Quarterly Journal of
Child Mental Health
Vol. 13, No. 3, Fall 2026

Research Paper

Differentiating eye movements during reading in students with and without dyslexia using artificial intelligence

Ameneh Shakeri[1], Masoud Sharifi[*2], Hadi Moradi[3], Omid Shokri[4]

1. Ph.D. Student in Educational Psychology, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Psychology, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3. Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Iran
4. Associate Professor, Department of Psychology, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Citation: Shakeri A, Sharifi M, Moradi H, Shokri O. Differentiating eye movements during reading in students with and without dyslexia using artificial intelligence. J Child Ment Health. 2026; 13 (3):1-18.

URL: http://childmentalhealth.ir/article-1-1606-en.html

10.61882/jcmh.13.3.1

ARTICLEINFO

Keywords:
Artificial intelligence, dyslexia , eye-movement, students

Received: 3 Aug 2026
Accepted: 21 Oct 2026
Available: 22 Oct 2026

ABSTRACT

Background and Purpose: Dyslexia is one of the most prevalent Specific Learning Disorders (SLD) and can adversely affect students' academic performance and learning processes. So, the development of innovative approaches based on artificial intelligence technologies may facilitate the identification of distinctive eye-movement patterns for the early detection of dyslexia. Therefore, the present study aimed to differentiate eye-movement patterns during reading between students with dyslexia and typically developing students using artificial intelligence.

Method: The present study employed a cross-sectional design with a descriptive-analytical, causal-comparative method. The study population included all first to third-grade elementary school students in Tehran, Zahedan, Mashhad, and Qom city during the 2024–2025 academic year. The sample consisted of 586 students, including students diagnosed with dyslexia and typically developing students, recruited from comprehensive assessment, education, rehabilitation, and early developmental-educational intervention centers and general education schools in the aforementioned areas. Participants were selected through convenience sampling. Machine-learning models were employed to classify students based on eye-movement indices. The research instruments included the latest validated version of the Dyslexia Checklist (DC; Salimi Teymouri, 2007), the Intelligence Scale for Children-Fourth Edition (WISC-IV; Wechsler, 2003) in Iran, grade-appropriate reading texts for first- to third-grade students, and an eye-movement recording system. Data were analyzed using the Kruskal–Wallis test in SPSS - 27.

Results: The result showed significant differences between the typically developing students and students with dyslexia across all eye-movement measures (pupil movement: $H = 43.09$, gaze stability: $H = 48.37$, gaze stability ratio: $H = 35.51$, and not looking at the screen: $H = 57.09$; $P < 0.001$). For the selected models in the first, second, and third grades, accuracy was 0.90, 0.95, and 0.89, precision was 0.30, 0.80, and 0.33, sensitivity was 0.16, 0.40, and 0.26, and specificity was 0.98, 0.99, and 0.98, respectively. The area under the receiver operating characteristic curve was 0.95, 0.95, and 0.91, respectively. Gaze stability and pupil movement were also identified as the most important discriminative features across all three grades.

Conclusion: The findings show that eye-movement patterns can distinguish students with dyslexia from their typically developing peers with satisfactory accuracy. Accordingly, the integration of artificial intelligence–based screening tools, as a cost-effective and non-invasive approach for the early identification of dyslexia, is recommended as a strategic priority for educational authorities.

* **Corresponding author:** Masoud Sharifi, Assistant Professor, Department of Psychology, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
E-mail: M-charifi@sbu.ac.ir
Tel: (+98) 2177641034
2476-5740/ © 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Extended Abstract

Introduction

Reading is a fundamental cognitive ability; however, individuals with 0064yslexia experience persistent and significant difficulties in acquiring and performing this skill (1, 2). Dyslexia is a neurodevelopmental disorder and the most prevalent disorder within the category of specific learning disorder, characterized by substantial difficulties in decoding letters and words, slow and effortful reading, and impaired comprehension (3). The Prevalence of dyslexia has been estimated at 5% to 17% across different populations (5, 6), and the disorder may contribute to repeated academic failure, particularly during the early school years, and ultimately to school dropout (7). Moreover, delays in identifying dyslexia can progressively exacerbate associated difficulties, whereas early intervention during childhood may play a critical role in preventing adverse long-term outcomes (8, 9). Despite the considerable importance of early identification of dyslexia, this process remains challenging in practice (10). Therefore, the development of simple, rapid, and accessible screening tools is essential for the early identification of dyslexia (13). In this regard, objective behavioral eye measures have opened new avenues for the identification of dyslexia. Recent studies in this field (13, 14) have demonstrated fundamental differences between eye-movement patterns recorded during reading in individuals with dyslexia and typically developing (TD) individuals. Despite variations in the specific measures examined across studies, three characteristics—longer eye Fixation durations, rapid eye Saccades, and Regression saccades—have consistently been identified as key indicators of the objective reading behaviors observed in individuals with dyslexia (15, 16). Accordingly, in recent years, the analysis of eye movements using Machine Learning (ML), as a branch of artificial intelligence, has assumed a central role in contemporary research on dyslexia identification (7).

In this context, eye movements recorded using Webcams embedded in computers (22), with the captured images serving as raw data processed through ML algorithms, enable the analysis of reading patterns and the differentiation of individuals with dyslexia from typically developing individuals (22). Given the aforementioned theoretical foundations and the substantial advances in assistive technology, a review of the literature indicates that a notable research gap remains in Iran regarding the identification of eye-movement patterns using ML algorithms for the detection of dyslexia. Accordingly, the present study was conducted to differentiate eye movements during reading between students with and without dyslexia using artificial intelligence.

Method

The present study employed a cross-sectional design with a descriptive-analytical, causal-comparative method. The study population comprised all first- to third-grade elementary school students in Tehran, Zahedan, Mashhad, and Qom city during the 2024–2025 academic year. The study sample consisted of 586 students with and without dyslexia through comprehensive assessment, education, rehabilitation, and early developmental-educational intervention centers and general education schools within the aforementioned population. Participants were selected using convenience sampling. ML models were employed to classify students based on eye-movement metrics. Of the 586 students included in the present study, 42 had dyslexia, 116 had reading difficulties (to assess the sensitivity of the model, its performance was also evaluated using data from this group), and 428 were typically developing (TD) students. The inclusion criteria were an age range of 7–9 years, proficiency in Persian, normal or corrected-to-normal visual acuity based on parental reports and students' school health records, and a normal intelligence quotient based on the Wechsler Intelligence Scale for Children–Fourth Edition (WISC-IV). The exclusion criteria were the presence of neurological disorders that could affect eye-movement recording, according to the students' school health records; unwillingness to participate in the study; and invalid or unusable research questionnaires. The research instruments included the latest validated version of the Dyslexia Checklist (DC) in Iran (29, 31, 32), the Wechsler Intelligence Scale for Children–Fourth Edition (WISC-IV) (To detect normal intelligence in a dyslexic sample), (33, 34), reading texts for first- to third-grade students, and Eye-movement metrics. The demographic characteristics of the participants indicated that, among the 586 students, the TD group comprised 87 boys and 49 girls in the first grade, 112 boys and 79 girls in the second grade, and 34 boys and 67 girls in the third grade. The reading-difficulty group comprised 13 boys and 9 girls in the first grade, 46 boys and 16 girls in the second grade, and 19 boys and 13 girls in the third grade. The dyslexia group comprised 13 boys and 3 girls in the first grade, 10 boys and 3 girls in the second grade, and 6 boys and 7 girls in the third grade.

Results

The descriptive findings of the present study are reported in Table 1.

Table 1: Mean and standard deviation of participants' eye-movement metrics across the three groups

	Group	typically developing (TD) group		reading-difficulty group		dyslexia group	
	Variable	M	SD	M	SD	M	SD
Eye-movement metrics	Pupil movement	0.03	0.01	0.04	0.02	0.05	0.02
	Gaze stability	216.13	129.74	376.43	201.17	411.23	395.81
	Gaze-stability ratio	0.39	0.11	0.34	0.13	0.26	0.26
	Absence of gaze toward the screen	0.15	0.23	0.25	0.29	0.44	0.44

Note. M= Mean, SD=Standard Deviation

As shown in Table 1, the mean pupil movement and the proportion of absence of gaze toward the screen were higher in the dyslexia group than in the TD group, whereas gaze stability was lower in the dyslexia group. The reading-difficulty group generally exhibited values between those of the other two groups across most of the eye-movement metrics. Furthermore, the assumptions of normality and homogeneity of variances were not met. Therefore, the nonparametric Kruskal–Wallis test was used to examine differences among the three groups of students in terms of the predictor variables. The results of the Kruskal–Wallis test indicated statistically significant differences across the three groups TD group, reading-difficulty, and dyslexia in all of the variables examined, including pupil movement (H = 43.09), gaze stability (H = 48.37), gaze-stability ratio (H = 35.51), and absence of gaze toward the screen (H = 57.09) (P < 0.001). Although statistically significant between-group differences were observed for several variables, the primary objective of the present study extended beyond group comparisons and focused on classifying and predicting individuals' group membership. Accordingly, the performance of the extracted features was subsequently evaluated using ML models. To assess the performance of commonly used classification algorithms and select the most suitable algorithm for the present study, logistic regression, random forest, support vector machine, and k-nearest neighbors were compared using five-fold cross-validation. For each algorithm, several performance metrics, including accuracy, sensitivity, and specificity, were calculated separately for each grade to evaluate the models' ability to discriminate students with reading disorders from TD group. Given the differences in the performance of ML algorithms across grade levels, the algorithm demonstrating the best performance metrics for each grade was selected as the final model. Accordingly, logistic regression demonstrated the best performance for first- and third-grade students, whereas random forest yielded the best performance for second-grade students. It should be noted that the "better performance" of logistic regression for second-grade elementary students refers to the better performance of this algorithm in classification, as measured by model evaluation metrics. The corresponding accuracy values were 0.88, 0.88, and 0.95, respectively, and the corresponding areas under the receiver operating characteristic curve (AUC-ROC) were 0.95, 0.85, and 0.95, respectively. Furthermore, gaze stability and pupil movement were identified as the most important discriminative features across all three grade levels.

