Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 1-19

Enterprise Ontology Based on Intelligent Agents; Case Study: Knowledge-Based Production Export Actors

Mohammad Rahim Bannakar[1*], Shaaban Elahi, Shaghayegh Sahraei[3]

[1] IT Management Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[2] Industrial Management Department, Rafsanjan Vali-e- Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
[3] IT Management Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 04 March 2023, Revised: 08 October 2023, Accepted: 18 November 2023
Paper type: Research

Abstract

This article examines the role of intelligent agents in enriching and developing organizational ontology. On the other hand, reviewing business documents in the Trade Promotion Organization and the statistics of Iran's exports and imports over recent years creates a practical need to identify Iran's trade weaknesses through an ontology of knowledge-based export actors and to propose solutions for them. Using a systematic review of theoretical foundations, nine concepts of ontology enrichment through intelligent agents were identified, and evidence of the capabilities of intelligent agents for ontology development and enrichment was obtained. By evaluating and summarizing the theoretical foundations, an organizational ontology based on intelligent agents was developed to create a knowledge source in this field and was evaluated through expert interviews. In the present article, the organizational ontology of knowledge-based product export actors was developed based on intelligent agents, thus providing a knowledge source containing tacit and explicit knowledge from knowledge-based product export actors. This ontology serves as a useful knowledge resource in the process of exporting knowledge-based products. In addition, companies that have the potential to export but have not done so can use this knowledge resource to strengthen and develop their export capabilities.

Keywords: Ontology, Intelligent Agent, Knowledge Management, Interoperability.

[*] Corresponding Author's email: elahi@vru.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱ الی ۱۹

هستان‌شناسی سازمانی مبتنی بر عامل‌های هوشمند؛ موردمطالعه: بازیگران صادرات دانش‌بنیان

محمدرحیم بناکار[۱]، شعبان الهی[۲*]، شقایق صحرایی[۳]

[۱] کارشناسی ارشد مدیریت فناوری اطلاعات دانشگاه تربیت مدرس

[۲] استاد تمام گروه مدیریت دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان

[۳] استادیار مدیریت فناوری اطلاعات دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این مقاله نقش عامل‌های هوشمند برای غنی‌سازی و توسعه هستان‌شناسی سازمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از طرفی بررسی اسناد تجاری در سازمان توسعه تجارت و آمار صادرات و واردات ایران در چند ساله گذشته این ضرورت را در فضای عملی ایجاد می‌کند تا ضعف‌های تجاری ایران توسط یک هستان‌شناسی از بازیگران صادرات دانش‌بنیان شناسایی و پیشنهادهایی برای حل آنها ارایه شود. با روش بررسی نظامند مبانی نظری، ۹ مفهوم ذیل غنی‌سازی هستان‌شناسی به وسیله عامل‌های هوشمند شناسایی شدند و شواهدی از قابلیت‌های عامل‌های هوشمند جهت توسعه و غنی‌سازی هستان‌شناسی حاصل شد. با ارزیابی و جمع بندی مبانی نظری، هستان‌شناسی سازمانی مبتنی بر عامل‌های هوشمند برای ایجاد یک منبع دانشی در این زمینه توسعه داده شد و با مصاحبه با خبرگان مورد ارزیابی قرار گرفت.. در مقاله حاضر هستان‌شناسی سازمانی بازیگران صادرات محصولات دانش‌بنیان مبتنی بر عامل‌های هوشمند توسعه داده شد و بدین ترتیب منبع دانشی، حاوی دانش ضمنی و آشکار از بازیگران صادرات محصولات دانش‌بنیان ارایه شد. این هستان‌شناسی به‌عنوان یک منبع دانشی مفید در فرایند صادرات محصولات دانش‌بنیان می‌باشد. علاوه بر این، شرکت‌های که پتانسیل صادرات داشته، ولی صادراتی انجام نداده‌اند می توانند از این منبع دانشی درتقویت و توسعه توان صادراتی خود استفاده کنند.

کلیدواژگان: هستان‌شناسی، عامل‌های هوشمند، مدیریت دانش، تعامل‌پذیری.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: elahi@vru.ac.ir

۱- مقدمه

در عصر اطلاعات، دانش کارکنان یک سازمان به‌عنوان محوری‌ترین عنصر در ایجاد ارزش در نظر گرفته می‌شود. دانش ضمنی بیانگر دانش غیرمستقیم غیرقانونی است که در طول زمان توسط کارکنان از طریق تجربیات حاصل از کار روزمره، معامله با مشتری، انجام مراحل و رویه‌های شرکت کسب می شود [۱]. بیرونی‌سازی دانش ضمنی با هستان‌شناسی منجر به سودرسانی به سرمایه‌های انسانی هر سازمان می‌شود. به‌ویژه، این امر بر نحوه گردش دانش در سازمان‌ها و تغییر ماهیت آن تأثیر می‌گذارد. با استفاده از هستان‌شناسی سازمانی می‌توان یک بازنمایی ساختارمند از بازیگران یک زمینه خاص داشت، که این پایه و اساس ایجاد دانش جدید است؛ جایی که مدیران باید در استفاده از داده‌های خود به دنبال انعطاف‌پذیری زیادی باشند و آن‌ها را سریع‌تر و اقتصادی‌تر جلوه دهند؛ شرکت‌ها باید انبوهی از اطلاعات مهم را ذخیره و مدیریت کنند [۲]. اما هستان شناسی دقیقا به چه معناست. تام گروبر هستان‌شناسی را این‌گونه تعریف می‌کند: «هستان‌شناسی، مدل‌سازی مفاهیم موجود به شکل رسمی و صریح و بیان روابط میان مفاهیم است»[۳]. در این تحقیق از هستان‌شناسی برای ایجاد یک پایگاه دانشی که بتواند چالش‌ها و اهداف مشخص در دامنه موردمطالعه را برآورده سازد، استفاده‌شده است. به جهت کشف موجودیت‌ها و روابط میان آنها در ایجاد و نگهداری هستان‌شناسی از قابلیت‌های عامل‌های هوشمند که قدرت درک و یادگیری از محیط را دارند استفاده می‌شود تا به صورت خودکار مطابق با موضوعات و مفاهیم و روابط بین آن‌ها تکامل یابند، تمامی فرایند خودکارسازی به‌صورت مفهومی در این پژوهش ارائه می‌گردد [۴].

در اقتصاد دانش‌محور سرمایه فکری سازمان‌ها به یک منبع اساسی برای بقا و رقابت تبدیل شده است و تسلط بر ابزارهای تولید مانند گذشته نمی تواند سازمان‌ها را از رقبایشان متمایز کند. به‌طور کلی، با توجه به این زمینه، سازمان‌ها باید با دانستن چگونگی تعریف و دفاع از ویژگی‌های خود، این مزیت رقابتی پایدار را تضمین کنند، که آن‌ها را از رقبای خود متمایز می‌کند [5]. ویژگی خاصی که این مزیت رقابتی را ایجاد می‌کند به توانایی سازمان در شناسایی دانش کارکنان خود، به‌سرعت در اختیار قرار دادن آن برای کارکنان دیگر و نیز ارتقاء و توسعه آن بستگی دارد و پایه و اساس استراتژی‌های جدید رقابتی را تشکیل می‌دهد. دانش انسانی در تصمیم‌گیری، نوآوری در تجارت و فعالیت‌های حل‌مسئله مورد استفاده قرار می گیرد. از آنجایی‌که اکثر شرکت‌ها غالباً با عوامل غیرقابل کنترل مانند شرایط نامشخص اقتصادی، جذب، بازنشستگی کارکنان باارزش و محیط اطلاعاتی وسیع و گسترده روبه‌رو هستند لذا ایجاد دانش و مدیریت آن یک اقدام حیاتی است که می‌تواند سازمان‌ها را قادر سازد تا با این عوامل مقابله کنند.

به گفته فردریش و وان درول ۸۰ درصد از دانش یک سازمان به‌عنوان دانش ضمنی در ذهن کارمندان سازمان قرار دارد. از این رو، دانش ضمنی بیانگر دانش غیرمستقیم غیرقانونی است که در طول زمان توسط کارکنان از طریق تجربیات حاصل از کار روزمره، معامله با مشتری، انجام مراحل و رویه‌های سازمان کسب می‌شود [1]. بنابراین دانش ضمنی را می‌توان بخشی مرتبط از سازمان دانست، که پراکنده و ساختارنیافته است و هنوز هیچ راهی برای ایجاد ارزش از آن با استفاده از ابزارهای وب معنایی و نرم‌افزارهای اجتماعی پیدا نشده است لذا برای انجام این کار باید آن را با روش‌های ساختاریافته بازنمایی کرد و درسازمان به اشتراک گذاشت تا زمانی که افراد سازمان را ترک می‌کنند، این دانش دردسترس باشد؛ درنتیجه با بروز تغییرات، تازه‌واردها در شناخت مفاهیم عملکرد بهتری خواهند داشت [6].

همچنین تصور از واقعیت تا حد زیادی تحت کنترل نقشه‌برداری ذهن است که به‌منظور درک واقعیت صورت می‌گیرد؛ در حال حاضر ظهور و تجاری‌سازی اینترنت و تکامل فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات (ICT) باعث می‌شود که محیط‌های تجاری سازمان‌ها به‌طور فزاینده‌ای گسترده‌تر شوند، بنابراین دسترسی کارکنان سازمان به محیط اطلاعاتی بسیار زیاد شده لذا لحظه به لحظه دانش و داده‌های موجود در زمینه کاری کارکنان دست‌خوش تغییر می‌شود و همین امر سبب خواهد شد میان نقشه‌برداری ذهنی افراد با یکدیگر و اهداف سازمانی مغایرت ایجاد شود؛ دانش با یک ساختار شناختی همراه است که اجازه می‌دهد تا اطلاعاتی که از طریق تجربه، یادگیری یا درون‌نگری به دست می‌آید، برای تفسیر فعالیت‌های جسمی یا ذهنی در یک موقعیت خاص، تفسیر شوند [5].

بازنمایی دانش در قالب هستان‌شناسی از ویژگی‌های چندوجهی برخوردار است [7]. برخی از این ویژگی‌های چندوجهی هستان‌شناسی شامل بازنمایی شفاف موجودیت‌ها در یک دامنه مشخص و همچنین روابط بین موجودیت‌ها و خصوصیاتی راجع به موجودیت‌ها و روابط بین آن‌ها، منجر به ایجاد یک شبکه معنایی در آن دامنه می‌شود، که می‌توان از آن به‌عنوان یک پایگاه دانش در هر سازمانی استفاده کرد، بررسی اسناد بین‌المللی در معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری نشان می‌دهد، موافقت‌نامه موقت تشکیل منطقه تجارت آزاد بین ایران و اتحادیه اقتصادی اوراسیا در سال ۱۳۹۷ شمسی منعقد گردیده است. در این موافقت‌نامه بسیاری از

محصولات دانش‌بنیان از تخفیف‌های تعرفه‌ای جذابی برای مبادله بین طرفین قرارداد برخوردار بودند. پس از اتمام زمان تفاهم‌نامه، در سال ۱۴۰۰شمسی با بررسی و تجزیه و تحلیل آمار صادرات و واردات محصولات دانش‌بنیان و تراز تجاری ایران با کشورهای منطقه اوراسیا در گزارش‌ها سازمان توسعه تجارت کشور، این نتیجه حاصل شد که اکوسیستم دانش‌بنیان کشور به شکل درست و بهینه‌ای از این فرصت پیش‌آمده، استفاده نکرده‌اند. لذا در این مقاله تلاش می‌شود با ارائه هستان‌شناسی سازمانی، دید مشترک و منسجمی از داده‌ها، اطلاعات و دانش در افراد، برنامه‌ها، سازمان و مرزهای جامعه و بازار ایجاد شود که با اهداف و استراتژی‌ها هم‌راستا باشد و با توجه به این‌که داده‌ها و اطلاعات در هستان‌شناسی سازمان به یادگار می‌ماند، می‌توان پس از خروج افراد از سازمان آن را به‌عنوان دانشی ارزشمند به کارکنان بعدی سازمان آموزش داد و منتقل کرد [8]؛ در عصر حاضر تغییرات در دامنه و فرایندهای کاری حاکم بر کشور باعث ایجاد تغییراتی در ارائه مفاهیم هستان‌شناسی و مشکلاتی در جمع‌آوری و تحلیل بازیگران صادرات محصولات دانش‌بنیان شده است. از سوی دیگر عامل‌های هوشمند تغییرات محیطی را به‌صورت کاملاً خودکار تشخیص می‌دهند. لذا در این تحقیق از عامل‌های هوشمند جهت شناسایی ، تولید و به‌روزرسانی مفاهیم هستان‌شناسی استفاده‌شده است.علاوه بر این با توجه به ظهور مفاهیم جدید جهت جلوگیری در اخلال بازنمایی بازیگران صادرات دانش‌بنیان، عامل‌های هوشمند این قابلیت را دارند که بتوان با استفاده از آن‌ها روابط بین موجودیت‌ها را نیزاستخراج نمود [9].

همان‌طور که بیان شد، کشور ایران نتوانسته است از تخفیف‌های تعرفه‌ای حاصل از تفاهم‌نامه ای که برای کشورهای حوزه اوراسیا جذابیت داشت، به‌خوبی استفاده کند لذا هدف اصلی این تحقیق، ارائه هستان‌شناسی بازیگران صادرات محصولات دانش‌بنیان جهت تسهیل در فرایند صادرات و انتخاب بهترین مسیر صادراتی برای شرکت‌ها، به‌منظور ورود و ماندگاری در بازارهای خارجی است. درنهایت این مقاله به‌صورت مفهومی با پشتیبانی عامل‌های هوشمند فرایند غنی‌سازی را به‌صورت خودکار بیان می‌کند.

پیشینه تحقیق

نتایج پژوهش [6] با عنوان «کسب و مدیریت دانش با استفاده از نرم‌افزارهای اجتماعی و فناوری‌های وب معنایی» پلتفرم knowbest، را بر اساس نرم‌افزار اجتماعی و ابزارهای وب معنایی برای مدیریت یک کلاس خاص از دانش ضمنی در سازمان‌ها ارائه می‌کند. این تحقیق به مسئله چگونگی استخراج و انتشار دانش ضمنی از طریق نرم‌افزارهای اجتماعی همچون ویکی‌ها، بلاگ‌ها و میکرو بلاگ‌ها می‌پردازد. در این پژوهش بیان می‌شود که این نوع دانش (ضمنی) پراکنده و بدون ساختار است و ایجاد راه‌هایی برای خلق ارزش از آن دشوار است. برای پرداختن به این مشکل، آن‌ها پلتفرم knowbest را پیشنهاد می‌کنند که نوآوری این تحقیق می باشد و با استفاده از فن‌آوری‌های وب معنایی آن را گسترش می‌دهد.

نتایج پژوهش [10] با عنوان «تحقیق بر روی استخراج دانش ضمنی مبتنی بر هستان‌شناسی برای شرکت هوافضا» روش‌های سنتی استخراج دانش ضمنی را معرفی کرده و مشکلات موجود در روش‌های سنتی را نیز بیان کرده است. مدلی که در این پژوهش ارائه‌شده با ترکیب ویژگی‌ها و کاربردهای هستان‌شناسی, بازنمایی دانش ضمنی مبتنی بر هستان‌شناسی برای یک شرکت هوافضایی[1] پیشنهاد شده است. با استفاده از این مدل, تحقیقات در طراحی کتابخانه هستان‌شناسی، استخراج محدودیت‌ها و خدمات دانشی انجام شده است. دانش تاکتیکی به‌دست‌آمده از این پژوهش را می‌توان استفاده مجدد کرد و راندمان تحقیق و توسعه را بهبود بخشید.

نتایج پژوهش [33] با عنوان «هستان‌شناسی و کاربردهای آن» بیانگر آن است که مهم‌ترین و متداول‌ترین انواع هستان‌شناسی عبارت‌اند از: هستان‌شناسی نمایش دانش، هستان‌شناسی عمومی، هستان‌شناسی سطح بالا، هستان‌شناسی دامنه، هستان‌شناسی حرفه (وظیفه)، هستان‌شناسی وظیفه-دامنه، هستان‌شناسی متد(روش) و هستان‌شناسی کاربرد. هستان‌شناسی فناوری‌های مدیریت دانش از نوع هستان‌شناسی دامنه است، بر همین اساس رویکرد هستان‌شناسی این مقاله که با هدف مدیریت دانش است به بررسی دامنه‌ای با محیطی تخصصی پرداخته که منجر به بهینه‌سازی در فرایندهای سازمان مورد بررسی می‌شود.

نتایج پژوهش [11] با عنوان «هستان‌شناسی سازمانی برای تعامل متقابل خدمت در سیستم‌های فیزیکی-سایبری-اجتماعی» شرکت را به‌عنوان یک سیستم فنی که در آن مؤلفه‌های اجتماعی تعبیه شده در نظر گرفته است. این مطالعه تحقیقاتی را در زمینه قابلیت هم‌کاری خدمات در سیستم‌های اجتماعی - سایبری که در شرکت‌ها تعبیه شده‌اند، ارائه می‌دهد. در این راستا، رویکردی که قادر به متحد ساختن مدل‌های مفهومی یک سیستم فیزیکی-

[1] Aerospace Enterprise

اجتماعی-سایبری است را از طریق هستان‌شناسی سازمانی با توجه به مفهوم تعیین وظایف، ارائه می‌دهد. نوآوری این مدل هستان‌شناسی، خدمات را با معناشناسی دامنه تأمین می‌کند و آن‌ها را از کار پیش‌بینی‌شده در موقعیت فعلی آگاه می‌کند.

نتایج پژوهش [7] با عنوان «مدل مدیریت دانش مبتنی بر هستان‌شناسی سازمانی برای پایگاه دانش سیستم پشتیبانی تصمیم ارزیابی وضعیت سازمان در بخش‌های سازمان‌های کوچک و متوسط» مدل مدیریت دانش مبتنی بر ایده اصلی هستان‌شناسی شرکت را ارائه کرده است. این مدل مبنای ساخت سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر دانش[1] (DSS KB) برای ارزیابی موقعیت شرکت‌ها در بخش SME[2] است. این مدل متشکل از یک چرخه از ایجاد ارزیابی موقعیت شرکت‌ها در فضای بالقوه ریسک-فعالیت است. طبقه‌بندی کلاس‌ها از پتانسیل و ریسک شرکت در زبان OWL (نرم‌افزار protege) ارائه شده است. پایگاه دانش سیستم پشتیبانی تصمیم ارائه شده در این مطالعه با روش استدلال مبتنی بر مورد (CBR) است.

پژوهش [5] با عنوان «یک رویکرد برای اکتساب دانش ضمنی مبتنی بر یک مدل هستان‌شناسی» رویکردی برای کسب دانش ضمنی بر اساس یک مدل هستان‌شناسی ارائه می‌دهد. در این مطالعه زیدات و ماریر از تکنیک‌های خود مقابله‌ای برای شناسایی عناصر ضمنی در فعالیت‌های بازیگران, مانند مفاهیم وضعیت, شناخت و دانستن که هستان‌شناسی را برای کسب دانش تشکیل می‌دهند, استفاده می‌کنند. این پژوهش دانش صریح و ضمنی را با استفاده از دو تکنیک، تصریح‌سازی و خود-مواجهه شناسایی و توصیف عناصر تشکیل‌دهنده فعالیت (عامل، دانش - چگونگی، موقعیت و یک ویدئو) و بازسازی فعالیت مورد مطالعه را در مدل هستان‌شناسی میسر می‌سازد.

نتایج پژوهش [12] تحت عنوان «یک مدل هستان‌شناسی به‌منظور تسهیل استدلال واکنشی در سیستم‌های چندعاملی در یک شبکه هوش تجاری» مفهوم شبکه هوش تجاری و هوش‌جمعی را با هم ادغام می‌کند تا به گروهی از افراد اجازه دهد تا به‌صورت جمعی اطلاعات مفیدی برای شرکتی تولید کنند که تصمیمات و استراتژی‌ها براساس آن اطلاعات اتخاذ می شوند. بااین‌حال، عملکرد هوش جمعی به دخالت انسان و واکنش او به تبادل تخصص و ایده‌ها ارتباط دارد. در این مقاله، یک پلتفرم بر اساس یک سیستم چندعاملی جهت ایجاد هوش‌جمعی در یک شبکه اطلاعاتی کسب‌وکار با استفاده از توانایی عوامل به دلیل هدایت متخصصان انسانی توسط فن‌آوری‌های وب معنایی پیشنهاد شده است. درنهایت در این تحقیق یک هستان‌شناسی به نام Onto-Agent طراحی و در protege از طریق یک مطالعه موردی بر اساس هوش رقابتی بخش بانکداری طراحی و اجرا شد.

در پژوهش [2] با عنوان »یک مدل ازعوامل[3] با استفاده از هستان‌شناسی‌ها و خدمات وب برای ایجاد و مدیریت شرکت‌های مجازی» یک مدل از عوامل برای ایجاد شرکت‌های مجازی معرفی شد. هسته این مدل مبتنی بر کاربرد هستان‌شناسی و خدمات وب است. این مدل تمام مراحل مربوط به چرخه عمر شرکت‌های مجازی را در نظر می‌گیرد. مدل پیشنهادی اساساً به‌عنوان یک مجموعه از گروه‌های عاملی سازمان‌دهی شده است که تحت مکانیسم‌های کار یکسانی قرار می‌گیرند و شرکای مختلف یک شرکت مجازی هستند. وظیفه اصلی این مدل کشف شرکا و ایجاد یک فرآیند مذاکره بین آن‌ها می باشد. انتخاب شرکا با بهره‌برداری هستان‌شناسی و توصیف خدمات وب تضمین می‌شود.

نتایج پژوهش [13] با عنوان «درک زنجیره بلوکی با استفاده از هستان‌شناسی سازمانی» یک هستان‌شناسی اولیه را در سه سطح توصیف می‌کند. به همین دلیل, از درک بهتر این تکنولوژی آشوبگر حمایت می‌کند. همچنین می‌تواند برای پشتیبانی از توسعه برنامه کاربردی مورداستفاده قرار گیرد, زیرا اول برنامه کاربردی را در سطح کسب‌وکار مشخص می‌کند. برای تعیین سطح کسب‌وکار با استفاده زبان‌های قراردادی و فرمت‌های گرافیکی, می‌توان از روش‌های مدل‌سازی ثابت استفاده کرد. در این مقاله, پژوهشگر قادر به ارزیابی وسیع هستان‌شناسی نشده؛ بنابراین مدل پیشنهادی باید به‌عنوان یک مدل اولیه دیده شود.

در پژوهش [1] با عنوان «مدل هستان‌شناسی برای بیرونی‌سازی دانش ضمنی در شرکت‌های فنی-اجتماعی» مدل هستان‌شناسی سازمانی راو و نایاک، الگوهای واقعی در بیرونی‌سازی دانش ضمنی متخصصان در یک سناریوی حل مسئله در یک شرکت بانکداری را انجام داده است؛ هدف این پژوهش ادغام جنبه‌های مختلف بیرونی‌سازی دانش ضمنی از طریق مدل هستان‌شناسی سازمانی است. مدلی که در این مطالعه بیان شده شامل دیدگاه‌های مفهومی و ارزیابی است. دیدگاه مفهومی شامل سه الگو به نام الگوی تراکنش, الگوی تراکنش گسترده و الگوی تعامل است که به‌طور مفهومی فرآیند بیرونی‌سازی را براساس مفاهیم هستان‌شناسی سازمانی مدل

[1] Decision Support System Knowledge Base

[2] Small Medium Enterprise

[3] Agents

می‌کند. با توجه به اینکه این تحقیق مدل هستان‌شناسی سازمان را در محدوده متخصصان سازمانی انجام داده‌اند، لذا در مدل هستان‌شناسی سازمانی این مقاله به حوزه‌های دیگر اعمال می‌شود که شامل مجموعه داده‌های بزرگ‌تر از متخصصان است.

در [14] با عنوان «اعتبارسنجی گردش کار گرید با استفاده از دانش ضمنی مبتنی بر هستان‌شناسی» چارچوب تحقیقاتی ارائه‌شده از سه بخش عمده تشکیل شده است: متخصصان حوزه سنجش از راه دور، پلتفرم کار گرید و سیستم دانش، که شامل اکتساب دانش، نمایش، تغییر و استنتاج است. فرآیند کسب دانش ضمنی دامنه باید از انتقال دانش ضمنی به دانش صریح حمایت کند. فرآیند مذکور دو مرحله اصلی دارد: ۱) استخراج دانش ضمنی دامنه و ۲) طبقه‌بندی دانش ضمنی دامنه. درنهایت، اطلاعات جمع‌آوری‌شده، مفاهیم و قواعد به یک هستان‌شناسی در یک ماشین در زبان OWL کدگذاری شده است که پایه دانش حوزه را تشکیل می‌دهد. نوآوری روش پیشنهادی لیو و همکاران برای کسب دانش ضمنی و نمایش مبتنی بر نوع خاصی از دانش ضمنی و کاربرد عینی آن است، زیرا دانش ضمنی اغلب با یک زمینه خاص یا کارکنان خاص مرتبط است و برای هر فرد کاملاً متفاوت است.

در پژوهش [15] با عنوان «تحلیل هستان‌شناسی سازمانی و شایستگی آن برای توسعه نرم‌افزار مبتنی بر مدل» پژوهشگر به بررسی برخی جنبه‌های اساسی هستان‌شناسی سازمانی پرداخته است. همچنین با مروری نظام‌مند بر ادبیات موجود نشان داده است که چگونه هستان‌شناسی سازمانی و روش‌شناسی مدل‌سازی آن برای توسعه نرم‌افزارهای سازمانی استفاده می‌شود. این پژوهش عناصر هستان‌شناسی سازمانی، مصنوعات مدل‌سازی آن را به‌عنوان اساس توسعه برنامه‌های رایانه‌ای تحلیل کرد. نقاط قوت و ضعف مختلف بر اساس هستان‌شناسی سازمانی شناسایی شدند. برای تکمیل این تحلیل با حقایق، مرور سیستماتیک متون EO/DEMO[1] انجام شد.

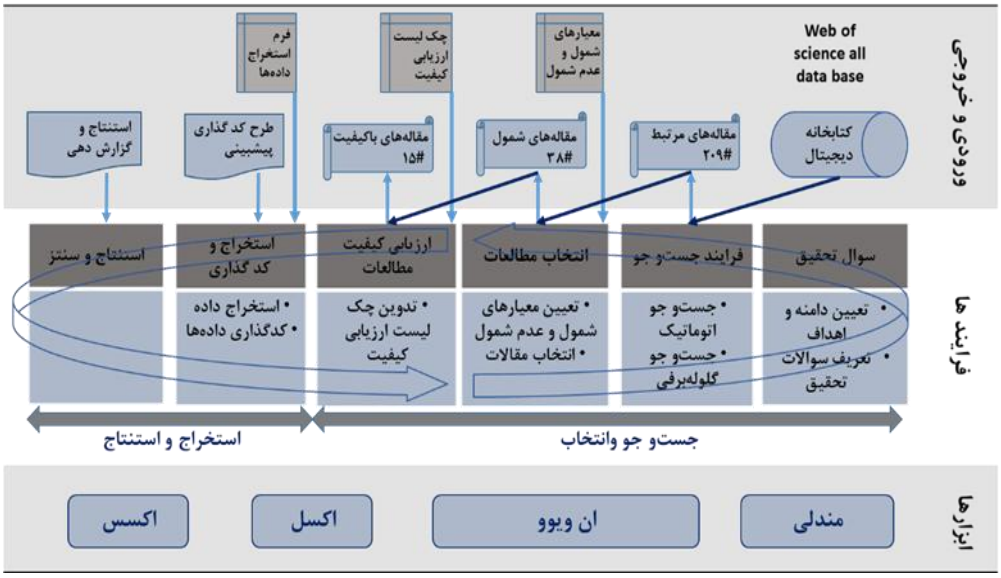
در پژوهش [16] با عنوان «نقشه دانش و هستان‌شناسی سازمانی برای بهبود بازمهندسی فرایند کسب و کار در بخش سلامت: یک مورد در بخش رادیولوژی» روشی مبتنی بر رویکرد علوم طراحی با ترکیب نقشه دانش، هستان‌شناسی سازمانی و به‌منظور پیدا کردن تراکنش‌های بدون ارزش‌افزوده و متعاقباً بازمهندسی آن‌ها برای افزایش بهره‌وری بهداشت و درمان ارائه کرد. در این تحقیق هستان‌شناسی سازمانی جزئیات و درک بهتر ماهیت پویای یک سازمان را ارائه می‌دهد که به‌عنوان اساس این مطالعه انتخاب شده است. این روش در بخش رادیولوژی انجام شده است. ارزیابی از طریق روش توصیفی با استفاده از چارچوب Moody و shank و مصاحبه با متخصصان مراقبت‌های بهداشتی انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که این روش، با حذف تراکنش‌های بدون ارزش‌افزوده کارآیی مراقبت بهداشتی را افزایش داده است.

در پژوهش [17] با عنوان «بررسی به‌کارگیری هستان‌شناسی در ساماندهی جریان دانش ضمنی سازمان» جهت جلوگیری از گم‌شدن دانش ضمنی و یا کشف نشدن این دانش و کمینه کردن مشکلات ناشی از ناسازگاری‌های معنایی و مفهومی، با روشی برای استخراج و سازمان‌دهی دانش ضمنی اقدام به بررسی هستان‌شناسی نموده که از سه لایه بازیابی معنایی، تفسیر معنایی و لایه فیزیکی برخوردار است؛ نتایج این مطالعه حاکی از آن است که با مرجع قرار دادن هستان‌شناسی می‌توان نیازمندی‌های اطلاعاتی فعالیت‌های سازمان، دانش ضمنی جمع‌آوری شده را به بالاترین سطح شفافیت رساند و قابلیت دسترسی را در سازمان افزایش داد.

۲- روش تحقیق

انتخاب روش تحقیق مناسب جهت نیل به اهداف، به ماهیت و موضوع تحقیق و امکانات اجرایی بستگی دارد [18]. امروزه برای استفاده بهینه از حجم بالای اطلاعات تولید شده توسط منابع مختلف و ارائه ترکیبی از شواهد به صورت خلاصه در یک بستر کاملا شفاف و از قبل برنامه ریزی شده، توجه بسیاری از پژوهشگران به جهت ارتقا کیفیت پژوهش خود به سمت رویکردهای نظام‌مند جلب شده است [19]. در این مقاله به علت نوظهور بودن موضوع تحقیق رویکرد نظام‌مند انتخاب شده است. بر اساس مطالعات به دست آمده در این مقاله و جست‌و جوی منابع متعدد شاهدی دال بر تحقیقی که به صورت خاص هستان‌شناسی و عامل‌های هوشمند را مورد بررسی قرار دهد، وجود نداشت؛ لذا مرور ادبی هستان‌شناسی و عامل‌های هوشمند برای شناسایی و استخراج مفاهیم مربوطه بین این دو حوزه علمی ارائه گردید. مرور ادبی نظام‌مند، یک روش شناسایی، ارزیابی و درک همه پژوهش‌های مرتبط با یک سوال پژوهش با حیطه موضوع یا پدیده مورد نظر می‌باشد [20] . دلایل انجام مرور نظام‌مند، خلاصه کردن شواهد موجود، تشخیص شکاف‌های پژوهش‌های فعلی و ارائه کردن یک چارچوب یا پیش زمینه است.فرایند این رویکرد مطابق شکل ۱ به اختصار ارائه می‌گردد.

[1] Design & Engineering Methodology for Organizations



شکل ۱. نقشه مرور نظام‌مند

تعیین پرسش پژوهش، مهم‌ترین بخش هر مرور سیستماتیک است. پرسش مرور، کل متدولوژی مرور سیستماتیک (فرایند جستجو، استخراج و تحلیل داده‌ها) را به پیش می‌برد؛ بدین‌صورت که در هر کدام از مراحل تحقیق تلاش می‌شود تا منطقی‌ترین و مطلوب‌ترین پاسخ به این سؤال داده شود؛ منابع مرتبط در فرایند جستجو شناسایی می‌شوند؛ داده‌های مناسب جهت پاسخ به سؤال‌ها استخراج می‌شوند و درنهایت این داده‌ها به‌گونه‌ای تحلیل می‌گردند تا بتوان به این سؤال پاسخ داد [21]؛ در این مرور نیز محقق پس از روشن ساختن الزام پژوهش در این زمینه تحقیقاتی خاص، تلاش می‌کند تا سؤالی را پایه و اساس این مرور قرار داده تا درنهایت پاسخی به چالشی علمی این پژوهش بیابد. لذا سؤال اصلی این تحقیق «عامل‌های هوشمند چه نقشی در تکامل و به‌روزرسانی هستان‌شناسی دارند؟» است.

در نخستین گام از انجام مرور سیستماتیک به شناسایی و جستجوی مطالعاتی پرداخته می‌شود، که در جهت پاسخ به سؤال پژوهش، به محقق کمک می‌نماید. در جست‌وجوی مقدماتی برای پیدا کردن تعداد هرچه بیشتر مطالعات اولیه، پایگاه‌های الکترونیکی، کتابخانه‌ای و گزارش‌های سازمانی راهبردی مشخص می‌شود تا بتوان جهت‌گیری اصلی در انجام مرور را به شیوه‌ای صحیح پایه‌ریزی نمود. رشته جست‌وجو و همچنین بازه زمانی (از ژانویه ۲۰۱۷ تا پایان سال ۲۰۲۱) در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. جست‌و جو اولیه منابع

پایگاه الکترونیکی مقالات	رشته جست‌و جو	تعداد بازیابی
Web of science All database	TOPIC[1]: (ontology,intelligent agents) Timespan: Last 5 years. Search language=English	۱۸۵
Web of science All database	TOPIC: (enterprise ontology, intelligent agents) Timespan: Last 5 years. Search language=English	۱۶

از آنجایی که برای انجام یک مرور سیستماتیک با کیفیت، نباید فقط به جست‌و جوی اتوماتیک و اولیه مطالعات، کفایت کرد تصمیم گرفته شد تا جستجوی گلوله برفی پیش رونده و بازگشتی انجام شود. در این مرحله جهت تکمیل فرایند شناسایی مقالات جست‌و جوی گلوله‌برفی به دو روش بازگشتی و پیش‌رونده صورت گرفت. در این مرحله از جست جو، جست‌و جوی بازگشتی و جست‌و جوی پیش‌رونده با پیروی و ایده برداری از پژوهش [22] برای افزایش اطمینان مرور ادبی نظام‌مند انجام شد؛ با استفاده از روش بازگشتی ۵ مقاله به دست آمد و از روش پیش‌رونده سه مقاله دیگر یافت شد [23].

بعد از جست‌و جوی مقالات، تصمیم بر این شد تا با محدود کردن مطالعات انتخاب بهتر و موثر صورت گیرد؛ یک سری معیارهای انتخاب مطالعه که مستقیما شواهدی برای پاسخ‌گویی به پرسش پژوهش فراهم می‌سازند و برای کاهش احتمال سوگیری مناسب می

[1] TOPIC= Title, Abstract, Author Keywords, Keywords Plus

باشند ، برای محدودکردن مطالعات انتخاب شدند [23] در اینجا معیارهای مورد استفاده برای تعیین این که آیا یک مقاله در مرور سیستماتیک گنجانده خواهد شد یا حذف می شود، بررسی می‌گردد.

نکته مهم در روش مرور نظام مند این است که با استفاده ازیک روش و ابزار معتبر و مطمئن و بر اساس معیارهای کیفی، کیفیت مطالعات مشمول مورد ارزیابی قرار گیرد؛ بنابراین جهت انجام هر چه بهتر مرورنظام مند، انتخاب یک روش و ابزار که بتواند اینکار را به درستی انجام دهد کار حساسی است و باید با دقت صورت پذیرد، بر همین اساس در این تحقیق یک چک لیست ارزیابی کیفیت با استفاده از ابزار چند پژوهش معتبر، که شامل ۷ آیتم و سوال است، تدوین شده است. در جدول زیر سوالاتی مربوط به ابعاد کیفی در سنجش مقالات آورده شده است تا در این خروجی مقالات با کیفیت مورد بررسی‌های عمیق تری قرار بگیرند. سوالات آورده شده در چک لیست زیر با ایده برداری از منابع آورده شده است، علاوه بر این در این چک لیست سعی شده جهت سوالات به سمت موضوع و زمینه تحقیقاتی سفارشی شود؛ که به شرح جدول ۳ می‌باشد.

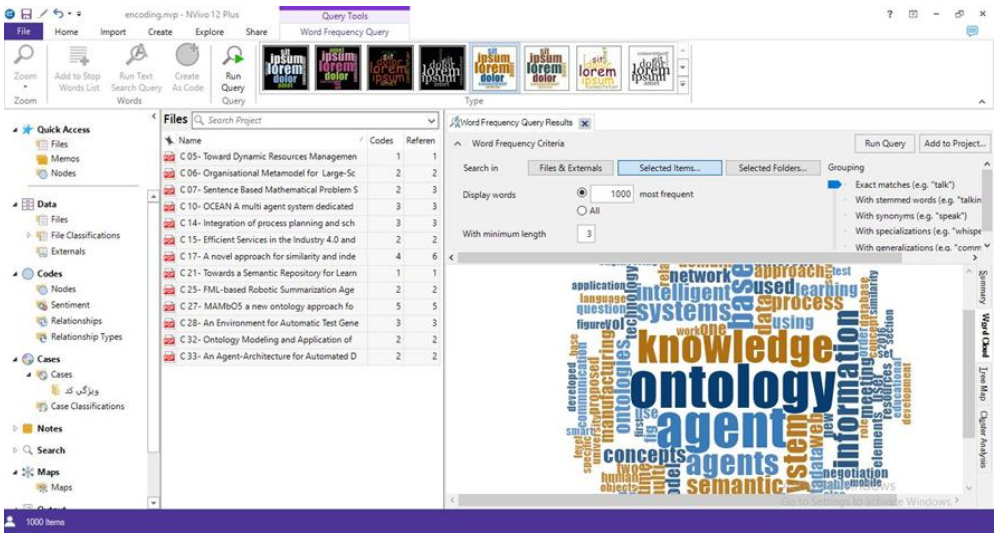
جدول ۲. انتخاب مقالات اولیه

معیار	معیارهای شمول
محتوا	مقاله‌هایی که تمرکز اصلی آنها بر غنی‌سازی هستان‌شناسی با استفاده از عامل‌های هوشمند باشد.
زبان	مقاله‌هایی که به زبان انگلیسی نوشته شده‌اند.
تاریخ انتشار	مقاله‌هایی که از ژانویه ۲۰۱۶ چاپ و منتشر شده اند.
نوع سند	مقاله‌هایی که به صورت ژورنال و کنفرانس چاپ شده باشند.
دسترسی به متن	امکان دسترسی به مقاله وجود داشته باشد.

