

ارزیابی سطح توجه افراد با استفاده از یادگیری ماشین و تحلیل الگوهای حرکتی چشم و دست در آزمون مسیرسازی

سپیده اطاعتی^۱، مهدی دلربایی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، etaati@email.kntu.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، delrobaei@kntu.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

ویرایش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

چکیده: توجه به عنوان یکی از فرایندهای شناختی کلیدی، نقش محوری در فعالیت‌های روزمره، یادگیری و تعاملات انسان با محیط ایفا می‌کند. ارزیابی دقیق و عینی سطح توجه افراد، به‌ویژه در موقعیت‌های پویا و واقعی، همواره با چالش‌هایی همراه بوده است. روش‌های سنتی مانند پرسش‌نامه‌های خودگزارشی یا آزمون‌های مبتنی بر کاغذ، اغلب قادر به ثبت تغییرات لحظه‌ای توجه یا تأثیر عوامل محیطی نیستند. در این مطالعه با هدف ارائه روشی دقیق و کارآمد برای ارزیابی میزان توجه، از تحلیل الگوهای حرکتی چشم و دست در چارچوب آزمون مسیرسازی بهره برده است. طی فرایند داده‌گیری، داده‌های ۴۲ شرکت‌کننده سالم در حین انجام آزمون مسیرسازی ثبت شد. حرکات چشم و دست شرکت‌کنندگان با استفاده از فناوری‌های ردیابی چشم و ثبت حرکات موشواره به‌دقت اندازه‌گیری شده‌اند و ویژگی‌هایی مانند جهش‌ها، تثبیت‌های چشمی، تعداد پلک‌زدن و سرعت حرکت موشواره استخراج گردیدند. سپس با بهره‌گیری از این ویژگی‌ها، یک مدل جنگل تصادفی برای پیش‌بینی سطح توجه آموزش داده شد. نتایج نشان می‌دهند که مدل مذکور با ضریب تعیین ۷۲ درصد توانسته است میزان توجه را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند. این یافته‌ها مؤید آن است که الگوهای حرکتی چشم و دست می‌توانند به‌عنوان شاخص‌هایی قابل‌اعتماد برای ارزیابی توجه مورد استفاده قرار گیرند؛ بنابراین استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در تحلیل داده‌های حرکتی چشم و دست روشی قابل‌اعتماد برای ارزیابی سطح توجه در موقعیت‌های واقعی است. این رویکرد، علاوه بر اهمیت علمی و پژوهشی خود، می‌تواند کاربردهای عملی در زمینه‌های مختلف مانند آموزش، روان‌شناسی بالینی و طراحی سیستم‌های تعاملی انسان و کامپیوتر داشته باشد.

کلمات کلیدی: ارزیابی شناختی، عملکرد اجرایی، آزمون مسیرسازی، تعامل انسان و ماشین، یادگیری ماشین.

Assessment of Individuals' Attention Levels Using Machine Learning and Analysis of Eye and Hand Movement Patterns in the Trail-Making Test

Sepideh Etaati, Mehdi Delrobaei

Abstract: Attention, as one of the key cognitive processes, plays a central role in daily activities, learning, and human-environment interactions. Accurately and objectively assessing individuals' attention levels, particularly in dynamic and real-world situations, has always been a challenge. Traditional methods, such as self-report questionnaires or paper-based tests, often fail to capture momentary attention fluctuations or the impact of environmental factors. This study, aiming to provide a precise and efficient method, utilized the analysis of eye and hand movement patterns within the framework of the Trail-Making Test. Data from 42 healthy participants were collected while they performed the test. Their eye and hand movements were accurately measured using eye-tracking technology and mouse movement tracking. Features such as saccades, fixations, blinks, and mouse movement speed were extracted. A Random Forest model was then trained using these features to predict attention levels. The results indicate that the model achieved a coefficient of determination R^2 score of 72%, demonstrating its ability to predict attention levels accurately. These findings confirm that eye and hand movement patterns can serve as reliable indicators for attention assessment. Therefore, applying machine learning techniques to analyze eye and hand movement data presents a reliable approach for evaluating attention levels in real-world settings. Beyond its scientific and research significance, this approach has practical applications in various fields, including education, clinical psychology, and the design of human-computer interaction systems.

Keywords: Cognitive assessment, executive function, trail-making test (TMT), human-robot interaction, machine learning.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تعامل انسان و ماشین به یکی از موضوعات محوری در زمینه مهندسی شناختی تبدیل شده است. با پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، امکان ارزیابی و تحلیل وضعیت شناختی انسان‌ها از طریق داده‌های رفتاری به طور فزاینده‌ای فراهم شده است. یکی از جنبه‌های کلیدی این تعامل، ارزیابی توجه انسان است که نقش تعیین‌کننده‌ای در کاربردهایی همچون رانندگی خودکار، محیط‌های صنعتی، سیستم‌های آموزشی و حتی فعالیت‌های روزمره ایفا می‌کند. ارزیابی دقیق و به‌موقع توجه نه تنها به بهبود ایمنی و بهره‌وری در این حوزه‌ها کمک می‌کند؛ بلکه زمینه را برای توسعه سیستم‌های هوشمند پیشرفته نیز فراهم می‌سازد [۱].

طبق تعاریف روان‌شناسی شناختی، توجه یکی از سازوکارهای شناختی بنیادین انسان است که امکان انتخاب و پردازش بخش محدودی از اطلاعات دریافتی را از میان حجم گسترده‌ای از داده‌های حسی، حافظه و سایر فرآیندهای شناختی فراهم می‌کند [۲]. توجه انواع مختلفی دارد که هر یک نقش متمایزی در پردازش اطلاعات ایفا می‌کنند، از جمله توجه پایدار [۳]، توجه انتخابی [۴]، توجه تقسیم‌شده [۵] و توجه اجرایی [۶]. این سازوکارهای شناختی با تعامل با یکدیگر نقش مهمی در مدیریت فعالیت‌های روزمره ایفا می‌کنند.

ارزیابی توجه به طور سنتی با استفاده از روش‌های بالینی انجام می‌شود که همچنان در روان‌شناسی و آموزش کاربرد دارند. یکی از این روش‌ها، آزمون استروپ رنگ و کلمه است که ابتدا برای سنجش توانایی مهار تداخل شناختی طراحی شد، اما به‌عنوان معیاری برای ارزیابی توجه انتخابی نیز استفاده می‌شود [۷]. آزمون ویسکانسین برای ارزیابی فرآیندهای شناختی همچون توجه و حافظه کاری به کار می‌رود [۸] و همچنین برای ارزیابی افراد مبتلا به اختلالات مختلف مانند اسکیزوفرنی و بیش‌فعالی نیز استفاده می‌شود [۹]. آزمون مسیرسازی^۱ نیز یکی از ابزارهای مهم برای ارزیابی توجه بصری و انعطاف‌پذیری شناختی است [۱۰] و در پژوهش‌های مختلف برای ارزیابی تکانش‌گری توجه مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱].

با پیشرفت فناوری، ابزارهای نوینی برای ارزیابی توجه معرفی شده‌اند. یکی از این ابزارها استفاده از شبکه‌های عصبی برای ارزیابی توجه است که از مختصات صورت برای تخمین وضعیت سر بهره می‌برد [۱۲]. همچنین استفاده از الگوریتم‌های بینایی رایانه‌ای در نظارت بر توجه دانش‌آموزان در کلاس‌ها نیز برای یادگیری بهتر دانش‌آموزان مفید بوده است [۱۳]. در نهایت، استفاده از ابزارهای زیست پزشکی برای ارزیابی عملکرد شناختی نتایج قابل توجهی را نشان داده است [۱۴].

آزمون مسیرسازی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی عملکردهای اجرایی در عصب‌روان‌شناختی شناخته می‌شود، اما استفاده از نسخه سنتی

آن محدودیت‌هایی به همراه دارد. استفاده از ردیابی چشم و ابزارهای دیجیتال، به‌ویژه در نسخه رایانه‌ای، امکان ثبت معیارهای جدیدی مانند طول مسیر دیدن و تثبیت‌های چشمی را فراهم کرده‌اند که به تمایز افراد سالم از مبتلا به اختلالات شناختی کمک می‌کنند [۱۵]. مطالعات نشان داده‌اند که معیارهای حرکات چشم، مانند مدت‌زمان تثبیت و دامنه جهش، بینش‌هایی در مورد فرآیندهای شناختی فراهم می‌کنند، هرچند که در تشخیص هماهنگی چشم و دست محدودیت دارند [۱۶]. همچنین در نسخه مبتنی بر ردیابی چشم، از سیستم استنتاج نروفازی تطبیقی^۲ برای ارزیابی سرعت جستجوی بصری و توجه استفاده می‌شود که می‌تواند در تشخیص اختلالات شناختی مفید باشد [۱۷]. در نهایت با ترکیب ردیابی چشم و حرکات دست، این رویکردها امکان ارزیابی دقیق‌تری از عملکردهای شناختی و بهبود تشخیص اختلالات و بیماری‌هایی مانند دمانس و بیماری آلزایمر را فراهم می‌آورند [۱۸].