Conclusion

The present study aimed to differentiate eye movements during reading between students with and without dyslexia using artificial intelligence. The findings revealed statistically significant differences in eye-movement patterns between the two groups, with students with dyslexia exhibiting distinct eye-movement patterns compared with their TD peers. This finding is consistent with several previous international studies (21, 23–25) that have highlighted the potential of ML algorithms for identifying dyslexia. In Iran, despite the increasing number of studies addressing the automated detection of dyslexia, no study to date has been reported to have simultaneously employed ML and eye-movement data analysis for this purpose. Most existing studies have instead focused on computer-based rehabilitation, gamification, and specialized equipment (8, 26–28). The findings of the present study may be interpreted in light of the relatively high prevalence of dyslexia (5, 6) and its persistent consequences for students' academic development (3). Failure to identify dyslexia promptly may contribute to the persistence of reading difficulties (7). Therefore, identifying students at risk for dyslexia during the early years of formal education represents a critical prerequisite for timely referral (10). On the other hand, reliance solely on performance-based measures and human assessment may be accompanied by measurement errors or potential biases. In this regard, alternative and complementary approaches, such as eye-movement analysis, may provide a basis for developing objective indicators for the initial screening process (13). By transforming eye-movement characteristics into quantitative data and applying ML algorithms, the present study enabled the simultaneous analysis of multiple patterns and more precise discrimination between the groups. This approach made it possible to identify subtle differences in the dynamics of eye movements that may not be readily detectable through conventional assessments and to transform them into reliable indicators for distinguishing dyslexia status.

Another distinctive aspect of the present study was the replacement of costly, specialized eye-tracking devices with conventional computer webcams, thereby enhancing the ecological validity of the assessment. Another factor contributing to the differentiation of students with dyslexia from their TD peers was the difference in the organization of visual patterns during reading. Video-based recording of eye movements using a computer webcam enabled the identification of these behavioral differences through the extraction of measurable variables. The present study had

several limitations, including the potential effects of text length and difficulty, participant fatigue, nonstandardized data-recording conditions, and the cross-sectional nature of the study. Future research should therefore employ appropriately matched reading tasks, standardized recording conditions, systematic data-quality monitoring, and longitudinal designs. Furthermore, combining eye-movement metrics with other cognitive and behavioral variables and validating the models in real-world samples and settings is recommended.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines: This article is derived from the doctoral dissertation of the first author in Educational Psychology at Shahid Beheshti University, Tehran. The scientific permission for this study was issued by Shahid Beheshti University under letter No. 1851218 on 2023/12/24. This research has the ethics code IR.SBU.REC.1403.081, issued by the Biomedical Research Ethics Committee of Shahid Beheshti University. Furthermore, the moral considerations outlined in the publication guidelines of the American Psychological Association (APA) and the ethical codes of the Iranian Psychological Association, including confidentiality, anonymity of identity information, data analysis, and informed consent from parents for participation in the study, were strictly adhered to in this research.

Funding: This study was conducted without financial support from any institution and was funded entirely by the authors.

Authors' contribution: In this study, the first author served as the primary designer and originator of the research and was responsible for data collection; the second author served as the first supervisor; the third author served as the second supervisor; and the fourth author served as the research advisor.

Conflict of interest: This research did not involve any conflicts of interest for the authors, and its results have been reported with complete transparency and without bias.

Data availability statement: All data from this study are available to the corresponding author and were submitted to the journal at the time of manuscript review. They will also be made available to a specific researcher upon reasonable request.

Consent for publication: The authors have full consent to publish this article .

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process: During the preparation of this work, the authors used ChatGPT (OpenAI) to improve the writing, language editing, coherence, and clarity of the manuscript. Additionally, the AI models Opus and Grok were employed for generating and refining code and solving programming problems. After using this tool/service, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Acknowledgement: We express our deepest gratitude to the esteemed participants and all those who helped us conduct the research.

مقاله پژوهشی

تمایز حرکات چشم هنگام خواندن در دانش‌آموزان با و بدون نارساخوانی با استفاده از هوش مصنوعی

آمنه شاکری[۱]، مسعود شریفی[۲*]، هادی مرادی[۳]، امید شکری[۴]

۱. دانشجوی دکترای روان‌شناسی تربیتی، دانشکده روان‌شناسی و علوم تربیتی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه روان‌شناسی، دانشکده روان‌شناسی و علوم تربیتی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. استاد، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، ایران

۴. دانشیار، گروه روان‌شناسی، دانشکده روان‌شناسی و علوم تربیتی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

مشخصات مقاله

کلیدواژه‌ها:
حرکات چشم،
دانش‌آموزان،
هوش مصنوعی،
نارساخوانی

دریافت شده: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲
پذیرفته شده: ۱۴۰۵/۰۷/۲۹
منتشر شده: ۱۴۰۵/۰۷/۳۰

چکیده

زمینه و هدف: نارساخوانی یکی از شایع‌ترین انواع اختلالات یادگیری ویژه است که پیامدهای نامطلوبی بر عملکرد تحصیلی و فرایند یادگیری دانش‌آموزان برجای می‌گذارد. از سویی توسعه روش‌های نوین مبتنی بر فناوری‌های هوش مصنوعی می‌تواند زمینه را برای شناسایی الگوهای متمایز حرکات چشم جهت غربالگری به‌موقع نارساخوانی فراهم کند. بدین‌ترتیب پژوهش حاضر با هدف تمایز الگوهای حرکات چشم هنگام خواندن در دانش‌آموزان با و بدون نارساخوانی با استفاده از هوش مصنوعی انجام شد.

روش: طرح پژوهش حاضر، مقطعی و روش آن توصیفی- تحلیلی از نوع علّی- مقایسه‌ای بود. جامعه آماری این پژوهش شامل تمامی دانش‌آموزان پایه‌های یکم تا سوم ابتدایی شهرستان‌های تهران، زاهدان، مشهد، و قم در سال تحصیلی ۱۴۰۳- ۱۴۰۴ بود. نمونه پژوهش شامل ۵۸۶ دانش‌آموز با و بدون تشخیص نارساخوانی از مراکز جامع سنجش، آموزش، توانبخشی، و مداخله بهنگام رشدی- تربیتی و مدارس آموزش عمومی جامعه آماری مذکور بود که به روش نمونه‌گیری در دسترس انتخاب شدند. جهت طبقه‌بندی دانش‌آموزان براساس شاخص‌های حرکات چشم از مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شد. ابزارهای پژوهش حاضر شامل آخرین نسخه اعتباریابی‌شده در ایران چک‌لیست نارساخوانی (سلیمی‌تیموری، ۱۳۸۶)، چهارمین ویرایش آزمون هوش کودکان (وکسلر، ۲۰۰۳)، متون خواندن پایه‌های یکم تا سوم، و شاخص ثبت حرکات چشم بود. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمون کروسکال–والیس با نرم‌افزار SPSS-27 استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد بین دو گروه دانش‌آموزان با و بدون نارساخوان در تمامی شاخص‌های حرکات چشم (حرکت مردمک: H=۴۳/۰۹، پایداری نگاه: H=۴۸/۳۷، نسبت پایداری نگاه: H=۳۵/۵۱ و عدم نگاه به صفحه: H=۵۷/۰۹، P>۰/۰۰۱) تفاوت معناداری وجود دارد. در مدل‌های منتخب پایه‌های یکم، دوم و سوم، به‌ترتیب دقت ۰/۹۰، ۰/۹۵ و ۰/۸۹، صحت ۰/۳۰، ۰/۸۰ و ۰/۳۳، حساسیت ۰/۱۶، ۰/۴۰ و ۰/۲۶، و اختصاصی‌بودن ۰/۹۸، ۰/۹۹ و ۰/۹۸ به دست آمد؛ همچنین سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده به‌ترتیب ۰/۹۵، ۰/۹۵ و ۰/۹۱ بود. پایداری نگاه و حرکت مردمک نیز در هر سه پایه به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های تمایزبخش شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: طبق یافته‌های به‌دست آمده الگوهای حرکات چشم می‌توانند با دقت مناسبی، دانش‌آموزان نارساخوان را از همتایان بهنجار خود متمایز سازند. بر این اساس پیشنهاد می‌شود جهت شناسایی زودهنگام این اختلال، استفاده از ابزارهای غربالگری مبتنی بر هوش مصنوعی به عنوان روشی کم‌هزینه و غیرتهاجمی در اولویت‌های راهبردی سازمان آموزش و پرورش قرار گیرد.

* **نویسنده مسئول:** مسعود شریفی، استادیار، گروه روان‌شناسی، دانشکده روان‌شناسی و علوم تربیتی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

رایانامه: M-charifi@sbu.ac.ir

تلفن: ۰۲۱-۷۷۶۴۱۰۳۴

مقدمه

مهارت خواندن به‌عنوان یک توانمندی زیربنایی شناختی، مبنای بسیاری از فرایندهای یادگیری و آموزش است (۱). با وجود این همه دانش‌آموزان این مهارت را با سهولت و کارآمدی یکسان کسب نمی‌کنند و در برخی موارد، این فرایند با دشواری‌های پایدار و معناداری همراه می‌شود (۲). نارساخوانی[1] نوعی اختلال عصبی– تحولی[2] و شایع‌ترین اختلال در زیرمجموعه اختلال یادگیری ویژه[3] است که با مشکلات جدی در رمزگشایی حروف و کلمات، خواندن کند و دشوار، و ضعف در درک معنا مشخص می‌شود (۳). همچنین افراد با این اختلال با وجود دارابودن هوشبهر[4] بهنجار و نبود مشکلات شنوایی یا بینایی، میان عملکرد خواندن و سطح مورد انتظار متناسب با سن و پایه تحصیلی آنها، فاصله‌ای معنادار وجود دارد (۴). همچنین این اختلال که شیوع[5] آن در جوامع مختلف بین ۵ تا ۱۷ درصد و در ایران ۵/۷ برآورد شد (۶، ۵)، ممکن است موجب شکست‌های مکرر در مدرسه، به‌ویژه در سال‌های ابتدایی و به دنبال آن کاهش اعتمادبه‌خود[6]، بی‌انگیزگی تحصیلی، و در نهایت ترک تحصیل شود (۷). علاوه بر این تأخیر در شناسایی این اختلال به تشدید تصاعدی مشکلات و دشوارشدن جبران شکاف تحصیلی با همسالان منجر می‌شود؛ زیراکه انعطاف‌پذیری بالای مغز در سنین پایین، فرصتی طلایی برای مداخلات آموزشی و درمانی با اثربخشی پایدار فراهم می‌آورد و مداخلات زودهنگام[7] می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در پیشگیری از بروز پیامدهای منفی و کاهش هزینه‌های فردی و اجتماعی بلندمدت ایفا کند (۸، ۹).