ارزیابی کیفی مقالات در نرم‌افزار مندلی رتبه‌بندی گردید، در ادامه فرایند، برای انجام تجزیه و تحلیل داده‌ها و متون از نرم‌افزار ان‌ویوو استفاده شده است. به این ترتیب که داده‌ها (مقاله‌های مرتبط) وارد این نرم‌افزار شده و مفاهیم اولیه تعریف می‌شوند؛ بعد از این مرحله امکان کدگذاری متن وجود دارد که در نهایت از این نرم‌افزار برای بررسی کدهای موجود و ارتباط آن‌ها استفاده شده است. از ویژگی‌های قابل توجه این نرم‌افزار در جهت هر چه بهتر کردن این تحلیل می‌توان به قابلیت سازمان‌دهی اطلاعات و جست‌و جوی واژه در تمام داده‌های موجود در نرم‌افزار اشاره کرد؛ همچنین در این نرم‌افزار امکاناتی برای مدلسازی و نمایش مدل با اشکال هندسی هم وجود دارد. در شکل ۲، تصویری از لیست مقالات با کیفیت و نقشه کلمات ابری مستخرج شده از متن مقالات آورده شده است:

جدول ۳. معیارهای کیفی انتخاب مقالات

ردیف	سوال	پاسخ
۱	آیا منطقی وجود دارد که چرا این مطالعه انجام شده است؟ [24], [25]	بلی، خیر، تاحدودی
۲	آیا اهداف کار پژوهش به روشنی بیان شده است؟ [24], [25]	بلی، خیر، تاحدودی
۳	آیا بحث‌هایی در مورد نتایج این مطالعه وجود دارد؟ [24], [25]	بلی، خیر، تاحدودی
۴	آیا مطالعات اولیه ما درباره اعتبار و محدودیت‌های یافته‌های خود به طور صریح گزارش کرده‌اند؟ [24][25]	بلی، خیر، تاحدودی
۵	ایا مفاهیم و روابط به خوبی مشخص شده است؟ [26]	بلی، خیر، تاحدودی
۶	آیا ارزش افزوده را به زمینه تحقیقاتی خود اضافه کرده است؟ [24]–[26]	بلی، خیر، تاحدودی
۷	آیا مطالعه از ابزار و زبان معتبر برای توسعه هستان‌شناسی استفاده کرده است؟ [27]	بلی، خیر، تاحدودی



شکل ۲. نقشه ابری کلمه‌های مستخرج شده از متن مقاله‌ها

در این تحقیق ۳۸ مقاله به عنوان داده وارد نرم‌افزار شده است. مفاهیم اولیه بر اساس مرور منابع معتبر و مرتبط در این حوزه به طور غیر سیستماتیک شناسایی شدند. قابلیت تعامل‌پذیری، قابلیت بازیابی، حاشیه‌نویسی و بازیابی اطلاعات، همراستاسازی مفاهیم و روابط هستان‌شناسی، حاشیه‌نویسی هستان‌شناسی، مفهوم‌سازی و سازمان‌دهی هستان‌شناسی، مدیریت پیکربندی هستان‌شناسی، سفارشی‌سازی هستان‌شناسی، عیب‌یابی هستان‌شناسی، مستندسازی هستان‌شناسی، استخراج و استنباط هستان‌شناسی، تسهیلگری هستان‌شناسی، گسترش و توسعه وسعت هستان‌شناسی، یادگیری هستان‌شناسی، نگاشت هستان‌شناسی، تطبیق روابط یا موجودیت‌های هستان‌شناسی، ماژول‌بندی هستان‌شناسی، جمعیت هستان‌شناسی، بازمهندسی هستان‌شناسی، ساختاردهی مجدد هستان‌شناسی و خلاصه‌نویسی هستان‌شناسی به‌عنوان گره‌ها در نظر گرفته می‌شود.

فرایند کدگذاری:

مفهوم پردازی از داده‌های استخراج شده از منابع اولین قدم در تجزیه و تحلیل است. در این مقاله تلاش می‌شود تا در احصای نکات کلیدی با روشی مشخص، نام‌گذاری یا به عبارت بهتر کدگذاری مقوله‌ها به‌خوبی انجام شود. با توجه به روش پیشنهادی

در مقاله [28] بر اساس ۳ نوع کدگذاری این مرحله انجام‌شده است، که عبارت‌اند از:

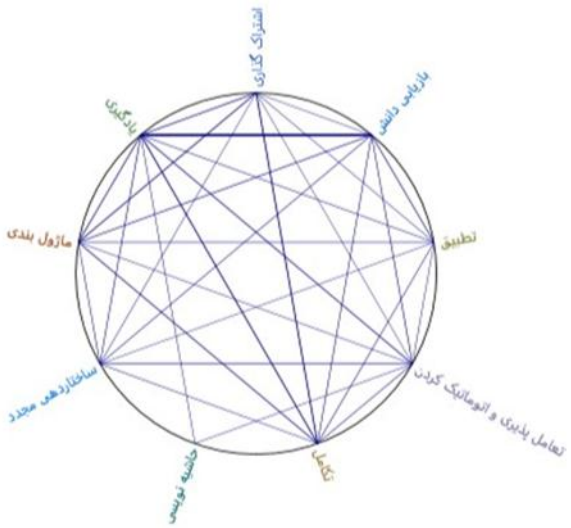
کدگذاری باز ---- کدگذاری محوری --- کدگذاری انتخابی

نتایج فرایند کدگذاری سه مرحله‌ای در مرور نظام‌مند در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.

بر اساس روشی ساختاریافته، بررسی و ارزیابی مقالات صورت گرفت و بعد از انجام مرور، نُه مفهوم اصلی و مرتبط شناسایی شدند که شامل: «بازیابی دانش، حاشیه‌نویسی هستان‌شناسی، یادگیری هستان‌شناسی، تطبیق روابط یا موجودیت‌های هستان‌شناسی، ماژول‌بندی هستان‌شناسی، ساختاردهی مجدد هستان‌شناسی، تکامل هستان‌شناسی، تعامل‌پذیری و اشتراک‌گذاری دانش» است.

تفسیر این مفاهیم به ارائه توضیحاتی می‌پردازد که تعامل بین عامل‌های هوشمند و هستان‌شناسی را بیان می‌کند و با هدف غنی‌سازی هستان‌شناسی انجام می‌گیرد. در شکل ۴ که برگرفته از نرم‌افزار ان-ویوو است، کدهای نهایی که از مرور نظام‌مند استخراج گردید نمایش داده شده است.

شکل ۳. نمودار فرایند کدگذاری مقالات



شکل ۴. کدهای استخراج شده از مرور نظام‌مند

در بخش‌های بعدی مقاله، هستان‌شناسی پیشنهادی ارائه می‌گردد که سپس در ادامه آن، با مصاحبه و مطالعه موردی بر اساس داده‌های واقعیت هستان‌شناسی ساخته می‌شود. مطالعه موردی شامل نوعی بررسی تفصیلی می باشد که همراه با داده‌های اطلاعاتی از یک یا چند سازمان یا از گروه‌های سازمانی است که با هدف ارائه تحلیلی از زمینه و فرایندهای دخیل در پدیده مورد بررسی انجام می‌شود و به عنوان یک استراتژی پژوهشی نامیده می‌شود، بنابراین در مطالعه موردی بازیگران صادرات محصولات دانش بنیان کشور، نهادهای تاثیرگذاردرفرایند صادرات محصولات دانش‌بنیان بیان می‌شود.

انتخاب حجم نمونه که با استفاده از آن در راستای دستاوردهای مرور نظام‌مند، مورد مطالعه بررسی می‌شود با ایده برداری از پژوهش [29] انجام می‌پذیرد. لینکلن و گوبا[۱] اظهار می‌کنند، در یک مطالعه که با دقت هدایت شده است و در آن انتخاب نمونه به صورت تکاملی بوده است، می‌توان با حدود ۱۲ شرکت کننده به نقطه اشباع رسید و احتمالاً این تعداد بیشتر از ۲۰ عدد نخواهد شد. داگلاس[۲] [30] در مطالعه خود تخمین زده است که در مصاحبه‌های عمیق، قبل از

[۱] Lincoln & Guba

[۲] Douglas

رسیدن به نقطه اشباع به ۲۵ نفر شرکت کننده نیاز خواهد بود. در عمل، مفاهیم اشباع اطلاعاتی و بازده نزولی که در نمونه‌گیری مطرح می‌شوند بایستی با محدودیت‌های زمان و سطح دسترسی در نقطه تعادل قرار گیرند؛ در این مقاله از ۱۵ نفر از مدیران، معاونین و کارشناسان خبره مربوط به صادرات محصولات دانش بنیان به عنوان نمونه استفاد شده است.

مصاحبه، یکی دیگر از انواع پژوهش است که با استفاده از گفتگویی هدفمند، مصاحبه گر پرسش‌های از پیش تعیین شده ای را می‌پرسد و پاسخگو به آنها جواب می‌دهد که این عمل به منظور کسب اطلاعات در زمینه موضوع یا حوزه مورد تحقیق انجام می‌شود. این روش ابزاری است که امکان بررسی موضوعات پیچیده، پیگیری پاسخ‌ها یا پیدا کردن علل آن و اطمینان یافتن از درک سوال از سوی پاسخگو را فراهم می‌سازد. در پژوهش کیفی مصاحبه شیوه‌ای است که هدف آن گردآوری توصیف‌هایی در مورد جهان واقعی مصاحبه شونده با توجه به تفسیر معنای پدیده توصیفی است.

طراحی اولیه سوال‌های مصاحبه بخش مهمی از روند پژوهش است و نیاز به توجه دقیق دارد. اگر سوال‌های نامناسب مطرح شوند باعث می‌شود تا زمان از دست برود و پاسخ دهندگان در این شرایط کم انگیزه شده و تمایلی به ادامه مصاحبه نخواهند داشت؛ لذا در این پژوهش سوال‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند، سوال‌هایی که در پژوهش‌های هستان‌شناسی و عامل‌های هوشمند جهت ارزیابی استفاده می‌شوند و سوال‌هایی با توجه به مدل مفهومی هستان‌شناسی و عامل‌های هوشمند طراحی و پرسیده شده است.

بخش اول مصاحبه بررسی می‌کند که آیا مصاحبه شونده‌ها و سازمان از هستان‌شناسی در سازمان استفاده می‌کنند. طبق نتیجه ای که از بررسی مصاحبه‌ها به دست آمده، سازمان‌ها از هستان‌شناسی بعنوان پایگاه دانشی در سازمان استفاده نمی‌کنند و دلیل آن واضح است زیرا این مفهوم به عنوان یک موضوع جدید علمی در وب معنایی است و هنوز شناخت کامل نسبت به این مفهوم در این زمینه ایجاد نشده است. در شکل ۵ تحلیلی با استفاده از نتایج مصاحبه آورده شده است.

جدول ۴. سوالات مصاحبه

قسمت اول	**جامعیت**	آیا هستان‌شناسی شامل تمام موجودیت‌های تاثیرگذار در صادرات است؟
	سادگی	آیا هستان‌شناسی شامل حداقل موجودیت‌ها و روابط است؟
	انعطاف‌پذیری	آیا موجودیت‌های هستان‌شناسی و مسیر صادراتی با تغییر آیین‌نامه‌ها قابل تغییر است؟
	یکپارچگی	آیا هستان‌شناسی دامنه مورد بررسی با بقیه بخش‌های سازمان سازگار است؟
	قابل درک بودن	آیا مفاهیم (موجودیت‌ها) و روابط به سادگی قابل درک است؟
	قابل پیاده‌سازی	آیا می‌توان هستان‌شناسی موردنظر را با شرایط موجود اجرا کرد؟
	صحت	آیا موجودیت‌ها و روابط معنایی هستان‌شناسی مطابق با واقعیت است؟
قسمت دوم	به نظر شما چه مفهومی نادیده گرفته شده است؟	
	به نظر شما چه مفهومی نباید در نظر گرفته شود؟	
	چه روابطی بین موجودیت‌های هستان‌شناسی ارائه شده وجود دارد؟	
	آیا این هستان‌شناسی به شما و دیگر مدیران در تصمیم‌گیری کمک می‌کند؟	
	به نظر شما آیا هستان‌شناسی می‌تواند راهنمای خوبی برای توسعه صادرات دانش‌بنیان شود؟	
	آیا شما نظر دیگری دارید؟	

	شناخت موجودیت‌های هستان‌شناسی	شناخت روابط هستان‌شناسی	Q1 جامعیت	Q2 سادگی	Q3 انعطاف‌پذیری	Q4 یکپارچگی	Q5 قابل درک بودن	Q6 قابل پیاده‌سازی	Q7 صحت
مصاحبه‌شونده ۱	0	0	4	2	3	2	2	4	5
مصاحبه‌شونده ۲	0	0	4	2	4	3	3	4	5
مصاحبه‌شونده ۳	زیاد	کم	5	4	4	3	4	5	5
مصاحبه‌شونده ۵	کم	0	4	4	3	3	4	4	5
مصاحبه‌شونده ۴	زیاد	کم	5	4	4	2	4	4	5
مصاحبه‌شونده ۶	0	0	4	2	3	3	4	5	5
مصاحبه‌شونده ۷	کم	کم	5	3	5	4	5	4	5
مصاحبه‌شونده ۸	کم	0	5	3	5	4	5	3	5
مصاحبه‌شونده ۹	کم	0	4	3	3	4	5	4	5
مصاحبه‌شونده ۱۰	کم	0	3	2	4	3	5	4	5
مصاحبه‌شونده ۱۱	زیاد	کم	4	3	5	3	4	3	5
مصاحبه‌شونده ۱۲	کم	0	5	3	4	4	4	4	4
مصاحبه‌شونده ۱۳	کم	0	3	3	3	3	4	5	5
مصاحبه‌شونده ۱۴	کم	0	5	3	3	4	5	4	5
مصاحبه‌شونده ۱۵	کم	کم	5	3	4	3	5	4	5

شکل ۵. تحلیل با استفاده از نتایج مصاحبه

همچنین در این پژوهش جهت توصیف موجودیت‌های هستان‌شناسی با عنوان بازیگران صادرات محصولات دانش بنیان کشور، حدود ۱۰ سند راهبردی در معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری و اتاق بازرگانی کشور و همچنین حدود ۱۴ آیین‌نامه اجرایی در کریدور توسعه صادرات و صندوق توسعه صادرات بررسی شد و با تعداد زیادی از شرکت‌های دانش بنیان قریب به ۸۰ شرکت مذاکره به عمل آمد تا به طور کاملا مرتبط و اختصاصی موجودیت‌های این زمینه احصاء شود. از میان منابع اطلاعاتی مختلف جهت تکمیل و دسته‌بندی هر چه بهتر با خبرگان در این زمینه مصاحبه شده است؛ سپس بعد از نهایی شدن موجودیت‌های تاثیرگذار در صادرات محصولات دانش‌بنیان، نهادها و ارگان‌های مربوطه مشخص گردید.

رویکردهای توسعه‌ی هستان‌شناسی می‌تواند دستی، با استفاده از ابزار مهندسی هستان‌شناسی، نیمه خودکار و یا خودکار باشد. هستان‌شناسی بازیگران صادرات محصولات دانش بنیان با استفاده از ابزار مهندسی هستان‌شناسی به نام (Protégé) صورت گرفته است. در این مقاله، از آخرین نسخه‌ی نرم‌افزار یعنی (Protégé ۵-۵)، برای توسعه هستان‌شناسی استفاده شده است. این نرم‌افزار، ایجاد هستان‌شناسی‌های OWL را پشتیبانی می‌کند تا بتواند از قدرت توصیف‌پذیری و عملگرهای غنی این زبان برای ساخت هستان‌شناسی‌های خود بهره‌مند شود [31].

روش‌های متعددی برای ساخت هستان‌شناسی معرفی شده است؛ از جمله روش‌های ساخت می‌توان به سایک[۱]، آسکولد و کینگ[۲]، سنسوس[۳]، کاکتوس[۴]، آنتونالج[۵] و نوی[۶] اشاره کرد. هر یک از روش‌ها گام‌هایی را برای ساخت هستان‌شناسی ارائه می‌کنند، یکی از این روش‌ها که تناسب بیشتری با موضوع تحقیق داشته و از آن استفاده شده است، روش‌شناسی «نوی» است [32]. گام‌های این روش عبارتند از:

۱. تعیین حوزه و دامنه‌ی هستان‌شناسی (دامنه، دلیل استفاده)
۲. در نظر گرفتن امکان استفاده مجدد از هستان‌شناسی‌های موجود
۳. برشماری اصطلاحات مهم هستان‌شناسی (ترم‌ها، ویژگی‌ها و دانش ما در مورد آنها)

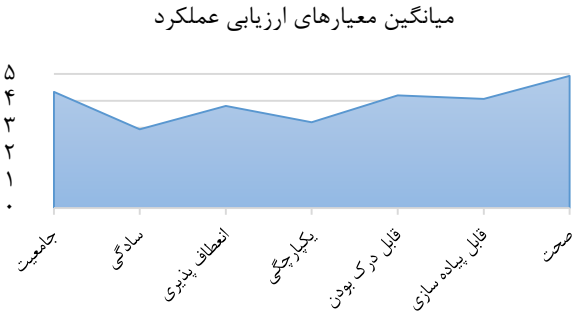
[۱] cyc
[۲] Uschold & king
[۳] Sensus
[۴] Kactus
[۵] On-to-knowledge
[۶] Noy

۴. تعریف کلاس‌ها و سلسله مراتب آن‌ها (به صورت بالا به پایین و پایین به بالا)
۵. تولید نمونه‌ها

۳- نتایج تحقیق

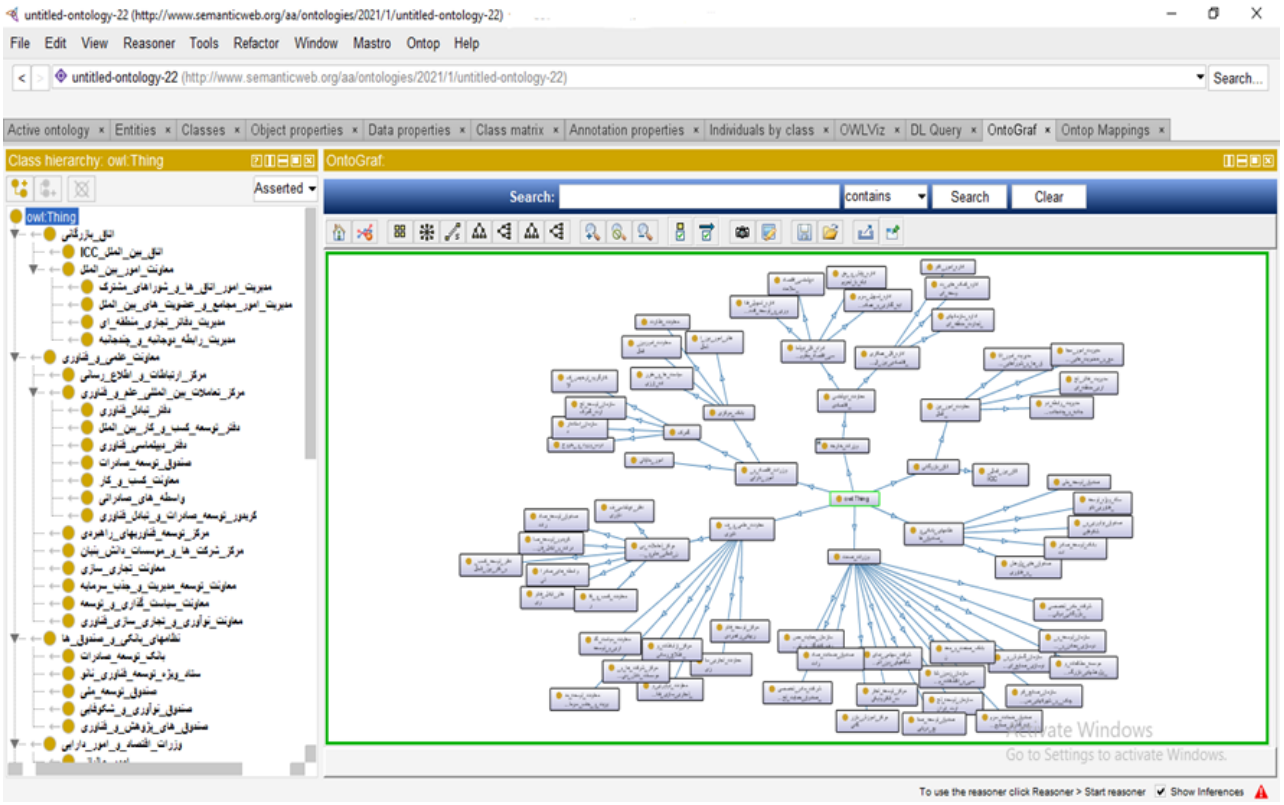
تجزیه و تحلیل داده‌ها برای بررسی سوال‌های پژوهش از اهمیت بسزایی برخوردار است زیرا نشان‌دهنده تلاش‌ها و زحمات فراوان محقق است و به عنوان بخشی از فرایند پژوهش علمی، یکی از پایه‌های اصلی پژوهش به شمار می‌رود که به وسیله آن کلیه فعالیت‌های پژوهشی تا رسیدن به یک نتیجه، کنترل و هدایت می‌شوند. پس از تعیین روش پژوهش و جمع آوری داده‌های مورد نیاز، پژوهشگر باید بسته به نوع مسئله با تکنیک‌های مناسب در صدد تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری شده و پاسخ به سؤالات پژوهش باشد؛ آنچه که مهم است این است که پژوهشگر باید اطلاعات و داده‌ها را در مسیر هدف پژوهش و پاسخ به سؤالات پژوهش با استفاده از داده‌ها تجزیه و تحلیل کند؛ لذا در این پژوهش با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌ها از منابع علمی و فضای عملی، منطقی‌ترین و صحیح‌ترین پاسخ در سطح مفهومی برای سؤالات پژوهش آورده شده است.

پس از انجام مصاحبه با توجه به معیارهای ارزیابی مدل پاسخ داده شده توسط مصاحبه‌شوندگان، میانگین معیارها به‌صورت نمودار زیر است. مدل پیشنهاد شده معیار جامعیت، قابل درک بودن، قابل پیاده‌سازی و صحت را پوشش می‌دهد، معیار انعطاف‌پذیری را در حد متوسط، اما معیار قابل سادگی و یکپارچگی آن پایین است.



شکل ۶. میانگین معیارهای ارزیابی عملکرد

در نهایت با بررسی‌های به عمل آمده از مصاحبه با خبرگان و همچنین تحقیقات میدانی، هستان‌شناسی مربوط به بازیگران صادرات محصولات دانش بنیان کشور به شرح زیر در نرم‌افزار پروتج[1] توسعه داده شد.



شکل ۷. هستان‌شناسی سازمانی بازیگران صادرات محصولات دانش بنیان

[1] Protégé Software

در این هستان‌شناسی سعی بر آن شده تا تمامی موجودیت‌های تأثیرگذار در فرایند صادرات محصولات به دیگر کشورها با دقت و شفافیت احصا گردد، از طرفی به دلیل اینکه محصولات دانش‌بنیان از تنوع زیادی در صنایع مختلف برخوردار است لذا این هستان‌شناسی، یک هستان‌شناسی جامع با در نظر گرفتن تمامی صنایع مختلف در صادرات محصولاتشان ایجاد شده است. همان‌طور که سابقاً بیان شد تصویر بالا از نرم‌افزار پروتج است که موجودیت‌ها و روابط بین موجودیت‌ها را بازنمایی می‌کند. یکی از تصمیمات مهم در فرایند ساخت هستان‌شناسی انتخاب ابزار ویرایش و تدوین هستان‌شناسی است؛ این پارامتر روی چرخه حیات، کیفیت و استانداردسازی آن تأثیر بسزایی دارد. از نرم‌افزار پروتج می‌توان به‌عنوان محیط ویرایش و توسعه هستان‌شناسی استفاده کرد. محیط پروتج با تعیین کلاس‌ها، سلسله مراتب آن‌ها و نمونه‌های عضو هر کلاس، هستان‌شناسی را بهتر توصیف کند. این محیط امکان توسعه هستان‌شناسی یک حوزه را از طریق ابزارهای متعدد مدل‌سازی به سهولت فراهم می‌کند و می‌توان به شیوه کاملاً بصری و بدون نیاز به درگیری با جزئیات قالب‌ها، به ساخت، دست‌کاری اجزاء و پشتیبانی هستان‌شناسی پرداخت. طراحی هستان‌شناسی با استفاده از این نرم‌افزار، در دو محیط ویرایشی Frames Protégé و Protégé-OWL امکان‌پذیر است. ویرایش هستان‌شناسی به وسیله Protégé-OWL که هستان‌شناسی‌های مبتنی بر قاب را مطابق با پروتکل OKBC رائه می‌دهد، به طراحان این امکان را می‌دهد تا هستان‌شناسی‌های فعال را مبتنی بر وب معنایی توسعه دهند.

در ابتدای تشریح کدهای مستخرج شده نیاز است تا تعریفی مختصر از عامل‌های هوشمند ارائه شود تا بتوانیم وجه اشتراکی که درنهایت منجر به غنی‌سازی هستان‌شناسی می‌شود به‌طور مطلوبی تشریح گردد. هر چیزی که محیط خود را از طریق حسگرها درک کند و از طریق اقدام گرها در آن محیط عمل نماید، یک عامل است.

وظیفه اصلی در ایجاد عامل، طراحی برنامه عامل می‌باشد؛ این کار به معنای طراحی تابع عاملی است که رشته مشاهدات را به یک عمل نگاشت کند. تابع عامل یک توصیف ریاضی خلاصه است و شامل جزئیات پیاده‌سازی نمی‌باشد. درحالی‌که برنامه عامل، پیاده‌سازی این تابع روی قسمتی از دستگاه‌های محاسباتی که معماری نامیده می‌شود، می‌باشد. معماری، ابتدا مشاهدات و ادراکات را از حسگرها می‌گیرد و برای برنامه‌های عامل، قابل دسترس می‌سازد [37]. عامل‌های هوشمند به‌عنوان عناصر ساختاری و نقش‌هایی به جهت غنی‌سازی و به‌روزرسانی هستان‌شناسی در اینجا تعریف می‌شوند به‌منظور درک بهتر راجع به عامل‌ها انواع عامل‌ها و ویژگی‌های عامل‌ها به‌اختصار توضیح داده می‌شود.

عامل‌های هوشمند اجزای پویایی هستند که وظایف محول شده از سوی کاربر خود را، با برقراری تعاملات به انجام می‌رسانند. برخی از مهم‌ترین خصوصیات و مشخصه‌های اصلی این عامل‌ها عبارت‌اند از: استقلال یا خودمختاری، قابلیت پیش بینی، قابلیت همکاری، قابلیت استدلا، رفتارهای تطبیق پذیر، قابلیت کنترل کنندگی و قابلیت تکامل برای به‌کارگیری مؤثر و کارآمد عامل‌های هوشمند در به‌روزرسانی و غنی‌سازی تطبیق، بهبود و توسعه آن با تغییرات و گسترش موجودیت‌ها و فرایندها، نیاز است تا تابع ادراکی، خصوصیات و رفتار آن‌ها بررسی‌شده و بر اساس شرایط اصلاح و تکمیل شوند.

در این تبادلات برخی از این عامل‌های هوشمند بر اساس وظایف و مأموریت خود در جستجو و انتخاب یا حذف موجودیت‌ها توسعه می‌یابد و برخی دیگر ارتباط میان موجودیت‌ها با یکدیگر در روابط درون هستان‌شناسی را پایش می‌نمایند. نهادهای موثر که بازیگران صادرات محصولات دانش بنیان خوانده شده در مورد مطالعه را می‌توان به عنوان یک عامل هوشمند با ویژگی‌های بیان شده از قابلیت‌های آن در نظر گرفت.

با بررسی تراز تجاری ایران در اسناد سازمان توسعه تجارت این نتیجه حاصل شد که تحریم‌های ظالمانه چند سالی است تأثیر بسزایی بر بدنه اقتصاد کشور گذاشته است و با توجه به محدودیت‌های گسترده در ابعاد گوناگون تجارت خارجی کشور، بازار اکثر محصولات را به تولیدکنندگان دیگر کشورها سپرده است. لذا توانمندسازی اکوسیستم دانش‌بنیان[1] در صادرات فرصت‌های رشد و توسعه برای شرکت‌ها را ایجاد می‌کند. با گسترش سطح دسترسی به بازارهای خارجی، شرکت‌ها می‌توانند به سطح بالاتری از تولید برسد. این امر باعث کاهش بهای تمام‌شده واحد و دستیابی به نرخ‌های سود بالاتر می‌شود. صادرات فرصت‌های ایجاد تنوع در بازار را برای شرکت‌ها ایجاد می‌کند. به‌علاوه به شرکت‌ها اجازه بهره‌برداری از نرخ‌های رشد متفاوت در بازارهای گوناگون را داده و وابستگی شرکت به یک بازار خاص را کاهش می‌دهد. صادرات فرصت یادگیری به‌واسطه وجود رقابت را برای شرکت‌ها فراهم کرده و باعث می‌شود شرکت‌ها توانایی بقا در محیط‌های غیر آشنا و غریبه

[1] محصولات دانش‌بنیان محصولات تولید شده یک تیم تحقیق و توسعه به پشتوانه دانش فنی و تکنولوژی بروز دنیا است.

را به‌دست آورند. به دلیل اهمیت صادرات، دولت‌ها معمولاً اقدام به حمایت از فعالیت‌های صادراتی شرکت‌ها با به‌کارگیری مشوق‌ها و برنامه‌های حمایتی می‌کنند که به برنامه‌های ترفیع معروف هستند، در کشور نیز سالیانه مبالغ قابل‌توجهی صرف برنامه‌های تشویق صادرات می‌شود. با این وجود، چند دهه است که راهبرد تشویق صادرات به‌عنوان یکی از راهبردهای اصلی در راستای سیاست کلان رشد اقتصادی در دستور کار دولت‌های ایرانی قرار داشته و برنامه‌ها و فعالیت‌های متعددی نیز در این راستا انجام شده است، بررسی‌ها نشان می‌دهد که ایران با وجود برخورداری از پتانسیل‌های بالای صادراتی، سهم کمی از بازارهای بین‌المللی را در اختیار دارد و اگرچه از زمان تدوین برنامه سوم توسعه، صادرات ایران روند صعودی به خود گرفته است، اما هنوز فاصله زیادی با شرایط مطلوب وجود دارد.

ارتقا صادرات شرکت‌ها در حوزه دانش‌بنیان نقش مهمی را در اقتصاد ملی کشور ایفا می‌کند. بنابراین چنین نتیجه‌گیری می‌شود که لازمه این ارتقا با توجه به مشکلات و موانع بیان‌شده این است که شرکت‌های دانش‌بنیان با شناخت کامل از موجودیت‌های تأثیرگذار در امر صادرات بتوانند در مسیر صادراتی فعالیت نمایند و از پتانسیل‌های موجود به‌خوبی استفاده کنند که نتیجه این امر علاوه بر توسعه بازار محصولات دانش‌بنیان و افزایش تولیدات این محصولات برای شرکت‌ها می‌تواند بهبود شاخص‌های کلان همچون اشتغال‌زایی، توسعه پایدار، رونق صنایع مختلف و ... مؤثر باشد.

در این بخش از مقاله فرایند غنی‌سازی و به‌روزرسانی هستان‌شناسی با استفاده از قابلیت‌های عامل‌های هوشمند ارائه می‌گردد. برای این منظور مطالعات متعددی بررسی گردید که نتایج این بررسی بدین‌صورت شد که برای انجام این کار ابتدا بستری مناسب انتخاب گردد. فضای برنامه‌نویسی پایتون دارای محیطی منعطف برای رسیدن به این مقصود است. در برنامه‌نویسی پایتون اولین قدم برای انجام این‌کار فراخوانی فایل هستان‌شناسی توسعه داده‌شده است که می‌توان آن را به‌وسیله کتابخانه Owlready انجام داد. با استفاده از این کتابخانه می‌توان هستی‌شناسی‌ها را بارگذاری، اصلاح و ذخیره کرد. با توجه به این‌که هستان‌شناسی در محیط نرم‌افزار Protégé توسعه داده شده است لذا فرمت فایل باید با پسوند owl. در بستر پایتون فراخوانی شود؛ این فراخوانی باعث می‌شود تا هستان‌شناسی به‌صورت صفحه‌ی کد پایتون در دسترس باشد، به‌گونه‌ای که موجودیت‌های هستی‌شناسی و نمونه‌ها به عنوان اشیاء در بستر پایتون قرار بگیرند و بتوان تغییرات را بر روی فایل مربوطه اعمال کرد؛ از طرفی برای خودکارسازی تغییرات، بر روی هستان‌شناسی نیاز است تا عامل هوشمندی توسعه داده شود که این عمل را انجام دهد. در زبان برنامه‌نویسی پایتون با استفاده از الگوریتم‌های تقویتی می‌توان عامل‌های هوشمند را سفارشی‌سازی و بر اساس نیاز کاربری توسعه داد تا با استفاده از قابلیت‌های آن‌ها عمل خودکارسازی انجام شود. تمامی مفاهیم استخراج‌شده از مرور نظام‌مند که ذیل غنی‌سازی و به‌روزرسانی هستان‌شناسی هستند از طریق کتابخانه owlready و الگوریتم‌های تقویتی هوش مصنوعی قابلیت اجرا است.

ارزیابی هستان‌شناسی، به‌منظور تعیین مناسب بودن آن برای یک دامنه خاص و استفاده از آن در کاربردی خاص ضروری است؛ لذا با توجه به اینکه تاکنون فعالیتی مبنی بر ایجاد هستان‌شناسی در این زمینه انجام‌نشده است، لذا از رویکرد کاربرد/وظیفه‌محور[1] برای ارزیابی هستان‌شناسی استفاده شد تا بتوان مناسب‌ترین هستان‌شناسی برای عملکرد مربوطه انتخاب شود. این رویکرد، هستان‌شناسی را بر اساس قابلیت‌ها و توانایی‌های آن در تکمیل وظایف و عملکردها ارزیابی می‌کند. با استفاده از این رویکرد می‌توان به روشی کمّی در مورد تناسب هستان‌شناسی برای انجام فعالیت یا وظیفه‌ای خاص، قضاوت کرد و این کار از طریق بررسی و ارزیابی عملکرد آن هستان‌شناسی در بافت آن فعالیت صورت می‌گیرد. به گفته [34] یک هستان‌شناسی ممکن است در انواع فعالیت‌ها و وظایف مورداستفاده قرار گیرد، نتیجه آن فعالیت با عملکرد خاص ممکن است تا حدی به هستان‌شناسی انتخاب‌شده در آن فعالیت، وابسته باشد. درنتیجه می‌توان گفت یک هستان‌شناسی خوب و باکیفیت آن است که برای عملکرد و فعالیتی خاص، نتایج و پاسخ‌های مؤثری ارائه شود. بنابراین هستان‌شناسی‌ها ممکن است از طریق استفاده و به‌کارگیری آن‌ها در عملکردی خاص و ارزیابی نتایج آن عملکرد، مورد ارزیابی قرار گیرند. [35] برای ارزیابی و اندازه‌گیری میزان تأثیر هستان‌شناسی در عملکرد مربوط (که نتیجه آن به مدل هستان‌شناسی بستگی دارد) باید فعالیت‌ها و عملکردها در طول ارزیابی، به‌صورت مداوم و ثابت انجام شوند و نحوه ارزیابی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که نتیجه آن وظیفه، تا حد ممکن به هستان‌شناسی انتخاب‌شده و استفاده شده، وابسته باشد.

در این رویکرد، هستان‌شناسی دست‌کم در سه سطح ارزیابی می‌شود:

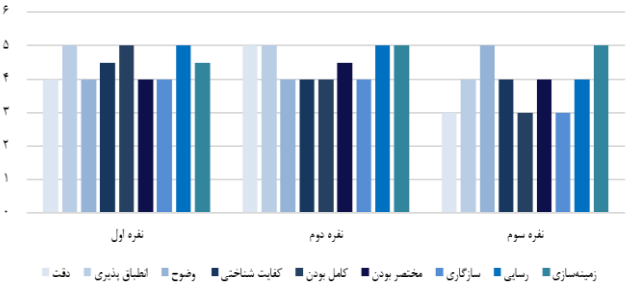
- دامنه واژه‌ها (رده‌ها و مفاهیم هستان‌شناسی)
تناسب روابط مربوط به طبقه‌بندی مفاهیم (روابط سلسله مراتبی is-a)
- تناسب روابط معنایی میان مفاهیم

[1] Task/Application- based Approach

با بررسی منابع و مشخص شدن سطوح ارزیابی هستان‌شناسی، وقت آن است تا معیارهای ارزیابی مشخص شود؛ با جست‌وجو بررسی منابع [36] معیارهای زیر از نظر مرکز ملی تحقیقات هستان‌شناسی آمریکا جهت ارزیابی کیفیت هستان‌شناسی حوزه موردبررسی، مشخص گردید

- معیارهای احتمالی مربوط به ارزیابی مرحله طراحی فرآیند توسعه هستی‌شناسی عبارت‌اند از:
  - دقت[1] (نمایش صحیح جنبه‌های دنیای واقعی)
  - انطباق‌پذیری[2] (سهولت انجام تغییرات)
  - وضوح[3] (برقراری ارتباط معنادار منظور اصطلاحات نفی شده)
  - کفایت شناختی[4] (مطابقت معنایی رسمی و شناختی)
  - کامل بودن[5] (پوشش مناسب حوزه موردنظر)
  - مختصر بودن[6] (عدم تعریف یا بدیهیات غیرضروری یا بیهوده)
  - سازگاری[7] (ناتوانی در یافتن نتایج متناقض از داده‌های ورودی معتبر)
  - رسایی[8] (تعداد سؤالات شایستگی که هستی‌شناسی می‌تواند به آن‌ها پاسخ دهد)
  - زمینه‌سازی[9] (تعداد مفروضات انجام‌شده توسط نظریه بنیادی هستی‌شناسی در مورد واقعیت)

به‌منظور اطمینان از این مسئله که هستان‌شناسی بازیگران صادرات محصولات دانش‌بنیان به‌طور درست در قالب هستان‌شناسی ارائه می‌شود، از سه نفر خبره و متخصص هستان‌شناسی و صادرات دانش‌بنیان به‌عنوان ذی‌نفعان بالقوه خواسته شد تا پرس‌وجوهایی به زبان منطق توصیفی از هستان‌شناسی در دامنه سؤالات شایستگی داشته باشند و پاسخی در طیف لیکرت به این سؤال بدهند که: «عملکرد هستان‌شناسی بازیگران صادرات محصولات دانش‌بنیان کشور در بازنمایی از موجودیت‌های مؤثر با هدف توسعه صادرات، چگونه است؟» از ۱ تا ۵، «خیلی بد»، «بد»، «متوسط»، «خوب»، «خیلی خوب». از این سه خبره پاسخ دو نفر، «خیلی خوب» و پاسخ نفر سوم «خوب» بود. همچنین این متخصصان به بررسی تمام موجودیت‌های اصلی و موجودیت‌های ذیربط آن‌ها در هستان‌شناسی پرداخته و نتیجه این تحلیل را در پاسخ خود لحاظ کردند.



شکل ۸. ارزیابی هستان‌شناسی از نظر خبرگان

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به‌منظور بررسی هستان‌شناسی سازمانی بازیگران صادرات محصولات دانش‌بنیان، باهدف ایجاد یک منبع دانشی، حاوی دانش ضمنی و آشکار از بازیگران صادرات محصولات دانش‌بنیان پرداخته شد. همچنین برای ایجاد یک منبع دانشی مناسب، مصاحبه و مطالعه منابع و مستندات مختلف در این زمینه انجام شد. علاوه بر این دانش ضمنی در قالب یک هستان‌شناسی، موجودیت‌های مؤثر در مسیر صادراتی را گزارش کرده است. این هستان‌شناسی به‌عنوان یک منبع دانشی مفید در فرایند صادرات محصولات دانش‌بنیان کشورهای مختلف به‌ویژه ایران است. اساساً جهت تقویت و توسعه توان صادراتی شرکت‌های صادرکننده‌ای که پتانسیل صادرات را داشته، ولی صادراتی انجام نداده‌اند مؤثر خواهد بود.

سوال اصلی این مقاله می‌پرسد که «عامل‌های هوشمند چه نقشی در تکامل و به‌روزرسانی هستان‌شناسی دارند؟» در بخش دوم از مرور ادبی نظام‌مند برای رسیدن به مفاهیم که بیانگر غنی‌سازی و بروزرسانی هستان‌شناسی است، استفاده شد. فرایند مرور ادبی نظام‌مند در شش مرحله سوال تحقیق، فرانید جست‌و جو، انتخاب مطالعات، ارزیابی کیفیت مقالات، کدگذاری و استنتاج بوده است. در مرحله اول تعیین دامنه و اهداف و تعریف سوالات تعریف شده است و در مرحله بعد با در نظر گرفتن پایگاه web of science به عنوان کتابخانه دیجیتال جست‌و جوی مقالات صورت گرفته است، سپس انتخاب مقالات بر اساس معیارهای شمول و عدم شمول انجام پذیرفت، بعد از انتخاب مقالات، ارزیابی کیفی مقالات بر اساس ۷ معیار انجام شد که تعداد ۱۵ مقاله با کیفیت برای تجزیه و تحالیل به نرم افزار ان ویوو منتقل شد و کدگذاری شده‌اند. بعد از تحلیل

[1] Accuracy
[2] Adaptability
[3] Clarity
[4] Cognitive adequacy
[5] Completeness
[6] Conciseness
[7] Consistency
[8] Expressiveness
[9] Grounding

نتایج کدگذاری نُه مفهوم شامل بازیابی دانش، حاشیه‌نویسی هستان‌شناسی، یادگیری هستان‌شناسی، تطبیق روابط یا موجودیت‌های هستان‌شناسی، ماژول‌بندی هستان‌شناسی، ساختاردهی مجدد هستان‌شناسی، تکامل هستان‌شناسی، تعامل‌پذیری و اشتراک‌گذاری است.