این پژوهش رویکردی نوین برای ارزیابی توجه از طریق تحلیل الگوهای حرکتی چشم و دست ارائه می‌دهد. برای این منظور، مجموعه‌ای از فعالیت‌های شناختی معیار طراحی شده‌اند که امکان جمع‌آوری داده و ارزیابی میزان توجه را فراهم می‌کنند. پس از گردآوری داده‌ها، فرایند پیش‌پردازش شامل حذف نویز و استانداردسازی انجام و ویژگی‌های کلیدی مرتبط با حرکات چشم و دست استخراج شده‌اند. سپس، از روش‌های آماری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای انتخاب ویژگی‌های بهینه استفاده شده است و مدل‌های برازش برای ارزیابی میزان توجه آموزش داده می‌شوند. به‌منظور اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی، از آزمون‌های شناختی معیار مانند مقیاس کنترل توجه^۳ استفاده شده است. دستاوردهای اصلی پژوهش به طور خلاصه عبارت‌اند از:

- تهیه یک مجموعه داده‌ی ساختارمند و ترکیبی از الگوهای حرکتی چشم و دست به همراه داده پرسش‌نامه‌های توجه و ذهن آگاهی که قابلیت استفاده در پژوهش‌های آینده را دارد.
- توسعه الگوریتمی جهت ارزیابی میزان توجه با استفاده از الگوهای حرکتی و شبکه‌های عصبی.
- ایجاد امکان سنجش کمی سطح توجه افراد در شرایط واقعی با استفاده از تعامل رایانه‌ای و بدون نیاز به تجهیزات پیچیده پزشکی.

در ادامه مقاله، پس از مرور اجمالی بر مطالعات موجود، به بررسی روش‌های ارزیابی توجه پرداخته می‌شود. این مرور بستر مناسبی برای طراحی مجموعه فعالیت‌ها و انتخاب روش‌های تحلیل داده‌ها فراهم می‌آورد. در بخش بعدی، روند طراحی فعالیت‌ها، روش‌های جمع‌آوری داده، استخراج ویژگی و مدل‌سازی پیشنهادی شرح داده شده است. این بخش نقش کلیدی در تبیین روش‌شناسی پژوهش ایفا می‌کند و جزئیات عملی اجرای آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها را به‌صورت ساختارمند بیان می‌کند. در نهایت، نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها ارائه شده است و یافته‌های

³ Attention Control Scale (ACS)¹ Trail Making Test (TMT)² Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

برای ثبت حرکات دست استفاده شده و تمامی مراحل طراحی آزمون، ضبط داده‌ها و تحلیل در نرم‌افزار پایتون انجام شده است. همچنین، فرآیند کالبراسیون و اجرای آزمون مسیریابی از طریق رابط کاربری گرافیکی توسعه یافته پیاده‌سازی شده است.

۲-۲ استخراج و پردازش ویژگی‌ها

پس از اتمام فرایند داده‌گیری، لازم است ویژگی‌های معنادار از حرکات چشم و دست که در حین انجام آزمون TMT-B ثبت شده‌اند پردازش و استخراج شوند. این مرحله شامل به‌کارگیری روش‌های پردازش تصویر و سیگنال به‌منظور تحلیل الگوهای حرکتی، شناسایی ویژگی‌های کلیدی و کاهش نویزهای احتمالی است. هدف از این پردازش، دستیابی به مجموعه‌ای از ویژگی‌های مناسب برای ارزیابی میزان توجه و عملکرد شناختی شرکت‌کنندگان در آزمون است.

۲-۲-۱ استخراج الگوهای حرکتی چشم

برای استخراج حرکات چشم، از جمله پلک‌زدن، تثبیت و جهش، از پردازش تصویر و سیگنال استفاده شده است. ابتدا با کمک کتابخانه‌های نرم‌افزار پایتون، نقاط مشخصه‌ی صورت استخراج و محل دقیق چشم‌ها شناسایی می‌شوند. سپس، آستانه‌ی بسته‌شدن چشم برای هر فرد تعیین شده و تعداد پلک‌ها محاسبه می‌شوند. به همین ترتیب، با تحلیل سیگنال‌های چشمی، تعداد و زمان جهش‌ها و تثبیت‌های چشم مشخص شده است. محاسبات مربوط به هر بخش در ادامه توضیح داده می‌شوند. برای به‌دست آوردن تعداد پلک‌زدن ابتدا با استفاده از کتابخانه dlib نقاط کلیدی چشم استخراج می‌شوند. این کتابخانه قادر است ۶۸ نقطه کلیدی را روی صورت شناسایی کند که ۱۲ نقطه از آن‌ها به چشم‌ها اختصاص دارند. سپس بر اساس این نقاط فاصله افقی بین گوشه‌های خارجی چشم و فاصله عمودی بین نقاط بالا و پایین پلک محاسبه می‌شوند. با تقسیم فاصله افقی بر فاصله عمودی، نسبت پلک‌زدن به دست می‌آید. روابط مربوط به محاسبه نسبت پلک‌زدن در رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) آورده شده‌اند. شماره‌های ذکر شده در روابط، نقاط مشخص شده در خروجی نرم‌افزار از کتابخانه dlib هستند.

$$(1) \quad \text{فاصله افقی} = \sqrt{(x_{39} - x_{36})^2 + (y_{39} - y_{36})^2}$$

$$(2) \quad \text{فاصله عمودی} = \frac{\sqrt{(x_{37} - x_{41})^2 + (y_{37} - y_{41})^2} + \sqrt{(x_{38} - x_{40})^2 + (y_{38} - y_{40})^2}}{2}$$

$$(3) \quad \text{نسبت پلک‌زدن} = \frac{\text{فاصله افقی}}{\text{فاصله عمودی}}$$

حال برای تشخیص دقیق پلک‌زدن، یک آستانه مشخص تعیین می‌شود که به‌صورت شخصی‌سازی شده برای هر فرد محاسبه شده و از

پژوهش مورد بررسی و تفسیر قرار می‌گیرند. در بخش نتیجه‌گیری، نتایج کلیدی پژوهش و پیشنهادهایی برای انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه ارائه می‌شوند.

۲- فرآیند انجام آزمایش و تحلیل داده‌ها

در این بخش، ابتدا فرایند اجرای آزمون‌ها و جمع‌آوری داده‌ها تشریح می‌شود. سپس روش‌های به‌کاررفته برای استخراج ویژگی‌های مربوط به حرکات چشم و دست با استفاده از روش‌های پردازش تصویر و پردازش سیگنال توضیح داده می‌شوند. در ادامه، معیارهای انتخاب ویژگی‌های مناسب جهت آموزش مدل برازشی تحلیل و فرآیند آموزش مدل برازش جنگل تصادفی شرح داده می‌شود.

۲-۱ شیوه‌نامه آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها

در این پژوهش، داده‌ها از ۴۲ شرکت‌کننده (۱۹ زن و ۲۳ مرد) با میانگین سنی ۲۴/۶۴ سال و انحراف معیار ۳/۳۲ جمع‌آوری شده‌اند. تمامی شرکت‌کنندگان از دانشجویان دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی بودند و فرآیند داده‌گیری طی سه هفته انجام شد. برای ارزیابی توجه، از آزمون مسیریابی استفاده شده است که نسخه دیجیتالی آن امکان ثبت حرکات چشم و موشواره را فراهم می‌کند [۱۹]. شرکت‌کنندگان ابتدا فرم رضایت آگاهانه و سپس پرسشنامه‌های مربوط به ارزیابی توجه و ذهن‌آگاهی که به ترتیب شامل پرسشنامه مقیاس کنترل توجه [۲۰] و پرسشنامه مقیاس ذهن‌آگاهی، توجه و هوشیاری^۱ [۲۱] بوده‌اند را تکمیل کردند. سپس، فاصله شرکت‌کنندگان از مانیتور (۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) تنظیم و فرآیند کالبراسیون برای تنظیم دوربین انجام شد. در مرحله کالبراسیون، شرکت‌کنندگان می‌بایست با حرکات چشم به ۹ نقطه مشخصی که به ترتیب بر روی صفحه‌نمایش داده می‌شد نگاه کنند. پس‌ازاین مراحل، شرکت‌کنندگان آزمون اصلی که آزمون مسیریابی است را انجام دادند. آزمون مسیریابی در دو بخش طراحی شده بود: بخش اول TMT-A که هدف وصل کردن اعداد ۱ تا ۲۵ به‌صورت صعودی بوده و بخش دوم TMT-B که شرکت‌کنندگان می‌بایست اعداد از ۱ تا ۱۳ و حروف از A تا L را به‌طور متناوب به هم متصل می‌کردند. مراحل آزمون مسیریابی در این پژوهش به این صورت بوده که ابتدا فاز تمرینی آزمون TMT-A (نسخه کوتاه شده آزمون اصلی) و سپس آزمون اصلی TMT-A اجرا می‌شود. به‌طور مشابه برای آزمون TMT-B نیز به همین صورت اجرا می‌شود و درنهایت آزمون TMT-A و TMT-B دوباره تکرار می‌شوند. مراحل آزمون مسیریابی طبق مقاله [۲۲] انتخاب شده است. در این آزمون شرکت‌کنندگان موظف بودند تا با حداکثر دقت و سرعت ممکن، مسیر مشخص شده بین اعداد و حروف را دنبال کنند.