با وجود اهمیت قابل‌توجه تشخیص زودهنگام نارساخوانی، این فرایند در عمل با کشاکش‌های متعددی همراه است و در نتیجه در بسیاری از موارد، برای کودکانی که به حمایت و آموزش ویژه نیاز دارند، در بازه زمانی مطلوب انجام نمی‌شود (۱۰). از سوی دیگر فرایندهای رایج تشخیص نارساخوانی برای کودکان اغلب زمان‌بر، پرهزینه، و تنش‌زا است (۱۱) و دسترسی محدود به مراکز تشخیصی و کمبود متخصصان واجد صلاحیت سبب می‌شود بسیاری از کودکان ماه‌ها در انتظار تشخیص باقی بمانند و زمان طلایی[8] مداخله زودهنگام را از دست بدهند (۱۲). همچنین اجرا و به‌کارگیری آزمون‌های تشخیصی جامع و همه‌جانبه که پیش‌شرطی اساسی برای تشخیص دقیق نارساخوانی و تدوین برنامه‌های مداخله‌ای اثربخش به‌شمار می‌رود، در مقیاس وسیع و برای تمامی کودکان در مراحل اولیه به‌دلیل محدودیت‌های عملیاتی، عملاً امکان‌پذیر نیست. بدین ترتیب طراحی و تدوین ابزارهای غربالگری ساده، سریع، و در دسترس ضرورتی اساسی جهت شناسایی زودهنگام در این حوزه محسوب می‌شود (۱۳).

در همین راستا، شاخص‌های رفتاری عینی که در بستر فعالیت‌های روزمره آموزشی (مانند خواندن) قابل ثبت باشند، چشم‌انداز نوینی را در تشخیص نارساخوانی گشوده است. مطالعات اخیر انجام‌شده در این حوزه (۱۴، ۱۳) نشان می‌دهد بین الگوهای حرکات چشم[9] که در هنگام خواندن افراد نارساخوان و افراد با تحول بهنجار ثبت شده است، تمایز بنیادینی وجود دارد و با وجود تنوع در موارد بررسی‌شده، در اغلب مطالعات سه ویژگی الگوی تثبیت[10] طولانی‌تر چشم، و حرکات پرشی سریع چشم[11] (در خواندن افراد نارساخوان کوتاه‌تر است)، و جهش‌های واپس‌گرد[12] (دربرگیرنده حرکات رو به عقب در متن است) به‌عنوان شاخص‌های اصلی رفتارهای عینی گزارش‌شده در این افراد به‌شمار می‌رود. این الگوها در واقع بازتابی از دشواری در رمزگشایی و پردازش زبانی هستند و می‌توانند به‌عنوان نشانگرهای عینی برای تشخیص این اختلال به کار گرفته شوند (۱۶، ۱۵). افزون بر این، عدم توجه به تکلیف[13] و نرخ پلک زدن[14] از دیگر نشانه‌های رفتاری قابل مشاهده هنگام خواندن هستند (۱۸، ۱۷) که در بررسی‌های انجام شده، افزایش نرخ پلک زدن با بار شناختی[15] بالاتر مرتبط دانسته شده است و شواهد تجربی درباره ارتباط مستقیم این متغیر با نارساخوانی همچنان اندک است (۱۹).

1. Dyslexia
2. Neurodevelopmental disorder
3. Specific learning disorder
4. Intelligence Quotient (IQ)
5. Prevalence
6. Self-esteem
7. Early intervention
8. Golden time
9. Eye -movement patterns
10. Fixation
11. Saccades
12. Regressive eye movement
13. Inattention to the task
14. Blink rate
15. Cognitive load

بر همین اساس در سال‌های اخیر، تحلیل حرکات چشم با استفاده از یادگیری ماشین[1] به‌عنوان شاخه‌ای از هوش مصنوعی[2]، به‌واسطه توانایی در استخراج خودکار و تحلیل الگوهای پیچیده از طریق داده‌های ورودی، جایگاه محوری را در پژوهش‌های نوین شناسایی نارساخوانی یافته است (۷). در این تحلیل با به‌کارگیری روش‌های محاسباتی و روابط موجود در داده‌ها، امکان ساخت مدل‌های پیش‌بینی‌کننده را فراهم می‌آورد که قادرند الگوهای آموخته‌شده را جهت تحلیل داده‌های جدید به‌کار ببرند (۱۴). در همین راستا در یک مطالعه (۲) پژوهشگران با معرفی ابزاری به نام "رادار" و بهره‌گیری از ردیاب حرکات چشم و ثبت حرکات چشم در حین خواندن، امکان شناسایی کودکان در معرض خطر نارساخوانی را فراهم کردند. در پژوهشی دیگر (۲۰) که با هدف پیش‌بینی نارساخوانی از طریق ابزار تحلیل حرکات چشم با بهره‌گیری از الگوریتم‌های[3] یادگیری ماشین انجام شد، نتایج نشان داد که این ابزار از دقت مطلوبی در تفکیک افراد دارای نارساخوانی برخوردار بوده و ظرفیت بالایی برای کاربرد در ابزارهای غربالگری دارد.

با وجود موفقیت پژوهش‌های پیشین (۲۰، ۱۴، ۷، ۲) در شناسایی افراد نارساخوان، وابستگی ابزارهای ثبت حرکات چشم به تجهیزات تخصصی و هزینه‌ی بالای آنها موجب شده تا در بسیاری از محیط‌های آموزشی و بالینی در دسترس نباشند (۲۱). از این رو ثبت حرکات چشم با استفاده از روش‌های جایگزین دیگری همچون دوربین‌های تعبیه‌شده در رایانه‌ها[4] به سهولت امکان‌پذیر است (۲۲). در واقع در این روش، تصاویر ثبت‌شده توسط دوربین‌های تعبیه‌شده در رایانه، به‌عنوان داده‌های خام، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین پردازش می‌شوند. این الگوریتم‌ها با استخراج ویژگی‌های مرتبط با حرکات چشم، از جمله جهت‌گیری دیداری، تثبیت‌ها، و حرکات سریع و پرشی چشم، امکان تحلیل الگوهای خواندن و تمایز افراد مبتلا به نارساخوانی از افراد فاقد اختلال (با تحول تیپیکال) را فراهم می‌کنند. اگرچه دقت این روش به‌دلیل تأثیرپذیری از عواملی همچون کیفیت دوربین و نور محیط، نسبت به ردیاب‌های تخصصی کمتر است (۲۲)، اما مطالعات (۲۳، ۲۱) تأکید دارند که این روش در استخراج الگوهای کلی و متمایز حرکات چشم در افراد نارساخوان، از کارآمدی کافی برخوردار است. علاوه بر این سهولت اجرا در شرایط غیرآزمایشگاهی و نزدیک به محیط‌های واقعی، هزینه اندک، و عدم نیاز به تجهیزات تخصصی و غیرتهاجمی بودن، امکان جمع‌آوری داده از نمونه‌های بزرگ‌تر را فراهم کرده و فرآیند غربالگری نارساخوانی را به روشی عملی و مقیاس‌پذیر تبدیل می‌سازد (۲۴). نتایج مطالعه انجام شده (۲۵) نیز مؤید این است که ردیابی چشم با دوربین رایانه‌ای، ابزاری مقیاس‌پذیر برای ارزیابی الگوهای خواندن است و می‌تواند در طراحی مداخلات آموزشی شخصی‌سازی‌شده مؤثر باشد.

با توجه به به مبانی فوق و پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه فناوری‌های کمک‌توان‌بخشی، بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در بافت بومی ایران همچنان خلأ پژوهشی محسوسی در زمینه شناسایی الگوهای حرکات چشم با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شناسایی نارساخوانی وجود دارد. اگرچه مطالعات متعددی (۲۶، ۸) جهت طراحی ابزارهای تشخیص خودکار نارساخوانی انجام شده است، اما تمرکز غالب این پژوهش‌ها عمدتاً بر تحلیل سیگنال‌های مغزی یا سنجش عملکرد دانش‌آموزان در تکالیف رایانه‌ای مبتنی بر بازی بوده است و در معدود مطالعاتی (۲۸، ۲۷) که به بررسی متغیرهای حرکات چشم پرداخته‌اند، تحلیل داده‌ها عمدتاً بر پایه روش‌های آماری کلاسیک انجام شده و از ظرفیت پیش‌بینی‌کنندگی الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شناسایی افراد دارای نارساخوانی استفاده نشده است. در این راستا یک فراتحلیل از ۱۸ مطالعه انجام شده درباره نارساخوانی در ایران، با اشاره به تفاوت نتایج بر اساس نوع ابزار تشخیصی، بر ضرورت استفاده از معیارها و ابزارهای یکپارچه و اهمیت شناسایی بهنگام تأکید کرده است (۹).

از منظر کاربردی نیز، توسعه ابزارهای غربالگری سهل‌الوصول، مقرون‌به‌صرفه، و غیرتهاجمی جهت شناسایی زودهنگام نارساخوانی در نظام آموزشی ایران همچنان با کشاکش‌های جدی روبه‌رو است و با توجه به اینکه شناسایی دیرهنگام این اختلال، هزینه‌های شناختی، تحصیلی، و روان‌شناختی بالایی را بر دانش‌آموزان و خانواده‌ها تحمیل می‌کند، ضرورت انجام پژوهش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی بیش از پیش آشکار می‌شود. پژوهش حاضر با هدف رفع این شکاف، به دنبال توسعه مدلی

1. Machine learning
2. Artificial intelligence
3. Algorithm
4. Webcam

هوشمند است که با بهره‌گیری از دوربین‌های معمولی و تحلیل همزمان حرکات چشم، امکان غربالگری دقیق و زودهنگام افراد با اختلال نارساخوانی را فراهم آورد. چنین روی‌آوردی علاوه بر فراگیرسازی دسترسی به ابزارهای غربالگری کم‌هزینه، متخصصان حوزه یادگیری و روان‌شناسان شناختی را قادر می‌سازد تا با صرف زمان کمتر در مرحله غربالگری، تمرکز اصلی خود را به طراحی مداخلات اختصاصی و فرآیندهای درمانی معطوف سازند. بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف تمایز حرکات چشم هنگام خواندن در دانش‌آموزان با و بدون نارساخوانی با استفاده از هوش مصنوعی انجام شد.