مفهوم بازیابی دانش و یادگیری هستان‌شناسی به عنوان مفاهیم اصلی هستند که برای بهره گیری از قابلیت عامل‌های هوشمند در جهت توسعه و بروزرسانی هستان‌شناسی بیان شد. بازیابی دانش به معنی یافتن اطلاعاتی برای پاسخ به یک نیاز اطلاعاتی دیگر به این معنی که می‌توان از قابلیت‌های عامل‌های هوشمند در تولید مفاهیمی و فاداده‌های که بتوان موجودیت‌ها و روابط درون هستان‌شناسی را توسعه داد. همچنین یادگیر هستان‌شناسی به معنی کسب دانش با هدف بازیابی و تبدیل یک منبع غیرهستان‌شناسی به یک هستان‌شناسی که با استفاده از قابلیت تحلیل و استنتاج عامل‌های هوشمند می‌توان داده‌های و منابع اطلاعاتی گوناگون و با فرمت‌های مختلف در یک شناسایی و در یک بستر فراخوانی کرد و یک منبع هستان‌شناسی به هستان‌شناسی موجود اضافه شد و از این طریق مفاهیم جدید به هستان‌شناسی اضافه شدند.

مفهوم تطبیق هستی‌شناسی به معنی شامل کردن و یا واردکردن یک هستان‌شناسی درون هستان‌شناسی دیگر تعریف شد، به عبارت بهتر راه‌حل امیدوارکننده‌ای برای مسئله ناهمگنی معنایی است. تناظرات و روابط را بین موجودیت‌های هستان‌شناسی مرتبط بامعنا پیدا می‌کند. همچنین پیدا کردن یا کشف ارتباطات یا موارد متناظر بین واحدها یا موجودیت‌های هستان‌شناسی یا ماژول‌های هستان‌شناسی‌های مختلف است.

در شکل‌گیری هستان‌شناسی‌ها داده‌ها و اطلاعات از منابع گوناگون به دست توسعه‌دهنده هستان‌شناسی می‌رسد منابعی که در فضاهای مختلف پیاده‌سازی شده، درگاهی اوقات ممکن است که برخی از این اطلاعات در یک زمینه خاص امکان استفاده نداشته باشند؛ استخراج مفاهیم و روابط در دامنه‌ای از دنیای واقعی جهت تکمیل هستان‌شناسی با دانش ضعیف، کار بسیار پیچیده‌ای است که با روش‌های متنوعی انجام می‌پذیرد. [4] اشتراک‌گذاری دانش به جهت مرتفع ساختن این موضوع، مطرح می‌گردد، که به انتقال اطلاعات از هر موجودیت به موجودیت دیگر در هستان‌شناسی اطلاق می‌شود

برای ایجاد یک پایگاه دانش برای یک حالت خاص، توسعه‌دهنده هستان‌شناسی دو گزینه دارد: ۱. ایجاد هستی‌شناسی مناسب از ابتدا ۲. استفاده مجدد از موارد موجود و در دسترس؛ لذا ایجاد یک پایگاه دانش (هستان‌شناسی) از ابتدا برای موضوع خاصی می‌تواند زمان‌بر و دشوار باشد. ماژول‌بندی هستان‌شناسی را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: معین کردن یک یا تعداد بیشتری ماژول در یک هستان‌شناسی باهدف پشتیبانی از قابلیت استفاده مجدد یا قابلیت نگهداری و ارتقاء. از طرف دیگر، نگهداری، استفاده مجدد و تلفیق و ارتقاء هستان‌شناسی‌های موجود به‌صورت دستی و غیر خودکار نیز کارهایی بسیار دشوار هستند. به‌طور خاص، استخراج فقط بخش‌های مربوطه از هستی‌شناسی که اغلب حاوی هزاران مفهوم است.

تعامل پذیری معنایی یک هستان‌شناسی یعنی توانایی مبادله کردن داده، همراه بامعنای مشترک و غیرمبهم است که با ایجاد یک نیازمندی برای امکان‌پذیر کردن انطباق، استنباط، کشف دانش و همسو کردن معنایی داده‌ها برای یک منبع دانش است. منبع دانش تعبیری از هستان‌شناسی است.

تصحیح کردن و سازمان‌دهی دوباره دانش موجود در یک مدل مفهومی اولیه و پیدا کردن دانش مفقود. این اقدام شامل تحلیل و سنتز کردن مفاهیم موجود است که هدف آن تحلیل ارزیابی فنی هستان‌شناسی هست، یعنی بررسی اینکه ساختار سلسله مراتبی هستان‌شناسی و کلاس‌ها نمونه‌ها ارتباطات و توابع کامل باشند (شامل تمامی تعاریف موردنیاز باشد)، پایدار باشد (یعنی با توجه به منابع دانش استفاده‌شده تناقضی در آنتولوژی نباشد)، مختصر باشد (حشو ضمنی یا آشکار وجود نداشته باشد) و به‌طور نحوی صحیح باشد.

حاشیه‌نویسی معنایی عبارت است از فرآیند نمایه‌سازی اطلاعات حاصل از منابع مرتبط که شامل روش‌های دستی، خودکار و نیمه‌خودکار برای بیان محتوای منابع و دانش مفاهیم کلیدی با استفاده از کلاس‌های هستان‌شناسی و نمونه‌های هستان‌شناسی می‌باشد که در فرآیند نمایه‌سازی آشکار می‌شوند

تکامل هستان‌شناسی شرایط لازم را برای نمایش دانش کافی را فراهم می‌نماید دانش به‌صورت بهینه برای حوزه‌های در حال تغییر، از فرایند تکامل هستان‌شناسی تولید می‌شود. از نقطه‌نظر دیگر تکامل هستان‌شناسی، پیدا کردن یا کشف ارتباطات بین موجودیت‌های هستان‌شناسی‌های مختلف یا ماژول‌های هستان‌شناسی مختلف تعریف می‌شود. شکل ۹ تحلیلی با استفاده از نمودار درختی از مفاهیم مذکور در نتیجه گیری مقاله است.

شکل ۹. نموداری درختی جهت تشریح مفاهیم استخراج شده

در این تحقیق تلاش بر آن شده است تا با استفاده از قابلیت‌های عامل‌های هوشمند هستان‌شناسی غنی‌سازی شود. ارائه مفاهیم بیان شده در فصول گذشته دال بر این موضوع بود که هر یک از مفاهیم نوعی اقدام در جهت غنی‌سازی و بروزرسانی هستان‌شناسی بود. عامل‌های هوشمند از قابلیت‌هایی مختلف و گوناگونی برخوردار هستند که با بررسی منابع متعدد مشخص شد ویژگی‌هایی همچون: «استقلال، خودمختاری، قابلیت پیش‌بینی، قابلیت همکاری، قابلیت استدلال، قابلیت کنترل‌کنندگی و تکامل و تحلیل و سنتز» از قابلیت‌های عامل هوشمند هستند که مرتبط با هستان‌شناسی است و می‌توان به وسیله آنها در جهت غنی‌سازی هستان‌شناسی در سطح مفهومی بررسی و ارائه کرد. از قابلیت‌های بیان شده عامل‌های هوشمند و ادغام و جاسازی در هستان‌شناسی می‌توان به مفاهیمی رسید که تحت عنوان غنی‌سازی و بروزرسانی هستان‌شناسی رسید. با تجزیه کردن سوال پژوهش به دو سوال فرعی، این مفاهیم نیز به دو دوسته تقسیم می‌شوند تا بتوان به سوالات فرعی پژوهش پاسخ داد.

امروزه منابع نظام‌مند و شاخصه‌های کلیدی که منجر به استفاده از عامل‌های هوشمند در توسعه و غنی‌سازی هستان‌شناسی کاربرد دارد از اهمیت و ضرورت بالایی برخوردار است. بنابراین در این تحقیق با بررسی منابع و مطالعات میدانی در خصوص روش‌های هستان‌شناسی و عامل‌های هوشمند به‌صورت نظام‌مند برای ارائه شاخصه‌های کلیدی به‌عنوان یک چالش موردبحث و بررسی قرار گرفته است.

محدودیت‌های این پژوهش عبارت‌اند از:

- محدودیت زمانی و ناتوانایی در استفاده و به‌کارگیری دستاوردهای مقاله در سازمان‌های مختلف
- محدودیت ارائه دستاوردهای موجود به‌صورت مفهومی
- عدم دسترسی آسان به سازمان‌های عالی رتبه و اجبار شدن به کسب نظرات کارشناسان و مدیران میانی
- تهیه یک نقشه جامع از موجودیت‌های مؤثر در فرایند صادرات محصولات دانش‌بنیان به علت گستردگی اکوسیستم مشکل بوده است.

این مقاله در مراحل مرور ادبی سیستماتیک با چالش‌ها و مشکلاتی مواجهه گردید و برای اینکه آن‌ها بر نتایج مرور تأثیر منفی نداشته باشند، راه‌حل‌هایی برای مواجهه با آن‌ها اتخاذ گردید. این چالش‌ها همراه با راهکارهای اتخاذی در ادامه توضیح داده می‌شوند.

یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که در این تحقیق وجود داشت، تعریف سؤال تحقیقی بود که قابلیت پوشش همه حوزه‌های مورد نظر مقاله را داشته باشند. در این راستا با برگزاری جلسات داخلی تدوین‌گران مقاله و بحث و تبادل نظر در این باره بر دقت و اعتبار سؤالات افزوده شد.

چالش برانگیزترین فاز مرور نظام‌مند و مهم‌ترین دشواری در فرایند جست‌وجو هنگام انتخاب واژه‌های جست‌وجو و مترادف و جایگزین، محدودیت‌های پایگاه‌های الکترونیکی دیجیتال و اطمینان از دستیابی به همه منابع مرتبط وجود دارد. دیگر چالشی که در فرایند جست‌وجو، جامعیت منابع مرتبط به‌دست‌آمده که مهم‌ترین دلایل آن می‌توان محدودیت‌های پایگاه آنلاین مقالات نام برد. برای از بین بردن مشکل جست‌وجو در پایگاه الکترونیکی، راهبرد جست‌وجوی بازگشتی و پیش‌رونده استفاده‌شده است.

یکی دیگر از چالش‌ها در فرایند جست‌وجو تعریف رشته‌های جست‌وجو بود که از مهم‌ترین دلیل آن عدم پشتیبانی کامل پایگاه داده از فرایند جست‌وجوی مقالات است. به جهت رفع این مشکل با تعریف رشته جست‌وجوی مناسب، استفاده از جست‌وجوی پیشرفته همراه با گزینه‌های محدود کردن با فیلترینگ، استفاده از معیارهای درست، تبادل‌نظر با اعضای تحقیق. همچنین در مرحله انتخاب مطالعات مرور چالش‌هایی وجود داشت که مرتفع ساختن آن‌ها نیازمند دانش و تجربه کافی بود. ازآنجایی‌که انتخاب مقالات به میزان زیادی به دانش، فهم و قضاوت محقق یا محققان وابسته است؛ انحراف از مسیر پژوهش به‌عنوان مهم‌ترین تهدید در این فاز محسوب می‌گردد. بنابراین جهت کاهش این تهدید، فیلترهای انتخاب و ارزیابی منابع به‌صورت گروهی و در چندین مرحله و بر اساس معیارهای برگرفته‌شده از منابع معتبر انجام پذیرفت. ازآنجایی‌که استخراج و سنتز اطلاعات به‌عنوان یکی از فازهای مرور نظام‌مند است لذا برای انجام هرچه بهتر این امر به بیشترین تلاش محققان نیازمند است؛ راهکارهای استفاده جهت کاهش این ریسک

و سوءگیری‌های احتمالی، استفاده از فرم‌های استاندارد استخراج داده، استفاده از چند مرورگر به‌صورت موازی و بررسی مکرر داده‌ها توسط چند مرورگر، بر صحت اطلاعات استخراج شده افزوده است.

۵- پیشنهادات

مفهوم بازیابی دانش و یادگیری هستان‌شناسی، مفهوم مهمی در تعامل هستان‌شناسی و عامل‌های هوشمند است اما منابعی که این مفهوم را بررسی کرده‌اند، کم است و پیشنهاد می‌شود که این مفهوم به‌صورت خاص مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این پیشنهاد می‌شود مفاهیم، معیارها و ارتباط بین مفاهیم بازنگری شود، تا ابتدا مفاهیم در دسترس، بیشتر توسعه داده شود و همچنین مفاهیم، معیارها و ارتباط‌های جدیدی شناسایی گردد.

نقطه تمرکز این تحقیق بر تحلیل کیفی است لذا پیشنهاد می‌گردد که پژوهشی با استفاده از داده‌های کمی در این زمینه انجام شود. همچنین محیطی که در این مقاله برای مطالعه موردی قرار گرفت بازیگران صادرات دانش‌بنیان است و پیشنهاد می‌گردد که دیگر بخش‌های اکوسیستم نوآوری و فناوری موردمطالعه قرار گیرد. درنهایت پیشنهاد می‌گردد جهت پیاده‌سازی مفاهیم مربوط به خودکارسازی فرایند غنی‌سازی هستان‌شناسی، محیطی با استفاده از الگوریتم‌های تقویتی هوش مصنوعی در پایتون توسعه داده شود، که بتوان به‌راحتی هستان‌شناسی‌های توسعه داده‌شده در اکوسیستم نوآوری به‌صورت خودکار طراحی، توسعه و به‌روزرسانی کرد.

مراجع

[1] S. S. Rao and A. Nayak, “Enterprise ontology model for tacit knowledge externalization in socio-technical enterprise,” Interdiscip. J. Information, Knowledge, Manag., vol. 12, pp. 99–124, 2017.

[2] M. Brahimi, “An agents’ model using ontologies and web services for creating and managing virtual enterprises,” Int. J. Comput. Digit. Syst., vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2019, doi: 10.12785/ijcds/080101.

[3] T. R. Gruber, “Toward Principles for the Design of Ontologies,” International Journal of Human-Computer Studies, vol. 43, no. 5–6. pp. 907–928, 1995.

[4] D. Monticolo, I. Lahoud, and P. C. Barrios, “OCEAN: A multi agent system dedicated to knowledge management,” J. Ind. Inf. Integr., vol. 17, p. 100124, 2020, doi: 10.1016/j.jii.2019.100124.

[5] S. Zidat and F. Marir, “An Approach to the Acquisition of Tacit Knowledge Based on an Ontological Model Department of Computer Science , Chahid Mostefa Ben Boulaid , University of College of Technological Innovation , Zayed University , Dubai , United Arab Corresponding Author :,” J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci., 2018, doi: 10.1016/j.jksuci.2018.09.012.

[6] A. Di Iorio and D. Rossi, “Capturing and managing knowledge using social software and semantic web technologies,” Inf. Sci. (Ny)., vol. 432, pp. 1–21, 2018, doi: 10.1016/j.ins.2017.12.009.

[7] Jan Andreasik, Knowledge management model based on the enterprise ontology for the KB DSS system of enterprise situation assessment in the SME sector, vol. 787. Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-94229-2_15.

[8] B. Okreša Đurić, J. Rincon, C. Carrascosa, M. Schatten, and V. Julian, “MAMbO5: a new ontology approach for modelling and managing intelligent virtual environments based on multi-agent systems,” J. Ambient Intell. Humaniz. Comput., no. 0123456789, 2018, doi: 10.1007/s12652-018-1089-4.

[9] D. Chumachenko and I. Meniailov, “Development of an intelligent agent-based model of the epidemic process of syphilis,” csit, vol. 2, pp. 17–20, 2019.

[10] Y. Wang, L. Wang, and C. Wang, “Research on Ontology-Based Tacit Knowledge Mining for Aerospace Enterprise,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 1087, no. 3, 2018,

[11] A. Smirnov, A., Levashova, T. and Kashevnik, Enterprise Ontology for Service Interoperability in Socio-Cyber-Physical Systems. In Enterprise Interoperability VIII, vol. 9. Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-13693-2.

[12] Y. Chemlal, “Onto-agent-SSSN: An ontology model to facilitate reactive reasoning in multi-agent systems within a business intelligence network,” Int. J. Reason. Intell. Syst., vol. 11, no. 3, pp. 282–291, 2019, doi: 10.1504/IJRIS.2019.102635.

[13] J. U. the blockchain using enterprise ontology. de Kruijff, J. and Weigand, H., 2017, “Understanding the Blockchain Using Enterprise Ontology,” Int. Conf. Adv. Inf. Syst. Eng. Springer, Cham., pp. 29–43, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-59536-8.

[14] J. Liu et al., “Grid workflow validation using ontology-based tacit knowledge: A case study for quantitative remote sensing applications,” Comput. Geosci., vol. 98, pp. 46–54, 2017, doi: 10.1016/j.cageo.2016.10.002.

[15] J. Cordeiro, “Analysing Enterprise Ontology and Its Suitability for Model-Based Software Development,” vol. 2, pp. 257–269, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-24854-3_19.

[16] M. A. Musa and M. S. Othman, “Knowledge map and enterprise ontology for enhancing business process reengineering in healthcare: A case of radiology department,” Int. J. Enterp. Inf. Syst., vol. 12, no. 2, pp. 26–46, 2016, doi: 10.4018/IJEIS.2016040103.

[۱۷] توقعی، محسن و بهشت‌زاده کیایی، منیره و رضایی، سپیده، ۱۳۹۵، “بررسی بکارگیری هستان‌شناسی در ساماندهی جریان دانش ضمنی سازمان in ”,همایش ملی دانش و فناوری مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران, ۱۳۹۵.https://ci , vol.

[18] A. M. Pinto-Llorente, M. C. Sánchez-Gómez, and A. Pedro Costa, “Qualitative and Mixed Methods Researches in Social Sciences,” ACM Int. Conf. Proceeding Ser., pp. 193–196, 2020, doi: 10.1145/3434780.3436696.

[19] A. Van Den Berg and M. Struwig, “Guidelines for Researchers Using an Adapted Consensual Qualitative Research Approach in... by Academic Conferences and publishing International - Issuu,” Electron. J. Bus. Res. Methods, vol. 15, no. 2, pp. 109–119, 2017.

[20] Y. Xiao and M. Watson, “Guidance on Conducting a Systematic Literature Review,” J. Plan. Educ. Res., vol. 39, pp. 93–112, 2019, doi: 10.1177/0739456X17723971.

[21] L. K. Nelson, “Computational Grounded Theory : A Methodological Framework,” Sociol. Methods Res., vol. 49, pp. 3–42, 2020, doi: 10.1177/0049124117729703.

[22] R. T. Webster, J. and Watson, “Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review,” MIS Q., vol. 26, no. 2, pp. xiii–xxiii, 2002.

[23] K. Dal, S. Mendes, R. Cristina, and D. C. Pereira, “USE OF THE BIBLIOGRAPHIC REFERENCE MANAGER IN THE SELECTION OF PRIMARY STUDIES IN INTEGRATIVE REVIEWS,” Texto Context., vol. 28, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1590/1980-265X-TCE-2017-0204.

[24] Dermeval, Diego, Jéssyka Vilela, Ig Ibert Bittencourt, Jaelson Castro, Seiji Isotani, Patrick Brito, "Applications of ontologies in requirements engineering : a systematic review of the literature," Requir. Eng., vol. 21, no. 4, pp. 405–437, 2016, doi: 10.1007/s00766-015-0222-6.

[25] M. Dadkhah, S. Araban, and S. Paydar, "A systematic literature review on semantic web enabled software testing," J. Syst. Softw., vol. 162, p. 110485, 2020, doi: 10.1016/j.jss.2019.110485.

[26] J. Gharib, M., Giorgini, P. and Mylopoulos, "Towards an ontology for privacy requirements via a systematic literature review," in 36th International Conference on Conceptual Modeling (ER), 2017, vol. 10650, pp. 193–208. doi: 10.1007/978-3-319-69904-2_16.

[27] F. Messaoudi, R., Mtibaa, A., Vacavant, A., Gargouri, F. and Jaziri, "Ontologies for Liver Diseases Representation : A Systematic Literature Review," J. Digit. Imaging, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1007/s10278-019-00303-2.

[28] H. wiesche, Manuel, Jurisch, Marlen C, Yetton, Philip W and Krcmar, "Grounded Theory Methodology in Information Systems Research," MIS Q., vol. 41, no. 3, pp. 685–701, 2017, doi: 10.25300/MISQ/2017/41.3.02.

[29] L. & Guba, Competing Paradigms in Qualitative Research. 1994.

[30] J. E. Douglas and M. Bryon, "Interview data on severe behavioural eating difficulties in young children," Arch. Dis. Child., vol. 75, no. 4, pp. 304–308, 1996, doi: 10.1136/adc.75.4.304.

[31] T. Hovorushchenko and O. Pavlova, Method of activity of ontology-based intelligent agent for evaluating initial stages of the software lifecycle, vol. 836. Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-97885-7_17.

[32] V. R. Sampath Kumar et al., "Ontologies for industry 4.0," Knowl. Eng. Rev., vol. 34, pp. 1–14, 2019, doi: 10.1017/S0269888919000109.

[33] [33] Smith, B. (2020) 'Ontology and Its Applications II', Iranian Research Institute for Information Science and Technology, 36(1), pp. 271–294.

[34] de Franco Rosa, Ferrucio et al. (2018) Towards an Ontology of Security Assessment: A Core Model Proposal Security assessment ·Information security ·Knowledge formalization ·OWL ·Ontology 12.1 Introduction. Springer International Publishing. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-77028-4_12.

[35] Degbelo, A. (2017) 'A snapshot of ontology evaluation criteria and strategies', ACM International Conference Proceeding Series, 2017-Septe(September), pp. 1–8. doi: 10.1145/3132218.3132219.

[36] Raad, J. and Cruz, C. (2018) 'A Survey on Ontology Evaluation Methods', Quarterly Knowledge and Information Management Journal, 6(2), pp. 25–34. doi: 10.30473/MRS.2020.48615.1402.

[37] Chumachenko, D. and Meniailov, I. (2019) 'Development of an intelligent agent-based model of the epidemic process of syphilis', csit. IEEE, 2, pp. 17–20.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 20-33

A Framework for Contextual Regulation Needs of Artificial Intelligence

Seyed Hadi Sajadi[1*], Helia Yousefnejad[2]

[1] Assistant Professor, ICT Research Institute (Iran Telecommunication Research Center), Tehran, Iran
[2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran

Received: 06 January 2025, Revised: 28 July 2025, Accepted: 02 August 2025
Paper type: Research

Abstract

The widespread use of artificial intelligence in areas such as autonomous vehicles, health and medical diagnosis, assisting researchers using large language models, robotics and defense fields indicates the increasing importance of this technology in various functional areas. In this regard, industries and governments around the world, with incentives such as increasing economic efficiency and quality of life, eliminating labor shortages, dealing with population aging and strengthening national defense power, are interested in obtaining the potential benefits of artificial intelligence and have accelerated the development and deployment of this technology in various fields through various means, including development-oriented policymaking and regulation. Along with the undeniable applications and benefits of this technology, unintended consequences are also created that have raised concerns. Although a significant literature has been developed on the governance and regulation dimensions of artificial intelligence, the context-based regulation of artificial intelligence has been largely neglected. Contextual regulation in this study refers to the analysis of regulatory needs from the perspective of distinct functional domains, each of which has different expectations, requirements, stakeholders, actions, and generally the discourse governing it. The present study selected these domains based on the PEST model and analyzed examples of context-based regulation in the core dimensions of AI regulation, including accountability, safety and security, privacy, transparency, explainability, fairness and non-discrimination, human control of technology, professional responsibility, and promotion of human values, in each of the domains of the aforementioned model, including the political, economic, social, and technological domains, and presented regulatory needs based on that.

Keywords: Artificial Intelligence, Governance, Regulation, Contextual Analysis, PEST

[*] Corresponding Author's email: h.sadjadi@itrc.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۲۰ الی ۳۳

چارچوب نیازهای تنظیم‌گری زمینه‌وند هوش مصنوعی

سیدهادی سجادی[1]*، هلیا یوسف‌نژاد [2]

[1] استادیار، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران)، تهران، ایران

[2] گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

کاربرد گسترده هوش مصنوعی در حوزه‌هایی مانند وسایل نقلیه خودران، سلامت و تشخیص پزشکی، دستیاری پژوهشگران با استفاده از مدل‌های زبانی بزرگ، رباتیک و حوزه‌های دفاعی، نشان‌دهنده اهمیت روزافزون این فناوری در حوزه‌های عملکردی متنوع جوامع است. در این راستا صنایع و دولت‌ها در سراسر جهان با انگیزه‌هایی چون افزایش کارایی اقتصادی و کیفیت زندگی، رفع کمبود نیروی کار، مقابله با پیری جمعیت و تقویت قدرت دفاع ملی، علاقه‌مند به کسب منافع بالقوه ناشی از هوش مصنوعی هستند و توسعه و استقرار این فناوری را به طرق گوناگون اعم از سیاست‌گذاری و تنظیم‌گری توسعه‌محور، در حوزه‌های مختلف تسریع کرده‌اند. در کنار کاربردها و مزایای غیرقابل‌انکار این فناوری، پیامدهای غیرمنتظره و ناخواسته‌ای نیز ایجاد می‌شود که نگرانی‌ها و دغدغه‌هایی را به وجود آورده است. اگر چه ادبیات قابل‌توجهی در خصوص ابعاد حکمرانی و تنظیم‌گری هوش مصنوعی توسعه‌یافته، لیکن تنظیم‌گری زمینه‌وند (مبتنی بر بافتار) هوش مصنوعی، تا حدود زیادی مغفول مانده است. منظور از تنظیم‌گری زمینه‌وند در این پژوهش احصاء نیازهای تنظیم‌گری از دید دامنه‌های عملکردی متمایز است که در هر دامنه انتظارات، الزامات، ذی‌نفعان، اقدامات و به طور عام گفتمان حاکم بر آن متفاوت از دامنه‌های دیگر است. پژوهش حاضر این دامنه‌ها را در بر اساس الگوی PEST برگزید و مصادیق تنظیم‌گری مبتنی بر بافتار را در ابعاد محوری تنظیم‌گری هوش مصنوعی مشتمل بر پاسخگویی، ایمنی و امنیت، حریم خصوصی، شفافیت، توضیح‌پذیری، انصاف و عدم تبعیض، کنترل انسانی فناوری، مسئولیت حرفه‌ای و ارتقای ارزش‌های انسانی، در هر یک از دامنه‌های الگوی مذکور شامل دامنه سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فناورانه مورد واکاوی قرارداده و بر اساس آن نیازهای تنظیم‌گری را ارائه کرده است.

کلیدواژگان: هوش مصنوعی، حکمرانی، تنظیم‌گری، تحلیل زمینه‌وند، الگوی **PEST**

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: h.sadjadi@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

هوش مصنوعی (AI) به‌سرعت در حال تغییر نحوه سازماندهی رفتار و تعاملات اجتماعی در جامعه امروزی است. سیستم‌های هوش مصنوعی و الگوریتم‌هایی که از عملیات آن‌ها پشتیبانی می‌کنند، نقش مهمی را در تصمیم‌گیری‌های پر ارزش برای جامعه بازی می‌کنند، از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم بالینی که تشخیص‌های پزشکی را انجام می‌دهند، سیستم‌های پلیسی که احتمال فعالیت‌های مجرمانه را پیش‌بینی می‌کنند تا الگوریتم‌های فیلتر که دسته‌بندی و شخصی‌سازی را ارائه می‌کنند، می‌توان نام برد. برنامه‌های کاربردی هوش مصنوعی همچنین می‌توانند پیامدهای غیرمنتظره و ناخواسته‌ای ایجاد کنند و اشکال جدیدی از خطرات را ایجاد کنند که باید به طور مؤثر توسط دولت‌ها مدیریت شوند.

بدون شک، این فناوری و برخی از کاربردهای آن، مزایای غیرقابل تصوری را در زمینه‌های مختلف به همراه دارند اما با توجه به ماهیت دگرگون‌ساز آن‌ها، چالش‌های اساسی را نیز در حوزه‌های اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی برای جوامع ایجاد نموده‌اند [1]. همگام با توسعه روزافزون هوش مصنوعی، بروز برخی چالش‌های ناشی از توسعه این فناوری‌ها و پیش‌بینی ظهور چالش‌های متعدد دیگر در این حوزه باعث شده است کشورها و جوامع بین‌المللی سخت تلاش کنند تا چارچوب‌های تنظیم‌گری سازگار با نوآوری و در عین حال ایمن را با هدف به حداکثر رساندن مزایا و به حداقل رساندن مخاطرات ناشی از فناوری‌های هوش مصنوعی ایجاد نمایند. اگر چه این روند قانون‌گذاری و تنظیم‌گری با شتاب قابل‌توجهی در حال پیشروی است، اما این آغاز راه است و سال‌ها به طول می‌انجامد تا نهادهای تنظیمی و نظارتی با شرح وظایف و اختیارات مشخص ایجاد شوند و تنظیم‌گری را در صنعت و جامعه به درستی محقق نمایند [2]. هوش مصنوعی که از دیرباز مورد توجه دانشمندان و فناوران حوزه محاسبات و رایانش بوده و دارای چندین دهه سابقه است، به یک‌باره با رشد و توسعه حیرت انگیز رایانه‌های پرسرعت و نیز توانمندی‌های حوزه انبارش و جمع‌آوری داده‌ها و بخصوص امکان تشکیل و تحلیل کلان داده‌ها و توسعه افزارهای این حوزه، محل توجه صنایع و نیز دولت‌ها قرار گرفته و به عنصری مهم در سنجش توانمندی کشورها و نیز موازنه قدرت‌های جهانی قرار گرفته است. آن‌چه مسلم است برای بهره‌مندی از مزایای تغییرات فناورانه، ایجاد تحولات ساختاری و اقتصادی-اجتماعی در بخش‌های گوناگون جهان اجتناب‌ناپذیر است [3]. این جمله بیانگر این معناست که توسعه فناوری به ویژه فناوری‌های تحول‌ساز، می‌تواند از یک سو به عوامل مشترک در کشورها و بسترهای مختلف مرتبط باشد و از سوی دیگر، می‌تواند با عواملی که مختص هر کشور و بافتار آن است، در ارتباط باشد. نگاهی اجمالی به آمار کشورهایی که در سال‌های اخیر راهبردهای ملی خود را اعلام نموده‌اند مؤید این موضوع است [4].

طبق گزارش‌های مرتبط با شاخص‌های هوش مصنوعی، تعداد سالانه قوانین مصوب مرتبط با هوش مصنوعی در ۱۲۷ کشور مورد بررسی، از یک مورد در سال ۲۰۱۶ به ۳۷ مورد در سال ۲۰۲۲ افزایش‌یافته است [4]. همچنین بررسی اسناد راهبردی هوش مصنوعی در کشورهای مختلف نشان می‌دهد که بخش تنظیم‌گری یکی از ارکان مهم در تمامی اسناد است. برای نمونه در سند راهبردی آلمان ۱۰ محور به تنظیم‌گری تخصیص داده شده و این تعداد برای چین ۵ محور، فرانسه ۹ محور، آمریکا ۱۷ محور و سوئد ۱۴ محور است [5].

چنان‌که در گزارش سالانه شاخص هوش مصنوعی آمده است، اشاره به مفهوم قوانین و مقررات موضوعه هوش مصنوعی در سراسر جهان تقریباً دوبرابر شده است و از ۱۲۴۷ مورد در سال ۲۰۲۲ به ۲۱۷۵ در سال ۲۰۲۳ رسیده است. هوش مصنوعی در اسناد قانونی ۴۹ کشور در سال ۲۰۲۳ ذکر شده است که موید نفوذ گفتمان سیاستی هوش مصنوعی در گستره جهانی است. در سال ۲۰۲۳ بیشتر استراتژی‌های منتشر شده مربوط به کشورهای کم درآمد یا با درآمد کمتر از متوسط بوده است و روندا اولین کشور در دسته کشورهای کم درآمد است که استراتژی خود را منتشر کرده است. کشورهای تاجیکستان، سنگال و بنین هم در سال جاری میلادی استراتژی خود را منتشر کرده‌اند [4].

در پاسخ به توسعه هوش مصنوعی، نظام‌های حقوقی گوناگون مداخلات تنظیمی مختلفی را در مواجهه با این فناوری ایجاد کرده‌اند. درحالی‌که برخی کشورها حمایت از مصرف‌کننده را از طریق وضع مقررات سخت‌گیرانه در اولویت قرار می‌دهند، برخی دیگر با اتخاذ رویکردی سهل‌گیرانه‌تر، نوآوری را ترویج می‌کنند. بااین‌حال، مقایسه الگوهای مختلف تنظیم‌گری هوش مصنوعی می‌تواند به یافتن تعادل مناسب میان نوآوری و حمایت از مصرف‌کننده در برابر مخاطرات هوش مصنوعی کمک کند.

براین‌اساس، تنظیم‌گری در توسعه هوش مصنوعی نقش مهمی داشته و درصورتی‌که موردتوجه قرار نگیرد، موانع قابل‌توجهی را در برابر توسعه مطلوب و متوازن قرار می‌دهد که باید به‌موازات خلق فناوری‌های این زمینه و به‌کارگیری آن‌ها، با وضع قوانین و مقررات دقیق، مسیر موردنظر را هموار نمود. نکته مهم در این زمینه و سؤال اساسی آن است که آیا تنظیم‌گری هوش مصنوعی از بافتار و زمینه حاکم بر آن که می‌تواند سازمانی، کشوری یا جهانی باشد، متأثر می‌شود یا خیر. چه وجوهی از بافتار و زمینه بر تنظیم‌گری آن تأثیر

می‌گذارد. این مقاله در صدد است ابعاد زمینه‌وند تأثیرگذار بر تنظیم‌گری هوش مصنوعی را مورد تحقیق قرار دهد. تحلیل زمینه‌وند و مبتنی بر بافتار به‌عنوان فرایندی برای درک ویژگی‌های موقعیتی، سیاسی، فنی، فیزیکی، اقتصادی فرهنگی و اجتماعی که یک سیستم در آن کار خواهد کرد، مسیر پاسخ‌گویی به این پرسش را هموار خواهد نمود.

در ادامه، در بخش دوم پژوهش، مروری بر ادبیات موضوع تنظیم‌گری هوش مصنوعی انجام شده است. در بخش سوم و چهارم ضمن تعریف مفهوم زمینه‌وندی و ضرورت پرداختن به آن در مباحث مرتبط با تنظیم‌گری، متدولوژی پژوهش تشریح شده است. در بخش پنجم، یافته‌های حاصل از مطالعات و تحلیل‌های صورت‌گرفته، به تفکیک اصول اساسی و ویژگی‌های محوری تنظیم‌گری هوش مصنوعی ارائه شده است و در نهایت در بخش ششم، پیشنهادهای تنظیم‌گری زمینه‌وند هوش مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مرور ادبیات

قابلیت‌های جدید در زمینه فناوری‌های هوش مصنوعی و تجارب جدید جهانی در بهره‌گیری از آن برای پردازش گفتمان بشری اعم از متون علمی، مستندات، گزارش‌های، اقدامات، رخدادها، سخنان و هرآنچه در دامنه تعریف این مفهوم قرار می‌گیرد و ارائه نتایج شگرف در تولید آگاهی، تحلیل، تفسیر و نیز ارائه استنتاج‌های منطقی و محاسباتی و نیز نظامات توضیح‌دهنده نحوه رسیدن به نتایج استخراج شده برای اقناع پرسشگر، نشان‌دهنده تحولی عظیم است که پیش‌روی ابنا بشر قرار دارد که نمونه بارز آن محصولاتی است که شرکت اپن.ای.آی[1] ارائه کرده است مانند چت.جی.پی.تی و یا محصول شرکت گوگل که بنام گوگل بارد ارائه کرده است. بخش بزرگی از جنب‌وجوش‌ها و تحولات این زمینه، مرهون رونمایی‌های این‌چنینی است که تمام توجهات جهانی را به خود جلب نموده است.

اصطلاح هوش مصنوعی اولین‌بار در کنفرانس تابستانی کالج دارموث امریکا در سال ۱۹۵۶ مطرح شد؛ اما حوزه مطالعاتی هوش مصنوعی عملاً قبل از آن تعریف شده بود. مثلاً نقش محوری در خلق آنچه که امروزه تئوری کنترل نامیده می‌شود را نوربرت وینر (۱۸۹۴-۱۹۶۴) ایفا کرد. کتاب پرفروش او در سال ۱۹۴۸ با عنوان سایبرنتیک، جلب‌توجه همگانی به امکان ساخت ماشین‌هایی با هوش مصنوعی را به دنبال داشت [6].

دیدگاه آلن تورینگ در زمانه جنگ جهانی که هیتلر بخش اعظمی از سرزمین‌های اروپایی را تسخیر کرده بود، بیشترین تأثیرگذاری را در این زمینه داشته است و بر اساس فعالیت‌های آزمایشگاهی او و همکاران، شکل جدیدی از هوش به وجود آمد. تورینگ، مشابهت فرایند محاسباتی و فرایند تفکّر انسانی را به کمک بنیادهای نظری محاسبات بررسی و با اختراع اوّلین رایانه عملگر و تلفیق این فرایندها در ساخت رایانه و انجام محاسبات مرتبط با رمزگشایی‌های موردنیاز جنگ، زمینه‌ساز اولین تلاش‌ها در به‌کارگیری این فناوری‌های جدید برای شبیه‌سازی هوش گردید [6].

پس از توفیقات نظری و عملی به‌دست‌آمده در این دوره، تجارت و صنعت روی خوش به این فناوری نشان داده به‌طوری که صنعت هوش مصنوعی از حجم چند میلیون دلار در سال ۱۹۸۰ به میلیاردها دلار در ۱۹۸۸ رسید که شامل صدها شرکت ساخت سیستم‌های هوشمند، سیستم‌های بینایی، روبات‌ها، نرم‌افزار و سخت‌افزار مخصوص این حوزه بود. اما به‌زودی پس از آن، دوره‌های افول فرارسید که زمستان هوش مصنوعی خوانده شد؛ دوره‌ای که شرکت‌ها به دلیل ناکامی در تحقّق وعده‌های خارق‌العاده، به سقوط و افول کشیده شدند [6].

هوش مصنوعی همانند مثال فوق دوره‌های رونق و نیز افول متعددی را در دهه‌های گذشته طی نموده است؛ ولی با پیشرفت‌های اخیر خود عملاً تردیدهای این حوزه را از بین برده و مسیر روشنی از توسعه و پیشرفت و توفیقات خود را نشان داده است. یکی از وجوهی که تأثیر مهمی در پیشرفت این حوزه و رفع موانع آن دارد و باید سعی کند نگرانی‌ها و دغدغه‌های ذی‌نفعان مختلف را هم‌زمان با پیشبرد راهبردهای توسعه در نظر بگیرد، مسئله تنظیم‌گری[2] است.

معمولاً زمانی که انبوهی از اتفاقات در یک زمینه رخ می‌دهد، اعتراضات عمومی به وجود می‌آید و مسائل و مشکلات خود را به‌تدریج نمایان می‌سازند، تنظیم مقررات مطالبه می‌شود. به‌وجودآمدن این شرایط به‌مثابه آغاز راه است و سال‌ها طول می‌کشد تا اینکه یک نهاد نظارتی ایجاد می‌شود و شروع به تنظیم صنعت می‌کند [2].

موضوع هوش مصنوعی و تنظیم‌گری آن به یکی از جدی‌ترین دغدغه‌های حکمرانان و به‌تبع آن جوامع علمی و اندیشمندان بدل شده است و این دغدغه در قالب قوانین و اسناد هوش مصنوعی در نظام‌های حقوقی مختلف و با درنظرگرفتن زمینه‌های حقوقی - اخلاقی، اقتصادی، فلسفی و بعضاً سیاسی، تدوین و تصویب شده

[1] OpenAI
[2] Regulation

است. دراین‌رابطه می‌توان به مواردی چون مقررات حفاظت از داده اتحادیه اروپا[1] (۲۰۱۶)، راهنمای اخلاقی برای هوش مصنوعی قابل اعتماد توسط گروه کارشناسان ارشد هوش مصنوعی اتحادیه اروپا[2] (۲۰۱۹) و قانون هوش مصنوعی اتحادیه اروپا[3] (۲۰۲۳)، در اتحادیه اروپا و ابتکار جهانی IEEE در خصوص اخلاق سامانه‌های خودکار و هوشمند[4] (۲۰۱۶) ، بیانیه مونترال برای توسعه مسئولانه هوش مصنوعی[5] (۲۰۱۸) و اصول هوش مصنوعی OECD[6] (۲۰۱۹)، در عرصه جهانی، اشاره نمود [7].