برای جمع‌آوری داده‌ها، از دوربین HD مایکروسافت مدل لایف کم ۳۰۰۰ (۳۰ فریم در ثانیه) جهت ثبت حرکات چشم و از موشواره بی‌سیم

¹ Mindful Attention Awareness Scale (MAAS)

انحراف معیار آن‌ها است. با تنظیم ضریب دو، می‌توان حساسیت این معیار را برای تشخیص تثبیت و جهش تنظیم کرد.

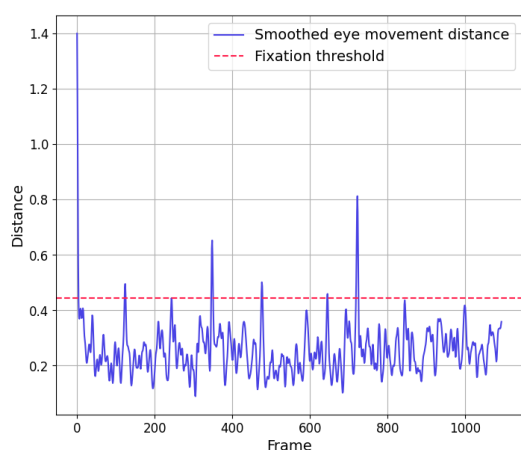


(الف)



(ب)

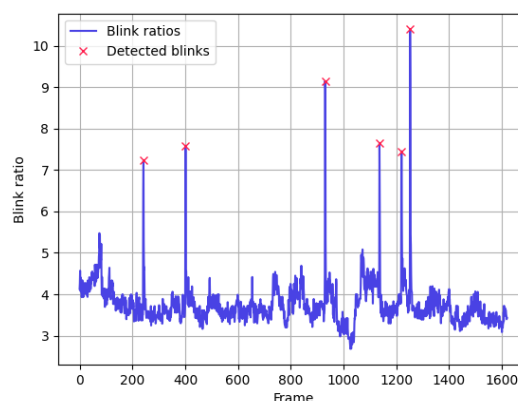
شکل ۲: ردیابی نگاه در داده‌های ویدیویی با استفاده از MediaPipe؛ (الف) نمونه‌ای از تشخیص چشم‌ها و عنبیه در تصویر، (ب) به دست آوردن مرکز چشم‌چپ و راست و مرکز نگاه (نمایش داده‌شده با رنگ سبز)



شکل ۳: نمودار فاصله حرکات چشم بین فریم‌های متوالی در داده‌های ویدیویی نمایش داده شده است. خط چین قرمز نشان‌دهنده آستانه تثبیت است، به طوری که حرکات فراتر از این آستانه به عنوان جهش یا پلک زدن در نظر گرفته می‌شوند و حرکات پایین‌تر از آن، بسته به مدت زمان ثابت ماندن نگاه، به عنوان تثبیت طبقه‌بندی می‌شوند.

براین اساس، حرکت‌هایی که فاصله آن‌ها کمتر از این آستانه باشد، تثبیت و سایر حرکات جهش در نظر گرفته می‌شوند. لازم به ذکر است که

داده‌های کالیبراسیون استخراج می‌گردد. در این فرآیند، ابتدا نسبت پلک‌زدن در دو حالت مختلف ثبت می‌شود: زمانی که چشم‌ها باز هستند و پلک‌زدن رخ نمی‌دهد (حالت عادی) و لحظاتی که پلک‌ها کاملاً بسته می‌شوند (حالت پلک‌زدن). سپس، برای داده‌های مربوط به حالت عادی، مقدار صدک ۷۵ام نسبت‌های پلک‌زدن محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده حد بالایی تغییرات طبیعی نسبت پلک‌زدن در زمان عدم پلک‌زدن است. برای داده‌های حالت پلک‌زدن، میانه مقادیر نسبت پلک‌زدن در نظر گرفته می‌شود تا مقدار معمول نسبت در هنگام بسته شدن پلک‌ها مشخص شود. در نهایت، آستانه پلک‌زدن از میانگین این دو مقدار (صدک ۷۵ام از حالت عادی و میانه از حالت پلک‌زدن) به دست می‌آید. این مقدار به مدل کمک می‌کند تا بین پلک‌زدن واقعی و تغییرات طبیعی چشم که مشابه پلک‌زدن هستند، تمایز قائل شود و در ادامه، در هر فریم ویدئویی، اگر مقدار نسبت پلک‌زدن از این آستانه عبور کند، پلک‌زدن ثبت می‌شود. نمونه‌ای از تشخیص تعداد پلک‌ها در آزمون TMT-B در شکل ۱ نشان داده شده است.



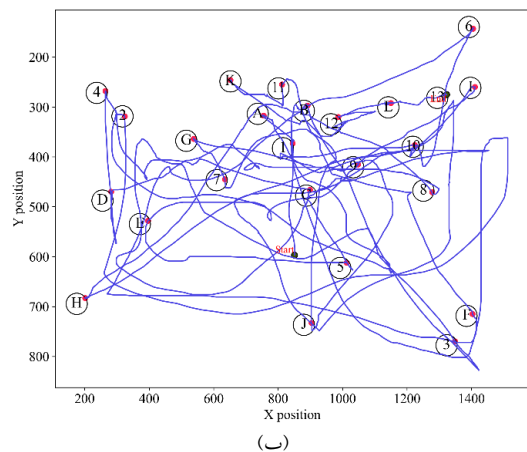
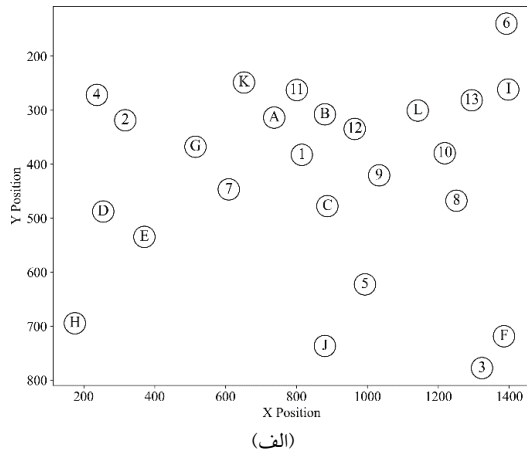
شکل ۱: نمونه‌ای از تشخیص پلک زدن در آزمون TMT-B

در ادامه برای به دست آوردن تعداد و زمان جهش‌ها و تثبیت‌های چشم لازم است محل نگاه را به دست آوریم. برای این امر با استفاده از کتابخانه MediaPipe موقعیت چشم‌ها استخراج شده و مرکز هر چشم بر اساس میانگین مختصات نقاط کلیدی آن تعیین شده است. سپس، مرکز نگاه به عنوان میانگین موقعیت چشم‌ها تخمین زده شد. نمونه‌ای از تشخیص مرکز چشم‌ها و مرکز نگاه در شکل ۲ آورده شده است.

برای تحلیل حرکات چشم، فاصله‌های اقلیدسی بین نقاط نگاه متوالی محاسبه شده و نمودار آن برای تشخیص تثبیت‌ها و جهش‌ها ترسیم شده است. جهت کاهش نویز ناشی از حرکات سر و خطاهای سیستم، از یک فیلتر گاوسی با انحراف معیار ۲ استفاده شده است. نمونه‌ای از این نمودار در شکل ۳ ترسیم شده است.

