، قطعیت بیشتری نسبت به میزان قطعیت کلی‌شان در تمام آزمایش‌ها گزارش کرده‌اند. تست آماری نشان داد که این تفاوت به جز کوهرنسی  $۱۲/۸$  و  $۵۱/۲$  معنی‌دار بود (مقادیر تست آماری برای کوهرنسی‌های  $۶/۴$ ،  $۳/۲$ ،  $۰$  به ترتیب برابر است با  $P=۰/۰۰۸$ ،  $P=۰/۰۰۰$ ،  $P=۰/۰۰۰$  و  $P=۰/۰۰۰$ ). از طرفی دیگر، زمانی که یک بازخورد منفی دریافت می‌کردند و تصمیم به عدم تعویض محیط می‌گرفتند، میزان قطعیت‌شان کمتر از میزان قطعیت کلی بود (تصویر ۳).

## تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از پایان نامه و با حمایت مالی ستاد علوم شناختی با کد طرح ۱۱۶۷۱ است. این پژوهش با حمایت دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی انجام شده است.

که مشاهده این اثرها را می توان با یافته پژوهش (۳۰) بدین ترتیب توجیه کرد که پس حتما قطعیت احتمال تعویض را رمزگذاری می کند و همینطور نیز به عنوان یکی از شواهد مورد نیاز برای تعویض محیط تجمع می شود تا به یک حد آستانه برسد.

## منابع

- Newell BR, Lagnado DA, Shanks DR. Straight choices: The psychology of decision making: Psychology Press. 2015.
- Olsen K, Roepstorff A, Bang D. Knowing whom to learn from: individual differences in metacognition and weighting of social information. 2019.
- Carandini M, Churchland AK. Probing perceptual decisions in rodents. *Nature neuroscience*. 2013; 16(7): 824-31.
- Drugowitsch J, Moreno-Bote R, Churchland AK, Shadlen MN, Pouget A. The cost of accumulating evidence in perceptual decision making. *Journal of Neuroscience*. 2012; 32(11): 3612-28
- Wang X-J. Probabilistic decision making by slow reverberation in cortical circuits. *Neuron*. 2002;36(5):955-68.
- Koukoulis F, Rooy M, Tziotis D, Sailor KA, O'Neill HC, Levenga J, et al. Nicotine reverses hypofrontality in animal models of addiction and schizophrenia. *Nature Medicine*. 2017; 23(3): 347-54
- Camerer C, Loewenstein G, Prelec D. Neuroeconomics: How neuroscience can inform economics. *Journal of economic Literature*. 2005; 43(1): 9-64
- Glimcher PW, Fehr E. Neuroeconomics: Decision making and the brain: Academic Press; 2013.
- Braddon-Mitchell D, Jackson F. Philosophy Of Mind And Cognition: an introduction. (ed.) Malden. Mass Blackwell. 2007:49.
- Britten KH, Newsome WT, Shadlen MN, Celebrini S, Movshon JA. A relationship between behavioral choice and the visual responses of neurons in macaque MT. *Visual neuroscience*. 1996; 13(1): 87-100
- Esch T, Mesce KA, Kristan WB. Evidence for sequential decision making in the medicinal leech. *Journal of Neuroscience*. 2002; 22(24): 11045-54
- Hanks TD, Summerfield C. Perceptual decision making in rodents, monkeys, and humans. *Neuron* 2017; 93(1): 15-31.
- Gold JI, Shadlen MN. The neural basis of decision making. *Annu Rev Neurosci*. 2007; 30: 535-74 .
- Shadlen MN, Newsome WT. Neural basis of a perceptual decision in the parietal cortex (area LIP) of the rhesus monkey. *Journal of neurophysiology*. 2001; 86(4): 1916-36
- Britten KH, Shadlen MN, Newsome WT, Movshon JA. The analysis of visual motion: a comparison of neuronal and psychophysical performance. *Journal of Neuroscience*. 1992; 12(12): 4745-65
- Kiani R, Churchland AK, Shadlen MN. Integration of direction cues is invariant to the temporal gap between them. *Journal of Neuroscience*. 2013; 33(42): 16483-9
- Vafaei S, Ebrahimpour R, Zabbah S. The Relationship Between Pupil Diameter Data and Confidence in Multi-Stage Decisions. *The Neuroscience Journal of Shefaye Khatam*. 2020: 70-9.
- 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
- Purcell BA, Kiani R. Hierarchical decision processes that operate over distinct timescales underlie choice and changes in strategy. *Proceedings of the national academy of sciences*. 2016;113(31):E4531-E440
- Sarafyazd M, Jazayeri M. Hierarchical reasoning by neural circuits in the frontal cortex. *Science*. 2019 , (6441) 364.
- Churchland AK, Kiani R, Shadlen MN. Decision-making with multiple alternatives. *Nature neuroscience*. 2008, (6) 11: 693-702.
- Olianezhad F, Zabbah S, Ebrahimpour R. The influence of past decision information on decision making in the present. *Shefaye Khatam*. 2016; 4(3): 1-8
- Shadlen MN, Kiani R. Decision making as a window on cognition. *Neuron*. 2013; 80(3): 791-806.
- Tohidi-Moghaddam M, Zabbah S, Ebrahimpour R. The role of the primary information on importance of the last information in decision making. *Neurosci J Shefaye Khatam*. 2016; 4: 26-34
- Van Den Berg R, Anandalingam K, Zylberberg

A, Kiani R, Shadlen MN, Wolpert DM. A common mechanism underlies changes of mind about decisions and confidence. *Elife*. 2016;5: e12192

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

27. Piet A, Hady AE, Brody CD. Rats optimally accumulate and discount evidence in a dynamic environment. *arXiv preprint arXiv*: 2017, 171005945.

28. Wimmer K, Compte A, Roxin A, Peixoto D, Renart A, De La Rocha J. Sensory integration dynamics in a hierarchical network explains choice probabilities in cortical area MT. *Nature communications*. 2015;6(1):1-13

29. Zhan J, Ince RA, Van Rijsbergen N, Schyns PG. Dynamic construction of reduced representations in the brain for perceptual decision behavior. *Current Biology*. 2019; 29(2): 319-26

30. Okazawa G, Sha L, Purcell BA, Kiani R. Psychophysical reverse correlation reflects both sensory and decision-making processes. *Nature communications*. 2018;9(1): 1-16.

31. Roitman JD, Shadlen MN. Response of

neurons in the lateral intraparietal area during a combined visual discrimination reaction time task. *Journal of neuroscience*. 2002; 22(21): 9475-89.

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

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

34. Seo H, Cai X, Donahue CH, Lee D. Neural correlates of strategic reasoning during competitive games. *Science* 2014; 346(6207): 340-3.

35. Ossmy O, Moran R, Pfeffer T, Tsetsos K, Usher M, Donner TH. The timescale of perceptual evidence integration can be adapted to the environment. *Current Biology*. 2013; 23(11): 981-6

36. Purcell BA, Heitz RP, Cohen JY, Schall JD, Logan GD, Palmeri TJ. Neurally constrained modeling of perceptual decision making. *Psychological review*. 2010; 117(4): 1113

37. Ditterich J. Evidence for time-variant decision making. *European Journal of Neuroscience* 2006;224(12):3628-41.