در این راستا، آلمیدا[7] و همکاران، چارچوبی مفهومی برای تنظیم هوش مصنوعی ایجاد می‌کند که تمام مراحل سیاست‌گذاری عمومی مدرن، از اصول اولیه تا حکمرانی پایدار را دربر می‌گیرد. این مقاله یک بررسی سیستماتیک گسترده از ادبیات مربوط به مقررات هوش مصنوعی که بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ منتشر شد را انجام داده است. در این تحقیق انواع مخاطرات مرتبط با توسعه و به‌کارگیری هوش مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله ضمن توصیه به اجتناب از پذیرش و توسعه بی پرواگونه این فناوری هشدار می دهد که عدم توجه به ملاحظات این زمینه ممکن است موجب بی‌ثباتی اجتماعی و سیاسی در جامعه شده و در نتیجه آزادی، تعیین سرنوشت، حقوق بشر و ارزش‌های انسانی را تهدید کند و به‌علاوه و مهم‌تر از همه اینکه فرصت‌های توسعه را از بین ببرد. دلایلی که در این تحقیق برای تنظیم‌گری هوش مصنوعی برشمرده می‌شود عبارت‌اند از [8]:

۱. نیاز تولیدکنندگان به درک یک چارچوب قانونی که در آن بتوانند به طور قابل‌اعتماد عمل کنند.
۲. نیاز مصرف‌کنندگان و جامعه به محافظت از وسایلی که ممکن است به آن‌ها آسیب برساند یا بر آن‌ها تأثیر منفی بگذارد.
۳. نیاز به فرصت‌های تجاری

این پژوهش همچنین اصول تنظیم‌گری هوش مصنوعی را مشتمل بر مواردی چون حفاظت از حریم خصوصی، مسئولیت‌پذیری، ایمنی و امنیت، شفافیت و توضیح‌پذیری، انصاف و عدم تبعیض، کنترل انسانی فناوری، مسئولیت حرفه‌ای و ارتقای ارزش‌های انسانی، برمی‌شمرد [8].

بویتن[8] در پژوهش خود با عنوان حکمرانی بر هوش مصنوعی: فرصت‌ها و چالش‌های اخلاقی، قانونی و فنی، تحلیل‌های عمیقی از چالش‌های اخلاقی، قانونی و فنی ناشی از توسعه رژیم‌های حکمرانی برای سیستم‌های هوش مصنوعی ارائه می‌کند. این پژوهش با گردآوری هشت مقاله محوری که توسط کارشناسان برجسته بین‌المللی در زمینه‌های هوش مصنوعی، علوم کامپیوتر، علوم داده، مهندسی، اخلاق، قانون، سیاست، رباتیک و علوم اجتماعی نوشته شده‌اند، بر سه حوزه زیر تمرکز می‌نماید [9]:

۱. حاکمیت اخلاقی: تمرکز بر مرتبط‌ترین مسائل اخلاقی مطرح شده توسط هوش مصنوعی، پوشش موضوعاتی مانند انصاف، شفافیت و حریم خصوصی (و نحوه واکنش در زمانی که استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند منجر به تبعیض در مقیاس بزرگ شود)، تخصیص خدمات و کالاها (استفاده از هوش مصنوعی توسط صنعت، دولت و شرکت‌ها) و جابه‌جایی اقتصادی (پاسخ اخلاقی به ناپدیدشدن مشاغل به دلیل اتوماسیون مبتنی بر هوش مصنوعی).
۲. توضیح‌پذیری و تفسیرپذیری: این دو مفهوم به‌عنوان سازوکارهای ممکن برای افزایش عدالت الگوریتمی، شفافیت و پاسخگویی در نظر گرفته می‌شوند. برای مثال، ایده «حق توضیح» تصمیمات الگوریتمی در اروپا مورد بحث است. این حق به افراد این حق را می‌دهد که اگر الگوریتمی در مورد آن‌ها تصمیم بگیرد (مثلاً امتناع از درخواست وام) توضیحی دریافت کنند. بااین‌حال، این حق هنوز تضمین نشده است. علاوه بر این، این که چگونه «توضیح الگوریتمی ایده‌آل» را تفسیر کنیم و چگونه این توضیحات را می‌توان در سیستم‌های هوش مصنوعی تعبیه کرد، باز باقی می‌ماند.
۳. حسابرسی اخلاقی: برای سیستم‌های الگوریتمی غیرقابل‌بررسی و بسیار پیچیده، سازوکارهای پاسخگویی نمی‌توانند صرفاً بر تفسیرپذیری تکیه کنند. سازوکارهای حسابرسی به‌عنوان راه‌حل‌های ممکن پیشنهاد شده‌اند که ورودی‌ها و خروجی‌های الگوریتم‌ها را از نظر سوگیری و آسیب‌ها بررسی می‌کنند، نه اینکه نحوه عملکرد سیستم را باز کنند [9].

کشورها و حوزه‌های همکاری بین‌المللی و منطقه‌ای در سراسر دنیا

[1] General Data Protection Regulation (GDPR)
[2] Ethical Guidelines for Trustworthy AI by the EU High-Level Expert Group on AI
[3] Artificial Intelligence Act (AI Act)
[4] IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems
[5] Montreal Declaration for a Responsible Development of Artificial Intelligence
[6] OECD Principles on Artificial Intelligence
[7] Almeida
[8] Buiten

به‌منظور تسهیل توسعه و به‌کارگیری هوش مصنوعی و غلبه بر آسیب‌ها و تهدیدات احتمالی ناشی از آن، راهکارها و رویکردهای تنظیم‌گری متعددی را به کار بسته‌اند. اگرچه ایده کلی تأثیر عوامل زمینه‌ای از دهه‌ها قبل شناخته شده است، در ادبیات آکادمیک، تعریف دقیق و قابل‌اتکایی از زمینه‌وندی و عوامل آن وجود ندارد و باتوجه‌به ماهیت مسئله سیاست‌گذاری یا تنظیم‌گری، متغیرهای زمینه‌ای متنوعی، توسط پژوهشگران معرفی شده است.

یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار مرتبط با زمینه‌وندی، متأثر از مبانی سیاسی و اقتصادی حاکم بر حکمرانی کشورها است که بر هر نوع قاعده‌گذاری از جمله قاعده‌گذاری مرتبط با هوش مصنوعی اثرگذار است. دراین‌خصوص، پیگاتو و همکاران سه الگوی مبنا را برای حکمرانی بر فناوری‌ها از جمله هوش مصنوعی، تعریف نموده‌اند:

۱. الگوی آمریکایی: از طریق فناوری‌های بزرگ و فراملی خود سیاست اقتصادی بازار آزاد را در اولویت قرار می‌دهد و داده و اطلاعات را به منابع قدرت سایبرنتیک تبدیل می‌کند.

۲. الگوی اروپایی: استفاده از مقررات سخت‌گیرانه منطقه‌ای در سطح اتحادیه برای کنترل و مهار شرکت‌های جهانی فعال در حوزه فضای مجازی

۳. الگوی چینی: مداخله مستقیم دولت و محدودسازی حضور شرکت‌های تکنولوژی خارجی و حمایت مالی و معنوی گسترده از توسعه فناوری به‌صورت بومی [10].

اهم ویژگی‌های مدنظر کشورها در حوزه تنظیم‌گری هوش مصنوعی که بعضاً از یکی از الگوهای زمینه‌ای فوق تبعیت می‌کند، در جدول ۱، آمده است [5].

جدول ۱. ویژگی‌های محوری اسناد راهبردی و تنظیم‌گری کشورهای مورد بررسی

کشور	ویژگی‌های محوری مدنظر در تنظیم‌گری
آلمان	شفافیت الگوریتمی، توضیح‌پذیری؛ سخت‌گیری و حساسیت در سلامت حفاظت از داده‌ها پیش‌بینی‌پذیری، شفافیت و اعتبارسنجی به‌منظور جلوگیری از سوءاستفاده و تبعیض در زمینه تصمیم‌گیری و پیش‌بینی سازگار کردن قوانین کپی‌رایت در زمینه استفاده از داده و متون برای اهداف یادگیری ماشین
آمریکا	طراحی سیستم‌های هوش مصنوعی قابل‌اعتماد و ایمن، قابل‌تفسیر توسعه سیستم‌های هوش مصنوعی هماهنگ با اهداف اخلاقی، قانونی و اجتماعی آمریکا طراحی سیستم‌های هوش مصنوعی امن و قدرتمند بهبود عدالت، شفافیت و پاسخگویی از طریق سیستم‌های هوش مصنوعی مالکیت فکری پاسخگویی به ثبات، عدالت، توجیه‌پذیری و امنیت
امارات	اطمینان از امنیت داده‌های خصوصی مردم اطمینان از حسن استفاده از هوش مصنوعی اطمینان از یکپارچگی و امنیت اطلاعات توجه بسیار بالا به امنیت و حفاظت از شهروندان حریم خصوصی شهروندان
ترکیه	لزوم وضع مقررات در مورداستفاده از داده و الگوریتم‌های هوش مصنوعی در زمینه‌های حساس همچون امنیت ملی و سلامت لزوم تعیین خط‌مشی سخت‌گیرانه در زمینه رعایت اخلاقیات هوش مصنوعی وضع مقررات سخت‌گیرانه برای محافظت از دارایی‌های فکری زمینه هوش مصنوعی در ترکیه
سوئد	توجه به ملاحظات اخلاقی ایمنی، امنیت اعتمادسازی و شفافیت تأکید بسیار بر ابعاد انسانی و اجتماعی هوش مصنوعی حفاظت از حریم خصوصی
قطر	نظام اخلاقی پاسخگو در مناطق حساس جامعه مانند دادگاه‌ها، بهداشت و سلامت محافظت از شهروندان در برابر حملات سایبری حفظ حریم خصوصی
مکزیک	حفظ حریم خصوصی محافظت از داده‌های شخصی برخورداری از نظام انعطاف‌پذیر مالکیت فکری
لیتوانی	رویکرد انسان‌محور به هوش مصنوعی توجه به اهداف اخلاقی AI قابل‌اعتماد بودن شفافیت و توجیه‌پذیری حفظ حریم خصوصی امنیت
فرانسه	اخلاق تخصصی هوش مصنوعی تضمین پاسخگویی توسعه‌دهندگان الگوریتم‌های هوش مصنوعی در قبال توسعه کاربردهای ضدبشری شفاف‌سازی سامانه‌های هوش مصنوعی
چین	هارمونی و دوستی انصاف و عدالت حریم خصوصی، امنیت و کنترل‌پذیری توجه بیشتر به حقوق مالکیت فکری و حمایت از حقوق فکری ارزش‌های اخلاقی

به عنوان نمونه‌ای از شاخص تنظیم‌گری هوش مصنوعی مبتنی بر رویکرد اروپایی می‌توان به قانون هوش مصنوعی اتحادیه اروپا اشاره نمود که با توجه به ساختار و زمینه حقوقی، اقتصادی، سیاسی و اجتماعی خاص، نگاشته شده است [11] و در محورهای هشت‌گانه تنظیم‌گری هوش مصنوعی، ارائه شده توسط آلمیدا و همکاران [8] و بویتن و همکاران [9] شامل پاسخگویی[1] [12]، ایمنی و امنیت[2] [13]، حریم خصوصی[3] [14]، شفافیت و توضیح‌پذیری[4] [15, 16]، انصاف و عدم‌تبعیض[5] [17, 18]، کنترل انسانی فناوری[6] [19]، مسئولیت حرفه‌ای[7] [20] و ارتقاء ارزش‌های انسانی[8]، به این رویکرد پایبند بوده است.

تجزیه‌وتحلیل زمینه‌وند یک مبنای اساسی برای توسعه هر استراتژی است که به دنبال ترویج تغییر است. برای درک بهتر محرک‌های ناکارآمدی یک سیاست یا راهبرد خاص، محققان به زمینه‌ای که فرایند سیاست‌گذاری و تنظیم‌گری در آن اتفاق می‌افتد اهمیت زیادی می‌دهند. چنین رویکردی اغلب با اصطلاح «آگاهی زمینه‌ای» مرتبط است که نخست در سال ۱۹۹۴ توسط شیلیت و تیمر[9] مورداستفاده قرار گرفته است [21]. اگر چه رویکردهای متعددی برای ترکیب فرایند تدوین و اعمال سیاست‌ها و مقررات با حساسیت‌های مرتبط با زمینه وجود دارد، اکثر این رویکردها بر این ایده مبتنی هستند که اتخاذ یک سیاست یا اعمال تنظیم‌گری تنها زمانی موفق خواهد بود که در هر مرحله از ارزیابی و به‌روزآوری سیاست‌ها، راهبردها و مقررات، زمینه‌وندی و پایبندی به الزامات زمینه، پیش‌فرض انگاشته شود.

۳- روش تحقیق

بررسی الگوهای تنظیم‌گری هوش مصنوعی نشان می‌دهد که هر نظام حقوقی برای یافتن الگو باید متناسب با اهداف، سیاست‌ها، اقتضائات و ویژگی‌های نظام حقوقی، فرهنگی و فناوری خود این موضوع را سامان دهد. پژوهش حاضر که از نظر ماهیت، توصیفی - تحلیلی و از نظر روش، مطالعه اسنادی و تحلیل کیفی محتوا است، در پی پاسخ به این پرسش است که آیا تنظیم‌گری هوش مصنوعی از بافتار و زمینه حاکم بر آن که می‌تواند سازمانی، کشوری یا جهانی باشد، متأثر می‌شود یا خیر. چه وجوهی از بافتار و زمینه بر تنظیم‌گری آن تأثیر می‌گذارد. تحلیل زمینه‌وند، نخستین مرحله هنگام برنامه‌ریزی برای مداخله است که مستلزم یک رویکرد تکرارشونده است که به طور سیستماتیک بر تغییرات زمینه‌ای نظارت نموده و از این طریق، امکان‌سنجی و اهمیت مداخله مستمر را تضمین نماید.

به‌عنوان یک نکته برجسته، در ادبیات موضوع، تمایل به استفاده از چارچوب PEST (مخفف سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فنی) برای طبقه‌بندی دقیق‌تر عوامل زمینه‌ای وجود دارد که عموماً ناشی از انگیزه اتخاذ چارچوب تثبیت شده‌ای است که قادر به دسته‌بندی عوامل از دیدگاه کلان محیطی باشد. یکی دیگر از ویژگی‌های ملموس و قابل‌اعتنای عوامل زمینه‌ای، پویایی هر متغیر زمینه است که باتوجه‌به اینکه محیط خارجی به‌سرعت در حال تغییر تلقی می‌شود، طبقه‌بندی ارائه شده در قالب الگوی PEST، تنوع و نوسان عوامل زمینه‌ای را با نگاه روشن‌تری مدنظر قرار می‌دهد. ارزیابی زمینه‌وند از طریق ابعاد مختلف به داشتن یک چشم‌انداز استراتژیک از مداخلات ممکن کمک می‌کند و PEST به‌عنوان یک راهنمای کلی، درعین‌حال که انعطاف‌پذیری قابل‌توجهی در انتخاب ابزار برای جمع‌آوری اطلاعات و دانش فراهم می‌کند، از تجزیه‌وتحلیل بیش از حد پراکنده و ازدست‌دادن تمرکز جلوگیری می‌کند.

لذا باتوجه‌به تمرکز مقاله بر عوامل محیطی و کلان مؤثر بر سیاست‌گذاری تنظیم‌گری، الگوی PEST به‌عنوان چارچوب مفهومی منتخب پژوهش در نظر گرفته شد. فرایند انجام پژوهش در مراحل زیر انجام شده است:

الف) گردآوری منابع نظری شامل کتب، مقالات علمی معتبر و اسناد سیاستی بین‌المللی در حوزه تنظیم‌گری هوش مصنوعی

ب) شناسایی و انتخاب اسناد راهبردی مرتبط با تنظیم‌گری هوش

[1] Accountability
[2] Safety and Security
[3] Privacy
[4] Transparency and Explainability
[5] Fairness and Non-discrimination
[6] Human Control of Technology
[7] Professional Responsibility
[8] Promotion of Human Values
[9] Schilit & Theimer

مصنوعی از کشورهای منتخب (از جمله اتحادیه اروپا، آمریکا، چین، آلمان، سوئد و ایران) با هدف تحلیل تطبیقی رویکردهای تنظیم‌گری

ج) استخراج و طبقه‌بندی شاخص‌ها و اصول‌محوری تنظیم‌گری از اسناد یادشده، شامل اصولی همچون پاسخگویی، ایمنی و امنیت، حریم خصوصی، شفافیت و توضیح‌پذیری، انصاف و عدم تبعیض، کنترل انسانی فناوری، مسئولیت حرفه‌ای و ارتقای ارزش‌های انسانی

د) تحلیل محتوای کیفی اسناد و تطبیق آن‌ها با ابعاد الگوی PEST به‌منظور استخراج مصادیق تنظیم‌گری زمینه‌مند در هر یک از ابعاد چهارگانه

ه) تدوین جداول مقایسه‌ای برای نمایش نیازهای تنظیم‌گری بر اساس بافتار در ابعاد سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فناورانه

و) در گام نهایی، بر اساس یافته‌ها و با درنظرگرفتن شرایط سیاسی، فرهنگی و فناورانه ایران، نیازهای مکمل و ویژه تنظیم‌گری در کشور تدوین و ارائه شد.

در این پژوهش، تحلیل داده‌ها به روش تحلیل مضمون[1] انجام‌گرفته است و به‌منظور افزایش اعتبار یافته‌ها، سه‌گانه سازی منابع (مطالعات نظری، اسناد سیاستی و منابع تطبیقی) موردتوجه قرار گرفته است.

۴- یافته‌ها

بر اساس تحلیل اسناد راهبردی کشورهای مختلف و تطبیق آن با چارچوب PEST، رویکردهای تنظیم‌گری هوش مصنوعی تفاوت‌های معناداری در پاسخ به دغدغه‌های سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فناورانه دارند. برای نمونه، همان‌گونه که در جدول ۱، قابل مشاهده است، در برخی کشورها مانند آلمان و فرانسه، شفافیت الگوریتمی و پاسخ‌گویی توسعه‌دهندگان مورد تأکید قرار گرفته است، در حالی‌که کشورهایی نظیر چین، امارات و ترکیه رویکرد متمرکزتری بر کنترل و امنیت در محیط سایبری دارند. براساس مطالعه اسناد کشورها در زمینه هوش‌مصنوعی و الگوهای حکمرانی حاکم بر جغرافیایی سیاسی کشورها و نیز فضای نیاز به تنظیم‌گیری برای رفع نگرانی‌ها و دغدغه‌های کشورها، چارچوب‌های نیاز در چهاردسته سیاسی، اقتصادی، فرهنگی و فناورانه احصاء شده است.

در بعد سیاسی، کشورهای مختلف با چالش‌هایی مانند استفاده از هوش مصنوعی در تولید اخبار جعلی، نقض حریم خصوصی سیاسی، و تهدیدات امنیت ملی مواجه‌اند. بر همین اساس، سیاست‌گذاری‌هایی در زمینه شفافیت الگوریتمی، مقابله با سلاح‌های خودکار هوشمند، و مشارکت در تدوین هنجارهای بین‌المللی طراحی شده‌اند.

در بعد اقتصادی، تمرکز کشورها بر بهره‌برداری از ظرفیت‌های رشد اقتصادی ناشی از هوش مصنوعی، در عین مدیریت مخاطراتی مانند بیکاری ساختاری، نابرابری اقتصادی و سوگیری در نظام‌های توصیه‌گر بوده است. در این بُعد، لزوم طراحی سازوکارهای تنظیم‌گر برای حمایت از مشاغل، مقابله با اطلاعات اقتصادی آلوده و حفظ منافع مصرف‌کنندگان موردتأکید قرار گرفته است.

در بعد اجتماعی، مضامینی همچون حفظ ارزش‌های فرهنگی، بی‌طرفی قومی و مذهبی در سامانه‌ها، حفاظت از حریم خصوصی افراد در حوزه سلامت و آموزش، و پیشگیری از اثرات منفی هوش مصنوعی بر نهادهای اجتماعی (مانند خانواده و آموزش) استخراج شده‌اند. همچنین، موضوع آموزش عمومی و ارتقای سواد هوش مصنوعی در جامعه از الزامات مهم تنظیم‌گری تلقی شده است.

در بعد فناورانه نیز، نیاز به امنیت زیرساخت‌های هوش مصنوعی، مقابله با دست‌کاری الگوریتم‌ها، مدیریت داده‌ها و قابلیت تعامل‌پذیری بین سامانه‌ها مطرح شده است. لزوم شفافیت فنی، اعتبارسنجی مدل‌ها، طراحی قابلیت کنترل انسانی و پیش‌بینی پیامدهای فنی سامانه‌ها از جمله مضامین کلیدی این بخش است.

۴-۱- سیاست و زمینه‌وندی

رابطه «بافتار» و «سیاست» در دهه گذشته به طور فزاینده‌ای در تئوری و عمل بدیهی شده است. محققین دریافته‌اند که زمینه سیاسی در شکل‌دهی به موفقیت یا شکست مداخلات سیاستی حیاتی است. بوکنیا و همکاران، زمینه سیاسی مداخلات تنظیم‌گری را در دو حوزه نهادی جامعه مدنی و سیاسی و تعاملات آن‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای برمی‌شمرند [22]. در این تفسیر، جامعه سیاسی و اراده سیاسی کارگزاران دولتی و نقشی که نهادهای سیاسی رسمی و غیررسمی ایفا می‌کنند، از یک سو و ظرفیت و تعهد جامعه مدنی مستقل ازسوی‌دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این رویکرد عواملی چون ساختار سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری کشورها، قوانین و مقررات موضوعه، رویکرد تنظیم‌گری، سطح مداخلات بخش خصوصی و سازمان‌های مردم‌نهاد در فرایند تنظیم‌گری، سازوکارهای برگزاری انتخابات، رویکردهای دیپلماتیک و

[1] Thematic Analysis

سیاست‌های حوزه بین‌الملل کشورها در ابعاد منطقه‌ای و بین‌المللی در تنظیم‌گری مبتنی بر بافتار هوش مصنوعی، موضوعیت می‌یابد (جدول ۲).

جدول ۲. نیازهای تنظیم‌گری هوش مصنوعی مبتنی بر بافتار سیاسی

حوزه عمل تنظیم‌گری	زمینه سیاسی (مصادیق مهم)
پاسخگویی	- مقابله با به‌کارگیری هوش مصنوعی در تولید اخبار جعلی برای انتخابات - مقابله با به‌کارگیری هوش مصنوعی در تولید اخبار جعلی برای نقض صلح
ایمنی و امنیت	- مقابله با استفاده از هوش مصنوعی برای فعالیت‌های تروریستی - مقابله با استفاده از هوش مصنوعی در ایجاد بحران‌های سیاسی - اجتماعی - مقابله با شکل‌گیری موتورهای نفوذ سیاسی مبتنی بر پردازش زبان طبیعی
حریم خصوصی	- مقابله با به‌کارگیری هوش مصنوعی در نقض حریم خصوصی کنشگران سیاسی - مقابله با به‌کارگیری هوش مصنوعی در فهم رأی و نظر اشخاص در انتخابات
شفافیت و توضیح‌پذیری	- شفافیت الگوریتم‌ها و مدل‌های هوش مصنوعی مرتبط با تحلیل‌های انتخاباتی - امکان ارائه توضیح قابل‌فهم برای نخبگان سیاسی در باره استنتاجات سامانه‌های هوش مصنوعی بکار گرفته شده در تحلیل‌های انتخاباتی
انصاف و عدم تبعیض	- مقابله با اطلاعات آلوده در فرایند آموزش و یادگیری سامانه‌های هوش مصنوعی در حوزه تحلیل‌های سیاسی و انتخابات - مقابله با اطلاعات آلوده در فرایند آموزش و یادگیری سامانه‌های هوش مصنوعی در حوزه تحلیل‌های مرتبط با اقوام، مذاهب و جنسیت‌ها
کنترل انسانی فناوری	- مقابله با تولید و به‌کارگیری سلاح‌های هوشمند خودمختار - مشارکت در تصویب کنوانسیون‌ها و هنجارسازی‌های بین‌المللی در زمینه تولید و استفاده از تسلیحات کشنده مبتنی بر هوش مصنوعی
مسئولیت حرفه‌ای	- آموزش عمومی برای آگاهی از خطرات هوش مصنوعی در زمینه اخبار جعلی مرتبط با اشخاص سیاسی، انتخابات و بحران‌های سیاسی - اجتماعی - مقابله با اطلاعات آلوده در فرایند آموزش و یادگیری سامانه‌های هوش مصنوعی در زمینه قدرت انتخاب مردم

۴-۲- اقتصاد و زمینه‌وندی

بافت اقتصادی به محیط خارجی اشاره دارد که بر سیاست‌های مالی، استراتژی‌های تجاری و رفتار مصرف‌کننده تأثیر می‌گذارد و عواملی مانند نرخ تورم، سطح اشتغال و مقررات دولتی را در بر می‌گیرد. بیشتر مطالعات مرتبط تأکید می‌کنند که هوش مصنوعی این پتانسیل را دارد که به طرق مختلف بر رشد اقتصادی تأثیر بگذارد. بااین‌حال، شایان‌ذکر است که تأثیر هوش مصنوعی بر رشد اقتصادی در همه بخش‌ها و مناطق یکسان نیست. برخی از صنایع ممکن است تغییرات و رشد قابل‌توجهی را تجربه کنند، درحالی‌که برخی دیگر ممکن است با چالش یا اختلال مواجه شوند. علاوه بر این، پذیرش و ادغام موفقیت‌آمیز فناوری‌های هوش مصنوعی نیازمند زیرساخت‌های کافی، دردسترس‌بودن داده‌ها و سیاست‌های حمایتی است که می‌تواند در اقتصادهای مختلف متفاوت باشد. دسترسی به فناوری‌های هوش مصنوعی، زیرساخت‌های دیجیتال و مهارت‌های هوش مصنوعی می‌تواند بر میزان بهره‌مندی کشورها و صنایع از هوش مصنوعی تأثیر بگذارد. به‌علاوه مواردی چون میزان رشد اقتصادی و متغیرهای کلان اقتصادی کشورها، تحول مهارت‌ها، انقلاب تکنولوژیکی، سیاست‌های مدیریت ریسک، مدیریت مصرف و اقتصاد سبز بر تنظیم‌گری زمینه‌وند هوش مصنوعی مؤثر خواهد بود [23].

هوش مصنوعی توسط بسیاری به عنوان موتور بهره‌وری و رشد اقتصادی تلقی می‌شود که می‌تواند کارایی را افزایش دهد و با تجزیه و تحلیل حجم زیادی از داده‌ها، فرآیند تصمیم‌گیری را بهبود بخشد. همچنین می‌تواند باعث ایجاد محصولات و خدمات، بازارها و صنایع جدید شود و در نتیجه تقاضای مصرف‌کننده را افزایش داده و جریان‌های درآمدی جدیدی ایجاد کند. با این حال، هوش مصنوعی ممکن است تأثیر مخربی نیز بر اقتصاد و جامعه داشته باشد. برخی هشدار می‌دهند که این امر می‌تواند منجر به ایجاد ابر شرکت‌ها - مراکز ثروت و دانش - شود که می‌تواند اثرات مضری بر اقتصاد گسترده‌تر داشته باشد [24]. همچنین ممکن است شکاف بین کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه را افزایش دهد و نیاز به کارگران با مهارت‌های خاص را افزایش دهد و در عین حال کارکنان فعلی را بیکار کند. این روند اخیر می تواند پیامدهای گسترده‌ای برای بازار کار داشته باشد. کارشناسان همچنین در مورد پتانسیل آن برای افزایش نابرابری، کاهش دستمزدها و کاهش پایه مالیات هشدار می‌دهند که همگی از جمله عوامل اقتصادی هستند که لازم است در فرآیند تنظیم‌گری مبتنی بر بافتار مدنظر قرار گیرند [25].

۴-۳- فرهنگ و زمینه‌وندی

ازآنجاکه هوش مصنوعی به ادغام در همه جنبه‌های زندگی ادامه می‌دهد، اطمینان از اینکه سیستم‌های هوش مصنوعی ارزش‌های مشترک انسانی را منعکس می‌کنند و از آن‌ها حمایت می‌کنند، ضروری است. مفهوم "ارزش‌های انسانی" در فرهنگ‌ها و زمینه‌ها متفاوت است و پرسش‌های مهمی را مطرح می‌کند. به‌عنوان‌مثال، حریم خصوصی یک حقوق اساسی بشر در نظر گرفته می‌شود، اما تفسیر آن می‌تواند بین مناطق مختلف بسیار متفاوت باشد.

درحالی‌که برخی از کشورها حریم خصوصی افراد را در اولویت قرار می‌دهند، برخی دیگر ممکن است بر امنیت جمعی در حفاظت از داده‌های شخصی تأکید کنند.

جدول ۳. نیازهای تنظیم‌گری هوش مصنوعی مبتنی بر بافتار اقتصادی

حوزه عمل تنظیم‌گری	زمینه اقتصادی (مصادیق مهم)
پاسخگویی	- مقابله با به‌کارگیری هوش مصنوعی در تولید اخبار جعلی برای تخریب محصولات و صنایع و برندها
ایمنی و امنیت	-مقابله با استفاده از هوش مصنوعی در ایجاد بحران‌های اقتصادی، نایابی کالاها و یا نوسانات قیمتی
حریم خصوصی	- مقابله با به‌کارگیری هوش مصنوعی در نقض حریم خصوصی مرتبط با درآمد اشخاص
شفافیت و توضیح‌پذیری	-شفافیت الگوریتم‌ها و مدل‌های هوش مصنوعی مرتبط با تحلیل‌های اقتصادی و نظام‌های توصیه در حوزه خریدوفروش و تجارت در سکوها -امکان ارائه توضیح قابل‌فهم در باره استنتاجات سامانه-های هوش مصنوعی بکار گرفته شده در تصمیم‌سازی-های اقتصادی
انصاف و عدم تبعیض	-مقابله با اطلاعات آلوده در فرایند آموزش و یادگیری سامانه‌های هوش مصنوعی در حوزه تحلیل‌های اقتصادی و ارائه مشاوره‌های اقتصادی -مقابله با به‌کارگیری سویه‌دار سامانه‌های هوش مصنوعی در حوزه تحلیل‌های مرتبط با تبلیغات اقتصادی و معرفی صنایع و محصولات -برنامه‌ریزی برای مقابله با تشدید نابرابری‌ها به‌واسطهٔ شکاف هوش مصنوعی در افراد و صنایع
مسئولیت حرفه‌ای	-برنامه‌ریزی برای ممانعت ازدست‌رفتن بسیاری از مشاغل صنعتی به واسطه استفاده از عامل‌های هوشمند و ربات‌ها -آموزش عمومی برای آگاهی از خطرات هوش مصنوعی در زمینه اخبار جعلی مرتبط با محصولات و صنایع -آموزش عمومی برای آگاهی از مزایای استفاده از هوش مصنوعی در یافتن شغل و تأمین مایحتاج ارزان‌تر -تعیین نقش‌های ملی برای استفاده از هوش مصنوعی در زمینه تأمین حقوق مصرف‌کنندگان محصولات -مقابله با به‌هم‌ریختگی‌های ناشی از فراوانی بی‌سابقه کالاها به واسطه به‌کارگیری هوش مصنوعی در فرایندهای تولید -تعیین نقش‌های ملی برای استفاده از هوش مصنوعی در کشف تقلب‌ها در حوزه استفاده از محصولات فکری و اعتباربخشی به استنتاج‌های زمینه
ارتقای ارزش-های انسانی	- استفاده از هوش مصنوعی در زمینه توسعه آزادی مثبت مرتبط با حوزه‌های اقتصادی از قبیل انتخاب شغل، سرمایه‌گذاری خطرپذیر

یکی از نکات کلیدی اهمیت درک تفاوت‌های فرهنگی هنگام توسعه سیستم‌های هوش مصنوعی است و توسعه‌دهندگان هوش مصنوعی به‌جای اتخاذ یک مدل واحد، باید زمینه‌های فرهنگی، قانونی و اجتماعی منحصربه‌فردی را که سیستم‌های هوش مصنوعی آن‌ها در آن کار می‌کنند، در نظر بگیرند. به‌عنوان‌مثال، یک هوش مصنوعی امتیازدهی اعتباری که در مناطق مختلف استفاده می‌شود ممکن است به مجموعه‌داده‌های آموزشی محلی نیاز داشته باشد که رفتارهای مالی گروه‌های جمعیتی مختلف را منعکس کند. در پژوهش‌های متأخر هوش مصنوعی به‌عنوان یک موضوع اجتماعی و بوم‌شناختی در نظر گرفته می‌شود و عوامل تعیین‌کننده هویت اجتماعی و ادراکات اجتماعی هوش مصنوعی را که متغیر وابسته اصلی است، برجسته می‌کند. کانزولا و همکاران نشان دادند که متغیرهای هویت اجتماعی خاص مربوط به ارزش‌های بنیادی و اجتماعی، مانند مذهب، دیدگاه‌ها در مورد فناوری‌های جدید، موقعیت اقتصادی و سیاسی و آموزش، بر ادراک اجتماعی از هوش مصنوعی به‌صورت مثبت یا منفی تأثیر می‌گذارند [26].

در بعد اخلاق نیز مطابق پژوهش سرنقی و احمدزاده، اخلاقیات حاکم بر جامعه در حوزه‌های زیر بر کسب‌وکارها تأثیر می‌گذارد و یا تأثیر می‌پذیرد که باتوجه‌به ابتنای این ابعاد بر بافتار و زمینه، اهمیت تنظیم‌گری زمینه‌وند در ابعاد فرهنگی و اخلاقی هوش مصنوعی را بیش از سایر ابعاد برجسته می‌سازد [27]:

۱. اخلاق فردی: این سطح به معیارهای اخلاقی مرتبط با درون انسان می‌پردازد و مبتنی بر وجدان فردی است. این نوع اخلاق مبنای کسب‌وکار و کنش هدفمند انسان است. در این زمینه اولین و بنیادی‌ترین ارزش اخلاقی را می‌توان امید به زندگی، زندگی انسانی و سلامت جسمی و روانی و اعتماد به اطرافیان و جامعه و نیز پرهیز از خشونت و خلاف‌کاری دانست.
۲. اخلاق شرکتی و جمعی کوچک (اخلاق سازمانی): این سطح به خانواده، سازمان و شرکت مرتبط است که فرد بدان تعلق دارد. در این مرحله محدودیت‌هایی بر عمل اخلاقی وارد می‌شود و چه‌بسا فردی که اصول اخلاقی مشخصی را رعایت نمی‌کند ممکن است در این مرحله اخلاقی عمل کند و به قواعد و اصول اخلاقی سازمان و کسب‌وکار پایبند باشد. نمود عینی آن توجه برخی شرکت‌ها به مسئولیت‌های اجتماعی است و نیز اخلاقی عمل‌نکردن بعضی از شرکت‌ها در قبال پدیده‌هایی نظیر فرار مالیاتی از مصادیق این سطح محسوب می‌شود.
۳. اخلاق اجتماعی و شبکه‌ای: این سطح در شبکه‌ای از

سازمان‌ها و یا اجتماع معنی دارد و می‌تواند در گستره اجتماعی و همه شرکت‌ها و سازمان‌ها تعریف شود و همه ارتباطات را از منظر فردی و سازمانی در برگیرد. اخلاق شبکه‌ای تعهد به رعایت حقوق محیط و شبکه‌ای از کسب‌وکارها است که کل شبکه را شامل می‌شود و به‌تنهایی و با اخلاقی بودن برخی از اجزا به دست نمی‌آید.

۴. اخلاق تصمیم‌گیران: این سطح به رفتار حاکمان، مسئولان و تصمیم‌گیران جامعه مرتبط است که می‌تواند سطح اخلاق در جامعه را ارتقا بخشد و تأثیر وسیعی داشته باشد.

جدول ۴. نیازهای تنظیم‌گری هوش مصنوعی مبتنی بر بافتار اجتماعی

حوزه عمل تنظیم‌گری	زمینه اجتماعی (مصادیق مهم)
پاسخگویی	- تعیین نظام مسئولیت‌پذیری و پاسخ‌گویی سکوهای فضای مجازی برای اجبار به استفاده از هوش مصنوعی برای تعدیل محتواهای مضر
ایمنی و امنیت	- مقابله با به‌کارگیری هوش مصنوعی در ایجاد بحران‌های اجتماعی، مهندسی ذهن و تضعیف نقش نهادهای مهم مانند خانواده، مشاوره‌های غلط مانند ترویج خودکشی
حریم خصوصی	- مقابله با به‌کارگیری هوش مصنوعی در زمینه نقض حریم خصوصی مرتبط با سلامت افراد
شفافیت و توضیح‌پذیری	- شفافیت الگوریتم‌ها و مدل‌های مرتبط با ارائه تحلیل‌های اجتماعی و متون پیشنهادی در جستجوها و نیز ارائه خدمات اجتماعی - شرکت‌هایی که از سامانه‌های هوش مصنوعی استفاده می‌کنند باید فاش کنند که در کجا و به چه منظوری از سامانه‌های مذکور استفاده می‌کنند - امکان توضیح‌دادن استنتاجات در ارائه خدمات اجتماعی
انصاف و عدم تبعیض	- بی‌طرفی قومی، مذهبی و جنسیتی در ارائه نتایج جستجو - مقابله با اطلاعات آلوده در آموزش و یادگیری سامانه‌های هوش مصنوعی برای ارائه خدمات اجتماعی و مشاوره - عدم استفاده از سامانه‌های هوش مصنوعی برخوردار از داده‌های ناکافی در داوری صلاحیت‌ها مانند استخدام زنان
کنترل انسانی فناوری	- کنترل انسانی سامانه‌های آموزشی مبتنی بر هوش مصنوعی - کنترل انسانی سامانه‌های مشاوره‌ای سلامت و روان‌شناسی مبتنی بر هوش مصنوعی
مسئولیت حرفه‌ای و اجتماعی	- آموزش خطرات استفاده از هوش مصنوعی در حوزه‌های سلامت، روان‌شناسی، خانواده و . - ارائه اسناد و آمار موارد و مشکلات به وجود آمده در جامعه به‌واسطهٔ استفاده نادرست از هوش مصنوعی و یا استفاده افراطی - به مهندسان هوش مصنوعی باید مجموعه‌ای از اصول استاندارد آموزش داده شود تا یاد بگیرند که از حقوق کاربران محافظت کنند (شبیه سوگند بقراط پزشکان)

۴-۴- فناوری و زمینه‌وندی

در سطح ملی، پیشرفت فناوری می‌تواند از طریق اختراع و نوآوری، پذیرش و انطباق فناوری‌های از قبیل موجود و گسترش فناوری‌ها در بین شرکت‌ها، افراد و بخش عمومی در داخل کشور رخ دهد. سرعت پیشرفت فناوری در یک کشور، خواه از طریق ایجاد فناوری (بهره‌برداری از دانش از قبل موجود) یا پذیرش و انطباق فناوری‌های ایجاد شده در مناطق دیگر، به میزان مواجهه کشور با فناوری‌های خارجی و توانایی اقتصاد داخلی برای جذب و انطباق فناوری‌هایی که در معرض آن است بستگی دارد. بسیاری از کشورهای درحال‌توسعه مهارت‌های لازم برای مشارکت معنادار در توسعه نوآوری را ندارند. در نتیجه، بخش عمده‌ای از پیشرفت تکنولوژیک در کشورهای درحال‌توسعه از طریق جذب و انطباق فناوری‌های از قبل موجود حاصل می‌شود [28].

در این راستا، توانمندی‌های فناورانه در مسیر مواجهه با فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی اهمیت می‌یابند. به‌عنوان نمونه زیرساخت فناوری اطلاعات که به مسائل مربوط به سیستم‌های اساسی فناوری اطلاعات موردنیاز برای پذیرش هوش مصنوعی اشاره دارد، فناوری اطلاعات و امنیت داده‌ها که برای پذیرش هوش مصنوعی حیاتی هستند، اتصال و قابلیت تعامل فرایندهای مبتنی بر هوش مصنوعی در سیستم‌های تولید فناوری اطلاعات، همگی از عوامل کلیدی فناورانه در توسعه هوش مصنوعی به شمار می‌آیند.

در سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، عدم دسترسی به داده‌ها اغلب مانعی برای پذیرش است؛ بنابراین کلان‌داده می‌تواند به طور قابل‌توجهی کیفیت برنامه‌های کاربردی هوش مصنوعی را بهبود بخشد. قابلیت تعامل و تبادل داده‌ها و اساس سازگاری هوش مصنوعی با سیستم‌ها، ساختارها و زیرساخت‌های موجود، یکی دیگر از الزامات مهم برای پذیرش در نظر گرفته می‌شود [29].