تثبیت چشم به عنوان دوره‌هایی تعریف می‌شود که در آن نگاه نسبتاً ثابت است درحالی که جهش شامل حرکات سریع بین تثبیت‌هاست [۲۳]. برای طبقه‌بندی این رفتارها، یک آستانه تثبیت محاسبه شده که با رابطه (۴) مشخص می‌شود. در این رابطه، μ میانگین فاصله‌های حرکت نگاه و σ

$$S_i = \sum_{k=1}^{i-1} \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2} \quad (V)$$



شکل ۴: نمونه‌ای از آزمون TMT-B؛ (الف) چپش آزمون TMT-B (ب) نمونه‌ای از مسیر حرکت موشواره در آزمون که خطوط آبی حرکت و نقاط قرمز محل کلیک‌های موشواره را نشان می‌دهند.

همچنین، نسبت خط مستقیم که جابه‌جایی را به مسافت تقسیم می‌کند، مدت‌زمان انجام هر بخش، سرعت و شتاب در راستای X و Y، برآیند این مقادیر (۸) و (۹) و جهش (۱۰) از دیگر ویژگی‌های استخراج شده هستند.

$$v_x = \frac{\delta x}{\delta t}, v_y = \frac{\delta y}{\delta t}, \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (8)$$

$$\dot{v} = \frac{\delta v}{\delta t} \quad (9)$$

$$\ddot{v} = \frac{\delta \dot{v}}{\delta t} \quad (10)$$

از دیگر ویژگی‌های مهم می‌توان به سرعت زاویه‌ای (۱۱)، انحنای (۱۲) و نرخ تغییر انحنای (۱۳) اشاره کرد که نشان‌دهنده میزان تغییرات زاویه‌ای در مسیر حرکت است.

$$W = \frac{\delta \theta_t}{\delta t} \quad (11)$$

تعداد جهش‌های به‌دست‌آمده از این روش مجموع جهش‌ها و پلک‌ها است که تعداد پلک‌ها از آن کم می‌شود [۲۴].

$$\mu + 2 \times \sigma \quad (4)$$

در شکل ۳ آستانه تثبیت چشم با خط چین قرمز مشخص شده است. برای صحت‌سنجی، این روش روی داده‌های کالیبراسیون بررسی شد. با تقریب، بدون احتساب پلک‌ها، انتظار ۹ تثبیت و ۸ جهش وجود داشت که مدل توانست با دقت قابل قبول این ویژگی‌ها را شناسایی کند. در این بخش دو داده پرت حذف شدند.

برای محاسبه زمان تثبیت و جهش، معیارهای زمانی مشخص شدند. مطالعات نشان داده‌اند که تثبیت‌ها معمولاً بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌ثانیه طول می‌کشد و کمتر از ۱۰۰ میلی‌ثانیه تثبیت محسوب نمی‌شود [۲۵]. بنابراین، تثبیت‌ها توالی‌هایی با مدت بیش از ۱۰۰ و کمتر از ۵۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شدند. همچنین، توالی‌هایی با زمان کمتر از ۲۰۰ میلی‌ثانیه به‌عنوان جهش طبقه‌بندی شدند [۲۶].

در ادامه، میانگین، انحراف معیار، بیشترین و کمترین زمان برای تثبیت و جهش محاسبه شد تا الگوهای مختلف حرکات چشم تحلیل شوند. در مجموع ۱۱ ویژگی مختلف از داده‌های چشمی استخراج شد که ویژگی‌های حرکات چشم را ارائه می‌دهند.

۲-۲-۲ استخراج الگوهای حرکتی موشواره

داده‌های مربوط به حرکت موشواره در حین اجرای آزمون‌ها ذخیره شده‌اند که این داده‌ها شامل مختصات حرکت موشواره با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز و همچنین موقعیت کلیک‌ها هستند. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر، آزمون‌های هر شرکت‌کننده بر اساس کلیک‌های ثبت شده روی اهداف تفکیک شده‌اند. این کار امکان استخراج ویژگی‌های مرتبط با حرکت موشواره را فراهم کرده و محاسبه ویژگی‌ها را برای مسیرهای بین اهداف متوالی ممکن می‌سازد.

ترتیب اهداف در آزمون TMT-B، همراه با نمونه‌ای از مسیرهای حرکتی موشواره و کلیک‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این تحلیل، مختصات مسیر حرکت موشواره بین هر دو هدف متوالی مورد بررسی قرار گرفته تا ویژگی‌های متنوعی از آن‌ها استخراج شوند.

ویژگی‌های استخراج شده از موشواره بر اساس روش‌های ارائه شده در مطالعات پیشین [۲۷]، [۲۸]، [۲۹] و [۳۰] انجام گرفته و به‌طور مجزا برای هر شرکت‌کننده اعمال گردیده است. این ویژگی‌ها شامل مختصات در راستای X و Y، زاویه حرکت موشواره (۵)، جابه‌جایی (۶) و مسافت پیموده شده (۷) هستند.

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{\delta y}{\delta x}\right) \quad (5)$$

$$D = \sqrt{(y_j - y_i)^2 + (x_j - x_i)^2} \quad (6)$$

$$(۱۲) \quad C = \frac{\delta \theta}{\delta S}$$

$$(۱۳) \quad \Delta C = \frac{\delta C}{\delta S}$$

همچنین، ویژگی‌هایی چون تعداد و مدت زمان توقف‌ها، آنتروپی و x-flips برای تحلیل حرکات پیچیده‌تر و غیرقابل پیش‌بینی حرکات موشواره مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای ارزیابی بهتر، برخی از ویژگی‌ها دارای پنج بعد آماری شامل مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و دامنه (تفاوت بین حداکثر و حداقل) هستند.

در مجموع ۸۲ ویژگی مختلف از داده‌های حرکتی موشواره استخراج شدند که به‌طور مجزا در تحلیل‌های مختلف استفاده شدند.

۲-۳ انتخاب ویژگی‌های مناسب

پس از استخراج ویژگی‌ها از داده‌های حرکتی چشم و موشواره، در مجموع ۹۳ ویژگی به دست آمد که می‌بایست ویژگی‌های مناسب را از میان آن‌ها انتخاب می‌شد. در گام نخست، از تحلیل همبستگی پیرسون برای بررسی رابطه خطی بین ویژگی‌ها و متغیرهای هدف که شامل نمرات پرسشنامه‌های ACS، MAAS و تمرکز و تغییر توجه (که زیر نمرات پرسشنامه ACS هستند)، استفاده شد. ویژگی‌هایی که همبستگی کمتر از ۰/۲ با متغیرهای هدف داشتند، به‌عنوان ویژگی‌های کم‌اهمیت شناسایی و از تحلیل‌های بعدی کنار گذاشته شدند.

علاوه بر این، همبستگی‌های جفتی میان ویژگی‌ها برای شناسایی چندخطی بودن بررسی شد. جفت ویژگی‌هایی که همبستگی بیش از ۰/۸ داشتند، به‌عنوان متغیرهای بسیار وابسته در نظر گرفته شده و برای اطمینان از پایداری مدل، یکی از آن‌ها حذف گردید. برخلاف روش‌های سنتی که بر ارتباط ویژگی‌ها با یک متغیر خاص تمرکز دارند، در این پژوهش ویژگی‌هایی انتخاب شدند که ارتباط معناداری با چند متغیر هدف داشتند تا تصویر مناسب‌تری از ارزیابی توجه ارائه دهند.

به‌منظور بهبود فرایند انتخاب ویژگی، از شبکه‌های برازش نیز استفاده شد تا مدل به‌طور خودکار مهم‌ترین ویژگی‌ها را شناسایی کند. علاوه بر این، برای کاهش ابعاد و بهینه‌سازی مدل، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ به کار گرفته شد.

۲-۴ مدل برازش جنگل تصادفی

مدل جنگل تصادفی به دلیل توانایی آن در شناسایی روابط غیرخطی، تعاملات پیچیده بین ویژگی‌ها، و مقاومت در برابر بیش‌برازش، به‌عنوان مدل اصلی در این مطالعه انتخاب شد. این روش با ترکیب چند درخت تصمیم، دقت پیش‌بینی را افزایش داده و تعمیم‌پذیری بهتری نسبت به مدل‌های ساده‌تر ارائه می‌دهد [۳۱] و [۳۲].