روش

(الف) طرح پژوهش و شرکت‌کنندگان: طرح پژوهش حاضر مقطعی و روش آن توصیفی- تحلیلی از نوع علّی- مقایسه‌ای است. جامعه آماری پژوهش حاضر شامل تمامی دانش‌آموزان پایه‌های یکم تا سوم ابتدایی شهرستان‌های تهران، زاهدان، مشهد، و قم در سال تحصیلی ۱۴۰۳- ۱۴۰۴ بود. نمونه پژوهش شامل ۵۸۶ دانش‌آموز با تشخیص با و بدون نارساخوانی مراکز جامع سنجش، آموزش، توانبخشی، و مداخله بهنگام رشدی- تربیتی، و مدارس آموزش عمومی جامعه آماری مذکور بود که به روش نمونه‌گیری در دسترس، متناسب با دسترسی به آزمونگرهای آموزش‌دیده، و براساس معیارهای ورود و خروج انتخاب شدند. شناسایی دانش‌آموزان براساس مشاهدات بالینی، مصاحبه با والدین و آموزگاران، کسب نمره حد نصاب در چک‌لیست نشانگان نارساخوانی (به نقل از ۲۹)، و در نهایت ارزیابی صحت و روانی خواندن و درک مطلب توسط درمانگران این مراکز بود. به منظور طبقه‌بندی دانش‌آموزان براساس شاخص‌های حرکات چشم، از مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شد. همچنین حجم نمونه پژوهش حاضر براساس جدول پیشنهادی کرجسی و مورگان بود (۳۰). از بین ۵۸۶ دانش‌آموز مطالعه حاضر ۴۲ نفر نارساخوان، ۱۱۶ نفر دارای دشواری در خواندن (این گروه شامل افرادی بود که در عملکرد خواندن با مشکل مواجه بودند اما معیارهای تشخیصی نارساخوانی را به‌طور کامل برآورده نمی‌کردند)، و ۴۲۸ نفر از دانش‌آموزان بهنجار بودند. لازم به ذکر است که طبقه‌بندی دانش‌آموزان با مدل یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های دو گروه نارساخوان و دانش‌آموزان بهنجار بود ولی جهت ارزیابی حساسیت مدل، عملکرد آن بر روی داده‌های گروه دارای دشواری در خواندن نیز آزمون شد. هدف از این مرحله، بررسی توان مدل در شناسایی الگوهای نزدیک به اختلال و موارد در معرض خطر بود. جهت گردآوری داده‌های پژوهش حاضر لینک سامانه و دستورالعمل اجرای آزمون در اختیار آزمونگرهای واجد شرایط قرار گرفت و داده‌های دانش‌آموزانی که شرایط ورود به پژوهش را داشتند، جمع‌آوری شد. معیارهای ورود به پژوهش شامل دارا بودن دامنه سنی ۷ تا ۹ سال، تسلط به زبان فارسی، برخورداری از حس بینایی بهنجار یا اصلاح‌شده براساس گزارش والدین و پرونده سلامت دانش‌آموزان در مدرسه، و دارا بودن هوشبهر بهنجار در افراد نمونه نارساخوان براساس چهارمین ویرایش آزمون هوش وکسلر بود. همچنین معیارهای خروج از مطالعه، دارا بودن اختلالات عصبی مؤثر بر ثبت حرکات چشم بر طبق پرونده سلامت مدرسه، عدم تمایل به همکاری در پژوهش، و مخدوش بودن پرسشنامه پژوهش بود. مشخصات جمعیت‌شناختی افراد نمونه حاکی از این بود که از بین ۵۸۶ نفر شرکت‌کننده، در گروه دانش‌آموزان بهنجار پایه یکم (پسران: ۸۷ نفر، دختران: ۴۹ نفر)، پایه دوم (پسران: ۱۱۲ نفر، دختران: ۷۹ نفر)، و پایه سوم (پسران: ۳۴ نفر، دختران: ۶۷ نفر)، در گروه دشواری در خواندن پایه یکم (پسران: ۱۳ نفر، دختران: ۹ نفر)، دوم (پسران: ۴۶ نفر، دختران: ۱۶ نفر)، سوم (پسران: ۱۹ نفر، دختران: ۱۳ نفر)، و در گروه نارساخوان پایه یکم (پسران: ۱۳ نفر، دختران: ۳ نفر)، دوم (پسران: ۱۰ نفر، دختران: ۳ نفر)، سوم (پسران: ۶ نفر، دختران: ۷ نفر) بودند.

(ب) ابزار

۱. چک‌لیست نارساخوانی[1]: این ابزار به‌منظور سنجش دانش‌آموزان ابتدایی دارای نارساخوانی در سال ۱۳۸۶ توسط سلیمی‌تیموری طراحی و ابداع شد (به نقل از ۲۹). در پژوهش حاضر هدف از استفاده از این ابزار، شناسایی دانش‌آموزان دارای نارساخوانی و دانش‌آموزان در معرض خطر این اختلال بود. این ابزار دارای ۲۷ گویه است و در این پژوهش، فرم معلم آن توسط معلمان تکمیل و ارزیابی شد. نمره‌گذاری این چک‌لیست به‌صورت بلی (امتیاز ۱) و خیر (امتیاز ۰) است و نمرات بالاتر نشان‌دهنده شدت بیشتر نارساخوانی در آزمودنی است. کمینه نمره در این چک‌لیست

1. Dyslexia checklist

۰ و بیشینه آن ۲۷ است. نمرات ۰ تا ۹ به معنای کم‌بودن شدت اختلال، نمرات ۹ تا ۱۳ نشانه داشتن اختلال در محدوده متوسط، و نمره‌های بالای ۱۳ نشانه شدت بالای این اختلال است. روایی محتوایی این چک‌لیست توسط استادان دانشگاه فرهنگیان و پنج نفر از متخصصان شاغل در مراکز اختلالات یادگیری ویژه و فعال در حوزه بهبود نارساخوانی ارزیابی و تأیید شد (۳۱). همچنین اعتبار این ابزار نیز در پژوهش‌های مختلف (۳۲-۲۹) به روش آلفای کرونباخ، بالای ۰/۷۰ و همچنین در مطالعه‌ای دیگر (۳۲) به روش کودرریچاردسون، ۰/۶۹ گزارش شد. در پژوهش حاضر نیز اعتبار این ابزار با روش ضریب آلفای کرونباخ، ۰/۷۳ و با روایی صوری و محتوایی آن به شیوه کیفی توسط استادان راهنما و مشاور این طرح پژوهشی، تأیید شد.

۲. *چهارمین ویرایش آزمون هوش وکسلر کودکان*[1]: این آزمون در سال ۲۰۰۳ جهت سنجش هوش کودکان ۶ تا ۱۶ سال توسط دیوید وکسلر طراحی شد (۳۳). هدف از استفاده از این ابزار در این پژوهش سنجش هوشبهر دانش‌آموزان ابتدایی بود و در این پژوهش برای تشخیص بهنجار بودن سطح هوشی دانش‌آموزان نارساخوان استفاده شد (۴۲ نمونه نارساخوان). همچنین وضعیت هوشی سایر افراد نمونه از گزارش پرونده تحصیلی و مشاوره‌ای دانش‌آموزان در مدرسه استفاده شد. چهارمین ویرایش آزمون هوش وکسلر کودکان از ۱۵ خرده‌آزمون شامل ۱۰ خرده‌آزمون اصلی (شباهت‌ها، واژگان، درک مطلب، طراحی مکعب، مفاهیم تصویری، استدلال تصویری، فراحنای ارقام و توالی عدد-حروف، رمزنویسی، و نمادیابی) و ۵ خرده‌آزمون تکمیلی (اطلاعات عمومی، استدلال کلامی، تکمیل تصویر، حساب، و خط‌زنی) تشکیل شده است و چهار شاخص عمده هوش شامل، درک کلامی،[2] استدلال ادراکی،[3] حافظه فعال،[4] و سرعت پردازش[5] را می‌سنجد. میانگین نمرات این شاخص‌ها ۱۰۰ و انحراف استاندارد آنها ۱۵ است و نمرات بالاتر نشان‌دهنده عملکرد شناختی بالاتر و ظرفیت هوشی بیشتر در حوزه‌های مربوطه است. نمره هر خرده‌آزمون با جمع‌بندی امتیاز خام آزمودنی و تبدیل آن به نمره استاندارد محاسبه می‌شود. این آزمون در ایران در مطالعه‌ای (۳۴) اعتباریابی و روایی‌سنجی شده است. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که پایایی بازآزمایی خرده‌مقیاس‌های آزمون در دامنه ۰/۶۵ تا ۰/۹۵ و ضرایب پایایی تصنیف آنها بین ۰/۷۱ تا ۰/۸۶ است. همچنین روایی آزمون از طریق محاسبه همبستگی نمرات خرده‌مقیاس‌ها با نمره کل، مطلوب گزارش شد و در دامنه ۰/۶۶ تا ۰/۹۲ متغیر بود.

۳. *متون خواندن*[6]: در پژوهش حاضر جهت ثبت حرکات چشم در هنگام خواندن متن، برای هر یک از پایه‌های تحصیلی یکم تا سوم ابتدایی، متن جداگانه‌ای بر پایه کتاب‌ها، ساختارهای متناسب با پایه تحصیلی، و منابع آموزشی رسمی و رایج سازمان آموزش و پرورش با مشارکت و همکاری سه معلم باتجربه مقطع ابتدایی طراحی و تدوین شد. این متون حاوی کلمات با سطح دشواری استاندارد بودند و می‌توانستند عملکرد خواندن در هر پایه را بسنجند. برای پایه یکم، دو متن و برای پایه دوم و سوم، سه متن مجزا طراحی شد و در نهایت به‌منظور بررسی روایی محتوایی متون، از روش گروه کانونی[7] استفاده شد. بدین منظور، ۱۰ نفر از متخصصان حوزه اختلالات یادگیری ویژه سازمان آموزش و پرورش استثنایی با تحصیلات کارشناسی ارشد و دکترای روان‌شناسی در جلسات گروه کانونی حضور یافتند و متون تدوین‌شده را از نظر تناسب با پایه تحصیلی، سطح خواندن، و محتوای مورد نظر پژوهش بررسی کردند. در جریان جلسات، متخصصان ضمن ارائه دیدگاه‌های خود، درباره نقاط قوت و ضعف متون با یکدیگر بحث و تبادل نظر کردند و متن‌ها بر اساس بازخوردهای حاصل اصلاح شدند. فرایند بررسی و اصلاح متون تا دست‌یابی به توافق و اشباع نظری در دیدگاه‌های متخصصان ادامه یافت و نسخه نهایی آن پس از تأیید گروه کانونی در پژوهش استفاده شد.