۵- نتیجه‌گیری

هوش مصنوعی کلیدواژه مهم عصر حاضر به شمار می‌رود که به‌صورت جدی و پررنگ تمام ابعاد زندگی بشر را متأثر کرده است. هوش مصنوعی با سرعتی چشمگیر در حال تبدیل‌شدن به بخشی از زندگی روزمره ما است و علی‌رغم آن که مزایای بی‌شماری را به جامعه ارائه می‌دهد، نگرانی‌هایی در مورد غیرقابل‌پیش‌بینی بودن و غیرقابل‌کنترل بودن آن وجود دارد. برای افزایش مزایای هوش مصنوعی و درعین‌حال به‌حداقل‌رساندن مخاطرات آن، دولت‌ها در

سراسر جهان باید دامنه و عمق خطرات ناشی از آن را بهتر درک کنند و فرایندها و ساختارهای نظارتی و حاکمیتی را برای مقابله با این چالش‌ها توسعه دهند. پژوهش حاضر به معرفی چارچوب جدیدی پرداخته است که به بررسی کلی مفهوم تنظیم‌گری زمینه-وند هوش مصنوعی و عوامل زمینه‌ای که بر وضع مقررات در این حوزه تأثیر می‌گذارند، کمک می‌کند. با الهام از چارچوب ارائه شده بر اساس PEST در بخش پنجم این مقاله، جدول ۶، نیازهای تنظیم-گری زمینه‌وند را برای کشور ما که علاوه بر مصادیق بخش یافته‌ها می‌تواند نقش مکمل داشته باشد، ارائه می‌کند.

جدول ۵. نیازهای تنظیم‌گری هوش مصنوعی مبتنی بر بافتار فناورانه

حوزه عمل تنظیم‌گری	زمینه فنی (مصادیق مهم)
پاسخگویی	- مسئولیت‌پذیری و پاسخگویی در نحوه در دسترس قراردادن ابزارهای هوش مصنوعی
ایمنی و امنیت	- امن بودن دسترسی به الگوریتم‌ها و مدل‌ها و مقابله بانفوذ برای دست‌کاری آن‌ها - مقابله با روش‌های آلوده‌سازی داده‌های موردنظر برای آموزش و یادگیری ماشینی
حریم خصوصی	- تنظیم سامانه‌های هوش مصنوعی به ارائه خدمات تحلیلی و استنتاجی مبتنی بر رضایت اشخاص - تمهیدات ویژه و سخت‌گیرانه در توسعه و به‌کارگیری تجهیزات هوش مصنوعی پیشرفته مانند XR که اطلاعات وسیعی از تمام لحظات زندگی افراد و محیطشان را ذخیره می‌کنند.
شفافیت و توضیح‌پذیری	- شفافیت الگوریتم‌ها و مدل‌ها برای بررسی‌های آزمایشگاهی - ارائه روش استفاده آسان از موتورهای توضیح‌دهنده سامانه‌های هوش مصنوعی در زمینه تحلیل‌ها و استنتاج‌ها
انصاف و عدم تبعیض	- اجبار به خوداظهاری سامانه‌های هوش مصنوعی در زمینه قدرت داده‌ای و میزان اعتماد به تحلیل‌ها و استنتاج‌ها - آزمایش‌های دقیق باید در ابزارهای آموزش و یادگیری هوش مصنوعی قرارداده شده باشد تا از به‌کارگیری مدل‌هایی با پوشش ناعادلانه ویژگی‌های جمعیت‌شناسی جلوگیری شود.
کنترل انسانی فناوری	- تعبیه در پشتی اخذ فرمان انسانی دارای بالاترین اولویت در عملیات سامانه‌ها و ربات‌های هوش مصنوعی

جدول ۶. نیازهای مکمل تنظیم‌گری زمینه‌وند هوش مصنوعی برای ایران

حوزه تنظیم‌گری	نیاز تنظیم‌گری وابسته به بافتار
امنیت فناوری‌ها و سامانه‌های هوش مصنوعی	طراحی چارچوب جامع امنیت فناوری‌های هوش مصنوعی با تمرکز بر الگوریتم‌ها، زیرساخت‌ها، داده‌ها و مدل‌های زبانی بومی، با هدف جلوگیری از دست‌کاری، مسموم‌سازی داده، رخنه‌های امنیتی و نفوذ در سامانه‌های حساس ملی وضع مقررات افشای آسیب‌پذیری‌ها[1] و تعیین مسئولیت برای توسعه‌دهندگان در برابر نفوذها و حملات وضع الزامات بهره‌گیری از الگوهای امن توسعه در الگوریتم‌ها و مدل‌های داخلی
حفظ ارزش‌های اخلاقی	تدوین چارچوب الزام‌آور اخلاقی برای توسعه، استقرار و استفاده از سامانه‌های هوش مصنوعی، مبتنی بر ارزش‌های اسلامی - ایرانی ایجاد نظام ثبت و ممیزی اخلاقی سامانه‌های هوشمند در حوزه‌هایی مانند آموزش، سلامت و قضا
هنجارسازی‌های بین‌المللی	نهادسازی برای مشارکت رسمی در فرایندهای هنجارسازی بین‌المللی در حوزه هوش مصنوعی و تدوین آیین‌نامه مشارکت در استانداردسازی جهانی با حفظ منافع حاکمیتی تعریف سازوکار ارزیابی تطابق مقررات داخلی با الزامات بین‌المللی در حال تکوین
امنیت ملی و سلاح‌های کشنده	تدوین مقررات ملی برای ممنوعیت، محدودسازی یا پایش توسعه تسلیحات هوشمند خودمختار در داخل کشور و الزام مشارکت در نهادهای بین‌المللی کنترل تسلیحات AI محور
مدیریت تسلیحات اجتماعی	تدوین و تصویب نظام مقابله با تسلیحات اجتماعی مبتنی بر هوش مصنوعی و تقسیم کار ملی زمینه (برنامه‌های مقابله با جعل، نفرت‌پراکنی، مهندسی ذهن و...) متناسب با برنامه‌ریزی‌های هدفمند قدرت‌های بزرگ علیه ایران
تسهیل‌گری	رفع موانع دسترسی به پیکره‌های داده‌ای فارسی و نیز سامانه‌های در اختیار دولت برای کسب‌وکارهای بومی و نیز قاعده‌گذاری برای در اختیار گذاشتن داده‌های سکوهای بزرگ خصوصی داخلی با حفظ حریم خصوصی
تأمین داده‌ها و پیکره‌های معتبر و مبتنی بر منابع رسمی	تدوین دستورالعمل ارائه محتواها، اسناد و سوابق معتبر برای ایجاد پیکره‌های زبانی بزرگ مبتنی بر زبان فارسی و فرهنگ ملی به متقاضیان داخلی جهت ایجاد رقابت و کسب مزیت نسبی نسبت به ابزارهای خارجی
اقتصاد و صنعت هوش مصنوعی	دستورالعمل حمایت ویژه از کسب‌وکارهای هوش مصنوعی و نظام حمایت از ایده‌های زیرساختی و کاربردی و نیز ایجاد تقاضا در بخش‌های دولتی برای محصولات بومی

[1] Vulnerability Disclosure

حفظ زبان و فرهنگ	دستورالعمل حفظ زبان فارسی و فرهنگ بومی در فناوری‌ها و سامانه‌های مختلف هوش مصنوعی مانند سامانه‌های ترجمه، تدوین قراردادها، سامانه‌های آموزشی، ارائه مشاوره‌ها
اعتباربخشی ابزارها و خدمات	نظام سنجش و اعتبارسنجی کیفیت محصولات و خدمات مبتنی بر هوش مصنوعی در کشور و ایجاد آزمایشگاه‌های تخصصی مرتبط برای توسعه اعتماد به استفاده از محصولات داخلی و خارجی
سواد هوش مصنوعی	تقسیم کار ملی برای ترویج استفاده صحیح از هوش مصنوعی بخصوص مبتنی بر زبان فارسی و فرهنگ ملی
امنیت شغلی و هوش مصنوعی	تدوین سیاست‌ها، الزامات و توصیه‌های ملی برای مصالحه بین استفاده از هوش مصنوعی و حذف مشاغل و حوزه-های اولویت‌دار توسعه هوش مصنوعی با درنظرگرفتن ارزش‌های انسانی موردنظر فرهنگ اسلامی و اسناد بالادستی (تدبیر فناوری هوش مصنوعی در مقابل جبر این فناوری)

این پژوهش با ارائه یک چارچوب به بررسی ابعاد زمینه‌وند تأثیرگذار بر تنظیم‌گری هوش مصنوعی در بافتار سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فناورانه پرداخته و مصادیق تنظیم‌گری هوش مصنوعی مبتنی بر بافتار را در ابعاد محوری تنظیم‌گری هوش مصنوعی مشتمل بر پاسخگویی، ایمنی و امنیت، حریم خصوصی، شفافیت و توضیح-پذیری، انصاف و عدم تبعیض، کنترل انسانی فناوری، مسئولیت حرفه‌ای و ارتقای ارزش‌های انسانی، مورد واکاوی قرار داده است. در انتها بسته به شرایط کشور نیازهای مکمل را نیز ارائه نموده است که این نیازها برای کشور ما باتوجه‌به شرایط سیاسی و فرهنگی خاص آن می‌تواند مصادیق خاصی را متفاوت از دیگر کشورها دنبال کند.

مراجع

[1] C. Rigano, "Using artificial intelligence to address criminal justice needs," *National Institute of Justice Journal*, vol. 280, no. 17, pp. 1-10, 2019.

[2] E. Musk, Interviewee, *Elon Musk Warns Governors: Artificial Intelligence Poses 'Existential Risk'*. [Interview]. 27 November 2017.

[3] D. B. Audretsch, C. S. Hayter and A. N. Link, "Concise guide to entrepreneurship, technology and innovation," Edward Elgar Publishing, 2015.

[4] N. Maslej, L. Fattorini, E. Brynjolfsson, J. Etchemendy, K. Ligett, T. Lyons and J. Manyika, "The AI index 2023 annual report," Stanford University, Stanford, 2023.

[5] H. Mollazadeh, A. Hashempoor, A. Sharifian, H. Namazi, S. Mirzaei and M. Dehghan, "Artificial intelligence technology and strategic approaches of governments," Vice-Presidency for science and technology affairs, Tehran, 2021.[In persian]

[6] "An Introduction to the Philosophy of Artificial Intelligence," National Cyberspace Center Research Institute, Tehran, 2019. [In persian]

[7] S. M. M. Ghamami, "Editor's Note: An Introduction to Why Legislate Artificial Intelligence," *Quarterly Journal of Government and Law*, vol. 5, no. 1, pp. 1-8, 2024. [In persian]

[8] P. G. R. de Almeida, C. D. dos Santos and J. S. Farias, "Artificial intelligence regulation: a framework for governance," *Ethics and Information Technology*, vol. 23, no. 3, pp. 505-525, 2021.

[9] M. C. Buiten, "Towards intelligent regulation of artificial intelligence," *European Journal of Risk Regulation*, vol. 10, no. 1, pp. 41-59, 2019.

[10] J. Pigatto, M. Datysgeld and L. Silva, "Internet governance is what global stakeholders make of it: a tripolar approach," *Revista Brasileira de Política Internacional*, vol. 64, no. 2, p. e011, 2021.

[11] "The EU Artificial Intelligence Act," 2024.

[12] C. Novelli, M. Taddeo and L. Floridi, "Accountability in artificial intelligence: what it is and how it works," *Ai & Society*, vol. 39, no. 4, pp. 1871-1882, 2024.

[13] M. Almada and N. Petit, "The EU AI Act: Between the rock of product safety and the hard place of fundamental rights," *Common market law review*, vol. 62, no. 1, 2025.

[14] S. Musch, M. C. Borrelli and C. Kerrigan, "Balancing AI innovation with data protection: A closer look at the EU AI Act," *Journal of Data Protection & Privacy*, vol. 6, no. 2, pp. 135-152, 2023.

[15] C. Panigutti, R. Hamon, I. Hupont, D. Fernandez Llorca, D. Fano Yela, H. Junklewitz and E. Gomez, "The role of explainable AI in the context of the AI Act," in *Proceedings of the 2023 ACM conference on fairness, accountability, and transparency*, 2023.

[16] T. Tzimas, "Algorithmic transparency and explainability under eu law," *European Public Law*, vol. 29, no. 4.

[17] L. Deck, J. L. Müller, C. Braun and D. Zipperling, "Implications of the AI Act for Non-Discrimination Law and Algorithmic Fairness," *arXiv preprint arXiv:2403.20089*, 2025.

[18] K. Meding, "It's complicated. The relationship of algorithmic fairness and non-discrimination regulations in the EU AI Act," *arXiv preprint arXiv:2501.12962*, 2025.

[19] J. Davidovic, "On the purpose of meaningful human control of AI," *Frontiers in big data*, vol. 5, 2023.

[20] M. Hedlund and E. Persson, "Expert responsibility in AI development," *AI & SOCIETY*, vol. 39, no. 2, pp. 453-464, 2024.

[21] B. N. Schilit and M. M. Theimer, "Disseminating active map information to mobile hosts," *IEEE network*, vol. 8, no. 5, pp. 22-32, 1994.

[22] B. Bukenya, S. Hickey and S. King, "Understanding the role of context in shaping social accountability interventions: towards an evidence-based approach," Institute for Development Policy and Management, University of Manchester, Manchester, 2012.

[23] J. T. Gonzales, "Implications of AI innovation on economic growth: a panel data study," *Journal of Economic Structures*, vol. 12, no. 1, p. 13, 2023.

[24] M. A. Trabelsi, "The impact of artificial intelligence on economic development," *Journal of Electronic Business & Digital Economics*, 2024.

[25] "Economic impacts of artificial intelligence," European Parliamentary Research Service, 2019.

[26] A.-M. Kanzola, K. Papaioannou and P. Petrakis, "Unlocking society's standings in artificial intelligence," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 200, pp. 106-123, 2024.

[27] T. Firoozan Sarnaghi and F. Ahmadzadeh, "Global Competitiveness Index (GCI) and Classification of Countries Based on Ethical Criteria," *Journal of Decision Engineering*, vol. 3, no. 9, pp. 103-138, 2019. [In persian]

[28] E. K. Ghani, N. Ariffin and C. Sukmadilaga, "Factors influencing artificial intelligence adoption in publicly listed manufacturing companies: a technology, organisation, and environment approach," *International Journal of Applied Economics, Finance and Accounting*, vol. 14, no. 2, pp. 108-117, 2022.

[29] R. Kabalisa and J. Altmann, "AI technologies and motives for AI adoption by countries and firms: a systematic literature review," in *Economics of Grids, Clouds, Systems, and Services: 18th International Conference, GECON 2021*, 2021.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 34-53

An Architecture For Processes Analysis in Smart Factories Based on Big Data, Process Mining, and Machine Learning Techniques

Alireza Olyai[1], Shideh Saraeian[2*], Ali Nodehi[3]

[1] Department of Computer Engineering, Go.C., Islamic Azad University, Gorgan, Iran
[2] Department of Computer Engineering, Go.C., Islamic Azad University, Gorgan, Iran
[3] Department of Computer Engineering, Go.C., Islamic Azad University, Gorgan, Iran

Received: 08 January 2025, Revised: 28 May 2025, Accepted: 18 August 2025
Paper type: Research

Abstract

Due to the nature of smart factories and the use of new technologies such as cyber-physical systems, cloud computing, the Internet of Things, etc. in such environments, the volume of data generated has increased exponentially. Therefore, real-time processing of large volumes of high-speed data for process analysis is a difficult and challenging problem. In this case, big data analysis technologies, as a powerful tool, can play an important role in controlling processes. In this research, an architecture based on a combination of big data, process mining, and machine learning techniques for analyzing processes in smart factories is presented, which enables accurate and real-time analysis of processes in such environments. In fact, this architecture utilizes powerful big data analysis tools and new techniques such as process mining and by employing the logistic regression algorithm as a machine learning tool, it is able to extract valuable insights from the data generated in these environments. The results of the performance evaluation of the proposed architecture indicate that, based on the completeness and accuracy criteria in the context of process models discovery, it has achieved scores of 92.69% and 79.68%, respectively. Also, the best results were obtained for metrics such as prediction accuracy during the process model conformance checking phase using the logistic regression algorithm, reaching 99.5%. These results show the high capability of this architecture in real-time process analysis through the integration of advanced data analysis techniques.

Keywords: Smart Factory, Processes Analysis, Big Data, Process Mining, Machine Learning.

[*] Corresponding Author's email: shideh.saraeian@iau.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۳۴ الی ۵۳

یک معماری برای تحلیل فرآیندها در کارخانه‌های هوشمند بر اساس تکنیک‌های کلان‌داده، فرآیندکاوی و یادگیری ماشین

علیرضا اولیائی[۱]، شیده سرائیان[۲*]، علی نودهی[۳]

[۱] گروه کامپیوتر، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران

[۲] گروه کامپیوتر، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران

[۳] گروه کامپیوتر، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با توجه به ماهیت کارخانه‌های هوشمند و به‌کارگیری فناوری‌های نوینی مانند سیستم‌های سایبری فیزیکی، رایانش ابری، اینترنت اشیاء و غیره در این‌گونه محیط‌ها، حجم داده‌های تولید شده به‌صورت تصاعدی افزایش یافته است. بنابراین، پردازش بلادرنگ حجم زیادی از داده های با سرعت بالا به منظور تحلیل فرآیندها، مسئله‌ای سخت و چالش‌برانگیز است. در این شرایط، فناوری‌های تحلیل کلان‌داده‌ها به عنوان ابزاری قدرتمند می‌توانند نقش مهمی را در کنترل فرآیندها ایفا نمایند. در این پژوهش، یک معماری مبتنی بر ترکیب تکنیک‌های کلان‌داده، فرآیندکاوی و یادگیری ماشین برای تحلیل فرآیندها در کارخانه‌های هوشمند ارائه شده است که امکان تحلیل دقیق و بلادرنگ فرآیندها در این‌گونه محیط‌ها را فراهم می‌آورد. در حقیقت، این معماری از ابزارهای قدرتمند تحلیل کلان‌داده و تکنیک‌های نوینی مانند فرآیندکاوی بهره می‌برد و با به‌کارگیری الگوریتم رگرسیون لجستیک به عنوان یک ابزار یادگیری ماشین، قادر به استخراج بینش‌های ارزشمند از داده‌های تولید شده در این محیط‌ها است. نتایج ارزیابی معماری پیشنهادی نشان می‌دهد که این معماری بر اساس معیارهای کامل بودن و دقت در زمینه کاوش مدل‌های فرآیند به ترتیب به مقادیر ۹۲٫۶۹٪ و ۷۹٫۶۸٪دست یافته است. همچنین، بهترین نتایج در شاخص‌هایی نظیر دقت پیش‌بینی در مرحله بررسی انطباق مدل‌های فرآیند با استفاده از الگوریتم رگرسیون لجستیک معادل ۹۹٫۵٪ به‌دست آمده است. این نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای این معماری در تحلیل‌های بلادرنگ فرآیندها از طریق ترکیب تکنیک‌های پیشرفته تحلیل داده است.

کلیدواژگان: کارخانه هوشمند، تحلیل فرآیندها، کلان‌داده‌ها، فرآیندکاوی، یادگیری ماشین.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: shideh.saraeian@iau.ac.ir

۱- مقدمه

کارخانه هوشمند، نسل جدیدی از کارخانه‌ها است که با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند سیستم‌های سایبری فیزیکی، اینترنت اشیاء، کلان‌داده‌ها، رایانش ابری، هوش مصنوعی، رباتیک و غیره باعث افزایش کیفیت و بهینگی تولید شده است. در کارخانه‌های هوشمند تمام عناصر (مانند ماشین‌ها، برنامه‌های کاربردی و غیره) در حال تولید کردن داده‌هایی می‌باشند که این داده‌ها عموما بزرگ و پیچیده هستند [۱]. بنابراین، علاوه بر داشتن کلان‌داده‌ها نیاز به ابزارهای قوی جهت دسترسی و تحلیل آنها می‌باشد که این مسئله می‌تواند به عنوان یک چالش مهم در نظر گرفته شود [۱]. اینترنت اشیاء یکی از منابع داده‌ای مهم تشکیل‌دهنده کلان‌داده‌ها است [۲]. این داده‌ها می‌توانند مربوط به کارخانه یا محیط کسب وکار باشند. از دید کسب وکار، تحلیل کلان‌داده‌ها در کارخانه‌های هوشمند می‌تواند اطلاعات مفیدی را برای سیستم‌های اطلاعاتی فراهم نماید [۳]. این کار توسط جمع‌آوری و تحلیل هوشمند مقدار گسترده‌ای از داده‌ها که از منابع مختلفی مانند گرایشات بازار، تقاضاهای جاری و آینده و غیره بدست می‌آیند، امکان‌پذیراست [۳]. با توجه به فناوری‌های مورد استفاده درکارخانه‌های هوشمند، داده‌های ساخت‌یافته و داده‌های جریانی دو نوع اصلی از داده‌هایی هستند که نقش مهمی را در این‌گونه محیط‌ها ایفا می‌نمایند. داده‌های ساخت‌یافته شامل داده‌هایی هستند که در یک قالب از پیش تعریف‌شده و سازمان‌یافته ذخیره می‌شوند (مانند داده‌های سیستم‌های اطلاعاتی). داده‌هایی که به صورت پیوسته و بلادرنگ تولید می‌شوند و نیاز به پردازش سریع دارند را داده‌های جریانی گویند. این داده‌ها معمولا توسط اینترنت اشیاء تولید می‌گردند.

یک فرآیند کسب وکار شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌های مرتبط و پیوسته است که در یک سازمان برای رسیدن به یک هدف مشخص انجام می‌شود [۴]. کنترل عملکرد فرآیندهای کسب وکار، سازمان‌ها را قادر به بهبود فرآیندهای خود می‌سازد. عدم اندازه‌گیری کارایی فرآیندهای کسب و کار مانع کنترل و بهبود و در نتیجه مدیریت آنها می‌شود [۵]. بنابراین، تحلیل فرآیندها می‌تواند فوایدی مانند بهبود تصمیم‌گیری، افزایش بهره وری و کاهش هزینه‌ها را برای سازمان‌ها و صنایع فراهم آورد. فرآیندهای کسب و -کار در کارخانه‌های هوشمند بر اساس فناوری‌های جدید مانند اینترنت اشیاء و کلان‌داده‌ها اجرا می‌شوند. بنابراین، با توجه به اینکه حجم داده‌های فرآیندها به سرعت در حال رشد است، در کنار فراوانی رویدادهای مربوط به سیستم‌های سازمانی، کارخانه هوشمند و اینترنت اشیاء نیز موج جدیدی از داده‌های مربوط به فرآیندها را تولید می‌نمایند [۶] از این رو، اینترنت اشیاء نیز یکی از منابع داده‌ای است که می‌تواند جریانی از رویدادهای مورد استفاده در تحلیل فرآیندها را فراهم سازد. بنابراین، با توجه به ماهیت داده‌های مورد استفاده در کارخانه‌های هوشمند، کنترل اجرای فرآیندها در این‌گونه محیط‌ها باید توسط ابزاهای تحلیل کلان‌داده‌ها انجام گردد. این ابزارها می‌توانند در کنترل دقیق و بهینه فرآیندها نقش بسیار مهمی ایفا کنند.

از سوی دیگر، یکی از روش‌های قدرتمندی که می‌تواند برای کنترل فرآیندها به‌کار گرفته شود، تکنیک‌های فرآیندکاوی است. فرآیندکاوی به عنوان یکی از تکنیک‌های نوین مدیریت فرآیندهای کسب‌وکار[1]، ابزاری قدرتمند برای غنی‌سازی مدیریت کارخانه‌های هوشمند در جنبه‌های مختلف مانند کنترل و بهینه‌سازی فرآیندها محسوب می‌شود [۴]. فرآیندکاوی با تحلیل داده‌های ثبت شده از اجرای فرآیندها، امکان شناسایی انحرافات و بهبود کیفیت در فرآیندهای کسب‌وکار را فراهم می‌آورد. در حقیقت، کارخانه‌های هوشمند با تولید حجم عظیمی از داده‌ها، نیازمند ابزارهای قدرتمندی برای تحلیل و تصمیم‌گیری هستند. تحلیل کلان‌داده و فرآیندکاوی، دو فناوری مکمل هستند که می‌توانند به طور مشترک به این نیاز پاسخ دهند. تحلیل کلان‌داده با ارائه دید کلی از داده‌ها و فرآیندکاوی با تمرکز بر جزئیات فرآیندها، امکان بهبود مستمر، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها را در کارخانه‌های هوشمند فراهم می‌آورند.

همچنین، تکنیک‌های تحلیلی پیشرفته‌ای مانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز به عنوان ابزاری قدرتمند، می‌توانند نقش کلیدی را در تحلیل داده‌های تولید شده در کارخانه‌های هوشمند و بهینه‌سازی فرآیندها ایفا نمایند. درحقیقت، الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند با یادگیری از داده‌های گذشته، مدل‌هایی ایجاد کنند که بتوانند رفتار سیستم را پیش‌بینی نموده و تصمیمات هوشمندانه‌ای اتخاذ کنند. بنابراین، برای فائق آمدن بر چالش تحلیل داده‌های بزرگ، متنوع و با سرعت زیاد جهت کنترل فرآیندها در کارخانه‌های هوشمند، این مقاله یک معماری مبتنی بر تکنیک‌های تحلیل‌کلان‌داده، فرآیندکاوی و یادگیری ماشین ارائه نموده است. در حقیقت، در این معماری از یکپارچه‌سازی تکنیک‌های پیشرفته تحلیل داده برای تحلیل فرآیندها استفاده شده است. استفاده از این تکنیک‌ها باعث می‌شود مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تری ایجاد شده و در نتیجه پشتیبانی بهتر و قوی‌تری در تحلیل فرآیندها فراهم گردد.

[1] Business Process Management (BPM)

بطورکلی، نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

- ارائه یک معماری کلان‌داده برای تحلیل داده‌ها در کارخانه‌های هوشمند؛
- یکپارچگی تکنیک‌های کلان‌داده، فرآیندکاوی و یادگیری ماشین برای کنترل دقیق فرآیندها در یک کارخانه هوشمند؛
- استفاده از مزایای الگوریتم‌های کاوشگر استقرایی و رگرسیون لجستیک برای استخراج و بررسی تطابق فرآیندها در معماری ارائه شده.

بقیه این مقاله به‌صورت زیر طبقه‌بندی شده است: بخش دوم به مرور ادبیات موضوع می‌پردازد. در بخش سوم معماری پیشنهادی معرفی می‌شود. بخش چهارم به ارزیابی کارایی و اعتبارسنجی معماری پیشنهادی اختصاص دارد. در بخش پنجم، نتایج حاصل از ارزیابی، بحث و بررسی می‌شود. سرانجام، بخش ششم به ارائه نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- مرور ادبیات موضوع

۲-۱- ابزارهای تحلیل کلان‌داده‌ها

امروزه، حجم عظیمی از داده‌ها تولید می‌شوند که فرصت‌های بی‌نظیری را برای کسب وکارها فراهم می‌نماید. تحلیل این داده‌ها، به کسب وکارها کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری بگیرند، روندها را پیش‌بینی کنند و از رقبا پیشی بگیرند. برای انجام این کار، به ابزارهای قدرتمندی نیاز است که بتوانند حجم عظیمی از داده‌ها را پردازش، تحلیل و بصری‌سازی کنند. ابزارهای تحلیل کلان‌داده را می‌توان به دسته‌های مختلفی شامل ابزارهای جمع‌آوری داده‌ها[1]، ابزارهای تحلیل داده‌ها[2]، ابزارهای ذخیره‌سازی داده‌ها[3] و ابزارهای ایجاد تقاضا[4] از داده‌ها تقسیم نمود. **دریافت داده،** اولین و یکی از مهم‌ترین مراحل در فرآیند تحلیل کلان‌داده است. این مرحله شامل جمع‌آوری داده‌ها از منابع مختلف، تبدیل آن‌ها به فرمتی قابل استفاده و بارگذاری در سیستم ذخیره‌سازی کلان‌داده است. برخی از ابزارهای محبوب مانند Apache Flume [۷]، Kafka [۷] و Apache Sqoop [۸] برای جمع‌آوری داده‌ها از منابع داده‌ای به‌کار می‌روند.

ابزارهای تحلیل داده، نقش بسیار مهمی در استخراج بینش‌های ارزشمند از حجم عظیمی از داده‌ها ایفا می‌کنند. این ابزارها باعث می‌شوند تا الگوها، روندها و ارتباطات پنهان در داده‌ها کشف شده و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده را بهبود می‌بخشند. در این رابطه، Hadoop یکی از محبوب‌ترین چارچوب‌های کلان‌داده است که از مدل برنامه‌نویسی MapReduce برای پردازش داده‌های دسته‌ای بزرگ استفاده می‌نماید. از سوی دیگر، ابزارهایی مانند Apache Storm [۷] و Apache Spark Streaming [۹-۱۰] نیز برای پردازش داده‌های جریانی در کلان‌داده‌ها استفاده می‌گردند.

بعضی از فناوری‌های ذخیره‌سازی داده‌ها شامل HDFS و HBase هستند که برای ذخیره‌سازی داده‌های بزرگ به‌کار می‌روند. HDFS[5] یکی از محبوب‌ترین سیستم‌های فایل توزیع‌شده است که برای ذخیره‌سازی داده‌های بزرگ در خوشه‌هایی طراحی شده است. HDFS داده‌ها را به بلوک‌های کوچک تقسیم نموده و آن‌ها را در چندین نود توزیع می‌کند تا در برابر خطا مقاوم باشند. HBase[6]، یک فناوری ذخیره‌سازی کلان‌داده است [۱۱]. به عبارت دیگر، HBase یک پایگاه داده توزیع شده NoSQL با قابلیت‌های مقیاس‌پذیری بسیار زیاد و تحمل‌پذیری عیب است که بر روی HDFS ساخته شده است [۱۲].

همچنین، ابزارهای ایجاد تقاضا از داده‌ها، این امکان را فراهم می‌سازند تا با استفاده از زبان‌های پرس‌وجو، داده‌های عظیم و پیچیده کاوش شوند. Apache Hive [۱۳]، Apache Pig [۱۴] و Apache Spark SQL [۹-۱۰] برخی از ابزارهای معروف ایجاد تقاضا در کلان‌داده‌ها می‌باشند که قادر به تحلیل کردن حجم بزرگی از داده‌ها هستند. Hive زبان SQL را پشتیبانی می‌کند. در حقیقت، Hive یک انبار داده مبتنی بر Hadoop است که به کاربران اجازه می‌دهد با استفاده از SQL به داده‌ها دسترسی پیدا کنند. Pig از یک زبان جریان داده‌ای به نام Pig Latin که مبتنی بر تقاضا است، پشتیبانی می‌نماید که نه تنها برای پردازش داده‌های ساخت‌یافته مانند Hive به‌کار می‌رود، بلکه قابلیت پردازش داده‌های غیرساخت‌یافته را نیز دارد. Apache Spark SQL نیز یک موتور پرس‌وجوی SQL بر روی Spark است که از پردازش داده‌های بزرگ به صورت موازی پشتیبانی می‌کند.

۲-۲- معماری‌های ارائه شده برای کلان‌داده‌ها

در ادبیات موضوع، طیف گسترده‌ای از معماری‌ها برای تحلیل کلان‌داده به منظور پاسخگویی به نیازهای خاص، طراحی شده‌اند.

[1] Data collection
[2] Data analyzing
[3] Data storing
[4] Data querying
[5] Hadoop Distributed File System
[6] Hadoop Database

در این رابطه، الکساکیس و همکاران[1] یک معماری کلان‌داده را برای سیستم‌های حمل و نقل هوشمند ارائه داده‌اند [۱۵]. این معماری می‌تواند بسیاری از موانع موجود در سیستم‌های قدیمی و کنونی را برطرف نماید. همچنین، در [۴] نویسندگان یک سیستم مدیریت فرآیند کسب وکار[2] را برای کارخانه‌های هوشمند توسعه داده‌اند که این سیستم از یک معماری تحلیل کلان‌داده نوآورانه به‌منظور نظارت بر اجرای فرآیندها بهره می‌برد. مانوگران و همکاران[3] یک معماری کلان‌داده مبتنی بر اینترنت اشیاء را به منظور نظارت و هشداردهی در زمینه مراقبت‌های پزشکی هوشمند پیشنهاد داده‌اند [۱۶]. در حقیقت، این معماری از دو زیرمعماری یکی برای جمع‌آوری و ذخیره‌سازی داده‌ها با استفاده از فناوری‌های کلان‌داده و دیگری برای یکپارچه‌سازی امن بین رایانش مه و رایانش ابری به‌کار می‌رود. با توجه به پیچیدگی روزافزون زنجیره‌های تامین، نیاز به ابزارهای قدرتمندی برای تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری هوشمندانه بیش از پیش احساس می‌شود. در این رابطه، در [۱۷]، محققان یک معماری کلان‌داده را برای تحلیل زنجیره‌های تامین ارائه نمودند. آنها معتقدند که این معماری قابلیت‌هایی مانند کارایی، قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی منابع را فراهم می‌آورد. المطیری و همکاران[4] یک رویکرد کلان‌داده را پیشنهاد داده‌اند که با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک و تکنیک‌های مبتنی بر تقریب گرادیان، به طبقه‌بندی دقیق تصاویر پزشکی می‌پردازد [۱۸]. نویسندگان معتقدند که این روش باعث بهبود دقت تشخیص، ارائه هشدارهای بلادرنگ و کاهش زمان پردازش در حوزه سلامت می‌گردد. در [۱۹] یک معماری کلان‌داده به‌منظور شناسایی و تحلیل سایت‌های دارک وب[5] ارائه شده است. این معماری با استفاده از ترکیب فناوری‌های کلان‌داده، یادگیری ماشین و پردازش زبان طبیعی عمل می‌نماید. نتایج نشان می‌دهد، معماری پیشنهادی باعث شناسایی فعالیت‌های مشکوک مانند فیشینگ می‌شود.

سیریویرا و پایک[6] یک معماری مرجع چابک را برای تحلیل خودکار کلان‌داده‌ها برای کاربران لبه شبکه[7] ارائه نموده‌اند [۲۰]. آن‌ها معتقدند که این معماری می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای تحلیل داده‌ها در زیرساخت‌های مرتبط با صنعت و جامعه دیجیتال به‌کار رود

. در [۲۱] محققان یک معماری کلان‌داده مبتنی بر شبکه عصبی عمیق BilSTM[8] را پیشنهاد داده‌اند که برای پیش‌بینی و تصمیم‌گیری در حوزه‌های مالی و حسابداری به‌کار می‌رود. معماری پیشنهادی، قادر است با پردازش داده‌های حجیم، پیش‌بینی‌های دقیقی را ارئه دهد که می‌تواند باعث بهبود کارایی و دقت در تصمیم‌گیری‌های مالی شود. در [۲۲] نویسندگان یک معماری را با ترکیب رویکرد یادگیری ماشین و فناوری‌های تحلیل کلان‌داده برای شناسایی بیماران دیابتی در زمینه تصمیم‌گیری در حوزه مراقبت‌های پزشکی ارائه نمودند. آن‌ها با مقایسه الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین در معماری پیشنهادی، نتیجه‌گیری کردند که الگوریتم رگرسیون لجستیک نتایج بهتری را نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است.

مروری بر مشخصات برخی از معماری‌های ارائه شده برای کلان‌داده‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۳- عملکردهای الگوریتم‌های یادگیری ماشین

یادگیری ماشین، شاخه‌ای از هوش مصنوعی است که به سیستم‌ها توانایی یادگیری و بهبود عملکرد بر اساس داده‌ها را می‌دهد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین با شناسایی الگوها در داده‌ها، پیش‌بینی‌های دقیق و تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه‌ای را ممکن می‌سازند. این الگوریتم‌ها در زمینه‌های مختلفی مانند کلان‌داده‌ها، رباتیک و غیره به‌کار می‌روند [۳۳]. برخی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیان، آدابوست، رگرسیون لجستیک، درخت تصمیم و غیره هستند.

در سال‌های اخیر، این الگوریتم‌ها به دلیل توانایی‌های بی‌نظیرشان در حل مسائل پیچیده، توجه محققان و متخصصان از حوزه‌های گوناگونی مانند علوم کامپیوتر و مهندسی را به خود جلب کرده‌اند

[1] Alexakis et al.
[2] Business Process Management System (BPMS)
[3] Manogaran et al.
[4] Almutairi et al.
[5] Dark web
[6] Siriweera and Paik
[7] Edge computing
[8] Bidirectional Long Short-Term Memory

.

جدول ۱. مروری بر مشخصات بعضی از معماری‌های ارائه شده در زمینه کلان‌داده‌ها

سال	منبع	مشخصات معماری
۲۰۱۸	گوهر و همکاران[۱] [۲۳]	طراحی یک معماری کلان‌داده چندلایه‌ای برای تحلیل داده‌های اینترنت اشیای کوچک (IoST) با هدف استخراج اطلاعات ارزشمند و بهبود تصمیم‌گیری در سیستم‌های هوشمند.
۲۰۱۹	کنستانت نیکولاد و همکاران[۲] [۲۴]	تعریف یک معماری مبتنی بر کلان‌داده‌ها برای مدیریت و تحلیل داده‌های اینترنت اشیاء در زنجیره تأمین هوشمند به‌منظور بهبود کارایی و تصمیم‌گیری در زمینه لجستیک.
۲۰۲۰	سالیرنو و همکاران[۳] [۲۵]	یک معماری کلان‌داده چهار لایه‌ای برای نگهداری پیشگویانه خطوط راه‌آهن با هدف شناسایی خرابی‌ها در آن‌ها.
۲۰۲۱	سیماکوویچ و همکاران[۴] [۲۶]	ارائه یک معماری تحلیلی کلان‌داده برای اپراتورهای شبکه تلفن همراه به منظور افزایش سطح کیفیت خدمات و رضایت مشتریان.
۲۰۲۲	رایف وهمکاران[۵] [۲۷]	تعریف یک معماری کلان‌داده برای شهرهای هوشمند با هدف بهبود کیفیت زندگی شهروندان.
۲۰۲۳	آهیدوس و همکاران[۶] [۲۸]	ارائه یک معماری شش لایه‌ای برای کلان‌داده‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء در زمینه آموزش.
۲۰۲۴	میلز و همکاران[۷] [۲۹]	یک معماری مبتنی بر رایانش ابری برای تحلیل کلان‌داده‌ها در محیط‌های 5G و رایانش لبه.
۲۰۲۴	ورنر و تای[۸] [۳۰]	توسعه‌ی یک معماری مرجع برای پردازش داده‌های کلان به‌صورت بدون سرور[۹] درمحیط‌های رایانش ابری به- منظور کاهش هزینه‌ها، افزایش کارایی و رفع چالش‌های مربوط به پردازش کلان‌داده‌ها.
۲۰۲۵	اسماعیل و همکاران[۱۰] [۳۱]	ارائه یک چارچوب برای پردازش داده‌های جریانی با استفاده از فناوری‌های کلان‌داده‌ها با هدف تحلیل بلادرنگ احساسات کاربران توییتر.
۲۰۲۵	ساراسوات و چوداری[۱۱] [۳۲]	ارائه یک رویکرد برای یکپارچه‌سازی تحلیل‌های کلان‌داده با رایانش ابری در بستر سیستم‌های ERP صنایع تولیدی.

در این رابطه، مایر و همکاران[۱۲] روشی مبتنی بر ترکیب تحلیل مولفه‌های اساسی[۱۳] و الگوریتم خوشه‌بندی DBSCAN[۱۴] را برای نظارت بر شرایط تولید و نگهداری پیشگویانه[۱۵] در کارخانه‌های هوشمند پیشنهاد داده‌اند [۳۴]. در [۲۴]، محققان برای کنترل زنجیره‌های تامین هوشمند یک سیستم تحلیل کلان‌داده مبتنی بر الگوریتم رگرسیون لجستیک را تعریف نموده‌اند. این معماری باعث انعطاف‌پذیری، کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت تصمیم‌گیری در زمینه لجستیک می‌گردد. همچنین، چو و همکاران[۱۶] یک روش جدید یادگیری ماشین که ترکیبی از روش‌های بدون‌نظارت و نیمه‌نظارت‌شده است را برای نگهداری پیشگویانه در کارخانه‌های هوشمند ارائه نموده‌اند [۳۵]. نویسندگان معتقدند رویکرد پیشنهادی، تسهیل یکپارچه‌سازی داده‌های ناهمگن تولید شده از دستگاه‌های مختلف را در راستای پشتیبانی از نگهداری پیشگویانه فراهم می‌آورد. در [۳۶]، محققان عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند ماشین بردار پشتیبان و نایو بیز را در زمینه تشخیص نفوذ در شبکه‌های کامپیوتری ارزیابی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نتایج بهتری را در زمینه دقت و کاهش نرخ خطای طبقه‌بندی ارائه می‌دهد.