با استفاده از نمونه‌گیری تصادفی و ترکیب چند درخت، جنگل تصادفی از وابستگی بیش از حد به داده‌های آموزشی جلوگیری کرده و امکان کشف ارتباطات غیرخطی بین متغیرها را فراهم می‌کند. علاوه بر این، این مدل قادر است اهمیت نسبی هر ویژگی را در پیش‌بینی نمرات شناختی تعیین کند که در تحلیل داده‌ها اهمیت زیادی دارد. در مقایسه با مدل‌های پیچیده‌تر، جنگل تصادفی تنظیمات حساس کمتری نیاز دارد و پایداری بیشتری نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این ویژگی‌ها، جنگل تصادفی به‌عنوان مدل برازش برای ارزیابی توجه انتخاب شد، زیرا تعادل مطلوبی بین دقت، تعمیم‌پذیری و تفسیرپذیری ارائه می‌دهد [۳۳].

مدل جنگل تصادفی پس از انتخاب ویژگی‌هایی که بیشترین همبستگی را با متغیرهای هدف داشتند، آموزش داده شد. این فرایند شامل یک رویکرد تکراری و تجربی با استفاده از امتیازهای اهمیت ویژگی بود که در نهایت ویژگی‌های مناسب از آزمون TMT-B استخراج شدند. پس از انتخاب ویژگی‌ها، داده‌ها استانداردسازی شدند تا مقیاس یکنواختی برای تمام متغیرها ایجاد شود و از تأثیر نامتناسب ویژگی‌هایی با دامنه‌های متفاوت جلوگیری گردد.

برای بهبود تعمیم‌پذیری، افزایش داده‌ها در آزمون TMT-B با افزودن نویز گاوسی (با انحراف معیار ۰/۰۰۵) انجام شد. این روش تنوع داده‌های آموزشی را افزایش می‌دهد و مدل را در برابر تغییرات داده‌های دنیای واقعی مقاوم‌تر می‌سازد. همچنین، برای کاهش ابعاد و حذف نویز، تجزیه مؤلفه‌های اصلی اعمال شد که تعداد مؤلفه‌ها به چهار مؤلفه کاهش یافت. پس از پیش‌پردازش، مجموعه داده‌ها به نسبت ۸۰-۲۰ به داده‌های آموزشی و آزمایشی تقسیم شدند و مقدار Random State برابر با ۴۲ تنظیم شد تا تکرارپذیری نتایج تضمین گردد. برای ارزیابی عملکرد مدل، صحنه‌گذاری K-fold با مقدار K برابر با پنج به کار گرفته شد. مدل جنگل تصادفی با ۱۰۰ درخت و حداکثر عمق پنج تنظیم شد تا بین پیچیدگی و تعمیم‌پذیری تعادل برقرار گردد. عملکرد نهایی مدل بر اساس میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE) و R² Score ارزیابی شد، که نشان‌دهنده میزان واریانس و دقت به‌دست آمده توسط مدل است.

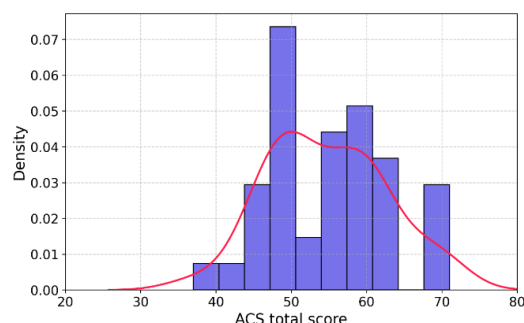
۳- نتایج و تحلیل یافته‌ها

در این بخش، به تحلیل آماری نمرات پرسشنامه‌ها و نتایج مدل برازش جنگل تصادفی برای ارزیابی میزان توجه پرداخته می‌شود. ابتدا توزیع نمرات پرسشنامه‌های ACS و MAAS بررسی می‌شود تا ویژگی‌های مرکزی و پراکندگی داده‌ها تحلیل گردد. سپس، نتایج مدل جنگل تصادفی که برای پیش‌بینی میزان توجه بر اساس داده‌های حرکتی چشم و موشواره استفاده شده است، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت، نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه می‌شود تا اثربخشی و دقت روش‌های به کاررفته بررسی گردد.

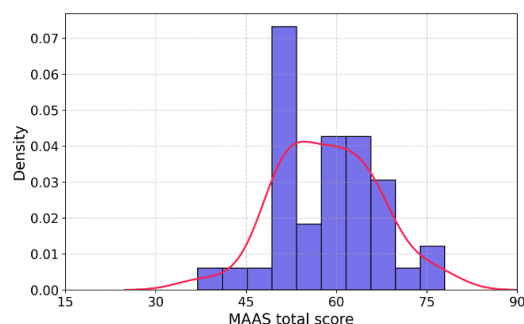
^۱ Principal component analysis (PCA)

۳-۱ بررسی‌های آماری

شکل ۵ توزیع نمرات پرسش‌نامه‌های ACS و MAAS را نمایش می‌دهد که به ترتیب میزان ذهن آگاهی و توجه شرکت کنندگان را ارزیابی می‌کنند. بررسی توزیع نمرات ACS نشان می‌دهد که این داده‌ها دارای توزیعی نسبتاً متقارن و نزدیک به نرمال هستند. در حالی که تعداد کمتری از آن‌ها در انتهای پایین یا بالای طیف قرار دارند. وجود مقدار اندکی Skewness مثبت در این توزیع نشان می‌دهد که برخی از شرکت کنندگان توجه بالاتری نسبت به سایرین داشته‌اند.



(الف)



(ب)

شکل ۵: نمودار هیستوگرام فراوانی نمرات پرسشنامه‌های (الف) مقیاس کنترل توجه (ACS) و (ب) مقیاس ذهن آگاهی، توجه و هوشیاری (MAAS) و منحنی تابع چگالی احتمال برآورده شده را نمایش می‌دهند.

در مقابل، توزیع نمرات MAAS الگوی مشابه اما با پراکندگی بیشتر را نشان می‌دهد. این تفاوت ممکن است نشان‌دهنده تنوع بالاتر در سطوح ذهن آگاهی میان شرکت کنندگان باشد. برخی افراد نمرات پایینی به دست آورده‌اند که نشان‌دهنده تمرکز کمتر بر لحظه‌ای حال است، در حالی که برخی دیگر نمرات بالاتری دارند که بیانگر سطح بالای ذهن آگاهی در فعالیت‌های روزمره است.

مقایسه دامنه‌ی تغییرات این دو آزمون نیز حائز اهمیت است. نمرات ACS در بازه‌ی ۳۷ تا ۷۱ قرار دارند، در حالی که نمرات MAAS گستره‌ی وسیع‌تری از ۳۷ تا ۷۸ را در برمی‌گیرند. این تفاوت می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت بالاتر MAAS در تمایز بین سطوح مختلف ذهن آگاهی باشد. علاوه بر این، تمرکز داده‌ها در هر دو توزیع عمدتاً در بخش میانی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده عملکرد متوسط بیشتر شرکت کنندگان در این آزمون‌ها است. با این حال، مقدار بالاتر انحراف معیار در نمرات MAAS

نسبت به ACS نشان می‌دهد که میزان تنوع در نحوه‌ی تجربه‌ی ذهن آگاهی میان شرکت کنندگان بیشتر از میزان تفاوت در توجه است.

۳-۲ ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی

در این تحقیق ۹۳ ویژگی از داده‌های حرکت چشم و موشواره استخراج و برای شناسایی ویژگی‌های مرتبط با ارزیابی توجه تحلیل همبستگی انجام شد. نمرات هدف شامل ACS، MAAS و زیر نمرات آن (تمرکز و تغییر توجه) بودند. ویژگی‌هایی با بالاترین همبستگی با نمرات هدف برای مدل‌های برازش انتخاب شدند. نتایج تحلیل همبستگی برای آزمون TMT-B و ویژگی‌های انتخاب‌شده در جدول ۱ آورده شده‌اند.

نتایج تحلیل همبستگی برای آزمون TMT-B نشان می‌دهند که ویژگی‌هایی مانند مدت‌زمان جهش، انحناء، تعداد تثبیت‌ها و جهش‌ها و معیارهای شتاب با نمرات هدف همبستگی معناداری دارند. همچنین ارتباط منفی بین میانگین مدت‌زمان جهش و ACS نشان‌دهنده این است که جهش‌های کوتاه‌تر ممکن است نشانگر توجه بیشتر باشند.