۴. *شاخص ثبت حرکات چشم*[8]: در پژوهش حاضر به‌منظور ثبت و تحلیل حرکات چشم دانش‌آموزان هنگام خواندن متن، از دوربین‌های رایانه (رزولوشن[9] حداقل ۷۲۰ پیکسل[10]، نرخ نمونه‌برداری ۳۰ فریم[11] بر ثانیه) استفاده شد. در طول فرایند ثبت، دانش‌آموز در فاصله ۵۰ تا ۷۰

1. Wechsler Intelligence Scale for Children-Fourth Edition (WISC-IV)
2. Verbal Comprehension Index (VCI)
3. Perceptual Reasoning Index (PRI)
4. Working Memory Index (WMI)
5. Processing Speed Index (PSI)
6. Reading texts
7. Focus group
8. Eye-movement metrics
9. Resolution
10. Pixel
11. Frame

سانتی‌متری از نمایشگر قرار گرفتند و بدون استفاده از تجهیزات تخصصی ردیابی چشم، رفتار و حرکات چشم دانش‌آموز در بافت محیطی در هنگام خواندن ضبط شد. پس از ثبت ویدئوها، تصاویر با استفاده از محیط برنامه‌نویسی پایتون[1] پردازش شدند و نواحی چهره و چشم با بهره‌گیری از کتابخانه‌های اوپن‌سی‌وی[2]، مدیا پایپ[3]، و دیلیب[4] شناسایی شد و موقعیت چشم‌ها، مردمک، و نقاط شاخص چشم در هر فریم شناسایی و بر اساس تغییرات آنها در طول زمان، ویژگی‌های مرتبط با حرکات چشم شامل شاخص‌های حرکت مردمک، پایداری نگاه (مجموع فریم‌هایی که در آنها میزان جابه‌جایی تخمینی مردمک بین فریم‌های متوالی کمتر از آستانه از پیش تعیین‌شده بود)، نسبت پایداری نگاه، و عدم نگاه به صفحه استخراج شد.

(د) روش اجرا: به منظور اجرای پژوهش حاضر پس از اخذ کد اخلاق از کمیته اخلاق در پژوهش‌های زیست‌پزشکی دانشگاه شهید بهشتی تهران به مدارس آموزش عمومی و مراکز جامع سنجش، آموزش، توانبخشی، و مداخله بهنگام رشدی- تربیتی شهرستان‌های تهران، زاهدان، مشهد، و قم مراجعه شد و پس از هماهنگی با مسئولین این مدارس و مراکز، دانش‌آموزان پایه‌های یکم تا سوم که براساس چهارمین ویرایش آزمون هوش وکسلر کودکان دارای هوشبهر بهنجار بودند؛ به عنوان افراد بهنجار و همچنین دانش‌آموزانی که علاوه بر برخورداری از هوشبهر بهنجار، طبق مشاهده بالینی، مصاحبه با معلمان و والدین، ارزیابی‌های درمانگران این مراکز، و همچنین نمرات حاصله از چک‌لیست نارساخوانی (به نقل از ۲۹) تشخیص نارساخوانی دریافت کردند، به عنوان گروه نارساخوان پژوهش انتخاب شدند. جهت انتخاب آزمودنی‌های پژوهش ملاحظات اخلاقی از جمله حفظ محرمانگی اطلاعات، رضایت آگاهانه و خروج از پژوهش در هر مرحله در صورت تمایل، و پاسخ به پرسشنامه‌ها بدون ذکر نام رعایت شد. پس از این مرحله، به تعدادی آزمونگرهای واجد شرایط، آموزش داده شد که با استفاده از لینک‌های اختصاصی ارسالی برای آنها به‌صورت حضوری و چهره به چهره حرکات چشم دانش‌آموزان را اندازه‌گیری کنند؛ بدین‌ترتیب پس از ورود اطلاعاتی نظیر جنسیت، پایه تحصیلی، سطح خواندن، و وضعیت تشخیص نارساخوانی، متن متناسب با پایه تحصیلی دانش‌آموز در سامانه نمایش داده شد (در مجموع ۱۵۰۹ فایل متن، پایه یکم دو متن و برای پایه دوم و سوم، سه متن مجزا از ۵۸۶ نفر آزمون شد) و همزمان حرکات چشم وی هنگام خواندن، با استفاده از دوربین رایانه ثبت شد. پس از ثبت ویدئوها، داده‌های تصویری با استفاده از محیط برنامه‌نویسی پایتون[5] و بهره‌گیری از کتابخانه‌های اوپن‌سی‌وی، مدیاپایپ و دیلیب[6] پردازش شدند و پس از شناسایی حرکات چشم و تغییرات آنها در طول زمان، داده‌های استخراج‌شده پیش‌پردازش و برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین آماده شدند.

همچنین جهت شناسایی الگوهای مرتبط با نارساخوانی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف طبقه‌بندی، از چهار الگوریتم یادگیری ماشین؛ شامل ماشین‌بردار پشتیبان[7]، جنگل تصادفی[8]، رگرسیون لوجستیک[9]، و نزدیک‌ترین همسایه[10] استفاده شد. لازم به یادآوری است که رگرسیون لوجستیک در یادگیری ماشینی بیشتر برای پیش‌بینی، ارزیابی دقت مدل، و عملکرد روی داده‌های جدید استفاده می‌شود و با آزمون آماری رگرسیون لوجستیک متفاوت است هرچند زیربنای اصلی هردو یکی است، اما تفاوت، بیشتر در هدف و روش ارزیابی است. رگرسیون لوجستیک در این مطالعه در فضای یادگیری ماشین به کار رفته است. یژگی‌های استخراج شده به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل‌ها به کار گرفته شدند تا توانایی آنها در تمایز دانش‌آموزان دارای نارساخوانی از دانش‌آموزان بهنجار بررسی شود. به‌منظور ارزیابی قابلیت تعمیم مدل‌های توسعه‌یافته، از روش اعتبارسنجی متقابل پنج‌بخشی[11] استفاده شد و در نهایت عملکرد مدل‌ها بر اساس میانگین نتایج حاصل از پنج تکرار محاسبه شد و با استفاده از شاخص‌های دقت[12]، حساسیت[13]، ویژگی[14]، دقت پیش‌بینی مثبت[15]، و سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده[16] ارزیابی

1. Python
2. OpenCV
3. MediaPipe
4. Dlib
5. Python
6. OpenCV, mediapipe and dlib
7. Support vector machine
8. Random forest
9. Logistic Regression Algorithm
10. K-Nearest neighbors
11. Fold cross validation-5
12. Accuracy
13. Sensitivity
14. Specificity
15. Precision
16. ROC-AUC

شد. تمامی مراحل پردازش داده‌ها، استخراج ویژگی‌ها، آموزش، اعتبارسنجی، و ارزیابی مدل‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون[1] انجام شد. بدین ترتیب برای توسعه کدهای پایتون این پروژه، از محیط برنامه‌نویسی Cursor و مدل‌های هوش مصنوعی Opus و Grok استفاده شد. این مدل‌ها برای تولید و اصلاح کد، حل مسائل برنامه‌نویسی، اشکال‌زدایی و بهبود پیاده‌سازی به کار گرفته شدند. همچنین، شناسایی نواحی چهره و چشم با بهره‌گیری از کتابخانه‌های اوپن‌سی‌وی، مدیاپایپ و دیلیب انجام گرفت و موقعیت چشم‌ها، مردمک‌ها، و نقاط شاخص چشم از فریم‌های ویدئویی استخراج شد. در پایان جهت تحلیل داده‌ها در سطح توصیفی از میانگین و انحراف استاندارد و در سطح استنباطی از آزمون ناپارامتریک کروسکال والیس و نرم‌افزار SPSS-27 استفاده شد.

یافته‌ها

یافته‌های توصیفی شامل مقادیر میانگین و انحراف استاندارد شاخص‌های حرکات چشم در گروه‌های با تحول بهنجار، دشواری در خواندن، و نارساخوان در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱: میانگین و انحراف معیار نمرات شاخص‌های حرکات چشمی آزمودنی‌ها در سه گروه

متغیر		گروه با تحول بهنجار		گروه دشواری در خواندن		گروه نارساخوان	
		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
شاخص‌های حرکات چشم	حرکت مردمک	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲
	پایداری نگاه	۲۶۱/۱۳	۱۲۹/۷۴	۳۷۶/۴۳	۲۰۱/۱۷	۴۱۱/۲۳	۳۹۵/۸۱
	نسبت پایداری نگاه	۰/۳۹	۰/۱۱	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۲۶	۰/۱۶
	عدم نگاه به صفحه	۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۴۴	۰/۴۴

باتوجه به نتایج جدول فوق، میانگین حرکت مردمک و میزان عدم نگاه به صفحه در گروه نارساخوان بیشتر از گروه با تحول بهنجار بود. اگرچه مقدار خام پایداری نگاه در گروه نارساخوان بیشتر بود، نسبت پایداری نگاه در این گروه کمتر از گروه با تحول بهنجار به‌دست آمد. در گروه با تحول بهنجار، با وجود تعداد کمتر فریم‌های دارای پایداری نگاه، این تثبیت‌ها سهم بیشتری از کل فرایند خواندن را تشکیل می‌دادند؛ در حالی که در گروه نارساخوان، طولانی‌تر بودن فرایند خواندن موجب ثبت فریم‌های بیشتری شده و در نتیجه مقدار خام پایداری نگاه افزایش یافته است، اما این تثبیت‌ها سهم کمتری از کل فرایند خواندن را تشکیل داده‌اند. بنابراین پایین‌تر بودن نسبت پایداری نگاه در گروه نارساخوان می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که تثبیت‌های هدفمند و کافی در این گروه بخش کوچک‌تری از فرایند خواندن را تشکیل می‌دهند و الگوی نگاه آنان نسبت به کودکان بهنجار کارآمدی کمتری دارد. گروه دارای دشواری خواندن در اغلب شاخص‌ها مقادیری بین دو گروه دیگر نشان داد. به‌منظور انتخاب آزمون آماری مناسب، مفروضه نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون شاپیرو- ویلک و همگنی واریانس‌ها با آزمون لوین بررسی شد. نتایج نشان داد که این مفروضه‌ها در اغلب متغیرها برقرار نیست؛ بنابراین برای بررسی تفاوت سه گروه از آزمون ناپارامتریک کروسکال- والیس استفاده شد. نتایج این یافته‌ها در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲: مقایسه متغیرها بین سه گروه

متغیر		آماره کروسکال-والیس	درجه آزادی	سطح معناداری
شاخص‌های حرکات چشم	حرکت مردمک	۴۳/۰۹	۲	<۰/۰۰۱
	پایداری نگاه	۴۸/۳۷	۲	<۰/۰۰۱
	نسبت پایداری نگاه	۳۵/۵۱	۲	<۰/۰۰۱
	عدم نگاه به صفحه	۵۷/۰۹	۲	<۰/۰۰۱

1. Python

نتایج آزمون کروسکال- والیس نشان داد که در هر چهار شاخص مورد بررسی، شامل حرکت مردمک، پایداری نگاه، نسبت پایداری نگاه و عدم نگاه به صفحه، تفاوت معناداری بین سه گروه دانش‌آموزان بهنجار، دارای دشواری خواندن، و نارساخوان وجود دارد (P<۰/۰۰۱). با وجود مشاهده تفاوت معنادار بین سه گروه در تمامی شاخص‌های مورد بررسی، هدف اصلی پژوهش حاضر فراتر از مقایسه گروهی و معطوف به طبقه‌بندی و پیش‌بینی عضویت دانش‌آموزان در گروه‌های مختلف است. بر این اساس در ادامه، توانایی این ویژگی‌ها در قالب مدل‌های یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی دانش‌آموزان بررسی شد. به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های رایج طبقه‌بندی و انتخاب مدل مناسب برای پژوهش حاضر، چهار الگوریتم رگرسیون لجستیک، جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان، و نزدیک‌ترین همسایه با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع پنج‌بخشی مقایسه شدند. در این روش، داده‌ها به پنج زیرمجموعه تقسیم شدند؛ به‌گونه‌ای که در هر تکرار، چهار زیرمجموعه برای آموزش مدل و یک زیرمجموعه برای آزمون مورد استفاده قرار گرفت. این فرایند پنج بار تکرار شد تا هر زیرمجموعه یک بار به‌عنوان مجموعه آزمون مورد استفاده قرار گیرد. عملکرد هر مدل بر اساس میانگین شاخص‌های ارزیابی در پنج تکرار محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد.