سرائیان و همکاران یک سیستم مدیریت فرآیند کسب وکار خودمختار را برای مدیریت فرآیندهای غیرقطعی با استفاده از عامل‌های[۱۷] هوشمند پیشنهاد داده‌اند [۳۷]. نویسندگان برای بهبود دقت تخمین پارامترها در این سیستم، از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه بهره برده‌اند. در [۲۵] یک معماری کلان داده مبتنی بر نوع خاصی از الگوریتم شبکه‌های عصبی بازگشتی یعنی شبکه LSTM[۱۸] ارائه شده است. در حقیقت، این رویکرد، یک مدل پیش‌بینی را معرفی می‌نماید که قادر به شناسایی خرابی‌های احتمالی در خطوط راه‌آهن می‌باشد. در [۳۸] محققان یک سیستم مدیریت فرآیند کسب وکار را برای تشخیص آناملی در فرآیندهای تولیدی افزایشی[۱۹] توسعه داده‌اند. در این سیستم از الگوریتم آدابوست به منظور شناسایی رفتارهای غیرعادی در مدل‌های فرآیند

[1] Gohar et al.
[2] Constante-Nicolalde et al.
[3] Salierno et al.
[4] Simaković et al.
[5] Raif et al.
[6] Ahaidous et al.
[7] Mills et al.
[8] Werener and Tai
[9] Serverless
[10] Ismail et al.
[11] Saraswat and Chouhari
[12] Maier et al.
[13] PCA (Principle Component Analysis)
[14] DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)
[15] Predictive Maintenance
[16] Cho et al.
[17] Agents
[18] Long Short – Term Memory
[19] Additive Manufacturing Process

استفاده شده است. تیس و همکاران[1] یک معماری را برای بهبود پیش‌بینی مرگ‌ومیر در بیماران دیابتی با استفاده از روش‌های فرآیندکاوی و یادگیری عمیق ارائه داده‌اند[۳۹]. آن‌ها معتقدند که روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مرسوم یادگیری ماشین، بر اساس مجموعه داده‌های مورد ارزیابی، عملکرد بسیار بهتری از خود نشان می‌دهد.

در [۲۸] یک معماری تحلیل کلان‌داده مبتنی بر الگوریتم درخت تصمیم در زمینه آموزش عالی پیشنهاد شده است. در این مقاله، محققان با تحلیل نمرات دانشجویان، روشی را برای نظارت و پیش‌بینی نمرات ارائه نمودند. احسانی و همکاران یک روش یادگیری ماشین را برای پیش‌بینی عمق کربوناسیون بتن تعریف نموده‌اند [۴۰]. در این پژوهش، از یک رویکرد نوآورانه به نام MOEA/D-ANN استفاده شده است. این رویکرد که ترکیبی از الگوریتم تکاملی چند هدفه مبتنی بر تجزیه و شبکه‌های عصبی مصنوعی است، به طور چشمگیری دقت پیش‌بینی را افزایش داده و زمان آموزش مدل را کاهش داده است. در [۴]، نویسندگان یک سیستم مدیریت فرآیند کسب‌وکار را برای کارخانه‌های هوشمند معرفی کرده‌اند. در این سیستم، از الگوریتم آدابوست برای نظارت بر وضعیت فرآیندها و تشخیص انحرافات استفاده شده است. با کمک این الگوریتم، امکان بهبود مستمر فرآیندها و افزایش بهره‌وری در کارخانه فراهم می‌گردد. در [۴۱] یک مدل طبقه‌بندی هوشمند بر اساس الگوریتم k نزدیکترین همسایه بهبودیافته به‌منظور افزایش دقت، سرعت و کیفیت طبقه‌بندی متون انگلیسی در کتابخانه‌هایی با حجم عظیم از منابع الکترونیکی ارائه شده است. همچنین، السیات و همکاران[2] یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم یادگیری عمیق و ترکیب مدل‌ها را برای طبقه‌بندی تصاویر پزشکی با هدف شناسایی دقیق بیمارهای قلبی پیشنهاد داده‌اند [۴۲]. در روش پیشنهادی، محققان از مدل‌های از پیش آموزش‌دیده و انتخاب بهینه ترکیب آنها بهره گرفته‌اند تا دقت تشخیص را در زمینه‌های پزشکی افزایش دهند.

۲-۴- فرآیندکاوی

فرآیندکاوی یک حوزه تحقیقاتی جدید است که با استخراج دانش از گزارشات رویداد[3]تولیدشده توسط سیستم‌های اطلاعاتی، به تحلیل فرآیندهای یک سازمان می‌پردازد [۳۹]. در حقیقت، فرآیندکاوی شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌ها است که با هدف کشف، نظارت و بهبود فرآیندها، از داده‌های موجود در سیستم‌های اطلاعاتی بهره می‌برد [۴۳]. تکنیک‌های فرآیندکاوی به سه دسته اصلی شامل کشف فرآیند[4]، بررسی مطابقت[5] و بهبود[6] تقسیم می‌شوند. الگوریتم‌های کشف فرآیند، با تحلیل داده‌های گزارشات رویداد، به‌صورت خودکار مدل‌های فرآیندها را تولید می‌نمایند.

در این رابطه، الگوریتم‌های متنوعی از جمله آلفا[7] [۴۴]، استخراج اکتشافی[8] [۴۵]، کاوشگر آی ال پی[9] [۴۶]، کاوشگر فازی[10] [۴۷] و کاوشگر استقرایی[11] [۴۸-۵۰]، برای استخراج مدل‌های فرآیند به‌کار گرفته می‌شوند. هر یک از این الگوریتم‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود بوده و انتخاب مناسب‌ترین الگوریتم به عوامل مختلفی از جمله نوع داده‌ها، پیچیدگی فرآیند و هدف تحلیل بستگی دارد. بررسی مطابقت دومین بخش از فرآیندکاوی است. تکنیک‌های بررسی مطابقت برای اهدافی مانند سنجش میزان انطباق بین مدل‌های فرآیند استخراج‌شده با واقعیت اجرایی (یعنی رفتار مشاهده شده) و همچنین ارزیابی تطابق بین مدل فرآیند با گزارش رویداد به‌کار می‌روند [۴۳]. برخی از الگوریتم‌های رایج بررسی مطابقت شامل فوت‌پرینت[12]، اجرای مجدد توکن[13] و همترازی[14] هستند. این روش‌ها در [۴۸] به‌صورت مفصل توضیح داده شده‌اند. سومین بخش از فرآیندکاوی، بهبود است. بهبود فرآیندها با استفاده از الگوریتم‌هایی صورت می‌گیرد که قادر به توسعه مدل فرآیند بر اساس داده‌های گزارش رویداد و همچنین ترمیم مدل‌های موجود می‌باشند.

همانطورکه پیش‌تر اشاره شد، با توجه به ماهیت کارخانه‌های هوشمند، پردازش بلادرنگ حجم عظیمی از داده‌های با سرعت زیاد به منظور تحلیل فرآیندها، مسئله‌ای سخت و چالش‌برانگیز است. همچنین، مطالعه معماری‌های ارائه شده در ادبیات موضوع نشان می‌دهد که بسیاری از طراحی‌های ارائه‌شده، فقط به معماری‌های کلان‌داده برای تحلیل داده‌ها بسنده نموده‌اند. نکته قابل توجه این است که ارائه معماری کلان‌داده به تنهایی کافی نیست؛ برای بهره‌برداری بهینه از آن، ترکیب با ابزارها و تکنیک‌های پیشرفته تحلیل داده ضروری است [۲۸]. در این زمینه، معماری‌های کلان‌داده از نظر ساختاری فقط به ارائه زیرساخت‌های ذخیره‌سازی

[1] Theis et al.
[2] Alsayat et al.
[3] Event logs
[4] Process discovery
[5] Conformance checking
[6] Enhancement
[7] Alpha
[8] Heuristic mining
[9] ILP miner
[10] Fuzzy miner
[11] Inductive miner
[12] Footprint
[13] Token Replay
[14] Alignment

و پردازش داده‌ها پرداخته‌اند و از نظر عملکردی فاقد پیش‌بینی تحلیلی بوده و تنها به جمع‌آوری و پردازش داده‌ها می‌پردازند.

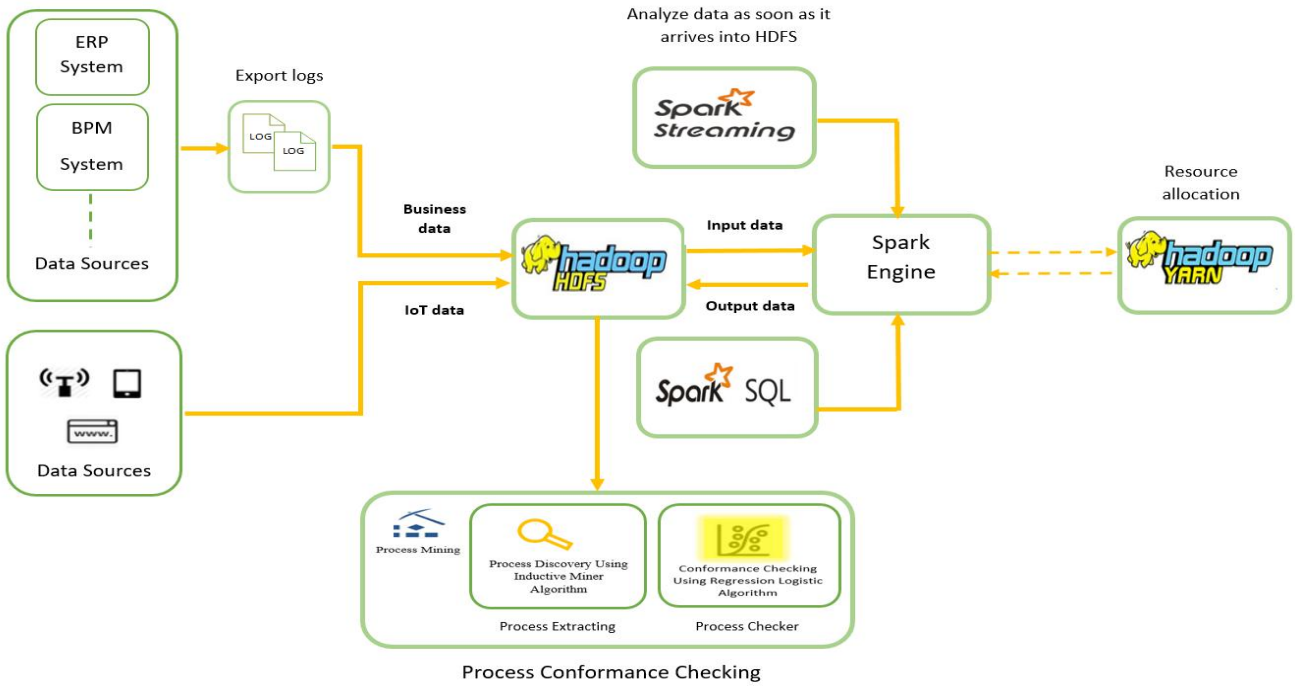
همچنین، برخی پژوهش‌های دیگر نیز صرفاً بر رویکردهای یادگیری ماشین متمرکز شده‌اند. با این حال، برای بهره‌برداری حداکثری از داده‌ها، ترکیب یادگیری ماشین با سایر روش‌های تحلیل داده، رویکردی کارآمدتر است. این‌گونه معماری‌ها، به لحاظ ساختاری نیازمند داده‌های آماده می‌باشند و عمدتا برای داده‌های حجیم و جریانی مناسب نیستند. از نظر عملکردی نیز، این معماری‌ها پیش-بینی‌هایی را ارائه می‌دهند بدون اینکه دید فرآیندی نسبت به تحلیل داشته باشند. در این زمینه، بعضی از طرح‌های پیشنهادی از ترکیب تکنیک‌های کلان‌داده‌ها و یادگیری ماشین به منظور تحلیل داده‌ها استفاده نموده‌اند. این معماری‌ها، اگرچه از نظر ساختاری کامل‌تر هستند، ولی قادر به شناسایی رفتار سیستم نمی‌باشند و به لحاظ عملکردی صرفا می‌توانند عملیات پیش‌بینی را انجام دهند و توانایی تحلیل گلوگاه‌ها، انحرافات یا بهینه‌سازی فرآیندها را ندارند. پژوهش حاضر، یک معماری را برای تحلیل دقیق و جامع فرآیندهای کارخانه‌های هوشمند ارائه می‌دهد. این معماری با تلفیق تکنیک‌های کلان- داده، فرآیندکاوی و یادگیری ماشین، امکان استخراج بینش‌های ارزشمند از داده‌ها را فراهم می‌نماید. یکی از مزایای بارز فرآیندکاوی در زمینه کشف مدل‌های فرآیند نسبت به روش‌های یادگیری ماشین، توانایی آن در ایجاد مدل‌های فرآیند قابل تفسیر است که به ما کمک می‌کند تا به طور مستقیم دلایل و علت‌های وقایع را درک کنیم [۳۹]. بنابراین، ترکیب این سه فناوری قدرتمند، دیدگاه کاملاً جدیدی را برای تحلیل فرآیندها فراهم می‌کند و به کسب وکارها اجازه می‌دهد تا به بینش‌های عمیق‌تری دست یابند و تصمیم‌گیری‌های بهتری اتخاذ نمایند. از این رو، معماری پیشنهادی دارای ویژگی‌های کارآمدی برای محیط‌هایی نظیر کارخانه‌های هوشمند است. این ویژگی‌ها عبارتند از:

- پردازش داده‌ها در مقیاس بالا به کمک فناوری‌های کلان‌داده؛
- پیش‌بینی و تحلیل‌های آماری از طریق روش‌های یادگیری ماشین؛
- بررسی و بهینه‌سازی رفتار سیستم با استفاده از تکنیک‌های فرآیندکاوی.

۳- معماری ارائه شده

معماری پیشنهادی، روشی برای تحلیل عمیق داده‌های کارخانه‌های هوشمند ارائه می‌دهد. این معماری با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته کلان‌داده‌ها، فرآیندکاوی و یادگیری ماشین امکان کنترل دقیق فرآیندها را فراهم می‌آورد. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، این معماری شامل مولفه‌های مختلفی می‌باشد که می‌تواند قابلیت‌های تحلیلی قدرتمندی را برای تصمیم‌گیری بهینه در محیط‌های صنعتی هوشمند ارائه دهد. با گسترش کاربرد فناوری‌های نوین همچون اینترنت اشیاء و کلان‌داده در کارخانه‌های هوشمند، حجم عظیمی از داده‌های ساخت‌یافته تا داده‌های جریانی تولید می‌شوند. این حجم عظیم از داده‌ها، ضرورت استفاده از روش‌های نوین پردازش داده، به‌ویژه برای تحلیل داده‌های جریانی را دوچندان کرده است. به همین منظور، در معماری پیشنهادی، از تکنیک‌های پیشرفته تحلیل کلان‌داده برای پردازش بلادرنگ داده‌ها استفاده شده است. امروزه، Apache Hadoop و Apache Spark به عنوان ستون‌های اصلی پشته نرم‌افزار کلان‌داده شناخته می‌شوند [۵۱]. ابزارهای دیگر مانند Apache Hive و Apache HBase از قابلیت‌های آن‌ها برای اجرای عملیات خود بهره می‌برند [۵۱]. بنابراین، پایه و اساس معماری پیشنهادی بر روی دو چارچوب قدرتمند Hadoop و Spark استوار شده است. در این معماری، انواع منابع داده‌ای در نظر گرفته شده‌اند. ابتدا، از داده‌های ساخت‌یافته (مانند داده‌های سیستم‌های اطلاعاتی سازمانی) گزارشات رویداد استخراج شده و بر روی HDFS ذخیره می‌شوند تا در مراحل بعدی مورد تحلیل قرار گیرند. سپس، به‌صورت همزمان با ورود داده‌های ساخت‌یافته، داده‌های جریانی (مانند داده‌های اینترنت اشیاء) نیز به موتور پردازش Spark Engine ارسال می‌شوند تا از طریق مؤلفه Spark Streaming به‌صورت بلادرنگ و توزیع‌شده پردازش شوند. نتایج حاصل از این تحلیل نیز در HDFS ذخیره می‌گردد. پس از جمع‌آوری داده‌های ساخت‌یافته و داده‌های جریانی پردازش شده در HDFS، تمامی این داده‌ها به موتور پردازش Spark ارسال می‌شوند. در این مرحله، از مولفه SparkSQL برای اجرای پرس‌وجوهای تحلیلی و ترکیبی استفاده می‌شود.

این مرحله تحلیل، نقش اساسی در فراهم‌سازی داده‌های آماده برای فرآیندکاوی ایفا می‌کند. در این معماری، چارچوب YARN به عنوان یک مدیر منابع قدرتمند ایفای نقش می‌نماید. YARN با موتور Spark در تعامل مستقیم است و مسئولیت مدیریت منابع از جمله تخصیص، بهینه‌سازی و پشتیبانی از انواع مختلف پردازش را بر عهده دارد. پس از انجام تحلیل‌های کلان‌داده، نتایج به مولفه Process Conformance Checking به منظور انجام فرآیندکاوی ارسال می‌شوند. این عملیات شامل دو مرحله است؛ ابتدا مدل‌های فرآیند کشف شده و سپس تطابق آنها با داده‌های واقعی بررسی می‌شود. این مراحل در بخش‌های بعد بیشتر توضیح داده شده‌اند.



شکل۱. معماری پیشنهادی برای تحلیل فرآیندها در کارخانه‌های هوشمند

۳-۱- مولفه Process Conformance Checking

همانطور که شکل ۱ نشان می‌دهد، مولفه Process Conformance Checking در معماری پیشنهادی از دو ماژول تشکیل شده است. این دو ماژول دارای عملکردهای زیر می‌باشند:

- ماژول Process Extracting با تحلیل گزارشات رویداد، مدل‌های فرآیند را استخراج می‌نماید،
- ماژول Process Checker با بررسی تطابق مدل‌های فرآیند کشف‌شده با مدل‌های فرآیند در حال اجرا، انحرافات و گلوگاه‌های فرآیند را شناسایی می‌کند.

نحوه عملکرد این ماژول‌ها در مولفه Process Conformance Checking در شکل ۲ نشان داده شده است.

این رویکرد به کارخانه‌های هوشمند کمک می‌کند تا عملکرد فرآیندهای خود را بهینه‌سازی نمایند. این ماژول‌ها در بخش‌های بعدی با جزئیات بیشتر توضیح داده شده‌اند.

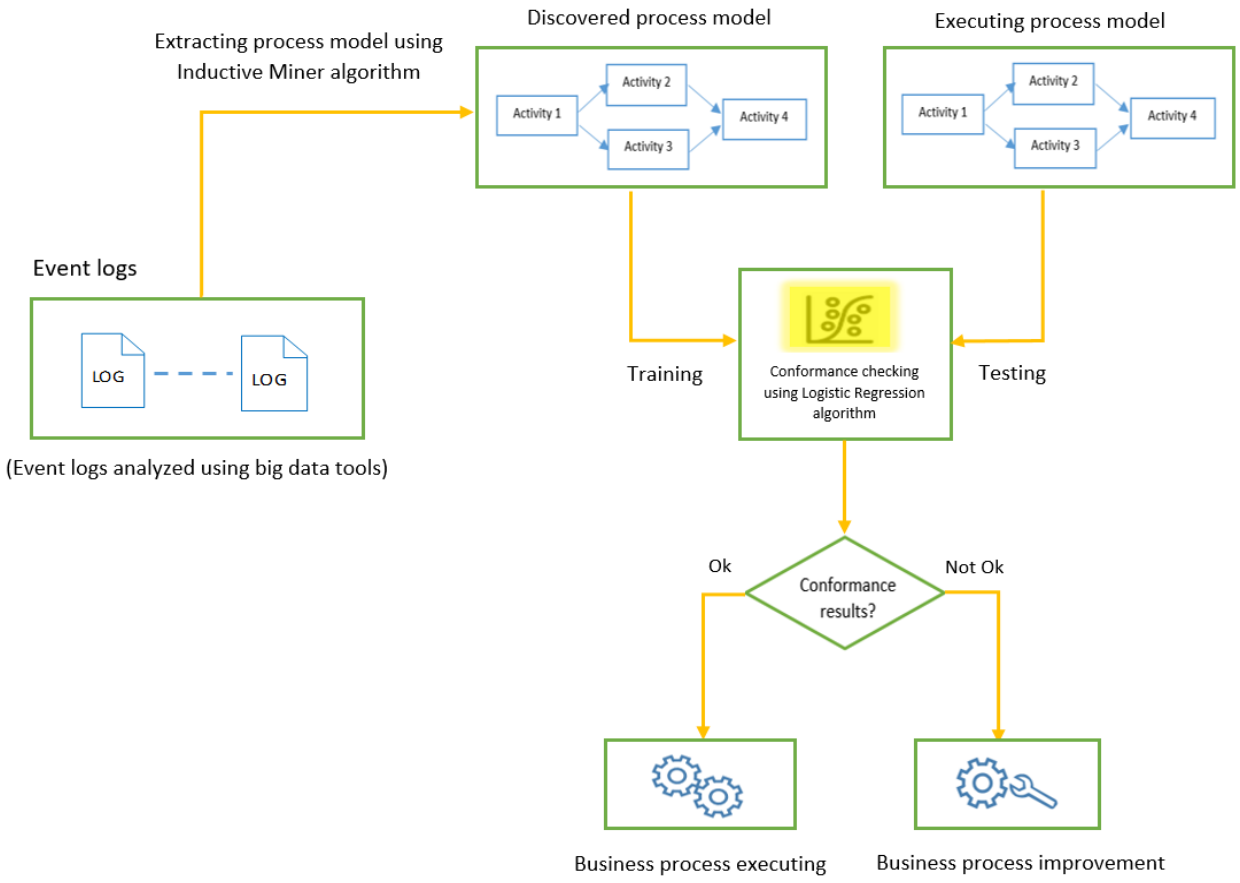
۳-۱-۱- ماژول Process Extracting

در ماژول Process Extracting، الگوریتم قدرتمند کاوشگر استقرایی با تحلیل گزارشات رویداد، مدل‌های فرآیند را به‌صورت خودکار استخراج می‌نماید. برخی از ویژگی‌ها و مزایای این الگوریتم عبارتند از [۴۸]:

- انعطاف‌پذیری؛
- استفاده از رویکرد درخت فرآیند[1] برای تولید مدل‌های فرآیند با کیفیت بالا نسبت به مدل‌های فرآیند تولید شده با زبان‌های مدل‌سازی دیگر مانند BPMN[2] و شبکه‌های پتری؛
- برخلاف الگوریتم‌های رایج کشف فرآیند مانند آلفا، استخراج اکتشافی و کاوشگر آی ال پی، تضمین تولید مدل‌های فرآیند Soundness (یعنی بدون بن‌بست[3] و سایر آناملی‌ها)؛
- برازندگی[4] بالای مدل فرآیند کشف‌شده نسبت به بازتولید رفتارهای گزارش رویداد.

الگوریتم کاوشگر استقرایی با استفاده از روش بازگشتی تقسیم و غلبه، مدل‌های فرآیند را کشف می‌کند. این الگوریتم، همانطور که در منابع [۴۸،۵۰] بیان شده است، یک گزارش رویداد را به چندین بخش کوچک‌تر تقسیم می‌کند و سپس به‌صورت بازگشتی بر روی هر بخش اجرا می‌شود تا زمانی که به ساده‌ترین شکل ممکن، یعنی یک فعالیت واحد، برسد. به این ترتیب، مسئله‌ی اصلی کشف مدل فرآیند، به چندین مسئله‌ی کوچک‌تر برای کشف زیرفرآیندها تقسیم می‌شود.

[1] Process Tree
[2] Business Process Model Notation
[3] Deadlock
[4] Fitness



شکل۲. توصیف عملکرد مولفه Process Conformance Checking

شبه‌کد الگوریتم کاوشگر استقرایی که برای کشف مدل‌های فرآیند به کار می‌رود، در الگوریتم ۱ ارائه شده است.

الگوریتم ۱. شبه‌کد الگوریتم کاوشگر استقرایی [۵۰]

```
function InductiveMiner(log)
// Base Case: If the log contains only one activity
b ← find BaseCase(log)
 if  InductiveMiner finds a basecase b in log then
    return b
 end if
 (⊕,∑1, …∑n) ← findCut(log)      // Find a suitable cut
// Split the log into partitions
 if InductiveMiner finds a cut c of operator ⊕ in log then
    log1…logn ← split log using c
    return⊕(InductiveMiner(log1),
    InductiveMiner(log2) , … InductiveMiner(logn))
 end if
// If no suitable cut is found, use a fallback strategy
    return fallThrought(log)
end function
```

نکته قابل توجه این است که مدل‌های فرآیند، علاوه بر نمایش گرافیکی رایج، می‌توانند به عنوان یک ماتریس علیتی[1] به‌صورت زیر نشان داده شوند [۳۸، ۴]:

$$CM = \{(In(act_i), Out(act_i)), \forall\, i = 1...n\}$$

به‌گونه‌ای که act_i نماینده یک فعالیت در گزارش رویداد است. In(act_i) و Out(act_i) به ترتیب مجموعه فعالیت‌هایی را نشان می‌دهند که باید پیش از act_i و پس از آن اجرا شوند. nتعداد کل فعالیت‌های موجود در گزارش رویداد است.

۳-۱-۲- ماژول Process Checker

پس از استخراج مدل‌های فرآیند، برای کنترل آن‌ها باید مدل‌های فرآیند کشف‌شده با مدل‌های فرآیند در حال اجرا مقایسه شوند. در حقیقت، با توجه به اینکه مدل‌های فرآیند استخراج‌شده، تصویری کلی از جریان کارهای کارخانه هوشمند را ارائه می‌دهند، مقایسه مداوم این مدل‌ها با وضعیت اجرایی واقعی فرآیندها، این

[1] Casual Matrix

امکان را فراهم می‌آورد تا از انطباق آن‌ها با یکدیگر اطمینان حاصل کنیم و در صورت لزوم، مدل‌ها را به‌روزرسانی نماییم. این امر به بهبود کنترل فرآیندها، افزایش بهره‌وری و کاهش خطاها کمک شایانی می‌کند. در ماژول Process Checker، عملیات کنترل فرآیندها از طریق الگوریتم رگرسیون لجستیک انجام می‌شود. این الگوریتم، یک ابزار قدرتمند و پرکاربرد در یادگیری ماشین است که برای حل طیف وسیعی از مسائل طبقه‌بندی استفاده می‌گردد. به طور کلی، رگرسیون لجستیک یک روش قدرتمند، قابل تفسیر، سریع و انعطاف‌پذیر برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته دودویی است [۵۲]. برای مقایسه مدل‌های فرآیند، ابتدا الگوریتم با استفاده از مدل فرآیند کشف‌شده آموزش می‌بینند. سپس، الگوریتم آموزش‌دیده برای ارزیابی مدل فرآیند در حال اجرا به‌کار می‌رود. در نهایت، با مقایسه رفتار فرآیندهای در حال اجرا با مدل‌های کشف‌شده، در صورت وجود اختلاف، مدل‌های فرآیند بهبود داده می‌شوند. شبه‌کد الگوریتم رگرسیون لجستیک به منظور به‌کارگیری در ماژول Process Checker در الگوریتم ۲ نشان داده شده است.

۴- ارزیابی کارایی معماری پیشنهادی

در این پژوهش، برای ارزیابی معماری پیشنهادی از هدوپ نسخه ۳.۰.۰ و اسپارک نسخه ۳.۳.۱ استفاده شده است. آزمایشات بر روی یک سیستم با پردازنده‌ای دو هسته‌ای، ۱۲ گیگابایت حافظه‌ی رم و یک ترابایت فضای دیسک سخت انجام شده است. همچنین، با هدف ارزیابی کارایی مولفه Process Conformance Checking، الگوریتم‌های به‌کار رفته در آن به کمک ابزار ProM و زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شده‌اند. برای ارزیابی، مجموعه‌ای از گزارشات رویداد متنوع (جدول ۲) به عنوان داده‌های ورودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به حجم بالای این گزارشات، فقط بخشی از یک نمونه از آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. این گزارشات رویداد توسط پیوند https://github.com/alireza178/event-log-evaluations/ قابل دسترس می‌باشند. همچنین، از معیارهای مختلفی نیز برای سنجش کارایی این مولفه استفاده شده است که در ادامه در زیربخش‌های بعدی به تفصیل شرح داده خواهند شد. شکل ۴ فرآیند کلی آزمایشات را برای ارزیابی کارایی مولفه Process Conformance Checking نشان می‌دهد.

الگوریتم۲. شبه‌کد الگوریتم رگرسیون لجستیک [۵۳]

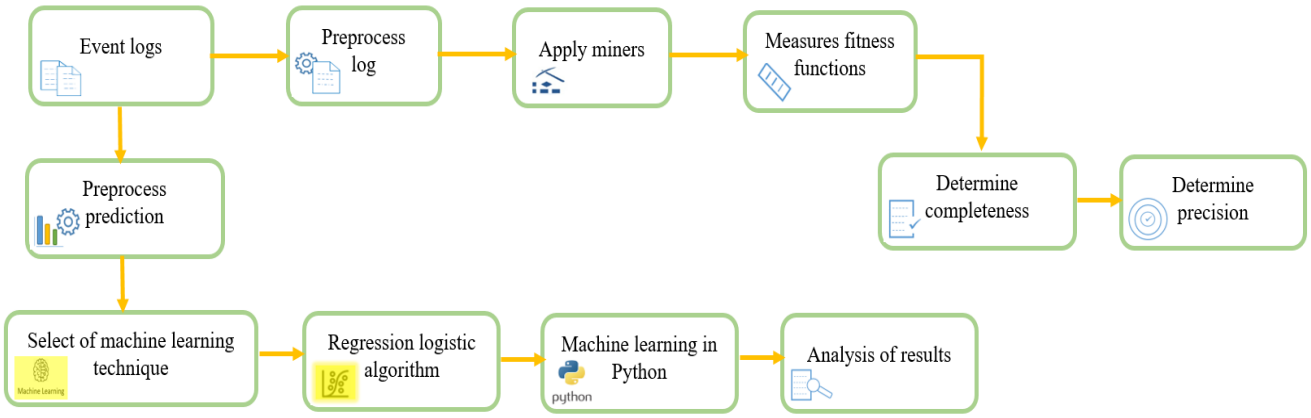
Input: Training data
(Train dataset← discovered process model,
Test dataset ← executing process model)
Begin
For i= 1 to k
For each training data instance d_i:
Set the target value for the regression to $z_i = \frac{y_i - P(1|d_j)}{[P(1|d_j) \times P(1-P(1|d_j))]}$
Initialize the weight of instance d_j to $[P(1|d_j) \times P(1 - P(1|d_j))]$
Finalize a f(j) to the data with class value (z_j) & weight(w_j)
Classification Label Decision
Assign (class label:1) if $P(1|d_j) > 0.5$, otherwise (class label:0)
End

جدول ۲. مشخصات فایل‌های گزارشات رویداد استفاده شده در آزمایشات

نام گزارش رویداد	توصیف مشخصات گزارش رویداد	ظرفیت	تعداد کیس‌ها	تعداد رویدادها
گزارش رویداد ۱	داده‌هایی از یک سیستم تولید مواد غذایی	۷۲٫۸ مگابایت	۲۰۱۳۵	۳۰۹۰۳۶
گزارش رویداد ۲	داده‌هایی درباره یک سیستم برنامه‌ریزی منابع سازمان	۴٫۸۴ مگابایت	۳۴۷۲۳	۱۰۳۴۶۹
گزارش رویداد ۳	داده‌هایی از تولیدات محصولات کشاورزی	۱٫۸۸ گیگابایت	۱۶۹	۱۰۴۸۵۷۵
گزارش رویداد ٤	داده‌هایی درباره زنجیره‌های تامین (داده‌های ساختیافته)	۹۱٫۱ مگابایت	۲۰۶۵۲	۱۸۰۵۱۹
گزارش رویداد ۵	داده‌هایی درباره زنجیره‌های تامین (داده‌های غیرساختیافته)	۹۱ مگابایت	۳۳۴۰	۴۶۹۹۷۷

Order Id	Product Name	order date (DateOrders)	Type	Days for sl	Days for sl	Benefit pe	Sales per customer	Delivery St	Late_deliv	Category I	Category I	Customer	Customer	Customer Email	Customer
1	Diamondback Women's Serene Classic Comfort Bi	1/1/2015 0:00	CASH	2	4	88.79	239.9799957	Advance sl	0	43	Camping &	Hickory	EE. UU.	XXXXXXXXX	Mary
2	Pelican Sunstream 100 Kayak	1/1/2015 0:21	PAYMENT	3	4	91.18	193.9900055	Advance sl	0	48	Water Spo	Chicago	EE. UU.	XXXXXXXXX	David
2	Nike Men's CJ Elite 2 TD Football Cleat	1/1/2015 0:21	PAYMENT	3	4	36.47	107.8899994	Advance sl	0	18	Men's Foo	Chicago	EE. UU.	XXXXXXXXX	David
2	Nike Men's Dri-FIT Victory Golf Polo	1/1/2015 0:21	PAYMENT	3	4	68.25	227.5	Advance sl	0	24	Women's /	Chicago	EE. UU.	XXXXXXXXX	David
4	Team Golf New England Patriots Putter Grip	1/1/2015 1:03	CASH	5	4	4.1	40.97999954	Late delive	1	40	Accessorie	San Anton	EE. UU.	XXXXXXXXX	Brian
4	Nike Men's Dri-FIT Victory Golf Polo	1/1/2015 1:03	CASH	5	4	60.27	123	Late delive	1	24	Women's /	San Anton	EE. UU.	XXXXXXXXX	Brian
4	Perfect Fitness Perfect Rip Deck	1/1/2015 1:03	CASH	5	4	26.13	296.9500122	Late delive	1	17	Cleats	San Anton	EE. UU.	XXXXXXXXX	Brian
4	O'Brien Men's Neoprene Life Vest	1/1/2015 1:03	CASH	5	4	33.59	159.9400024	Late delive	1	46	Indoor/Ou	San Anton	EE. UU.	XXXXXXXXX	Brian
5	Nike Men's CJ Elite 2 TD Football Cleat	1/1/2015 1:24	DEBIT	6	4	34.94	109.1900024	Late delive	1	18	Men's Foo	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Mary
5	Diamondback Women's Serene Classic Comfort Bi	1/1/2015 1:24	DEBIT	6	4	109.55	248.9799957	Late delive	1	43	Camping &	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Mary
5	Diamondback Women's Serene Classic Comfort Bi	1/1/2015 1:24	DEBIT	6	4	92.24	245.9799957	Late delive	1	43	Camping &	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Mary
5	Perfect Fitness Perfect Rip Deck	1/1/2015 1:24	DEBIT	6	4	143.98	299.9500122	Late delive	1	17	Cleats	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Mary
5	O'Brien Men's Neoprene Life Vest	1/1/2015 1:24	DEBIT	6	4	9.38	82.97000122	Late delive	1	46	Indoor/Ou	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Mary
7	Diamondback Women's Serene Classic Comfort Bi	1/1/2015 2:06	DEBIT	3	2	120.95	251.9799957	Late delive	1	43	Camping &	Miami	EE. UU.	XXXXXXXXX	Mary
7	Pelican Sunstream 100 Kayak	1/1/2015 2:06	DEBIT	3	2	78.4	195.9900055	Late delive	1	48	Water Spo	Miami	EE. UU.	XXXXXXXXX	Mary
7	Glove It Imperial Golf Towel	1/1/2015 2:06	DEBIT	3	2	4.58	77.55000305	Late delive	1	41	Trade-In	Miami	EE. UU.	XXXXXXXXX	Mary
8	O'Brien Men's Neoprene Life Vest	1/1/2015 2:27	TRANSFER	4	4	-131.15	163.9299927	Shipping o	0	46	Indoor/Ou	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Mary
8	Nike Men's Dri-FIT Victory Golf Polo	1/1/2015 2:27	TRANSFER	4	4	1.49	49.5	Shipping o	0	24	Women's /	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Mary
8	Perfect Fitness Perfect Rip Deck	1/1/2015 2:27	TRANSFER	4	4	16.88	149.3800049	Shipping o	0	17	Cleats	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Mary
8	Perfect Fitness Perfect Rip Deck	1/1/2015 2:27	TRANSFER	4	4	73.11	224.9600067	Shipping o	0	17	Cleats	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Mary
9	Pelican Sunstream 100 Kayak	1/1/2015 2:48	PAYMENT	5	4	96	199.9900055	Late delive	1	48	Water Spo	Lakewood	EE. UU.	XXXXXXXXX	Mary
9	Pelican Sunstream 100 Kayak	1/1/2015 2:48	PAYMENT	5	4	19.8	197.9900055	Late delive	1	48	Water Spo	Lakewood	EE. UU.	XXXXXXXXX	Mary
9	Nike Men's Free 5.0+ Running Shoe	1/1/2015 2:48	PAYMENT	5	4	3.8	189.9799957	Late delive	1	9	Cardio Eq	Lakewood	EE. UU.	XXXXXXXXX	Mary
10	Nike Men's CJ Elite 2 TD Football Cleat	1/1/2015 3:09	PAYMENT	6	4	28.73	110.4899979	Late delive	1	18	Men's Foo	Memphis	EE. UU.	XXXXXXXXX	Joshua
10	Glove It Women's Mod Oval 3-Zip Carry All Gol	1/1/2015 3:09	PAYMENT	6	4	-15.64	21.32999992	Late delive	1	41	Trade-In	Memphis	EE. UU.	XXXXXXXXX	Joshua
10	Pelican Sunstream 100 Kayak	1/1/2015 3:09	PAYMENT	6	4	-14.08	159.9900055	Late delive	1	48	Water Spo	Memphis	EE. UU.	XXXXXXXXX	Joshua
10	Pelican Sunstream 100 Kayak	1/1/2015 3:09	PAYMENT	6	4	72	149.9900055	Late delive	1	48	Water Spo	Memphis	EE. UU.	XXXXXXXXX	Joshua
10	O'Brien Men's Neoprene Life Vest	1/1/2015 3:09	PAYMENT	6	4	22.67	83.97000122	Late delive	1	46	Indoor/Ou	Memphis	EE. UU.	XXXXXXXXX	Joshua
11	Perfect Fitness Perfect Rip Deck	1/1/2015 3:30	PAYMENT	2	4	16.8	47.99000168	Advance sl	0	17	Cleats	Caguas	Puerto Ric	XXXXXXXXX	Nathan

شکل ۳. مشخصات بخشی از گزارش رویداد ۴



شکل ۴. مراحل انجام آزمایشات

۴-۱- معیارهای ارزیابی کارایی

در این بخش، برای ارزیابی عملکرد ماژول‌های Process Extracting و Process Checker در راستای کنترل فرآیندها، این ماژول‌ها در مولفه Process Conformance Checking توسط معیارهای مختلفی اعتبارسنجی شده‌اند. بر این اساس، توابع برازندگی برای ارزیابی الگوریتم‌های کشف مدل فرآیند به صورت زیر تعریف می‌شوند [۳۸]:

$$\text{Completeness} = \frac{\text{all considered activities of casual matrix} - \text{punishment}}{\text{total number of event log activities}} \quad (۱)$$

$$\text{Punishment} = \frac{\text{all incorrect relations of casual matrix}}{\text{number of log trace} - \text{number of traces incorrect relation} + 1} \quad (۲)$$

$$\text{Precision} = 1 - \max\{0, P_{dm}, P_{rm}\} \quad (۳)$$

$$P_{dm} = \frac{1}{\text{all enabled activites of the discoverd process model}} \quad (۴)$$

$$P_{rm} = \frac{1}{\textit{all enabled activites of the real process model}} \quad (۵)$$

همچنین، می‌توان برخی از معیارهای ارزیابی برای الگوریتم

بررسی انطباق فرآیند را به صورت زیر ارائه نمود [۳۸،۴۸]:

$$\text{True Positive Rate (TPR)} = \frac{\#\ \text{True Positive (TP)}}{\#\ \text{True Positive (TP)} + \#\ \text{False Negative(FN)}} \quad (۶)$$

$$\text{False Positive Rate (FPR)} = \frac{\#\ \text{False Positive (FP)}}{\#\ \text{False Positive (FP)} + \#\ \text{True Negative(TN)}} \quad (۷)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{\#\ \text{True Positive (TP)} + \#\ \text{True Negative (TN)}}{N} \quad (۸)$$

$$N = \#\ \text{True Positive (TP)} + \#\ \text{True Negative(TN)} + \#\ \text{False Positive (FP)} + \#\ \text{False Negative (FN)} \quad (۹)$$

بنابراین، اگر نمونه‌های فرآیند درست و نادرست را به عنوان دو کلاس مجزا در نظر بگیریم، می‌توان پارامترهای استفاده شده در روابط ۶، ۷، ۸ و ۹ را به صورت زیر تعریف نمود:

- **مثبت صحیح**[1]: نمونه‌هایی از فرآیند که به درستی به عنوان نمونه‌های درست طبقه‌بندی شده‌اند.
- **منفی کاذب**[2]: نمونه‌هایی از فرآیند که به اشتباه به عنوان نادرست طبقه‌بندی شده‌اند، اما در واقع درست هستند.
- **منفی صحیح**[3]: نمونه‌هایی از فرآیند که به درستی، نمونه‌های نادرست طبقه‌بندی شده‌اند.
- **مثبت کاذب**[4]**:** نمونه‌هایی از فرآیند که به اشتباه به عنوان درست طبقه‌بندی شده‌اند، در حالی که در واقع نادرست هستند.