جدول ۱: مقادیر ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های منتخب آزمون

TMT-B و نمرات هدف

ویژگی‌ها	MAAS	ACS	تمرکز	تغییر توجه
میانگین زمان جهش	-۰/۲۷۴	-۰/۳۹۹*	-۰/۴۷۶	-۰/۲۳۵
انحراف معیار زمان جهش	-۰/۰۴۰	-۰/۳۴۲	-۰/۴۷۳	-۰/۱۳۵
کمترین نرخ تغییر انحناء	-۰/۱۹۳	-۰/۳۷۳	-۰/۳۹۶	-۰/۲۷۳
کمترین زمان جهش	۰/۳۶۱	-۰/۲۴۳	-۰/۲۶۳	-۰/۱۷۱
بیشترین سرعت زاویه‌ای	-۰/۳۵۸	-۰/۱۹۶	-۰/۲۰۸	-۰/۱۴۳
میانگین انحناء	-۰/۰۲۷	-۰/۳۲۳	۰/۲۳۸	۰/۳۴۵
تعداد تثبیت	۰/۳۳۶	۰/۲۴۲	۰/۲۲۶	۰/۲۰۹
تعداد جهش	۰/۳۲۶	۰/۲۳۰	۰/۲۱۳	۰/۲۰۱
میانگین شتاب در راستای افقی	-۰/۱۸۰	-۰/۲۱۱	-۰/۳۰۷	-۰/۰۶۷

*مقادیری که پررنگ شده‌اند نشان‌دهنده همبستگی‌های معنادار ضرایب با نمرات هدف هستند.

این انتخاب‌ها با یافته‌های تحقیقات قبلی نیز هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهد جهش‌ها و تثبیت‌ها می‌توانند به عنوان نشانگرهای قابل‌اعتمادی برای فرآیندهای شناختی مانند توجه پایدار و جستجوی بصری عمل کنند [۳۴]. همچنین مطالعه [۲۴] ویژگی‌های حرکتی چشم مانند جهش، تثبیت و پلک‌زدن را انتخاب کرده است، اما به این نکته اشاره کرده است که برای تشخیص توجه، تنها استفاده از داده‌های موشواره کافی نیست. یکی از محدودیت‌های این مطالعه کمبود تعداد ویژگی‌های استخراج‌شده از داده‌های موشواره است و با افزایش تعداد این ویژگی‌ها می‌توان به نتایج بهتری در تحلیل داده‌های موشواره رسید.

تحلیل حرکت چشم شامل بررسی جهش‌ها، تثبیت‌ها و پلک زدن‌ها در ارتباط با عملکرد شناختی است، نه صرفاً در زمینه‌ی خواندن. مورد دیگر در این پژوهش، رویکرد روش شناختی آن است. درحالی‌که [۲۴] از مدل‌های طبقه‌بندی برای تعیین سطوح توجه استفاده کرده و به‌دقت ۷۵ درصد دست‌یافته‌اند، این مطالعه مدل‌های برازشی مانند جنگل تصادفی را برای ارزیابی نمرات توجه و آگاهی ذهنی به کار گرفته که R^2 Score برابر با ۷۲ درصد نشان می‌دهد. این روش، به‌جای دسته‌بندی‌های از پیش تعیین‌شده، ارزیابی پیوسته و دقیق‌تری از توجه ارائه می‌دهد. مدل‌های برازشی همچنین تفسیرپذیری بیشتری دارند و امکان ارزیابی‌های دقیق‌تر را فراهم می‌کنند که در زمینه‌های تعامل انسان و کامپیوتر ضروری است. علاوه بر این، مدل ارائه‌شده از تعمیم‌پذیری برخوردار است. درحالی‌که مدل طبقه‌بندی ارائه‌شده در [۲۴] عمدتاً در محیط‌های آموزش الکترونیکی کاربرد دارد، روش پیشنهادی در یک وظیفه شناختی ساختاریافته ارزیابی شده و برای تحقیقات روان‌شناختی مناسب‌تر است. همچنین، برخلاف مطالعه [۲۴] که به شناسایی حالات چهره متکی است، این روش به شرایط نوری، وضعیت‌های عاطفی و تفاوت‌های فردی حساس نیست، که آن را به رویکردی پایدارتر تبدیل می‌کند.

مطالعه دیگری در این حوزه، پژوهش [۱۷] است که آزمون مسیرسازی مبتنی بر ردیابی چشم^۱ (ETMT) را به‌عنوان ابزاری برای غربالگری نقص شناختی معرفی می‌کند. این روش از یک سیستم استنتاج نروفازی تطبیقی برای ارزیابی سرعت جستجوی بصری، تمرکز و اختلال شناختی استفاده می‌کند. باوجود نوآوری این روش، تفاوت‌هایی اساسی میان آن و رویکرد ارائه‌شده در این پژوهش وجود دارد.

مدل ETMT عمدتاً برای غربالگری نقص شناختی طراحی شده است و الگوهای حرکت چشم را در حین انجام آزمون مسیرسازی بررسی می‌کند، اما اطلاعاتی درباره عملکرد اجرایی و توجه ارائه نمی‌دهد. در مقابل، پژوهش ما بر پیش‌بینی کمی نمرات توجه و آگاهی ذهنی تمرکز دارد و با ترکیب داده‌های آزمون مسیرسازی، مقیاس ACS و MAAS، ارزیابی‌ای از عملکرد شناختی ارائه می‌دهد. درحالی‌که مدل ETMT تنها به ویژگی‌های استخراج‌شده از حرکت چشم متکی است، این روش علاوه بر داده‌های ردیابی چشم، اطلاعات حرکت موشواره را نیز در نظر می‌گیرد که دید عمیق‌تری از تعامل شناختی را فراهم می‌کند. افزون بر ویژگی‌های سنتی حرکت چشم، معیارهای مربوط به مسیر حرکتی موشواره، مانند سرعت، پیچیدگی مسیر و فاصله بین کلیک‌ها نیز محاسبه‌شده است که دامنه فرآیندهای شناختی مورد بررسی را نسبت به ETMT گسترش می‌دهد.

مدل ETMT از منطق فازی و سیستم استنتاج نروفازی تطبیقی برای دسته‌بندی افراد بر اساس سطوح مختلف اختلال شناختی بهره می‌برند. درحالی‌که این روش ارزیابی کلی ارائه می‌دهد، دقت لازم برای

نتایج مدل جنگل تصادفی برای ارزیابی میزان توجه در جدول ۲ آورده شده است. اعداد جدول میانگین نتایج حاصل از روش صحنه‌گذاری K-fold و مقادیر داخل پرانتز انحراف معیار آن‌ها هستند. مدل در پیش‌بینی نمرات ACS عملکرد خوبی از خود نشان داده است. مقدار R^2 Score بالا در داده‌های آزمایشی نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی مدل است، به‌طوری‌که مدل توانسته است بخش زیادی از تغییرات نمرات توجه را پیش‌بینی کند. مقادیر پایین MAE و MSE نیز نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی مدل نزدیک به مقادیر واقعی هستند. دقت حاصل‌شده بر روی داده‌های آزمون نیز نشان می‌دهد که مدل قابلیت پیش‌بینی مناسبی دارد.

جدول ۲: نتایج پیاده‌سازی مدل جنگل تصادفی برای آزمون TMT-B

داده‌های آموزش	داده‌های آزمون	معیارها	
MAE	۱/۸۸* (۲۴/۰)	۳/۳۸ (۰/۱۳)	نمرات
MSE	۵/۵۷ (۱/۱۷)	۱۵/۶۹ (۲/۵۴)	پرسش‌نامه توجه (ACS)
R^2 Score	۰/۹۰ (۰/۰۲)	۰/۷۲ (۰/۰۶)	

* اعداد ارائه‌شده در جدول میانگین نتایج حاصل از روش صحنه‌گذاری K-fold هستند و مقادیر داخل پرانتز نشان‌دهنده انحراف معیار مربوط به آن هستند.

۳-۳ مقایسه با مطالعات پیشین و محدودیت‌های

پژوهش

مطالعات متعددی به ارزیابی توجه با استفاده از داده‌های چندوجهی، به‌ویژه ترکیب حرکت چشم، حالات چهره و دینامیک موشواره پرداخته‌اند. یکی از پژوهش‌ها در این زمینه، مطالعه [۲۴] است که به شناسایی توجه هنگام خواندن از طریق تحلیل ویژگی‌های استخراج‌شده از حرکات چشم، حالات چهره و تعاملات موشواره می‌پردازد. این پژوهش با بهره‌گیری از یادگیری ماشین، سطوح توجه را بر اساس ورودی چندوجهی دسته‌بندی می‌کند. باوجود مزایای این روش، برخی محدودیت‌ها وجود دارد که پژوهش حاضر به دنبال رفع آن‌هاست.