جدول ۳ عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در طبقه‌بندی دانش‌آموزان پایه‌های یکم تا سوم ابتدایی نشان می‌دهد. برای هر الگوریتم، شاخص‌های ارزیابی شامل دقت، صحت، حساسیت، اختصاصی‌بودن، و سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده محاسبه شد تا توانایی مدل‌ها در تفکیک دانش‌آموزان نارساخوان از دانش‌آموزان بهنجار ارزیابی و مناسب‌ترین الگوریتم برای هر پایه تحصیلی مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۳: شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل در پایه‌های یکم تا سوم

پایه تحصیلی	الگوریتم طبقه‌بندی	دقت	صحت	حساسیت	اختصاصی‌بودن	سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده
یکم	جنگل تصادفی	۰/۹۰	۰/۳۰	۰/۱۶	۰/۹۸	۰/۹۵
	رگرسیون لجستیک	۰/۸۸	۰/۳۰	۰/۱۱	۰/۹۷	۰/۹۵
	ماشین‌بردار پشتیبان	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۸	۰/۸۵
	نزدیک‌ترین همسایه	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۹	۰/۸۵
دوم	جنگل تصادفی	۰/۹۵	۰/۷۰	۰/۳۶	۰/۹۹	۰/۹۵
	رگرسیون لجستیک	۰/۹۵	۰/۸۰	۰/۴۰	۰/۹۹	۰/۹۵
	ماشین‌بردار پشتیبان	۰/۹۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۹	۰/۸۵
	نزدیک‌ترین همسایه	۰/۹۴	۰/۷۰	۰/۳۰	۰/۹۹	۰/۸۵
سوم	جنگل تصادفی	۰/۸۹	۰/۳۳	۰/۲۶	۰/۹۸	۰/۹۱
	رگرسیون لجستیک	۰/۸۸	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۹۷	۰/۸۵
	ماشین‌بردار پشتیبان	۰/۸۹	۰/۲۰	۰/۰۶	۱/۰۰	۰/۸۲
	نزدیک‌ترین همسایه	۰/۸۹	۰/۴۰	۰/۲۶	۰/۹۸	۰/۷۳

بر اساس شاخص‌های عملکرد الگوریتم‌ها، در پایه یکم جنگل تصادفی، در پایه دوم الگوریتم رگرسیون لجستیک و در پایه سوم نیز جنگل تصادفی عملکرد بهتری داشته و به عنوان مدل نهایی انتخاب شدند (منظور از عملکرد بهتر رگرسیون لجستیک در پایه دوم، برتری عملکرد این الگوریتم در طبقه‌بندی بر اساس شاخص‌های ارزیابی مدل بوده است، نه حرکات واپس‌گرد چشم). این مقایسه با هدف تعیین مناسب‌ترین الگوریتم برای طبقه‌بندی دانش‌آموزان و اطمینان از انتخاب مدل برتر بر اساس عملکرد انجام شد. پس از انتخاب مدل‌های نهایی، به‌منظور بررسی اهمیت نسبی ویژگی‌های استخراج‌شده، از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد؛ زیرا این الگوریتم امکان محاسبه و رتبه‌بندی مستقیم اهمیت ویژگی‌ها را فراهم می‌کند. بنابراین انتخاب جنگل تصادفی برای تحلیل اهمیت ویژگی‌ها مستقل از انتخاب مدل نهایی و با هدف تفسیرپذیری

ویژگی‌ها انجام شد و رتبه‌بندی ارائه شده در جدول ۴ بر اساس شاخص اهمیت ویژگی در مدل جنگل تصادفی است.

با وجود تفاوت عملکرد الگوریتم‌ها در پایه‌های مختلف، برای بررسی اهمیت نسبی ویژگی‌ها از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد؛ زیرا این الگوریتم امکان محاسبه مستقیم اهمیت ویژگی‌ها را فراهم می‌کند. بنابراین رتبه‌بندی جدول ۴ بر اساس شاخص اهمیت ویژگی در مدل جنگل تصادفی ارائه شده است.

جدول ٤: ترتیب اهمیت ویژگی‌ها در عملکرد مدل

پایه تحصیلی	یکم	دوم	سوم
ویژگی	پایداری حرکت چشم	پایداری حرکت چشم	پایداری حرکت چشم
	حرکت مردمک	حرکت مردمک	حرکت مردمک
	نرخ پایداری حرکت چشم	عدم نگاه به صفحه	نرخ پایداری حرکت چشم
	عدم نگاه به صفحه	نرخ پایداری حرکت چشم	عدم نگاه به صفحه

جدول ۴ میزان اهمیت ویژگی‌های حرکات چشم در عملکرد مدل یادگیری ماشین را برای هر یک از پایه‌های تحصیلی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه ترتیب اهمیت ویژگی‌ها در پایه‌های مختلف تا حدی متفاوت است، اما ویژگی‌هایی مانند پایداری حرکت چشم، حرکت مردمک، نرخ پایداری حرکت چشم، و عدم نگاه به صفحه در تمامی پایه‌ها به‌عنوان ویژگی‌های کلیدی انتخاب شده‌اند. این یافته بیانگر آن است که این شاخص‌ها در تمامی پایه‌های مورد بررسی، اطلاعات تمایزبخشی برای مدل یادگیری ماشین فراهم کرده‌اند.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تمایز حرکات چشم هنگام خواندن در دانش‌آموزان با و بدون نارساخوانی با استفاده از هوش مصنوعی انجام شد. نتایج تحلیل یافته‌ها نشان داد میان الگوهای حرکات چشم در دو گروه مورد مطالعه تفاوت معنادار وجود دارد؛ به‌طوری که دانش‌آموزان نارساخوان، الگوهای حرکات چشم متمایزی از همسالان بهنجار خود نشان دادند. این الگوهای متمایز، حتی در غیاب اطلاعات زبانی یا صوتی، توانایی قابل قبولی در تفکیک این دو گروه دارند. این یافته با برخی مطالعات بین‌المللی پیشین (۲۵-۲۳، ۲۱) که بر قابلیت الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شناسایی نارساخوانی تأکید داشتند، همسو است. در ایران نیز با وجود انجام پژوهش‌هایی در حوزه تشخیص خودکار نارساخوانی، تاکنون مطالعه‌ای که به‌طور هم‌زمان از یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های حرکات چشم (از طریق دوربین) برای شناسایی یا غربالگری نارساخوانی استفاده کرده باشند، گزارش نشده است و اغلب مطالعات موجود بر توانبخشی رایانه‌ای، بازی‌وارسازی، و تجهیزات تخصصی تمرکز داشته‌اند (۲۸-۲۶، ۸). بدین ترتیب پژوهش حاضر گامی در جهت پیوند این دو روی‌آورد در بستر زبان فارسی به‌شمار می‌رود و می‌توانند چارچوبی عملی برای غربالگری دشواری‌های خواندن و نارساخوانی فراهم کنند.

در تبیین یافته‌های پژوهش حاضر می‌توان این‌گونه بیان کرد که با توجه به شیوع بالای نارساخوانی (۶، ۵) و پیامدهای مستمر آن بر روند تحصیلی دانش‌آموزان (۳)، عدم شناسایی بهنگام و نبود مداخلات پیشگیرانه می‌تواند به تداوم نارسایی در مهارت‌های خواندن و درک مطلب منجر شود و در نهایت دسترسی دانش‌آموز به محتوای آموزشی را با محدودیت جدی مواجه می‌سازد (۷). از این رو شناسایی دانش‌آموزان در معرض خطر این اختلال در سال‌های نخستین آموزش رسمی، بیش از آنکه صرفاً به معنای برچسب‌گذاری اختلال باشد، پیش‌شرطی حیاتی برای ارجاع بهنگام، ارزیابی تخصصی، و اجرای مداخلات متناسب با نیازهای فردی محسوب می‌شود (۱۰). از سوی دیگر اتکای صرف به سنجه‌های عملکردی و ارزیابی‌های انسانی ممکن است با خطا و یا سوگیری‌هایی همراه باشد که در این راستا، روش‌های جایگزین و مکملی مانند تحلیل حرکات چشم به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های عینی در هنگام خواندن، می‌تواند داده‌های ارزشمندی درباره سازمان‌یافتگی فرایند خواندن و تفاوت‌های فردی در راهبردهای دیداری فراهم آورد و مبنایی برای توسعه شاخص‌های عینی در فرایند غربالگری اولیه فراهم کند (۱۳).

علاوه بر این با توجه به ضرورت غربالگری در مقیاس وسیع در نظام‌های آموزشی، روش‌های سنتی ارزیابی نارساخوانی با وجود کارایی در تشخیص‌های تخصصی، در اجرای گسترده با کشاکش‌هایی نظیر محدودیت زمانی، منابع مالی، و نیاز به حضور متخصصان مواجه هستند. در مقابل استفاده از روی‌آوردهای محاسباتی برای تحلیل خودکار شاخص‌های رفتاری، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد جهت شناسایی اولیه در محیط‌های آموزشی به‌کار گرفته شود (۱۲). پژوهش حاضر با تبدیل ویژگی‌های حرکات چشم به داده‌های کمّی و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان تحلیل هم‌زمان الگوهای چندگانه و تمایز دقیق میان گروه‌ها را فراهم ساخت. همچنین استفاده از روی‌آوردهای مختلف طبقه‌بندی در کنار اعتبارسنجی متقابل، تأیید کرد که مدل‌های توسعه‌یافته تنها به داده‌های آموزشی وابسته نبوده و توانایی بالایی در شناسایی صحیح الگوهای رفتاری در نمونه‌های نارساخوان نشان می‌دهند. در واقع این فرآیند موجب شد تا تفاوت‌های بسیار ظریف در پویایی حرکات چشم که در ارزیابی‌های سنتی قابل مشاهده نیستند، به شاخص‌های قابل اتکا برای تفکیک وضعیت دانش‌آموزان مبدل شوند.