۴-۲- نتایج ارزیابی کارایی

برای ارزیابی کارایی ماژول Process Extracting در مولفه Process Conformance Checking، نیاز به پیاده‌سازی الگوریتم کاوشگر استقرایی است. بنابراین، این الگوریتم با استفاده از پلاگین مربوطه در نرم‌افزار ProM پیاده‌سازی می‌گردد. همچنین، برای سنجش عملکرد ماژول Process Extracting، مقایسه‌ای بین الگوریتم کاوشگر استقرایی با الگوریتم‌های آلفا، ژنتیک و استخراج اکتشافی انجام شده است. جدول‌های ۳ و ۴ پارامترهای استفاده شده در این الگوریتم‌ها را مشخص می‌نمایند.

جدول ۳. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک

Population size	۱۰
Generation	۱۰۰
Extra behavior punishment	۰،۰۲۵
Mutation Probability	۰،۲
Crossover Probability	۰،۸
Elitism rate	۰،۲

جدول ۴. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم استخراج اکتشافی

Long distance	۰،۹
Length two loops	۰،۹
Loops length one	۰،۹
Dependency	۰،۹

جدول ۵، نتایج نهایی ارزیابی عملکرد ماژول Process Extracting را بر اساس معیارهای انتخاب شده از جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد. برای انجام این ارزیابی، گزارشات رویداد بیان شده در جدول ۲ به عنوان ورودی به ماژول وارد شده‌اند. پس از اجرای ماژول، نتایج به‌دست آمده در جدول ۵ ارائه گردیده است.

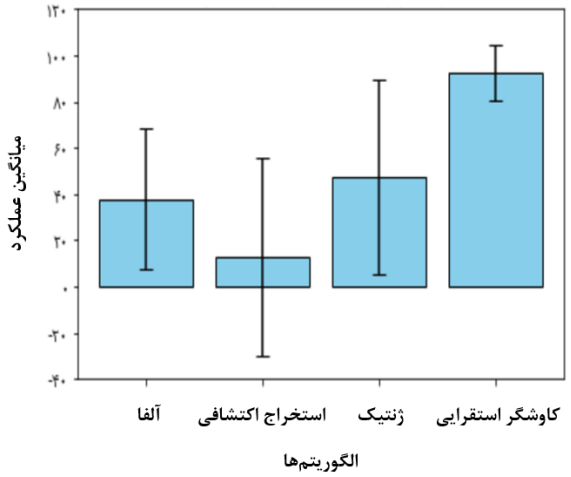
جدول ۵. نتایج مقایسه کارایی الگوریتم به‌کار رفته در ماژول Process Extracting با سایر الگوریتم‌ها

نام الگوریتم	کامل بودن (٪)	دقت (٪)
آلفا	۳۷،۹	۸۵،۱۸
	ارزیابی کلی:۶۱،۵۴	
استخراج اکتشافی	۱۲،۸	۷۶،۴۹
	ارزیابی کلی:۴۴،۶۴	
ژنتیک	۴۷،۳۳	۴۳،۵۸
	ارزیابی کلی:۴۵،۴۵	
کاوشگر استقرایی (این مقاله)	**۹۲،۶۹**	**۷۹،۶۸**
	ارزیابی کلی:۸۶،۱۸	

بر اساس نتایج جدول ۵، الگوریتم کاوشگر استقرایی با میزان دستیابی به نرخ کامل بودن[5]، ۹۲.۶۹ درصد و دقت[6]، ۷۹.۶۸ درصد عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که وقتی موازنه‌ای بین معیارهای کامل بودن و دقت مورد نیاز است و کیفیت کلی مدل کشف شده دارای اهمیت می‌باشد، الگوریتم کاوشگر استقرایی یک گزینه مناسب‌تری محسوب

[1] True Positive (TP)
[2] False Negative (FP)
[3] True Negative (TN)
[4] False Positive (FP)
[5] Completeness
[6] Precision

می‌شود. همچنین، برای بررسی تفاوت عملکرد الگوریتم‌های کاوش فرآیند از نظر معیار کامل بودن، تحلیل واریانس یک طرفه[1] انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف معناداری بین الگوریتم‌ها وجود دارد. مقدار آماره‌ی آزمون F برابر با ۱۲,۱۲۷۸ با درجات آزادی۳ و ۱۶ محاسبه گردید و مقدار احتمال (p) برابر با ۰,۰۰۰۲ به‌دست آمده است. با توجه به اینکه مقدار p کمتر از سطح معنی‌دار ۰,۰۵ است، فرضیه صفر (که بیان می‌کند بین میانگین‌های گروه‌ها تفاوت معناداری وجود ندارد) رد می‌شود و این نتیجه نشان می‌دهد که حداقل، عملکرد یکی از الگوریتم‌ها به طور معنی‌داری با سایرین تفاوت دارد. همچنین، این یافته تاکید می‌نماید که نوع الگوریتم نیز تاثیر معناداری بر میزان کامل بودن فرآیند دارد. در این زمینه، شکل ۵ میانگین عملکرد چهار الگوریتم کاوش فرآیند را به همراه انحراف معیار آن‌ها نشان می‌دهد. همانطورکه در این نمودار مشخص شده است، الگوریتم کاوشگر استقرایی با میانگین عملکرد ۹۲,۶۹، بالاترین کارایی را در میان الگوریتم‌های دیگر داشته است؛ در مقابل، الگوریتم استخراج اکتشافی با میانگین ۱۲,۸ پایین‌ترین عملکرد را نشان داده است. با توجه به انحراف معیار پایین الگوریتم کاوشگر استقرایی، می‌توان نتیجه گرفت این الگوریتم علاوه بر عملکرد برتر، از پایداری بیشتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر برخوردار بوده است.



شکل ۵. مقایسه میانگین و انحراف معیار عملکرد الگوریتم به‌کار رفته در ماژول Process Extracting با الگوریتم‌های دیگر

همچنین، برای تحلیل ترکیبی عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس دو معیار کامل بودن و دقت، از تحلیل واریانس چندمتغیره[2] استفاده شده است. در این تحلیل، مقدار p به‌دست آمده برای تعامل بین نوع الگوریتم و معیارهای ارزیابی، ۰,۰۰۲۵۷۵ است. این مقدار نشان‌دهنده تاثیر معنی‌دار الگوریتم‌ها بر ترکیب این دو شاخص عملکردی می‌باشد. به‌طور مشخص، الگوریتم کاوشگر استقرایی بالاترین میزان کامل بودن را در بین الگوریتم‌های بررسی شده، ارائه داده است. اگرچه الگوریتم آلفا دقت بالاتری را نشان می‌دهد، اما میانگین کلی دو شاخص در الگوریتم کاوشگر استقرایی از سایر الگوریتم‌ها بالاتر بوده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم کاوشگر استقرایی از نظر عملکرد کلی، برتری نسبی نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.

همچنین، جدول ۶، مقایسه‌ای بین عملکرد الگوریتم‌های آلفا، استخراج اکتشافی، کاوشگر آی ال پی و کاوشگر استقرایی را بر اساس گزارشات رویداد استفاده شده در مطالعه‌ی بتاچی و همکاران[3] [۵۴] ارائه می‌دهد. نتایج این مطالعه در جدول ۶ نشان داده شده است.

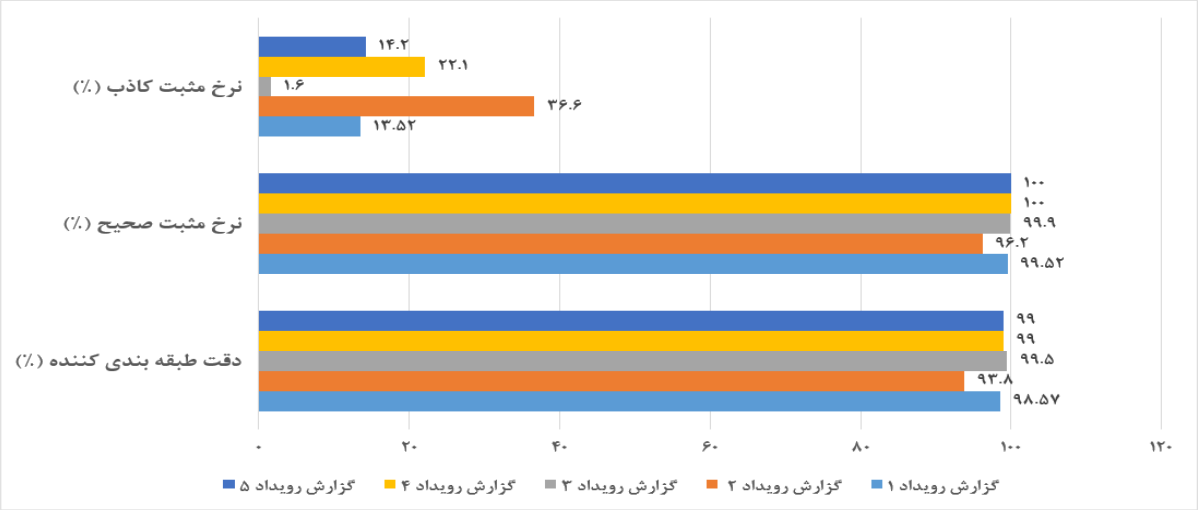
بر اساس مقایسه ارائه شده در جدول ۶، الگوریتم کاوشگر استقرایی دارای بالاترین میزان تناسب و دقت در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها است.

به منظور ارزیابی دقیق کارایی ماژول Process Checker در مولفه Process Conformance Checking، الگوریتم رگرسیون لجستیک با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شده است. در این رابطه، گزارشات رویداد (جدول ۲) به نسبت ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای تست، تقسیم گردیده و به عنوان ورودی به مدل وارد شده‌اند. نتایج حاصل از اجرای این ماژول، به صورت نمودار در شکل ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. مقایسه کارایی الگوریتم‌های آلفا، استخراج اکتشافی، کاوشگر آی ال پی و کاوشگر استقرایی [۵۴]

نام الگوریتم	تناسب (٪)	دقت (٪)
آلفا	۰,۸۳	۰,۷۷
استخراج اکتشافی	۰,۹۸	۰,۹۵
کاوشگر آی ال پی	۰,۹۰	۰,۷۷
کاوشگر استقرایی	**۰,۹۹**	**۰,۹۸**

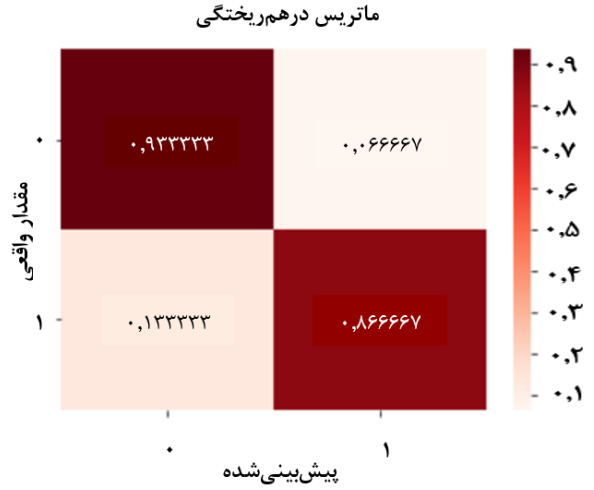
[1] One-Way ANOVA
[2] MANOVA
[3] Bettacchi et al.



شکل ۶. ارزیابی کارایی الگوریتم رگرسیون لجستیک

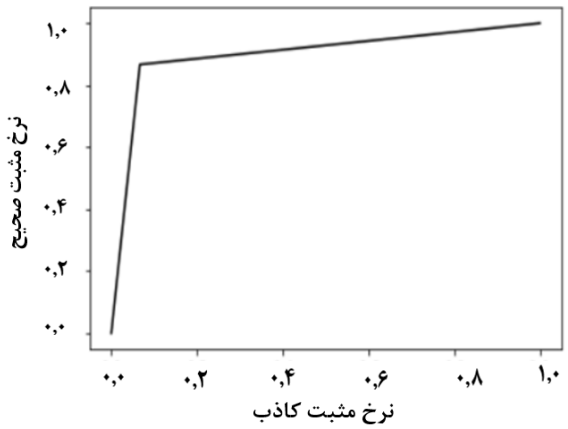
شکل ۶ نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم رگرسیون لجستیک به‌کار رفته در ماژول Process Checker را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این الگوریتم عملکرد بسیار مناسبی در کنترل مدل‌های فرآیند بر اساس گزارشات رویداد مختلف از خود نشان داده است.

علاوه بر این، ماتریس درهم‌ریختگی[1] محاسبه شده برای بخشی از داده‌های گزارش رویداد ۱، به عنوان معیاری برای ارزیابی عملکرد مدل در تشخیص دقیق انواع مختلف داده‌ها، در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل در طبقه‌بندی کلاس‌های مختلف عملکرد بسیار خوبی دارد.



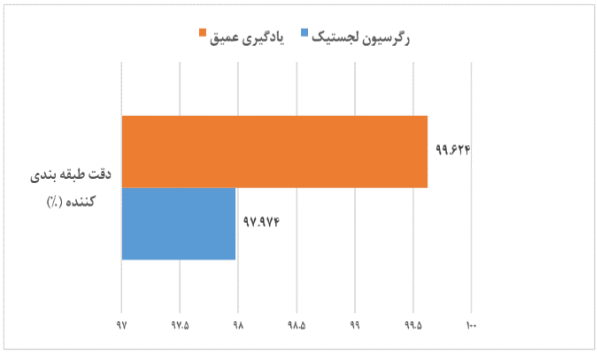
شکل ۷. یک مثال از ارزیابی مدل بر روی بخشی از داده‌های گزارش رویداد ۱

همچنین، شکل ۸ منحنی ROC[2] را برای داده‌های بررسی‌شده در شکل ۷ نمایش می‌دهد. مساحت زیر منحنی (AUC[3]) که معیاری برای سنجش عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی است، برای این مدل برابر با ۰,۹۰ محاسبه شده است. هرچه مقدار AUC به ۱ نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل بهتر است. بنابراین، با توجه به مقدار AUCبه دست آمده، می‌توان گفت که مدل عملکرد قابل قبولی در تشخیص صحیح نمونه‌ها دارد.



شکل ۸. منحنی ROC برای ارزیابی طبقه‌بندی‌کننده

[1] Confusion Matrix
[2] Receiver Operating Characteristic
[3] Area Under the Curve



شکل ۹- مقایسه عملکرد الگوریتم‌های رگرسیون لجستیک و یادگیری عمیق

در این بخش، به منظور بررسی و مقایسه قابلیت‌های پیش‌بینی، عملکرد الگوریتم رگرسیون لجستیک در برابر الگوریتم یادگیری عمیق ارزیابی شده است. ارزیابی عملکرد الگوریتم یادگیری عمیق نیز با استفاده از همان گزارشات رویداد ارائه شده در جدول ۲ انجام گردیده است. در نهایت، نتایج دقت هر دو الگوریتم در قالب نمودار، در شکل ۹ ارائه شده است.

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده و مقایسه آن‌ها با یافته‌های منابع مختلف، اگرچه الگوریتم یادگیری عمیق در پیش‌بینی‌های انجام گرفته دقت بالاتری ارائه نموده است (شکل ۹)، اما می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم رگرسیون لجستیک با توجه به ویژگی‌های خاص کارخانه‌های هوشمند نظیر تصمیم‌گیری بلادرنگ، مصرف بهینه منابع، تفسیرپذیری بالا و سادگی استقرار، نسبت به الگوریتم یادگیری عمیق گزینه‌ای کارامدتر محسوب می‌شود. بر این اساس، با مطالعه منابع گوناگون مانند [۵۵-۵۷] می‌توان این دو الگوریتم را بر پایه معیارهای مختلف مقایسه نمود.

الگوریتم یادگیری عمیق نیاز به زیرساخت محاسباتی سنگین (مانند GPU با توان محاسباتی بالا و حافظه زیاد) دارد. همچنین، برای پردازش داده‌های بزرگ و افزایش سرعت یادگیری، معمولاً لازم است تعداد لایه‌های شبکه افزایش یابد، که این موضوع به‌طور طبیعی باعث افزایش پیچیدگی محاسباتی، کندی اجرا و افزایش زمان پردازش می‌شود. در بسیاری از کاربردهای سازمانی، سرعت تصمیم‌گیری و سادگی مدل یک عامل مهم است. بنابراین رگرسیون لجستیک می‌تواند به‌سرعت و با تفسیرپذیری بالا، نتایج کاربردی‌تر ارائه دهد. در این زمینه، در تحلیل بلادرنگ فرآیندها، حتی چند میلی‌ثانیه تاخیر می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی گردد.

الگوریتم رگرسیون لجستیک به دلیل ساختار ساده‌اش می‌تواند در بسترهای بلادرنگ و تحلیل داده‌های جریانی بدون تاخیر زیاد اجرا شود، در حالی‌که یادگیری عمیق زمان بیشتری برای پردازش نیاز دارد. همچنین، داده‌های جریانی در فرآیندهای کسب‌وکار، ممکن است شامل نویز، ناقص بودن و تنوع رفتاری باشند. الگوریتم یادگیری عمیق در چنین محیطی بدون تنظیم دقیق، ممکن است دچار بیش‌برازش گردد. در این شرایط، روش رگرسیون لجستیک مقاوم‌تر است و بهتر می‌تواند با داده‌های پرت یا ناقص مقابله نماید. علاوه بر این، یادگیری عمیق نیازمند تخصص بالا، زیرساخت مناسب و عملیات نگهداری مداوم است. مدل‌های ساده مانند رگرسیون لجستیک، پس از یک‌بار آموزش، می‌توانند به‌راحتی در سامانه‌های عملیاتی سازمانی مستقر شوند بدون آنکه بار مهندسی بالایی تحمیل کنند.

بنابراین، اگرچه الگوریتم یادگیری عمیق از نظر تئوری توانایی بیشتری دارد، نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که الگوریتم رگرسیون لجستیک تعادلی عملی‌تر بین عملکرد، تفسیرپذیری و کارایی استقرار ارائه می‌دهد. در محیط‌های کسب‌وکار با تصمیم‌گیری بلادرنگ، این روش، تصمیم‌گیری‌های سریع‌تر، یکپارچگی راحت‌تر و منطق شفاف‌تری فراهم می‌کند که اغلب از بهبودهای جزئی در دقت پیش‌بینی با ارزش‌تر هستند.

۴-۳- نتایج ارزیابی کارایی بر اساس داده‌های نویزی

برای ارزیابی میزان استحکام معماری پیشنهادی، الگوریتم‌های به‌کار رفته در آن شامل الگوریتم کاوشگر استقرایی و الگوریتم رگرسیون لجستیک بر اساس گزارشات رویداد ارائه شده در جدول ۲ و در سطوح مختلف نویز (۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، نویزهای مورد مطالعه به دو دسته تقسیم شده‌اند. در بخش الگوریتم کاوش فرآیند، این نویزها شامل تغییر در نام فعالیت‌ها و ترتیب وقوع آن‌ها هستند. در بخش الگوریتم یادگیری ماشین، شامل اختلال در مقادیر برخی ویژگی‌ها و برچسب‌های کلاس می‌باشند. معیارهای ارزیابی شامل کامل بودن و دقت برای الگوریتم کاوشگر استقرایی و معیار دقت طبقه‌بندی‌کننده برای الگوریتم رگرسیون لجستیک در نظر گرفته شده‌اند. نتایج این ارزیابی‌ها در جداول ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند.

جدول ۷. نتایج ارزیابی کارایی الگوریتم کاوشگر استقرایی بر اساس سطوح نویز ۱۰٪، ۲۰٪ و۳۰٪

نویز (٪)	کامل بودن (٪)	دقت (٪)
۰	۹۲,۶۹	**۷۹,۶۸**
۱۰	۸۹,۶۹	**۷۴,۸۶**
۲۰	۸۶,۳۲	**۷۲,۰۶**
۳۰	۸۳,۵۳	**۶۸,۶۱**

با توجه به اینکه الگوریتم کاوشگر استقرایی، به ویژه در معیار کامل بودن در برابر نویز مقاوم می‌باشد، همانطور که در جدول ۷ نشان داده شده است، با افزایش سطح نویز، مقادیر کامل بودن و دقت، کاهش یافته‌اند. با این حال، این کاهش تدریجی و یکنواخت بوده و نشان‌دهنده آن است که مدل فرآیند همچنان توانایی تطابق با داده‌های نویزی را دارد. در حقیقت، در این ارزیابی، حتی با ۳۰٪ نویز، مقادیر کامل بودن و دقت در محدوده قابل قبولی قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده این می‌باشد که هنوز معماری قادر است به‌طور نسبی فرآیندها را بازسازی نماید.

جدول ۸. عملکرد الگوریتم رگرسیون لجستیک در سطوح نویز ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪

نویز (٪)	دقت طبقه‌بندی‌کننده
۰	۹۷,۹۷
۱۰	۸۹,۵۵
۲۰	۸۲,۴۹
۳۰	۶۷,۴۷

همان‌طور که در جدول ۸ نشان داده شده است، الگوریتم رگرسیون لجستیک نیز با افزایش نویز با کاهش دقت مواجه شده است. با این حال، کاهش دقت پیش‌بینی‌پذیر و منظم بوده و به‌صورت ناگهانی یا شدید رخ نداده است. دستیابی به دقت بالای ۸۹٪ با ۱۰٪ نویز و بیش از ۸۲٪ در ۲۰٪ نویز، نشان‌دهنده این است که مدل پیش‌بینی دارای ظرفیت تعمیم مناسبی بوده و دچار فروپاشی عملکردی نمی‌شود. حتی در شرایط ۳۰٪ نویز، مدل هنوز دقت بالاتر از حد تصادفی دارد که این امر نشان دهنده پایداری نسبی معماری است.

با توجه به نتایج ارائه‌شده، کاهش عملکرد هر دو الگوریتم به‌کار رفته در معماری پیشنهادی در برابر سطوح مختلف نویز، قابل انتظار و تدریجی بوده است. بنابراین، هیچ‌کدام از الگوریتم‌ها در مواجهه با نویز دچار فروپاشی شدید یا ناپایداری ناگهانی نشده‌اند و عملکرد آنها حتی در شرایط نویزی در محدوده قابل پذیرش قرار گرفته است. پس می‌توان نتیجه گرفت معماری طراحی‌شده از استحکام قابل قبولی در برابر نویز برخوردار است و برای کاربردهایی که داده‌ها ممکن است نویزی باشند، مناسب است.

۵- بحث

این پژوهش، یک معماری نوآورانه کلان‌داده را برای تحلیل و کنترل فرآیندها در یک کارخانه هوشمند ارائه می‌دهد. با ترکیب قدرتمند تکنیک‌های پیشرفته کلان‌داده، فرآیندکاوی و یادگیری ماشین، این معماری امکان نظارت دقیق، پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرآیندها را فراهم می‌آورد. به عبارت دیگر، معماری پیشنهادی با استخراج بینش‌های عمیق از حجم عظیمی از داده‌ها، ابزاری قدرتمند برای تصمیم‌گیری داده‌محور و بهبود عملکرد کلی کارخانه هوشمند به شمار می‌رود.

همانطورکه پیش‌تر اشاره شد، معماری‌های کلان‌داده به تنهایی برای تحلیل داده‌ها کافی نیستند و برای بهره‌برداری بهینه از آن‌ها، ترکیب با ابزارها و تکنیک‌های پیشرفته تحلیل داده ضروری است [۲۸]. بنابراین، در معماری پیشنهادی برای دستیابی به کنترل دقیق فرآیندها، از ترکیب این تکنیک‌ها بهره گرفته شده است. این معماری با در نظر گرفتن ویژگی‌های کارخانه‌های هوشمند از جمله پویایی، توسعه‌پذیری و حجم بالای داده، طراحی شده است تا بتواند به طور مؤثری با این محیط سازگار شود. بدین منظور، مولفه‌های این معماری قابلیت‌های بالایی را درکنترل فرآیندها توسط استفاده از ابزارهای تحلیلی کلان‌داده، تکنیک‌های مدرنی مانند فرآیندکاوی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین فراهم می‌آورند. در این رابطه، پردازش‌های کلان‌داده باعث می‌شود داده‌ها با سرعت بالایی پردازش شده و در نتیجه فایل‌های گزارش رویداد با بهینگی بیشتری برای مولفه‌های دیگر به‌کار گرفته شوند.

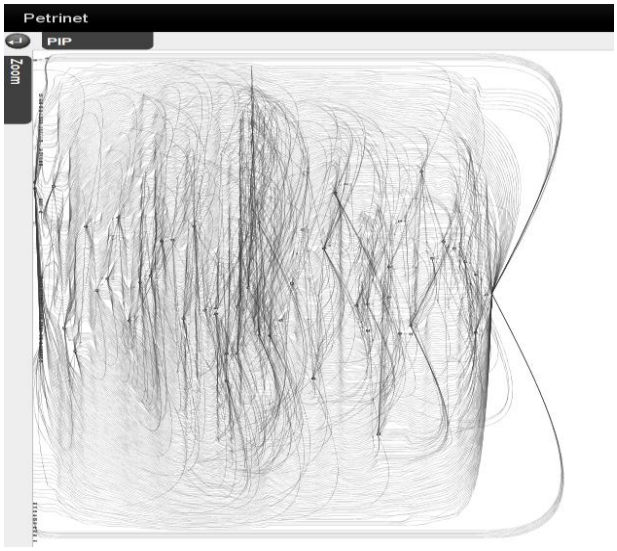
در این مقاله، الگوریتم کاوشگر استقرایی بر اساس معیارهای مختلفی ارزیابی شده است. با توجه به مزایای الگوریتم کاوشگر استقرایی در زمینه کشف مدل‌های فرآیند که در بخش ۱-۱-۳ تشریح شده است، نتایج ارزیابی‌های کمی ارائه شده در جدول‌های ۵ و ۶، برتری این الگوریتم را نسبت به الگوریتم‌های دیگر نشان می‌دهد. بنابراین، این الگوریتم، بر اساس معیارهای مختلف ارزیابی، عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها از خود نشان داده است.

علاوه بر این، در این پژوهش، الگوریتم رگرسیون لجستیک به عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی مدل‌های فرآیند مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از ارزیابی کارایی این الگوریتم که در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است، نشان دهنده دقت بالا و نرخ خطای پایین آن است.

برتری الگوریتم‌های یادگیری ماشین نسبت به الگوریتم‌های سنتی بررسی تطابق فرآیندها (مانند فوت‌پرینت، اجرای مجدد توکن و همترازی) در این است که آن‌ها توانایی بهتری در بهره-برداری از نتایج فرآیندکاوی برای بهبود فرآیندها دارند. درحقیقت، این الگوریتم‌ها مانند رگرسیون لجستیک با خودکارسازی فرآیندهای تحلیل و امکاناتی از قبیل طبقه‌بندی

مدل‌های فرآیند و تشخیص انحرافات، برای افزودن هوش مصنوعی به فرآیندکاوی به‌کار می‌روند و می‌توانند فرآیندکاوی سنتی را به فرآیندکاوی هوشمند تبدیل نمایند. علاوه بر این، روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر داده می‌باشند؛ در صورتی که اغلب روش‌های مرسوم بررسی مطابقت، مبتنی بر مدل هستند. بنابراین، در تکنیک‌های یادگیری ماشین نیاز به ایجاد مدل‌های فرآیند مانند مدل‌های پتری‌نت نمی‌باشد. از سوی دیگر، یکی از مشکلات تکنیک‌های مبتنی بر مدل نسبت به روش‌های یادگیری ماشین این است که این روش‌ها از مقیاس-پذیری ضعیف رنج می‌برند.

نکته قابل توجه در زمینه فرآیندکاوی، تعداد کیس‌ها و تعداد رویدادهای به‌کار رفته در یک کیس در یک گزارش رویداد است که می‌تواند گزارش رویداد را مقیاس‌پذیر نماید. به عبارت دیگر، از نظر ظرفیت یا مقیاس‌پذیری در کلان‌داده‌ها، منظور از کلان-داده در این پژوهش، گزارشات رویدادی هستند که تعداد کلانی از کیس و رویداد داشته باشند. پردازش مستقیم گزارشات رویداد بزرگ توسط الگوریتم‌های فرآیندکاوی، بدون بهره‌گیری از چارچوب‌های محاسباتی قدرتمند نظیر هدوپ، استخراج مدل-های فرآیند را غیرممکن می‌سازد یا منجر به استخراج مدل‌های فرآیند پیچیده می‌شود. این مدل‌ها در فرآیندکاوی به مدل‌های اسپاگتی موسوم‌اند. در مدل‌های اسپاگتی درک مدل فرآیند مشکل می‌شود و زمان زیادی برای تحلیل فرآیند نیاز است. برای مثال، شکل ۱۰ به وضوح نشان می‌دهد که عدم استفاده از چارچوب‌هایی مانند هدوپ در استخراج مدل فرآیند از گزارش رویداد ۴، منجر به تولید یک مدل اسپاگتی شده است.



شکل ۱۰. استخراج مدل فرآیند از گزارش رویداد ۴ در نرم افزار ProM

همچنین، با توجه به نقش محوری Apache Hadoop و Apache Spark در اکوسیستم کلان‌داده نسبت به برخی چارچوب‌های دیگر [۵۱]، معماری پیشنهادی بر پایه این دو چارچوب قدرتمند بنا شده است.

به‌طور کلی در سناریوهای بسیار بزرگ، مانند محیط‌های کارخانه‌های هوشمند که شامل تعداد زیادی رویداد و کیس هستند، مقیاس‌پذیری و کارایی معماری حائز اهمیت است. معماری پیشنهادی با تکیه برHDFS، Apache Spark طراحی شده است تا بتواند حجم عظیمی از گزارشات رویداد را پردازش نماید. بنابراین، داده‌ها ابتدا در بستر HDFS ذخیره شده و سپس با استفاده از Spark SQL و Spark Streaming تحلیل می‌شوند. HDFS، به‌عنوان سیستم ذخیره‌سازی توزیع‌شده، این گزارشات رویداد را به‌صورت کارآمد و مقیاس‌پذیر ذخیره نموده و دسترسی به داده‌ها را برای پردازش سریع فراهم می‌آورد. همچنین، ابزارهای Spark SQL و Spark Streaming امکان پردازش توزیع‌شده و کارآمد را هم در حالت دسته‌ای و هم در حالت جریانی فراهم می‌سازند. خروجی این مرحله به الگوریتم‌های کاوشگر استقرایی و رگرسیون لجستیک به منظور استخراج مدل فرآیند و ارزیابی میزان انطباق اجرای واقعی فرآیند با مدل استخراج‌شده منتقل می‌شود. بهره‌گیری از ویژگی‌های Apache Sparkباعث می‌شود این تحلیل‌ها به‌صورت توزیع‌شده و در مقیاس بالا انجام‌پذیر باشد. در نتیجه، این ترکیب از HDFS برای ذخیره‌سازی داده‌ها و Apache Spark برای پردازش آن‌ها، باعث می‌شود معماری ارائه‌شده توانایی پاسخ‌گویی به نیازهای پردازش و تحلیل در سناریوهای کلان‌داده‌ای را با حفظ دقت، سرعت و مقیاس‌پذیری داشته باشد.

بنابراین، با توجه به ماهیت پویا و مقیاس‌پذیر کارخانه‌های هوشمند و قابلیت داده‌های رویداد مورد استفاده در این محیط‌ها از نظر حجم، سرعت و تنوع و ویژگی‌های کلان‌داده‌ها (یعنی 4V[۱])، استفاده از ابزارهای تحلیلی کلان‌داده به همراه الگوریتم-های مورد استفاده در معماری پیشنهادی نه تنها مقیاس‌پذیری این معماری را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد، بلکه امکان استخراج بینش‌های ارزشمند برای بهبود فرآیندها، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها را نیز فراهم می‌آورد. بدین ترتیب، با توجه به مزایای راهکارهای ارائه شده، معماری کلان‌داده‌ی پیشنهادی به عنوان یک رویکرد کارآمد برای پیاده‌سازی در کارخانه‌های هوشمند معرفی می‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به ماهیت کارخانه‌های هوشمند و لزوم پردازش بلادرنگ حجم وسیع داده‌های تولید شده با سرعت زیاد، طراحی یک معماری کلان‌داده برای تحلیل فرآیندها ضروری است. بر این اساس، این مقاله یک معماری جدید را پیشنهاد می‌نماید که با ترکیب تکنیک‌های پیشرفته تحلیل داده‌ها مانند کلان‌داده‌ها، فرآیندکاوی و یادگیری ماشین به چالش تحلیل این نوع از داده‌ها پاسخ می‌دهد. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که معماری پیشنهادی به طور قابل توجهی در تحلیل و کنترل فرآیندها در محیط‌های صنعتی مانند کارخانه‌های هوشند به صورت کارآمد عمل می‌نماید.

در حقیقت، نوآوری اصلی این معماری، طراحی یک ساختار کلان‌داده برای پردازش بلادرنگ داده‌های حجیم و متنوع شامل داده‌های ساخت‌یافته و جریان داده‌ها، است. این ساختار با استفاده از چارچوب‌هایی مانند Hadoop و Spark و ترکیب تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند فرآیندکاوی و یادگیری ماشین، امکان تحلیل عمیق فرآیندها در کارخانه‌های هوشمند و تصمیم‌گیری‌های سریع و دقیق را فراهم می‌آورد.

علاوه بر این، این معماری با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته‌ای مانند کاوشگر استقرایی و رگرسیون لجستیک، در کنار تکنیک‌های کلان‌داده قادر به تحلیل فرآیندها و کشف روابط پنهان در داده‌های تولید شده در کارخانه‌های هوشمند است.

مراجع

[1] Mabkhot. M, Al-Ahmari. A, Salah. B, and Alkhalefah. H, "Requirements of the smart factory system: a survey and perspective," *Machines*, vol. 6, no. 2, pp. 23, 2018.

[2] Chen. M, Mao. S, and Liu. Y, "Big data: A survey," *Mobile networks and applications*, vol. 19, no. 2, pp. 171-209, 2014.

[3] Lee. J, Ardakani. H. D., Yang. S, and Bagheri. B, "Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation," *Procedia Cirp*, vol. 38, pp. 3-7, 2015.

[4] Olyai. A, Saraeian. S, and Nodehi. A, "Process mining-based business process management architecture: A case study in smart factories," *Scientia Iranica*, vol. 31, no. 14, 2024.

[5] Zur Muehlen. M, *Workflow-based Process Controlling: Foundation, Design and Application of workflow-driven Process Information Systems*, Logos Velrag Berlin, 2004.

[6] Polyvyanyy. A, Ouyang. C, Barros. A, and van der Aalst. W. M, "Process querying: Enabling business intelligence through query-based process analytics," *Decision Support Systems*, vol. 100, pp. 41-56, 2017.

[7] Liu. X, Iftikhar. N, and Xie. X, "Survey of real-time processing systems for big data," In *Proceedings of the 18th International Database Engineering & Applications Symposium, Porto, Portugal, July 7-9, 2014*, ACM, 2014, pp. 356-361.

[8] Nagdive. A S and Tugnayat. R M, "A review of Hadoop ecosystem for bigdata," *Int. J. Comput. Appl*, vol. 180, no.14, pp. 35-40, 2018.

[9] Shaikh. E, Mohiuddin. I, Alufaisan. Y, and Nahvi. I, "Apache spark: A big data processing engine," In *2019 2nd IEEE Middle East and North Africa COMMunications Conference (MENACOMM), Manama, Bahrain, November 19-21, 2019*, IEEE ,2019, pp. 1-6.

[10] Salloum. S, Dautov. R, Chen. X, Peng. P X, and Huang. J Z, "Big data analytics on Apache Spark," *International Journal of Data Science and Analytics*, vol. 1, pp.145-164 ,2016.

[11] Sahal. R, Breslin. J G, and Ali. M I, "Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 54, pp. 138-151, 2020.

[12] Vora. M N, "Hadoop-HBase for large-scale data," In *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology, Harbin, China, December 24-26, 2011*, IEEE, 2011, pp. 601-605.

[13] Thusoo. A and et al., "Hive: a warehousing solution over a map-reduce framework," *Proceedings of the VLDB Endowment*, vol. *2*, no.2, pp.1626-1629, 2009.

[14] Bansal. K, Chawla. P, and Kurle. P, "Analyzing performance of apache pig and apache hive with Hadoop," In *Engineering Vibration, Communication and Information Processing: ICoEVCI, India*, Springer Singapore, 2019, pp. 41-51.

[15] Alexakis. T, Peppes. N, Demestichas. K, and Adamopoulou. E, " A distributed big data analytics architecture for vehicle sensor data," *Sensors*, vol. 23, no. 1, pp. 357, 2022.

[16] Manogaran. G and et al., "A new architecture of Internet of Things and big data ecosystem for secured smart healthcare monitoring and alerting system," *Future Generation Computer Systems*, vol. *82*, pp. 375-387, 2018.

[17] Biswas. S and Sen. J, "A proposed architecture for big data driven supply chain analytics," *arXiv preprint arXiv:1705.04958*, pp. 7-34, 2017.

[18] Almutairi. L, Abugabah, A, Alhumyani H, and Mohamed. A. A, "Intelligent biomedical image classification in a big data architecture using metaheuristic optimization and gradient approximation", *Wireless Networks*, vol.30, no. 8, pp. 7087-7108, 2024.

[19] Pastor-Galindo. J and et al., "A Big Data architecture for early identification and categorization of dark web sites", Future Generation Computer Systems, vol. 157, pp. 67-81, 2024.

[20] Siriweera. A and Paik. I, "AutoBDA: Model-driven Reference Architecture for Automated Big Data Analysis Framework", IEEE Transactions on Services Computing, 2025.

[21] Theodorakopoulos. L, Theodoropoulou. A, Kampiotis. G, and Kalliampakou. I, "NeuralACT: Accounting Analytics using Neural Network for Real-time Decision Making from Big Data", IEEE Access, 2025.

[22] Nauman. M and et al., "The Role of Big Data Analytics in Revolutionizing Diabetes Management and Healthcare Decision-Making", IEEE Access, 2025.

[23] Gohar. M and et al., "A big data analytics architecture for the internet of small things," *IEEE Communications Magazine*, vol. *56*, no. 2, pp.128-133, 2018.

[24] Constante-Nicolalde. F V, Pérez-Medina. J L, and Guerra-Terán. P, "A proposed architecture for iot big data analysis in smart supply chain fields," In *The international conference on advances in emerging trends and technologies*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 361-374.

[25] Salierno. G, Morvillo. S, Leonardi. L, and Cabri. G, "An architecture for predictive maintenance of railway points based on big data analytics," In *International Conference on Advanced*

Data in Libraries", Systems and Soft Computing, pp. 200186, 2025.