تحقیق ما فراتر از شناسایی توجه در هنگام خواندن بوده و همچنین ارزیابی از عملکرد شناختی را نیز ارائه می‌دهد. به‌جای محدود کردن ارزیابی توجه در هنگام خواندن یک متن، عملکرد در آزمون مسیرسازی همراه با نمرات پرسش‌نامه‌های ACS و MAAS بررسی‌شده است تا چارچوبی برای تحلیل عملکرد اجرایی، تغییر توجه و تمرکز پایدار فراهم شود. در مرحله استخراج ویژگی‌ها، تحلیل دقیقی از مسیرهای حرکتی موشواره انجام‌شده، درحالی‌که مطالعه [۲۴] بیشتر بر رفتارهای کلیک و اسکرول تمرکز دارد. این تحقیق ویژگی‌هایی مانند مسیر حرکت، سرعت، فواصل زمانی بین کلیک‌ها و معیارهای مبتنی بر فاصله را در نظر گرفته که امکان بررسی میزان عملکردهای شناختی را فراهم می‌کند. علاوه بر این،

^۱ Eye-Tracking-Based Trail-Making Test (ETMT)

جدول ۳: مقایسه پژوهش حاضر با مطالعات مرتبط در زمینه ارزیابی میزان توجه

پژوهش	نوع داده	نوع آزمون	ویژگی‌های استخراج‌شده	روش تحلیل	خروجی مدل
[۲۴]	حرکات چشم، موشواره، حالت چهره	خواندن متن در سه شرایط مختلف	۵۲ ویژگی از داده‌های چشم، موشواره و حالت چهره	شبکه‌های طبقه‌بندی	Correct Classification Rate (CCR) = 75%
[۱۷]	حرکات چشم	آزمون مسیریابی	۱۳ ویژگی از داده‌های چشم	شبکه نروفازی تطبیقی	RSME = 0.3581
[۱۲]	تخمین وضعیت سر	دیتاست‌های دارای برجسب زاویه سر	زاویه‌های سر (تاب، غلت و سمت گشت)	شبکه‌های برازشی	MAE = 3°
[۱۵]	حرکات چشم و موشواره	آزمون مسیریابی	زمان واکنش، درصد پاسخ‌های درست، طول مسیر اسکن، تعداد و مدت تثبیت‌های چشمی	آنالیز آماری	تفاوت معنادار در طول مسیر اسکن بین دو گروه افراد سالم و دارای اختلال شناختی (p=0.03)
پژوهش حاضر	حرکات چشم و موشواره	آزمون مسیریابی	۹۳ ویژگی از داده‌های چشم و موشواره	شبکه‌های برازشی	R ² Score = 72% MAE = 3.38

تحلیل‌های شناختی را ندارد. در پژوهش انجام‌شده، مدل‌های یادگیری ماشین مبتنی بر برازش جنگل تصادفی به کار گرفته‌شده‌اند که امکان ارزیابی عددی نمرات توجه را فراهم می‌کنند.

در مطالعه [۱۲] تلاش شده است با استفاده از تخمین وضعیت سر، میزان توجه افراد را تخمین بزنند. در این روش، با بهره‌گیری از کتابخانه‌ی dlib، نقاط کلیدی چهره استخراج شده است و زوایای چرخش سر شامل تاب^۱، غلت^۲ و سمت گشت^۳ محاسبه می‌شوند. مدل برازش پیشنهادی در این پژوهش روی سه دیتاست مختلف آزمایش‌شده و میانگین خطای تخمین زوایا حدود ۳ درجه گزارش شده است. سپس، بر اساس زوایای تخمینی، فرمولی برای سنجش میزان توجه ارائه‌شده است که توجه را به چهار سطح طبقه‌بندی می‌کند. باین حال، این مطالعه با چند محدودیت مهم مواجه است. نخست، تکیه‌ی صرف بر زوایای سر نمی‌تواند تصویر دقیقی از میزان توجه ارائه دهد؛ زیرا توجه پدیده‌ای پیچیده و چندعاملی است و به اطلاعات غنی‌تری از جمله حرکات چشم و رفتارهای تعاملی نیاز دارد. دوم، اغلب پژوهش‌های معتبر در این حوزه، ویژگی‌هایی مانند نرخ تثبیت، جهش‌های چشمی و الگوهای تعامل با محیط را به‌عنوان شاخص‌های کلیدی ارزیابی توجه در نظر می‌گیرند. پژوهش حاضر با استفاده از آزمون مسیریابی، و با ترکیب ویژگی‌های استخراج‌شده از حرکات چشم و موشواره، تلاش کرده است تخمین دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری از میزان توجه ارائه دهد. مقایسه کلی پژوهش ما با مطالعات پیشین در جدول (۳) ارائه‌شده است.

در این مطالعه، تلاش شد مجموعه‌داده‌ای ساختاریافته برای ارزیابی میزان توجه افراد ایجاد شود. این مجموعه‌داده دارای چند مزیت قابل توجه است؛ از جمله طراحی دقیق پروتکل مبتنی بر آزمون شناختی معتبر TMT-B، ضبط هم‌زمان داده‌های حرکات چشم و ماوس، و

برجسب‌گذاری مبتنی بر آزمون‌های روان‌سنجی (نظیر MAAS و ACS) که امکان ارزیابی کمی توجه و ذهن‌آگاهی را فراهم می‌سازد. همچنین، استفاده از تجهیزات در دسترس مانند وب‌کم و موشواره، زمینه را برای توسعه ابزارهای ارزیابی توجه در بسترهای واقعی و غیر آزمایشگاهی فراهم می‌کند. باین حال، این مجموعه‌داده نیز با محدودیت‌هایی همراه است. نخست، تعداد شرکت‌کنندگان محدود بوده و دامنه سنی آن‌ها تقریباً یکسان است که می‌تواند بر تعمیم‌پذیری مدل‌های استخراج‌شده تأثیر منفی بگذارد. دوم، تمامی شرکت‌کنندگان سالم بوده و سطح توجه آن‌ها در محدوده‌ی متوسط تا بالا قرار داشته است؛ در نتیجه، تنوع نمونه در سطوح پایین‌تر توجه یا اختلالات شناختی کم بوده است. همچنین، دقت اندازه‌گیری حرکات چشم با استفاده از وب‌کم نسبت به دستگاه‌های تخصصی مانند ردیاب‌های چشم مادون‌قرمز پایین‌تر است که ممکن است بر کیفیت برخی از ویژگی‌های استخراج‌شده اثرگذار باشد. باین وجود، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که حتی با این ابزارهای ساده، می‌توان به برآورد قابل‌قبولی از وضعیت توجه دست یافت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روشی برای ارزیابی توجه بر اساس الگوهای حرکتی چشم و دست معرفی شد. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از آزمون مسیریابی و تحلیل ویژگی‌های حرکتی مانند تثبیت‌های چشمی، جهش‌ها، پلک‌زدن و مسیر حرکت موشواره، مدل جنگل تصادفی توانست با دقت R² Score ۷۲ درصد توجه را پیش‌بینی کند. این یافته‌ها نشان دادند که الگوهای حرکتی می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های معتبری برای سنجش توجه مورد استفاده قرار گیرند. این پژوهش نشان داد که ترکیب روش‌های یادگیری ماشین با داده‌های حرکتی، رویکردی نوین‌بخش برای ارزیابی