جنبه متمایز دیگر این پژوهش، جایگزینی دستگاه‌های تخصصی ردیابی چشم با دوربین‌های معمولی رایانه‌ای بود. اگرچه دقت این ابزارها در مقایسه با ردیاب‌های آزمایشگاهی دقیق، ممکن است تحت تأثیر متغیرهای محیطی نظیر نوسانات نور قرار گیرد، اما نتایج نشان داد که تفاوت الگوهای حرکات چشم در دانش‌آموزان نارساخوان چنان بارز است که حتی با ابزارهای ساده نیز می‌توان شاخص‌های معناداری از آن استخراج کرد. افزون بر این، برتری روی‌آورد حاضر صرفاً در کاهش هزینه‌ها نیست؛ که در افزایش روایی بوم‌شناختی است. برخلاف ردیاب‌های آزمایشگاهی که نیازمند شرایط مهارشده و محدودکننده هستند؛ شرایطی که می‌تواند برای آزمودنی‌ها تنش‌زا باشد، دوربین‌های رایانه‌ای امکان ثبت داده‌ها را در محیطی طبیعی‌تر و نزدیک‌تر به موقعیت‌های واقعی آموزشی فراهم می‌آورند. بدین ترتیب این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان بدون تغییر در ماهیت طبیعی کنش‌های دانش‌آموز، به تحلیل‌های عینی و دقیق در محیط‌های غیرآزمایشگاهی دست یافت.

عامل دیگری که موجب تمایز دانش‌آموزان نارساخوان از همسالان با تحول بهنجار شد، تفاوت در سازمان‌یافتگی الگوهای دیداری در فرایند خواندن بود. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که ثبت ویدئویی حرکات چشم با دوربین رایانه، امکان شناسایی این تفاوت‌های رفتاری را از طریق استخراج متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری نظیر تغییرات موقعیت مردمک، پایداری نگاه، نسبت حفظ نگاه بر صفحه، و میزان انحراف از متن فراهم می‌آورد. همچنین به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، رگرسیون لوجستیک، و نزدیک‌ترین همسایه مشخص کرد که تمایز میان دو گروه لزوماً وابسته به یک شاخص منفرد نیست، که حاصل تعامل و الگوهای مشترک میان چندین ویژگی رفتاری است. همچنین بررسی عملکرد مدل‌های توسعه‌یافته بر پایه این الگوها نشان داد که اگرچه مدل در تشخیص گروه بهنجار با اختصاصی بودن بالایی عمل کرده و توانسته است ثبات و انسجام ساختاری الگوهای چشمی این گروه را به‌خوبی شناسایی کند، اما میزان حساسیت آن در تشخیص تمامی موارد نارساخوانی نسبتاً پایین‌تر است. این تفاوت عملکردی، به جای آنکه از اعتبار یافته‌ها بکاهد، بر ماهیت چندبعدی نارساخوانی صحه می‌گذارد؛ زیرا که این اختلال فراتر از الگوهای صرف حرکتی چشم، با ابعاد پیچیده‌ای از جمله جنبه‌های زبانی، واج‌شناختی، و گفتاری درگیر است. بنابراین یافته‌های پژوهش حاضر تأیید می‌کند که الگوهای استخراج‌شده از دوربین‌های رایانه، اگرچه ابزاری قدرتمند برای غربالگری اولیه و شناسایی بخش‌های قابل‌اندازه‌گیری رفتار دیداری هستند، اما باید در چارچوب یک ارزیابی جامع و تخصصی تفسیر شوند. بنابراین یافته حاضر را می‌توان شواهدی مبنی بر وجود اطلاعات افتراقی در داده‌های حرکات چشم دانست؛ اطلاعاتی که حتی در نبود اتکا به پاسخ‌های زبانی یا صوتی دانش‌آموز، برای تمایز الگوهای خواندن دو گروه قابل استفاده بوده‌اند. بدین ترتیب روش پژوهش حاضر می‌تواند فاصله میان مشاهده ساده رفتار خواندن و تحلیل عینی و خودکار آن را کاهش داده و زمینه را برای توسعه ابزارهایی فراهم کند که در محیط‌های آموزشی، تعداد بیشتری از دانش‌آموزان را با صرف منابع کمتر مورد غربالگری قرار دهند.

به‌طور کلی مطالعه حاضر با تلفیق تحلیل عینی حرکات چشم و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، گامی فراتر از روی‌آوردهای متداول در

شناسایی نارساخوانی برداشته است. در حالی که بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های پیشین بر ارزیابی مستقیم عملکرد خواندن با روش‌های آزمایشی، شبه‌آزمایشی و یا استفاده از ابزارهای تخصصی ردیابی چشم متمرکز بوده‌اند، پژوهش حاضر نشان داد که الگوهای حرکات چشم ثبت‌شده با استفاده از دوربین نیز می‌توانند حاوی اطلاعات معناداری برای تمایز دانش‌آموزان دارای نارساخوانی از همسالان بهنجار باشند. از این منظر پژوهش حاضر علاوه بر گسترش شواهد مربوط به نشانگرهای رفتاری نارساخوانی، می‌تواند مبنایی برای مطالعات آتی در زمینه اعتبارسنجی و بهینه‌سازی مدل‌های محاسباتی در جمعیت‌های بزرگ‌تر و با تنوع زبانی و آموزشی بیشتر فراهم آورد. در نهایت تداوم این مسیر پژوهشی می‌تواند به گذار از شناسایی مبتنی بر ارزیابی‌های صرفاً تخصصی به سوی چارچوب‌های چندوجهی، داده‌محور، و قابل‌دسترسی برای غربالگری نارساخوانی کمک کند و از این طریق، گامی در جهت هدف نهایی علم، یعنی تبیین دقیق‌تر نشانگرهای این اختلال و تبدیل دانش حاصل از پژوهش به ابزارهای معتبر و کاربردپذیر برای شناسایی زودهنگام و مداخله به‌هنگام بردارد.

از محدودیت‌های پژوهش حاضر، تأثیرپذیری عملکرد دانش‌آموزان از طول متن و دشواری برخی واژه‌ها بود؛ به‌گونه‌ای که در برخی موارد، خستگی ناشی از ادامه خواندن می‌توانست بر کیفیت عملکرد و الگوهای حرکات چشم اثر بگذارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده فهرست واژه‌ها یا تکالیف خواندن متناسب با توانایی آزمودنی باشد تا اثر خستگی آنها کاهش یابد. همچنین استفاده از دوربین‌های معمولی رایانه‌ای، اگرچه امکان اجرای کم‌هزینه‌تر در محیط طبیعی آزمودنی را فراهم می‌کند ولی ممکن‌است تحت تأثیر عواملی مانند شدت نور، فاصله و زاویه نسبت به دوربین، حرکات سر و کیفیت تصویر قرار گیرد. از سوی دیگر، اتکا به حرکات چشم به‌عنوان منبع اصلی داده ممکن است بخشی از فرایندهای شناختی و رفتاری مرتبط با نارساخوانی را پوشش ندهد؛ در نتیجه ترکیب شاخص‌های حرکات چشم با متغیرهایی مانند زمان واکنش، عملکرد حافظه فعال، آگاهی واج‌شناختی، ویژگی‌های نوشتاری، و دست‌خط می‌تواند به توسعه یک الگوی چندوجهی و افزایش دقت، حساسیت، و اختصاصی بودن ابزار غربالگری کمک کند. در نهایت پیشنهاد می‌شود مدل‌های به‌دست‌آمده در نمونه‌های مستقل و محیط‌های آموزشی واقعی اعتبارسنجی شوند و با مقایسه الگوریتم‌های مختلف، روش‌های انتخاب ویژگی و مدل‌های یادگیری عمیق، پایداری و قابلیت کاربرد آنها در غربالگری زودهنگام نارساخوانی ارزیابی شود.

پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی از جمله حجم نمونه گروه نارساخوانی، ناهمگونی افراد نمونه از نظر توزیع جغرافیایی و جمعیت‌شناختی شرکت‌کنندگان، محدودیت در مستندسازی یکپارچه معیارهای تشخیصی، و نبود اعتبار سنجی خارجی مواجه بود. از دیگر محدودیت‌های این پژوهش تأثیر طول و دشواری متن، خستگی آزمودنی، شرایط غیراستاندارد ثبت داده‌ها، و مقطعی‌بودن مطالعه بود که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از تکالیف متناسب، شرایط ثبت استاندارد، پایش کیفیت داده، و مطالعات طولی استفاده شود. همچنین ترکیب شاخص‌های حرکات چشم با سایر متغیرهای شناختی و رفتاری و اعتبارسنجی مدل‌ها در نمونه‌ها و محیط‌های واقعی پیشنهاد می‌شود. همچنین حساسیت پایین برخی مدل‌ها و نیاز به شفاف‌سازی تنظیمات آستانه‌های تصمیم‌گیری از جمله مواردی است که در تفسیر نتایج باید مورد توجه قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده با افزایش حجم نمونه شواهد دقیق‌تری درباره عملکرد مدل فراهم شود. به ویژه اعتبارسنجی خارجی مدل با استفاده از نمونه‌های مستقل از مراکز و مناطق جغرافیایی مختلف از اولویت‌های ادامه این پژوهش خواهد بود تا تعمیم‌پذیری و پایداری عملکرد مدل در شرایط واقعی ارزیابی شود. همچنین بررسی روش‌های تنظیم آستانه تصمیم‌گیری با هدف بهبود حساسیت می‌تواند در پژوهش‌های آتی دنبال شود. در سطح کاربردی نیز پیشنهاد می‌شود از نتایج این پژوهش برای غربالگری و تشخیص زودهنگام کودکان نارساخوان، در تدوین پروتکل جامع تشخیص در کنار سایر شیوه‌ها استفاده شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: این مقاله برگرفته از رساله دکترای نویسنده یکم در رشته روان‌شناسی تربیتی دانشگاه شهید بهشتی تهران است. مجوز علمی این مطالعه توسط دانشگاه شهید بهشتی به شماره نامه ۱۸۵۱۲۱۸ در تاریخ ۱۴۰۲/۱۰/۳ صادر شد. این پژوهش دارای کد اخلاق IR.SBU.REC.1403.081 صادره از کمیته اخلاق در پژوهش‌های زیست‌پزشکی دانشگاه شهید بهشتی است. همچنین ملاحظات اخلاقی مندرج در راهنمای انتشار انجمن روان‌شناسی آمریکا و کدهای اخلاقی سازمان نظام روان‌شناسی ایران از جمله رازداری، محرمانه ماندن اطلاعات هویتی و تحلیل داده‌ها، و رضایت آگاهانه والدین جهت شرکت در پژوهش در این پژوهش رعایت شده است.

حامی مالی: این مطالعه بدون حمایت مالی هیچ مؤسسه‌ای و با هزینه نویسندگان مقاله انجام شده است.

نقش هر یک از نویسندگان: در این مطالعه نویسنده یکم به عنوان طراح و ایده‌پرداز اصلی پژوهش و مسئول جمع‌آوری داده‌ها، نویسنده دوم به عنوان استاد راهنمای یکم، نویسنده سوم به عنوان استاد راهنمای دوم، و نویسنده چهارم به عنوان استاد مشاور نقش داشتند.

تضاد منافع: انجام این پژوهش برای نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی را به دنبال نداشته است و نتایج آن کاملاً شفاف و بدون سوگیری گزارش شده است.

در دسترس بودن داده‌ها: تمامی داده‌های این مطالعه در اختیار نویسنده مسئول است و در زمان داوری دست‌نوشته به نشریه تحویل داده شد. همچنین در صورت درخواست منطقی پژوهشگری خاص در اختیار او قرار خواهد گرفت.

رضایت برای انتشار: نویسندگان برای انتشار این مقاله رضایت کامل خود را اعلام کردند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولّد و فناوری‌های مبتنی بر آن در فرایند اجرای پژوهش و نگارش مقاله: در فرایند انجام و آماده‌سازی این پژوهش، نویسندگان از هوش مصنوعی ChatGPT به‌منظور بهبود نگارش، ویرایش زبانی، ارتقای انسجام، و وضوح متن استفاده کردند. علاوه بر این از مدل‌های هوش مصنوعی Opus و Grok برای تولید و اصلاح کد، حل مسائل برنامه‌نویسی، و رفع اشکالات استفاده شد. پس از استفاده از این ابزار، نویسندگان مطالب مقاله را به طور کامل بررسی ویرایش کرده‌اند. همچنین نویسندگان این مقاله، مسئولیت کامل صحت محتوای تمامی بخش‌های آن را بر عهده می‌گیرند.

تشکر و قدردانی: از شرکت‌کنندگان محترم و همه کسانی که در اجرای پژوهش به ما یاری رساندند نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

References

1. Dostálová N, Plch L. A scoping review of webcam eye tracking in learning and education. Studia paedagogica. 2023;28(3):113-31. [Link]
2. Smyrnakis I, Andreadakis V, Selimis V, Kalaitzakis M, Bachourou T, Kaloutsakis G, Kymionis GD, Smirnakis S, Aslanides IM. RADAR: A novel fast-screening method for reading difficulties with special focus on dyslexia. PloS one. 2017 Aug 11;12(8):e0182597. [Link]
3. Tiwari V, Agarwal O, Sharma M, Sahu R, Babar R, Geddam R, Awais M, Ghayvat H. Akshar Mitra: a multimodal integrated framework for early dyslexia detection. Frontiers in Digital Health. 2025 Nov 28; 7:1726307. [Link]
4. Dabaghi K, D'Urso S, Sciarrone F. Artificial intelligence to help people with dyslexia in education: An interdisciplinary literature review. International Journal of Artificial Intelligence in Education. 2026 Mar 20:100012. [Link]
5. Yang L, Li C, Li X, Zhai M, An Q, Zhang Y, Zhao J, Weng X. Prevalence of developmental dyslexia in primary school children: A systematic review and meta-analysis. Brain sciences. 2022 Feb 10;12(2):240. [Link]
6. Jing W, Yu ELX, Motevalli S. A comparison between cognitive assessment and neurobiology technology assessment of dyslexia: a literature review. Int J Acad Res Bus Soc Sci. 2023;13(4):976-986. [Link]
7. Khan RU, Cheng JL, Bee OY. Machine learning and Dyslexia: Diagnostic and classification system (DCS) for kids with learning disabilities. International Journal of Engineering & Technology. 2018;7(3.18):97-100. [Link]
8. Delavarian M, Afrooz G. Investigating the accuracy and sensitivity of the intelligent screener system to predict children at risk of neurodevelopmental disorders (attention deficit-hyperactivity disorder and dyslexia). Journal of Learning Disabilities. 2020 Nov 21;10(1):87-109. [Persian] [Link]
9. Sakhai, F., Mazaheri, S., Golmohammadi, G., & Asadollahpour, F. (2025). Prevalence of developmental dyslexia among primary school children in iran: a systematic review and meta-analysis. *Iranian Journal of Psychiatry*, *20*(2), 223.
10. Sanfilippo J, Ness M, Petscher Y, Rappaport L, Zuckerman B, Gaab N. Reintroducing dyslexia: Early identification and implications for pediatric practice. Pediatrics. 2020 Jul 1;146(1): e20193046. [Link]
11. Fagbemi O, Bello AA, Adebayo FT. Assessment of teachers' roles in early identification of children with dyslexia in public primary schools in Oyo State. J Educ Res Dev. 2026;21(1):76-86. [Link]
12. Gomolka Z, Zeslawska E, Czuba B, Kondratenko Y. Diagnosing dyslexia in early school-aged children using the LSTM network and eye tracking technology. Applied Sciences. 2024 Sep 7;14(17):8004. [Link]
13. Nabil NZ, Effendi M, Matore EM, Zainal MS. Understanding early and late identification of dyslexia: a narrative review of diagnostic timing, systemic barriers, and educational equity. e-Bangi. 2025;22(3):455-66. [Link]
14. Jan TG, Khan SM. A systematic review of research dimensions towards dyslexia screening using machine learning. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B. 2023 Apr;104(2):511-22. [Link]
15. Kaisar S. Developmental dyslexia detection using machine learning techniques: A survey. ICT Express. 2020 Sep;6(3):181-184. [Link]
16. Macambira YK, Barbosa JV, Queiroga BM, Cordeiro AA, Menezes DC, Lima ML, Advíncula KP. Ocular findings from otoneurological examinations in children with and without dyslexia: a systematic review with meta-analysis. Brazilian Journal of Otorhinolaryngology. 2022 Nov 25;88(Suppl 3):192-201. [Link]
17. Toki EI. Using eye-tracking to assess dyslexia: A systematic review of emerging evidence. Education Sciences. 2024 Nov 17;14(11):1256. [Link]
18. Hamid SS, Admodisastro N, Manshor N, Ghani AA, Kamaruddin A. Engagement prediction in the adaptive learning model for students with dyslexia. InProceedings of the 4th International Conference on Human-Computer Interaction and User Experience in Indonesia, CHIuXiD'18 2018 Mar 23 (pp. 66-73). [Link]
19. Khan R, Debnath R. Human distraction detection from video stream using artificial emotional intelligence. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing. 2020 Apr 1;14(2):19. [Link]
20. Cho Y. Rethinking eye-blink: Assessing task difficulty through physiological representation of spontaneous blinking. InProceedings of the 2021 CHI conference on human factors in computing systems 2021 May 6 (pp. 1-12). [Link]
21. Björnsdóttir M, Hollenstein N, Barrett M. Dyslexia prediction from natural reading of Danish texts. InProceedings of the 24th Nordic Conference on Computational Linguistics (NoDaLiDa) 2023 May (pp. 60-70). [Link]
22. Shrestha S, Murano P. An algorithm for automatically detecting dyslexia on the fly. Int J Comput Sci Inf Technol. 2018 Jun;10(3):1-12. [Link]
23. Bott NT, Madero EN, Glenn JM, Lange AR, Anderson JJ, Newton DO, Brennan AH, Buffalo EA, Rentz DM, Zola SM. Device-embedded cameras for eye tracking-based cognitive assessment: Implications for teleneuropsychology. Telemedicine and e-Health. 2020 Apr;26(4):477-81. [Link]
24. Ikermane M, El Mouatasim A. Dyslexia deep clustering using webcam-based eye tracking. IAES Int J Artif Intell. 2023 Dec;12(4):1892-1900. [Link]
25. Jaiyeola G, Wong A, Bryck R, Mills C, Hutt S. Using webcam-based eye tracking during a learning task to understand neurodivergence. InProceedings of the 18th

International Conference on Educational Data Mining 2025 (pp. 354-364). [Link]
26. Wong AY, Bryck RL, Baker RS, Hutt S, Mills C. Using a webcam-based eye-tracker to understand students' thought patterns and reading behaviors in neurodivergent classrooms. InLAK23: 13th international learning analytics and knowledge conference 2023 Mar 13 (pp. 453-463). [Link]
27. Nevisi Z, Shiri ME, Minaei B. Designing an intelligent computer game for prediction of dyslexia based on cognitive science. Technology of Education Journal (TEJ). 2017 Jul 5;12(3):219-29. [Persian] [Link]
28. Mirtaheri G, Fathabadi J, Sharifi M, Sadeghi Firoozabadi V. Comparison of eye movements of students with and without dyslexia in visual perception tasks. Empowering Exceptional Children. 2018 Dec 22;9(4):29-40. [Persian] [Link]
29. Razavi SG, Zadehmohammadi A, Bigdeli M, Bigdeli H. Comparison of the effects of eye movement desensitization and reprocessing (EMDR) and neurofeedback on the cognitive performance of female secondary school students with internalizing and externalizing behavioral disorders. Journal of Psychological Science. 2026 Jun 10;25(160):1-21. [Persian] [Link]
30. Shafigh S, Bigdeli H, Khoeini F. Investigating the Effect of Executive Functions and Perception on the Reading Disorder Score of Elementary School Students with Reading Disorders (Mild to Severe Level). Middle Eastern Journal of Disability Studies. 2023 Mar 10; 13:160. [Persian] [Link]
31. Krejcie RV, Morgan DW. Determining sample size for research activities. Educ Psychol Meas. 1970; 30(3): 607-610. [Link]
32. Karimi H, Sabori G, GHASEMI A, NEMATI Z. Effect of advanced visual-perception frastig test on reading skills in students with specific dyslexia learning disability: A single subject study. Journal of Exceptional Children. 2019 Jan 1;19(3):115-28. [Persian] [Link]
33. Shafigh S, Bigdeli H, Khoyeeni F. The effect of modeling reading and attention on reading learning disorder mediated by classroom perception in students. Rooyesh-e-Ravanshenasi Journal (RRJ). 2024 Feb 10;12(11):97-108. [Persian] [Link]
34. Wechsler D. Wechsler intelligence scale for children – Fourth edition (WISC-IV). San Antonio, TX: The Psychological Corporation. 2003a. [Link]
35. Sadeghi, A, Rabiei, M, and Abedi M. Validation and Reliability of the Wechsler Intelligence Scale for ChildrenIV. Developmental Psychology: Iranian Psychologist. 2011; 7(28): 377-375. [Persian] [Link]