³ yaw

¹ pitch
² roll

- Sciences, vol. 10, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2020, doi: 10.3390/brainsci10100699.
- [9] V. A. Filippetti, G. L. Krumm, and W. Raimondi, "Computerized versus manual versions of the Wisconsin Card Sorting Test: Implications with typically developing and ADHD children," *Applied Neuropsychology: Child*, July 2020, Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21622965.2019.1570198>
- [10] D. M. Laura, "Neural correlates of a standardized version of the trail making test in young and elderly adults: A functional near-infrared spectroscopy study," *Neuropsychologia*, vol. 56, pp. 271–279, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.01.019.
- [11] F. Zare, P. Sedighi, and M. Delrobaei, "Evaluating Attentional Impulsivity: A Biomechatronic Approach," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, pp. 1–8, 2023, doi: 10.1109/TIM.2023.3292964.
- [12] T. Singh, M. Mohadikar, S. Gite, S. Patil, B. Pradhan, and A. Alamri, "Attention Span Prediction Using Head-Pose Estimation With Deep Neural Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 142632–142643, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120098.
- [13] Z. Trabelsi, F. Alnajjar, M. M. A. Parambil, M. Gochoo, and L. Ali, "Real-Time Attention Monitoring System for Classroom: A Deep Learning Approach for Student's Behavior Recognition," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 7, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2023, doi: 10.3390/bdcc7010048.
- [14] J. A. Mark, A. Curtin, A. E. Kraft, M. D. Ziegler, and H. Ayaz, "Mental workload assessment by monitoring brain, heart, and eye with six biomedical modalities during six cognitive tasks," *Front. Neuroergonomics*, vol. 5, Mar. 2024, doi: 10.3389/fnrgo.2024.1345507.
- [15] G. Juantorena, W. Berrios, M. C. Fernández, A. Ibanez, A. Petroni, and J. E. Kamienkowski, "Enhancing Cognitive Assessment: Integrating Hand and Eye Tracking in the Digital Trail-Making Test for Mild Cognitive Impairment," in *Proceedings of the 2024 Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, in ETRA '24. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, June 2024, pp. 1–3. doi: 10.1145/3649902.3655648.
- [16] L. Recker and C. H. Poth, "Test-retest reliability of eye tracking measures in a computerized Trail making test," *Journal of Eye Tracking Research and Applications*, vol. 10, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2020, doi: 10.3390/jeutra10100699.
- توجه در شرایط واقعی است. برای پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود که مطالعه بر روی نمونه‌های متنوع‌تری از نظر سن، سطح توجه و شرایط شناختی انجام شود. همچنین، استفاده از روش‌های پیشرفته‌تری مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی^۱ می‌تواند دقت تخمین نگاه را افزایش دهد. علاوه بر این، استفاده از داده‌های کالیبراسیون و حس‌گرهای تخصصی مانند Electrooculogram برای ثبت دقیق‌تر پلک‌زدن و مدل‌های سری زمانی مانند شبکه عصبی بازگشتی^۲ برای تحلیل داده‌های موشواره می‌تواند به بهبود دقت مدل کمک کند. این توسعه‌ها می‌توانند دقت و کاربردپذیری روش پیشنهادی را در ارزیابی توجه ارتقا دهند.
- ### مراجع
- [1] A. Das, Z. Wu, I. Skrjanec, and A. M. Feit, "Shifting Focus with HCEye: Exploring the Dynamics of Visual Highlighting and Cognitive Load on User Attention and Saliency Prediction," *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, vol. 8, no. ETRA, p. 236:1-236:18, May 2024, doi: 10.1145/3655610.
- [2] F. Capozzi and A. Kingstone, "The effects of visual attention on social behavior," *Social and Personality Psychology Compass*, vol. 18, no. 1, p. e12910, 2024, doi: 10.1111/spc3.12910.
- [3] M. Esterman and D. Rothlein, "Models of sustained attention," *Current Opinion in Psychology*, vol. 29, pp. 174–180, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.copsyc.2019.03.005.
- [4] W. (Sophia) Deng and V. M. Sloutsky, "Selective attention, diffused attention, and the development of categorization," *Cognitive Psychology*, vol. 91, pp. 24–62, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.cogpsych.2016.09.002.
- [5] S. A. Himi, M. Bühner, M. Schwaighofer, A. Klapetek, and S. Hilbert, "Multitasking behavior and its related constructs: Executive functions, working memory capacity, relational integration, and divided attention," *Cognition*, vol. 189, pp. 275–298, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.cognition.2019.04.010.
- [6] N. Watier and M. Dubois, "The Effects of a Brief Mindfulness Exercise on Executive Attention and Recognition Memory," *Mindfulness*, vol. 7, no. 3, pp. 745–753, June 2016, doi: 10.1007/s12671-016-0514-z.
- [7] B. C. Wright, "What Stroop tasks can tell us about selective attention from childhood to adulthood," *British Journal of Psychology*, vol. 108, no. 3, pp. 583–607, 2017, doi: 10.1111/bjop.12230.
- [8] L. Gómez-de-Regil, "Assessment of Executive Function in Patients with Traumatic Brain Injury with the Wisconsin Card-Sorting Test," *Brain*

² Recurrent Neural Network¹ Convolutional Neural Network

- Machinery, Nov. 2000, pp. 71–78. doi: 10.1145/355017.355028.
- [26] B. Birawo and P. Kasprowski, "Review and Evaluation of Eye Movement Event Detection Algorithms," *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 22, p. 8810, Nov. 2022, doi: 10.3390/s22228810.
- [27] S. Fu, D. Qin, D. Qiao, and G. T. Amariucai, "RUMBA-Mouse: Rapid User Mouse-Behavior Authentication Using a CNN-RNN Approach," in *2020 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*, June 2020, pp. 1–9. doi: 10.1109/CNS48642.2020.9162287.
- [28] C. Feher, Y. Elovici, R. Moskovitch, L. Rokach, and A. Schclar, "User identity verification via mouse dynamics," *Information Sciences*, vol. 201, pp. 19–36, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.ins.2012.02.066.
- [29] S. Khan, C. Devlen, M. Manno, and D. Hou, "Mouse Dynamics Behavioral Biometrics: A Survey," *ACM Comput. Surv.*, vol. 56, no. 6, p. 154:1–154:33, Feb. 2024, doi: 10.1145/3640311.
- [30] P. J. Kieslich, F. Henninger, D. U. Wulff, J. M. B. Haslbeck, and M. Schulte-Mecklenbeck, "Mouse-Tracking: A Practical Guide to Implementation and Analysis 1," in *A Handbook of Process Tracing Methods*, 2nd ed., Routledge, 2019.
- [31] Y. Deng, "Predicting and Analyzing Match Fluctuations Based on Random Forest Regression Algorithm," in *2024 IEEE 2nd International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA)*, June 2024, pp. 1490–1494. doi: 10.1109/ICIPCA61593.2024.10709310.
- [32] L. Wang, X. Zhou, X. Zhu, Z. Dong, and W. Guo, "Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data," *The Crop Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 212–219, June 2016, doi: 10.1016/j.cj.2016.01.008.
- [33] L. M. C. Cabezas, M. P. Otto, R. Izbicki, and R. B. Stern, "Regression trees for fast and adaptive prediction intervals," *Information Sciences*, vol. 686, p. 121369, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.ins.2024.121369.
- [34] E. E. McBride and J. M. Greeson, "Mindfulness, cognitive functioning, and academic achievement in college students: the mediating role of stress," *Curr Psychol*, vol. 42, no. 13, pp. 10924–10934, 2023, doi: 10.1007/s12144-021-02340-z.
- Making Test," *Journal of Vision*, vol. 23, no. 8, p. 15, Aug. 2023, doi: 10.1167/jov.23.8.15.
- [17] J. Chandrasekharan, A. Joseph, A. Ram, and G. Nollo, "ETMT: A Tool for Eye-Tracking-Based Trail-Making Test to Detect Cognitive Impairment," *Sensors*, vol. 23, no. 15, Art. no. 15, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23156848.
- [18] L. Recker, R. M. Foerster, W. X. Schneider, and C. H. Poth, "Emphasizing speed or accuracy in an eye-tracking version of the Trail-Making-Test: Towards experimental diagnostics for decomposing executive functions," *PLOS ONE*, vol. 17, no. 9, p. e0274579, Sept. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0274579.
- [19] I. Linari, G. E. Juantorena, A. Ibáñez, A. Petroni, and J. E. Kamienkowski, "Unveiling Trail Making Test: visual and manual trajectories indexing multiple executive processes," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, p. 14265, Aug. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-16431-9.
- [20] K. Townshend and M. Bornschlegel, "Attention Control Scale (ACS)," in *Handbook of Assessment in Mindfulness Research*, O. N. Medvedev, C. U. Krägeloh, R. J. Siegert, and N. N. Singh, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 1–18. doi: 10.1007/978-3-030-77644-2_85-1.
- [21] K. W. Brown and R. M. Ryan, "The benefits of being present: Mindfulness and its role in psychological well-being," *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 84, no. 4, pp. 822–848, 2003, doi: 10.1037/0022-3514.84.4.822.
- [22] K. Hagen, "Activation during the Trail Making Test measured with functional near-infrared spectroscopy in healthy elderly subjects," *NeuroImage*, vol. 85, pp. 583–591, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.09.014.
- [23] L. L. Russell et al., "Eye movements in frontotemporal dementia: Abnormalities of fixation, saccades and anti-saccades," *Alzheimer's & Dementia: Translational Research & Clinical Interventions*, vol. 7, no. 1, p. e12218, Jan. 2021, doi: 10.1002/trc2.12218.
- [24] J. Li, G. Ngai, H. V. Leong, and S. C. F. Chan, "Multimodal human attention detection for reading from facial expression, eye gaze, and mouse dynamics," *SIGAPP Appl. Comput. Rev.*, vol. 16, no. 3, pp. 37–49, Nov. 2016, doi: 10.1145/3015297.3015301.
- [25] D. D. Salvucci and J. H. Goldberg, "Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols," in *Proceedings of the 2000 symposium on Eye tracking research & applications*, in *ETRA '00*. New York, NY, USA: Association for Computing