[42] Alsayat. A and et al., "Enhancing cardiac diagnostics: A deep learning ensemble approach for precise ECG image classification", Journal of Big Data, vol. 12, no., pp.7, 2025.

[43] Alizadeh. S, and Norani. A, "ICMA: a new efficient algorithm for process model discovery," *Applied Intelligence*, vol. *48*, no.11, pp. 4497-4514, 2018.

[44] Van der Aalst. W, Weijters. T, and Maruster. L, "Workflow mining: Discovering process models from event logs," *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, vol.16, no. 9, pp. 1128-1142, 2004.

[45] Weijters. AJMM, Van der Aalst. WMP, Medeiros. AK, "Process mining with the heuristics miner algorithm," TU Eindhoven: BETA Working Paper Series, 2006.

[46] Van der Werf. J M E, van Dongen. B F, Hurkens. C A, and Serebrenik. A, "Process discovery using integer linear programming," In International conference on applications and theory of petri nets, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 368-387.

[47] Günther. C W, and Van Der Aalst. W M, "Fuzzy mining–adaptive process simplification based on multi-perspective metrics," In *International conference on business process management*, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 328-343.

[48] Van Der Aalst. W M P, *Process Mining-Data Science in Action*, 2rd ed., Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.

[49] Leemans. S J, Fahland. D, and Van Der Aalst. W M, "Discovering block-structured process models from event logs containing infrequent behavior," In *Business Process Management Workshops: BPM 2013 International Workshops, Beijing, China, August 26, 2013, Revised Papers 11*, Springer international publishing, 2014, pp. 66-78.

[50] Leemans. S J, Fahland. D, and Van der Aalst. W M, "Scalable process discovery and conformance checking," *Software & Systems Modeling*, vol. 17, pp. 599-631, 2018.

[51] Genkin. M, Dehne. F, Shahmirza. A, Navarro. P, and Zhou. S, "Autonomic Architecture for Big Data Performance Optimization", In *Intelligent Systems Conference*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 475-496.

[52] Pohar. M, Blas. M, and Turk. S, "Comparison of logistic regression and linear discriminant analysis: a simulation study," *Metodoloski zvezki*, vol.1, no. 1, pp.143, 2004.

[53] Kumar. V, "Evaluation of computationally intelligent techniques for breast cancer diagnosis," *Neural Computing and Applications*, vol. 33, no.8, pp. 3195-3208, 2021.

[54] Bettacchi. A, Polzonetti. A, and Re. B, "Understanding production chain business process using process mining: a case study in the manufacturing scenario", In *Advanced Information Systems Engineering Workshops: CAiSE 2016 International Workshops, Ljubljana, Slovenia, June 13-17, 2016, Proceedings 28*, Springer International Publishing, 2016, pp. 193-203.

[55] Ahmed. S F and et al. "Deep learning modelling techniques: current progress, applications, advantages, and challenges", Artificial Intelligence Review, vol.56, no. 11, pp. 13521-13617, 2023.

[56] Bailly. A and et al. "Effects of dataset size and interactions on the prediction performance of logistic regression and deep learning models", Computer Methods and Programs in Biomedicine, vol. 213, pp. 106504, 2022.

[57] Lu. Y and et al. "Comparison of machine learning and logistic regression models for predicting emergence delirium in elderly patients: A prospective study", International Journal of Medical Informatics, vol. 199, pp. 105888, 2025.

Information Systems Engineering, Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 29-40.

[26] Simaković. M N, Cica. Z G, and Masnikosa. I B. "Big Data architecture for mobile network operators," In *2021 15th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS), Nis, Serbia, October 20-22, 2021*, IEEE, 2021, pp. 283-286.

[27] Raif. M, Chehri. A, and Saadane. R, "Data architecture and big data analytics in smart cities," *Procedia Computer Science*, vol. 207, pp. 4123-4131.2022.

[28] Ahaidous. K, Tabaa. M, and Hachimi. H, "Towards IoT-Big Data architecture for future education," *Procedia Computer Science*, vol. 220, pp. 348-355.2023.

[29] Mills. N and et al., "A cloud-based architecture for explainable Big Data analytics using self-structuring Artificial Intelligence," *Discover Artificial Intelligence*, vol.*4*, no. 1, pp.33, 2024.

[30] Werner. S, and Tai. S," A reference architecture for serverless big data processing", Future Generation Computer Systems, vol. 155, pp. 179-192, 2024.

[31] Ismail. A, Sazali. F. H, Jawaddi. S. N. A, and Mutalib. S, " Stream ETL framework for twitter-based sentiment analysis: Leveraging big data technologies", Expert Systems with Applications, vol. 261, pp. 125523, 2025.

[32] Saraswat. J. K and Choudhari. S," Integrating big data and cloud computing into the existing system and performance impact: A case study in manufacturing", Technological Forecasting and Social Change, vol. 210, pp. 123883, 2025.

[33] Çınar. Z M and et al., "Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0," *Sustainability*, vol.*12*, no. 19, pp. 8211, 2020.

[34] Maier. A, Schriegel. S, and Niggemann. O, "Big data and machine learning for the smart factory—Solutions for condition monitoring, diagnosis and optimization," *Industrial Internet of Things: Cyber manufacturing Systems*, pp. 473-485, 2017.

[35] Cho. S and et al., "A hybrid machine learning approach for predictive maintenance in smart factories of the future," In *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018, Proceedings, Part II*, Springer International Publishing, 2018, pp. 311-317.

[36] Halimaa. A and Sundarakantham. K, "Machine learning based intrusion detection system," In *2019 3rd International conference on trends in electronics and informatics (ICOEI), Tirunelveli, India, April 23-25, 2019*, IEEE, 2019, pp. 916-920.

[37] Saraeian. S, Shirazi. B, and Motameni. H, "Optimal autonomous architecture for uncertain processes management," *Information Sciences*, vol. 501, pp. 84-99, 2019.

[38] Saraeian. S, and Shirazi. B, "Process mining-based anomaly detection of additive manufacturing process activities using a game theory modeling approach," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 146, pp. 106584, 2020.

[39] Theis. J, Galanter. W L, Boyd. A D, and Darabi. H, "Improving the in-hospital mortality prediction of diabetes ICU patients using a process mining/deep learning architecture," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 26, no.1, pp. 388-399, 2021.

[40] Ehsani. M and et al., "Machine learning for predicting concrete carbonation depth: A comparative analysis and a novel feature selection," *Construction and Building Materials*, vol. 417, pp. 135331, 2024.

[41] Xu. Q, "Application of an Intelligent English Text Classification Model with Improved KNN Algorithm in the Context of Big

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 54-68

Security Evaluation of Information Systems with Systems Dynamics Approach (Study Case: Agriculture Bank)

Amirhossein Abdolalipour[1*], Mohsen Shafiee[2]

[1] Assistant Prof, Department of Industrial Managemen, Khoy Branch, Islamic Azad University, Khoy. Iran

[2] MSc. in Information Technology Management, Faculty of Management, Electronic Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 20 October 2024, Revised: 10 June 2025, Accepted: 25 August 2025
Paper type: Research

Abstract

The main goal of the current research is to identify and analyze the interactions between various factors affecting information security and risks in the information systems of the Agriculture Bank using the systems dynamics approach. The simulation results show that the scenarios of increasing the security budget and improving the awareness of employees will bring the greatest risk reduction in the 36-month time horizon for the bank's information system. In the time horizon of 3 years, the risk level of the bank's information system will reach below 0.01. While with the implementation of the security budget increase scenario, this amount will be less than 0.001. In the mentioned time horizon, by increasing the budget from 1000 units to 1500 units in the 10th month, the information security level of the Agriculture Bank will increase to about 95%. To achieve this goal, the optimal allocation of resources should include new technologies and continuous training of employees. Also, it is essential to develop and update security protocols and regularly assess the weaknesses of financial institutions. Finally, it is suggested to establish a continuous monitoring and evaluation system of the bank's information systems security and to use the advice of information security experts to optimize security strategies and approaches.

Keywords: Security of Information Systems, Agriculture Bank, System Dynamics, Simulation

[*] Corresponding Author's email: amirhpour@iau.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۵۴ الی ۶۸

ارزیابی امنیت سیستم‌های اطلاعاتی با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها (مورد مطالعه: بانک کشاورزی)

امیرحسین عبدالعلی پور [۱*]، محسن شفیعی [۲]

[۱] استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم انسانی، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران.

[۲] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مدیریت فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، واحد الکترونیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی و تحلیل تعاملات میان عوامل مختلف مؤثر بر امنیت اطلاعات و ریسک‌های سیستم‌های اطلاعاتی بانک کشاورزی با استفاده از رهیافت پویایی‌شناسی سیستم‌ها است. شبیه‌سازی‌های پژوهش نشان می‌دهد که سناریوهای سناریوی افزایش بودجه امنیتی و ارتقاء آگاهی کارکنان به ترتیب بیشترین کاهش ریسک را در افق زمانی ۳۶ ماهه برای سیستم اطلاعاتی بانک به همراه خواهند داشت. در افق زمانی ۳ ساله، سطح ریسک سیستم اطلاعاتی بانک به پایین‌تر از ۰/۰۱ خواهد رسید. درحالی‌که با اجرای سناریوی افزایش بودجه امنیتی، این میزان کمتر از ۰/۰۰۱ خواهد بود. در افق زمانی مذکور، با افزایش بودجه از ۱۰۰۰ واحد به ۱۵۰۰ واحد در ماه دهم، سطح ایمنی اطلاعاتی بانک کشاورزی تا حدود ۹۵ درصد افزایش می‌یابد. برای تحقق این هدف، تخصیص بهینه منابع باید شامل فناوری‌های نوین و آموزش مستمر کارکنان باشد. همچنین، توسعه و به‌روزرسانی پروتکل‌های امنیتی و ارزیابی منظم نقاط ضعف مؤسسات مالی ضروری است. درنهایت، پیشنهاد می‌شود که نظام پایش و ارزیابی مستمر وضعیت امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانک برقرار شود و از مشاوره کارشناسان امنیت اطلاعات بهره‌برداری گردد تا استراتژی‌ها و رویکردهای امنیتی بهینه‌سازی شوند.

کلیدواژگان: امنیت سیستم‌های اطلاعاتی، بانک کشاورزی، پویایی‌شناسی سیستم، شبیه‌سازی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: amirhpour@iau.ir

۱- مقدمه

ارزیابی امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانکی به‌عنوان یکی از پیش‌نیازهای اساسی در حفظ اعتبار و اعتماد عمومی به نظام مالی کشورها، حائز اهمیت بسزایی است. با توجه به رشد روزافزون تهدیدات سایبری و پیچیدگی محیط فناوری اطلاعات، ارزیابی و ارتقاء امنیت اطلاعات در بانک‌ها به یک ضرورت استراتژیک برای پایداری و تاب‌آوری مؤسسات مالی تبدیل شده است. این ارزیابی نه‌تنها شامل شناسایی آسیب‌پذیری‌های موجود در زیرساخت‌های فناوری اطلاعات می‌شود، بلکه نیازمند تعیین و مدیریت ریسک‌های مرتبط با تهدیدات سایبری، نشت اطلاعات و سوءاستفاده‌های مالی است. جوانب مختلف این ارزیابی، ازجمله سیاست‌گذاری‌های امنیتی، پیاده‌سازی استانداردهای بین‌المللی و برگزاری آزمون‌های نفوذ، نشان‌دهنده پیچیدگی و ضرورت رویکردهای جامع در این زمینه است. به‌علاوه، با توجه به اینکه سیستم‌های اطلاعاتی بانکی به‌عنوان مراکز حساسی برای ذخیره و پردازش اطلاعات مالی مورداستفاده قرار می‌گیرند، اطمینان از یکپارچگی، محرمانگی و در دسترس بودن اطلاعات بدون شک به استمرار و پایداری فعالیت‌های اقتصادی و مالی مؤسسات و همچنین امنیت ملی کمک شایانی خواهد کرد. در این میان، بانک کشاورزی به‌عنوان یک نهاد مالی مهم و تأثیرگذار در اقتصاد کشور، نیازمند توجه ویژه به این مقوله است.

نخستین پیامد نقص امنیت سیستم‌های اطلاعاتی، از دست رفتن داده‌های هزینه‌های ناشی از عدم وجود امنیت مناسب شامل جریمه‌های قانونی، هزینه‌های مربوط به بازسازی سیستم‌ها و نیز هزینه‌های مربوط به جبران خسارت به مشتریان و کارکنان است [۱]. بسیاری از سازمان‌ها فاقد سیاست‌های مناسب برای مدیریت حوادث امنیتی هستند که این موضوع باعث افزایش خطرات می‌شود[۲]. این مسأله نشان‌دهنده اهمیت سرمایه‌گذاری در امنیت سایبری و ارتقاء استانداردهای حفاظتی در سازمان‌ها است، چراکه هرگونه ضعف در این زمینه می‌تواند به زیان‌های جبران‌ناپذیری منجر شود.

سیستم‌های امنیت اطلاعات به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود، به‌عنوان سیستم‌های پیچیده و پویا شناخته می‌شوند. این پیچیدگی و پویایی نه‌تنها ناشی از تنوع تهدیدات سایبری است، بلکه به تغییرات سریع در فناوری و نیازهای سازمان‌ها نیز مربوط می‌شود. ارزیابی و ارتقاء سطح امنیت سیستم‌های اطلاعاتی در بانک کشاورزی نه‌تنها به‌عنوان یک عامل بازدارنده در مقابل تهدیدات سایبری عمل می‌کند، بلکه موجب افزایش اعتماد عمومی به خدمات بانکی و همچنین بهبود عملکرد کلی این مؤسسه مالی می‌گردد. هدف اصلی پژوهش حاضر، ارائه تصویری جامع از وضعیت امنیت اطلاعات در سازمان موردمطالعه و شناسایی روندهای بحرانی و نقاط حساس است که می‌تواند مبنای اتخاذ تصمیمات مدیریتی و بهبود اقدامات امنیتی در آینده باشد در این راستا، رویکرد پویایی سیستم‌ها به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای تحلیل دینامیک‌های موجود در این سیستم‌ها و شناسایی نقاط ضعف و قوت آن‌ها، موردتوجه قرار می‌گیرد. این رویکرد امکان مدل‌سازی رفتار سیستم و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف را فراهم می‌آورد که می‌تواند به تصمیم‌سازان در این بانک در اتخاذ تصمیمات راهبردی و بهبود تدابیر امنیتی یاری رساند.

پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، به‌صورت جامع و نظام‌مند به تحلیل و شبیه‌سازی ابعاد مختلف امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانک کشاورزی می‌پردازد و با مدل‌سازی علی و شناسایی چرخه‌های بازخوردی، امکان تبیین روابط پیچیده میان متغیرهای کلیدی مؤثر بر امنیت اطلاعات را فراهم می‌آورد. با توجه به جایگاه راهبردی بانک کشاورزی در نظام مالی کشور و افزایش تهدیدات سایبری، ارزیابی و ارتقاء مستمر امنیت اطلاعات، نه‌تنها برای حفظ محرمانگی، یکپارچگی و دسترس‌پذیری داده‌های مالی ضروری است، بلکه نقشی بنیادین در پایداری عملیات بانکی، اعتماد عمومی و کاهش ریسک‌های عملیاتی ایفا می‌کند. یافته‌های این پژوهش، ضمن شناسایی نقاط ضعف و روندهای بحرانی، مبنایی علمی برای تصمیم‌سازی مدیران در زمینه تخصیص بهینه منابع، توسعه فناوری‌های نوین، طراحی سیاست‌های آموزشی هدفمند و به‌روزرسانی پروتکل‌های امنیتی فراهم می‌سازد و از این طریق، تاب‌آوری و امنیت بانک را در برابر تهدیدات نوظهور به‌طور معناداری افزایش می‌دهد.

۲- مروری بر مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱- مبانی نظری

امنیت اطلاعات به‌عنوان یکی از ارکان اساسی در حفاظت از داده‌ها، شامل سه اصل محوری یعنی محرمانگی، یکپارچگی و قابلیت دسترسی است [۳]. امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانکی، به‌عنوان یکی از ارکان اساسی در حفظ اعتماد مشتریان و تضمین سلامت اقتصادی یک کشور، تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل متنوع و پیچیده قرار دارد. این عوامل شامل خطاهای انسانی، تهدیدات سایبری، نقص‌های فناوری و همچنین سیاست‌ها و رویه‌های امنیتی داخلی بانک‌ها است.

۲-۱-۱- عوامل انسانی مؤثر بر امنیت سیستم‌های اطلاعاتی

خطاهای انسانی، به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تهدیدکننده، می‌تواند به بروز نقص‌های جدی در سیستم‌های امنیتی منجر شود، چراکه نادیده گرفتن پروتکل‌های امنیتی یا ارتکاب اشتباهات در برنامه‌نویسی و استفاده نادرست از سیستم می‌تواند دروازه‌ای برای نفوذ هکرها به سیستم‌های اطلاعاتی باشد [۴]. آسیب عمدی کاربران معمولاً ناشی از نیت‌های مخرب است، درحالی‌که آسیب غیرعمدی ناشی از بی‌توجهی یا عدم آگاهی کارکنان است. هر دو نوع آسیب می‌توانند عواقب جدی برای امنیت سیستم‌های اطلاعاتی داشته باشند[۵]. انگیزه‌های حمله به سیستم‌های اطلاعاتی می‌تواند از نارضایتی شغلی، انتقام‌جویی، یا حتی سود مالی ناشی شود [۶]. علاوه بر این، تهدیدات سایبری به‌طور روزافزونی در حال افزایش است و گروه‌های مجرمانه از تکنیک‌های پیشرفته‌تر برای نفوذ به این سیستم‌ها استفاده می‌کنند که این امر نیازمند به‌روزرسانی مداوم پروتکل‌های امنیتی و استفاده از فناوری‌های جدید مانند هوش مصنوعی و بلاک‌چین است [۷].

توانایی پیشگیری از حملات به‌شدت به آموزش و آگاهی کارکنان و مشتریان بستگی دارد. عدم آموزش مناسب می‌تواند منجر به نادیده گرفتن پروتکل‌های امنیتی و درنتیجه افزایش خطرات شود [۷].

استفاده از نرم‌افزارها و خدمات غیرضروری می‌تواند سطح آسیب‌پذیری را افزایش دهد. این نرم‌افزارها ممکن است شامل برنامه‌های قدیمی یا غیر موردنیاز باشند که به‌راحتی می‌توانند مورد سوءاستفاده قرار گیرند [۸].

دسترسی حداقلی به اطلاعات و سیستم‌ها یکی از روش‌های مؤثر در کاهش خطرات امنیتی است. با محدود کردن دسترسی کاربران به اطلاعات حساس، می‌توان احتمال وقوع حملات داخلی را کاهش داد. این رویکرد به‌ویژه در سازمان‌های بزرگ بسیار حیاتی است [۹].

۲-۱-۲- اثر عملکرد شبکه بر امنیت سیستم‌های اطلاعاتی

امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانکی به‌شدت تحت تأثیر شبکه و آسیب‌پذیری‌های موجود در آن است. این آسیب‌پذیری‌ها می‌توانند شامل نقاط ضعف در پایگاه داده، بدافزارها، به‌روزرسانی نرم‌افزارها و پروتکل‌های ارتباطی مانند پروتکل کنترل انتقال **(TCP)** باشند. بدافزارها می‌توانند به سیستم‌های بانکی نفوذ کرده و داده‌ها را سرقت کنند یا آسیب‌هایی به زیرساخت‌ها وارد کنند. یک مطالعه نشان می‌دهد که حملات بدافزاری به‌ویژه در کانال‌های بانکی می‌تواند خسارات مالی قابل‌توجهی به بار آورد [۱۰].

ریسک امنیت شبکه به ضعف‌های موجود در زیرساخت‌های فناوری اطلاعات مربوط می‌شود. امکان‌پذیری حمله به سیستم‌های اطلاعاتی بستگی به وجود نقاط ضعف در زیرساخت‌ها دارد. این نقاط ضعف می‌توانند ناشی از طراحی ضعیف، عدم به‌روزرسانی نرم‌افزارها یا عدم رعایت استانداردهای امنیتی باشند [۱۱]. سیستم‌هایی که از پروتکل‌های امنیتی قدیمی استفاده می‌کنند یا به‌روزرسانی نمی‌شوند، بیشتر در معرض خطر قرار دارند [۱۲]. نرم‌افزارهای قدیمی یا ناپایدار ممکن است نقاط ضعف زیادی داشته باشند که هکرها از آن‌ها بهره‌برداری کنند. استفاده از استانداردهای معتبر مانند **PTES** و **OWASP** در ارزیابی آسیب‌پذیری‌ها می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف کمک کند [۱۳]. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی می‌تواند به کاهش ریسک‌ها کمک کند [۱۴].

۲-۱-۳- ریسک‌های فنی در سیستم‌های بانکی

نقص‌های فناوری، شامل آسیب‌پذیری‌های نرم‌افزاری و زیرساخت‌های سخت‌افزاری، نیز به‌عنوان عوامل بحرانی در این زمینه مطرح هستند که ممکن است به‌روزرسانی‌های ناکافی یا عدم توجه به معایب امنیتی سیستم‌ها منجر شود [۱۵]. عدم انجام به‌روزرسانی‌های لازم می‌تواند منجر به بروز آسیب‌پذیری‌هایی شود که هکرها می‌توانند از آن‌ها سوءاستفاده کنند[۱۲].

استفاده از پروتکل‌های ناامن برای انتقال داده‌ها می‌تواند منجر به سرقت اطلاعات حساس شود؛ بنابراین، انتخاب و پیاده‌سازی پروتکل‌های امن مانند **TLS** ضروری است [۱۶].

حملات **MITM** می‌توانند با استفاده از تکنیک‌هایی مانند **ARP spoofing**، ارتباطات امن را تضعیف کنند و اطلاعات حساس را در معرض خطر قرار دهند [۱۷].

۲-۱-۴- اثر نوع داده‌ها بر امنیت سیستم‌های اطلاعاتی

حذف یا تغییر داده‌ها می‌تواند به‌طور مستقیم بر یکپارچگی و صحت اطلاعات تأثیر بگذارد [۱۸]. هرچه حجم داده‌ها بیشتر باشد، جذابیت برای هکرها نیز افزایش می‌یابد [۱۹]. در سیستم‌های بانکی، هرگونه تغییر غیرمجاز در داده‌ها می‌تواند منجر به خسارات مالی و از دست رفتن اعتماد مشتریان شود. همچنین، در صورت حذف ناخواسته داده‌ها، بازیابی اطلاعات ممکن است زمان‌بر و پرهزینه باشد [۱۸].

ریسک‌های مرتبط با داده‌ها شامل خطرات ناشی از نشت اطلاعات، دسترسی غیرمجاز و عدم تطابق با مقررات هستند. این ریسک‌ها می‌توانند منجر به خسارات مالی و قانونی برای مؤسسات مالی

شوند. ارزیابی دقیق ریسک و پیاده‌سازی استراتژی‌های مؤثر برای مدیریت آن ضروری است [۲۰].

محیط انتقال داده‌ها نقش حیاتی در امنیت اطلاعات دارد. وجود تهدیدات سایبری مانند حملات منع سرویس **(DDoS)** و نفوذ به شبکه می‌تواند به امنیت اطلاعات آسیب بزند. پروتکل **TCP** به‌خودی‌خود امنیت داده‌ها را تضمین نمی‌کند. استفاده از پروتکل‌هایی مانند **SSL** برای رمزگذاری داده‌ها در ارتباطات بانکی بسیار مهم است، اما این پروتکل‌ها نیز ممکن است تحت حملات خاصی قرار [۱۶]. استفاده از تکنیک‌های رمزنگاری مانند **Visual Cryptography** می‌تواند به تأمین امنیت اطلاعات در حین انتقال کمک کند [۲۱].

۲-۱-۵- اثر عوامل فیزیکی بر امنیت سیستم‌های اطلاعاتی

به‌طور خاص، زیرساخت‌های فیزیکی ازجمله امنیت مراکز داده، طراحی فیزیکی ساختمان‌ها و شرایط محیطی محیط کار مانند دما و رطوبت می‌توانند به‌طور مستقیم بر عملکرد و امنیت این سیستم‌ها تأثیر بگذارند [۲۲]. همچنین، نوسانات انرژی می‌توانند تأثیرات قابل‌توجهی بر عملکرد سیستم‌های اطلاعات بانکی داشته باشند. تغییرات ناگهانی در تأمین انرژی ممکن است منجر به خاموشی‌های ناخواسته یا کاهش کیفیت خدمات شود [۲۳]. این موضوع به‌ویژه در بانک‌ها که به پایداری و دسترسی مداوم به داده‌ها وابسته‌اند، اهمیت دارد. آسیب‌های سخت‌افزاری می‌توانند ناشی از عوامل طبیعی مانند زلزله یا طوفان یا عوامل محیطی مانند آتش‌سوزی نیز باشد [۲۴]. همچنین، نقص در تجهیزات می‌تواند به دلیل فرسودگی یا عدم نگهداری مناسب رخ دهد. این آسیب‌ها ممکن است منجر به از دست رفتن داده‌ها یا اختلال در خدمات بانکی شوند [۲۵].

از طرف دیگر، ریسک‌های فیزیکی مانند تهدیدات ناشی از سرقت، خرابکاری و حملات فیزیکی به زیرساخت‌ها، می‌توانند منجر به آسیب جدی به سیستم‌های اطلاعات بانکی شوند و نیازمند تدابیر امنیتی قوی برای حفاظت از دارایی‌ها هستند [۲۶].

اندازه سیستم اطلاعاتی نیز عاملی کلیدی است .سیستم‌های بزرگ‌تر معمولاً پیچیدگی بیشتری دارند و این پیچیدگی می‌تواند منجر به ضعف‌های امنیتی بیشتری شود. همچنین، مدیریت و نظارت بر سیستم‌های بزرگ‌تر دشوارتر است و این موضوع می‌تواند ریسک حملات را افزایش دهد [۲۷].

قابلیت کشف تهدیدات سایبری یکی از مهم‌ترین عوامل در پیشگیری از حملات است. استفاده از ابزارهای پیشرفته برای شناسایی تهدیدات و تجزیه‌وتحلیل رفتار شبکه می‌تواند به شناسایی زودهنگام حملات کمک کند. تحقیقات نشان داده‌اند که سازمان‌هایی که قابلیت کشف بالایی دارند، کمتر در معرض حملات موفق قرار دارند [۲۸]. علاوه بر این، سابقه حملات سایبری در یک نهاد مالی خاص نیز می‌تواند بر احتمال وقوع حملات آینده تأثیر بگذارد [۲۹]. رویدادهای ناخوشایند مانند حملات سایبری موفق می‌توانند تأثیر منفی بر سطح امنیت ادراک‌شده مشتریان بانک داشته باشند. [۳۰].

با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، بانک‌ها قادر به شناسایی و پاسخ سریع‌تر به تهدیدات هستند که این امر می‌تواند خسارات مالی و اعتباری را به حداقل برساند[۳۱]. وجود رویه‌های بازرسی منظم و دقیق می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف کمک کند. با انجام بازرسی‌های دوره‌ای، سازمان‌ها می‌توانند نقاط ضعف خود را شناسایی و برطرف کنند [۳۲]. این رویه‌ها باید شامل ارزیابی مستمر خطرات و آسیب‌پذیری‌ها باشند.

۲-۱-۶- اثر توسعه سیاست‌های پیشگیرانه و استانداردهای امنیتی بر امنیت سیستم‌های اطلاعاتی

تدوین سیاست‌های پیشگیرانه و استانداردهای امنیتی مشخص می‌تواند به کاهش احتمال وقوع حملات کمک کند [۳۳]. تخصیص بودجه آگاهی بخشی و تخصیص منابع مالی برای توسعه سیاست‌های امنیتی و زیرساخت‌ها، نقش مهمی در تقویت امنیت سیستم‌های اطلاعاتی ایفا می‌کند [۳۴ و ۳۵].

بااین‌حال، تحقیق [۳] با رویکردی انتقادی تأکید می‌کند که صرف افزایش بودجه یا پیروی از استانداردهای مرسوم، بدون توجه به زمینه سازمانی و رفتار کاربران، نمی‌تواند تضمین‌کننده امنیت پایدار باشد. همچنین، تعهد مدیریت ارشد در پیاده‌سازی سیاست‌های امنیتی و تخصیص منابع مالی مناسب برای این امر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است[۳۶]. جدول ۱ خلاصه‌ای از دسته‌بندی شاخص‌های امنیتی سیستم‌های اطلاعاتی بانک کشاورزی را ارائه می‌دهد.

با توجه به اهداف و چارچوب نظری پژوهش حاضر، سؤالات اصلی زیر مطرح می‌شود:

۱. چه عواملی بیشترین تأثیر را بر سطح امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانک کشاورزی دارند؟
۲. افزایش بودجه امنیتی و ارتقاء آگاهی کارکنان چه تأثیری بر کاهش ریسک اطلاعاتی بانک کشاورزی دارد؟
۳. کدام‌یک از سناریوهای پیشنهادی (افزایش بودجه، آموزش کارکنان، به‌روزرسانی فناوری) بیشترین اثربخشی را در بهبود امنیت اطلاعاتی بانک کشاورزی دارد؟

جدول ۱. دسته‌بندی شاخص‌های امنیتی سیستم‌های اطلاعاتی بانک

دسته	شاخص‌های کلیدی	توضیح
عوامل انسانی	آگاهی و آموزش کارکنان، مدیریت دسترسی، سیاست‌ها و رویه‌های امنیتی	تأثیر رفتار و دانش کارکنان بر امنیت
شبکه و زیرساخت	امنیت شبکه (فایروال، **IDS/IPS**)، امنیت پایگاه داده، امنیت فیزیکی	حفاظت از زیرساخت‌های **IT**بانک.
داده‌ها	حفاظت از یکپارچگی داده‌ها، حفاظت از محرمانگی داده‌ها، قابلیت دسترسی به داده‌ها	مدیریت و حفاظت از اطلاعات حساس بانک
ریسک‌های فنی	آسیب‌پذیری‌های نرم‌افزاری، پروتکل‌های امنیتی، مدیریت حوادث امنیتی	مقابله با تهدیدات فنی و آسیب‌پذیری‌ها.
سیاست‌ها و استانداردها	تطابق با استانداردها و مقررات، تعهد مدیریت، بودجه امنیتی	اهمیت سیاست‌ها، استانداردها و حمایت مدیریت از امنیت

۲-۲- پیشینه پژوهش

در پژوهش [۳۷] شاخص‌های تأثیرگذار بر امنیت سیستم‌های اطلاعاتی. بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی در مدت ۱۲ ماه نشان می‌دهد که در بین ریسک‌های شناسایی‌شده بیشترین اهمیت مربوط به ریسک فنی است؛ ریسک داده، انسان و فیزیکی در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند؛ کم‌اهمیت‌ترین ریسک مربوط به محیط است. درنهایت، چهار سناریو استفاده از نرم‌افزارهای امنیتی، تعیین سطوح دسترسی کاربران، استفاده از برق اضطراری، استفاده از نظارت تصویری و آموزش کارکنان جهت بهبود رفتار سیستم معرفی شده است.

نتیجه مطالعه [۲۹] نشان داد که بانک‌هایی که سابقه حملات بیشتری دارند، معمولاً با نرخ بالاتری از حملات جدید مواجه می‌شوند. این امر می‌تواند ناشی از عدم توانایی در اصلاح نقاط ضعف امنیتی یا عدم اجرای پروتکل‌های امنیتی مؤثر باشد.

نتیجه مطالعه [۲۸] در مورد ریسک‌های سایبری در خدمات مالی نشان داد که بسیاری از بانک‌ها به دلیل ضعف در دفاع امنیتی و عدم آگاهی کافی از تهدیدات، هدف حملات سایبری قرار می‌گیرند.

در یک مطالعه موردی در یک بانک بزرگ، مشخص شد که مشکلات اساسی در حاکمیت و فرهنگ امنیت وجود دارد که می‌تواند منجر به افزایش ریسک حملات سایبری شود [۳۸].

مطالعه [۳۹] به بررسی امنیت دستگاه‌های خودپرداز **(ATM)** در نیجریه پرداخته است و نشان می‌دهد که اجرای فعلی امنیت در این سیستم‌ها به‌اندازه کافی مؤثر نیست. این تحقیق با توزیع ۴۰۰ پرسشنامه بین کارآفرینان، کارمندان دولتی و دانشجویان انجام شد. نتایج نشان داد که هیچ تفاوت معناداری در ادراک این گروه‌ها نسبت به تأثیر مثبت دستگاه‌های خودپرداز بر خدمات بانکی وجود ندارد. همچنین، چالش‌های امنیتی مربوط به خدمات خودپرداز برای این گروه‌ها یکسان بود.

مطالعه [۴۰] به ارزیابی اثربخشی امنیت شبکه و فایروال در سیستم‌های بانکی نیجریه پرداخته است. نتایج مطالعه مذکور نشان می‌دهد که بانک‌های نیجریه‌ای به‌ندرت با حملات مخرب مواجه می‌شوند و استراتژی‌های امنیت شبکه‌ای که اتخاذ کرده‌اند، مؤثر بوده است. همچنین، یک برنامه کاربردی برای تقویت امنیت سیستم‌های بانکی توسعه‌یافته است.

مطالعه [۴۱] به بررسی پیاده‌سازی استاندارد **ISO 27001** در صنعت بانکداری می‌پردازد. این استاندارد به‌عنوان یک چارچوب جامع برای حفاظت از داده‌های حساس شناخته می‌شود. نتایج پژوهش مذکور نشان می‌دهد که پیاده‌سازی **ISO 27001** به بهبود مدیریت ریسک، قابلیت پاسخگویی به حوادث و افزایش تاب‌آوری کنترل‌های امنیت اطلاعات کمک کرده است. همچنین، این مطالعه به بررسی چالش‌ها و ملاحظات خاص صنعت بانکداری پرداخته و تأثیرات مثبت آن بر فرهنگ آگاهی امنیتی میان کارکنان بانک‌ها را موردبررسی قرار داده است.

مطالعه [۴۲] به بررسی تأثیر جنگ اوکراین بر امنیت اطلاعات صنعت بانکداری در کشورهای مجارستان و اسلواکی می‌پردازد. با استفاده از روش‌های کیفی، محققان داده‌های موجود و مصاحبه‌هایی با کارشناسان امنیت اطلاعات انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که بانک‌ها در اتحادیه اروپا با سطح بالایی از ریسک‌های سایبری مواجه هستند.

مطالعه [۴۳] در مورد تهدیدات امنیتی سیستم‌های حسابداری کامپیوتری در بانک‌های اردن انجام‌شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بسیاری از تهدیدات امنیتی ناشی از اشتباهات غیرعمدی کارکنان مانند ورود داده‌های نادرست یا اشتراک‌گذاری رمزهای عبور است.

تحقیق [۴۴] به ارزیابی نرم‌افزارها و سیستم‌های امنیتی در بانک‌های چین پرداخته است. این مطالعه به شناسایی آسیب‌پذیری‌های موجود در نرم‌افزارهای بانکی و نحوه مدیریت آن‌ها پرداخته است. محققان به این نتیجه رسیدند که به‌کارگیری رویکردهایی نظیر ارزیابی مستمر ریسک و آزمایش‌های نفوذ می‌تواند به شناسایی و کاهش تهدیدات امنیتی کمک کند.

به‌علاوه، در تحقیق [۴۵] که در مورد ارزیابی ریسک‌های امنیتی در بانک‌ها در اسپانیا انجام شد، به بررسی تأثیر مهاجرت به سیستم‌های ابری بر امنیت اطلاعات پرداخته‌شده است. نتایج این

تحقیق نشان داد که درحالی‌که خدمات ابری می‌توانند بهره‌وری را افزایش دهند، اما به نیاز به ارزیابی دقیق‌تری از ریسک‌های موجود در نگهداری داده‌ها می‌افزایند. آن‌ها پیشنهاد کردند که بانک‌ها باید تدابیر امنیتی مضاعف را در رویکردهای خود لحاظ کنند.

نهایتاً، مطالعه [۴۶] در مورد رابطهٔ آگاهی از امنیت اطلاعات با قصد نقض امنیت اطلاعات با نقش میانجی هنجارهای فردی و خودکنترلی عنوان مکرر: قصد نقض امنیت اطلاعات، با مطالعه از ۱۸۴ نفر از کارمندان بانک کشاورزی اصفهان نشان داد آگاهی از امنیت اطلاعات با کاهش ۵۳ درصدی قصد نقض امنیت مرتبط است. این پژوهش تأکید می‌کند که آموزش کارکنان توسط متخصصان امنیت، از طریق تقویت هنجارهای فردی (۰/۶۷) و خودکنترلی (۰/۷۱) نقشی کلیدی در کاهش رفتارهای مخرب سایبری دارد.

مطالعه [۴۷] با رویکردی انتقادی خاطرنشان می‌کند که بسیاری از رویکردهای امنیتی فعلی، به دلیل اتکای بیش‌ازحد بر کنترل‌های فنی و بی‌توجهی به تهدیدات نوظهور و ابعاد رفتاری کاربران، پاسخگوی کامل نیازهای امنیتی بانک‌های چین نیستند. این پژوهش توصیه می‌کند که مدل‌های ارزیابی امنیت باید به‌صورت مستمر به‌روزرسانی شوند و تحلیل ریسک جامع‌تری را شامل شوند. همچنین، تقویت آموزش و فرهنگ‌سازی امنیتی در میان کارکنان و مشتریان به‌عنوان یک ضرورت کلیدی مطرح‌شده است. افزون بر این، مطالعه مذکور بر اهمیت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین همچون هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای شناسایی تهدیدات پیشرفته و تحلیل رفتار کاربران تأکید دارد تا بتوان از رویکردهای سنتی فراتر رفت و به سطح بالاتری از امنیت اطلاعاتی در بانکداری آنلاین دست یافت.

۳- روش پژوهش

پژوهش حاضر از لحاظ رویکردی از نوع استقرایی، به لحاظ هدف از نوع کاربردی و ازلحاظ گردآوری داده‌ها، توصیفی- تحلیلی است. در پژوهش حاضر بنا بر فلسفه عمل‌گرایی، به‌منظور ارزیابی امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانک کشاورزی از مدل‌های تأییدشده، بهره گرفته‌شده است. همچنین در راستای طراحی مدل و اعتبارسنجی آن از نظر خبرگان استفاده‌شده است.

ابتدا، مقالات علمی، گزارش‌های صنعتی و استانداردهای امنیتی مرتبط با امنیت سیستم‌های اطلاعاتی در صنعت بانکداری (مانند استانداردهای**ISO 27001** ، **NIST** و غیره) بررسی شدند تا یک لیست اولیه از متغیرهای بالقوه مطابق جدول ۲ شناسایی شود. متغیرها بر اساس معیارهای زیر انتخاب شدند:

۱. ارتباط مستقیم با امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانک کشاورزی :متغیرها باید به‌طور مستقیم بر سطح امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانک تأثیرگذار باشند.
۲. قابلیت اندازه‌گیری و کمی‌سازی :متغیرها باید قابل‌اندازه‌گیری و کمی‌سازی باشند تا بتوان آن‌ها را در مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده کرد.
۳. تأثیرگذاری بر سایر متغیرها در سیستم :متغیرها باید بر سایر متغیرهای سیستم تأثیرگذار باشند و روابط علی و معلولی قابل‌توجهی داشته باشند.

سپس، مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته با ۵ نفر از کارشناسان امنیت اطلاعات بانک کشاورزی انجام شد. این کارشناسان دارای حداقل ۵ سال تجربه در زمینه امنیت اطلاعات بانکی بودند و در بخش‌های مختلفی مانند مدیریت ریسک امنیت اطلاعات، امنیت شبکه و امنیت پایگاه داده فعالیت می‌کردند. هدف از این مصاحبه‌ها، اعتبارسنجی لیست اولیه متغیرها، شناسایی متغیرهای خاص بانک کشاورزی و جمع‌آوری اطلاعات کیفی در مورد روابط بین متغیرها بود.

درنهایت، اسناد و مدارک داخلی بانک کشاورزی، مانند گزارش‌های ارزیابی ریسک، سیاست‌های امنیتی، رویه‌های عملیاتی، گزارش‌های ممیزی امنیتی و گزارش‌های حوادث امنیتی، مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند تا داده‌های لازم برای کمی‌سازی متغیرها جمع‌آوری شود. این اسناد به شناسایی دقیق‌تر نقاط ضعف و قوت امنیتی بانک و همچنین تعیین مقادیر اولیه متغیرها کمک کردند.

به‌منظور ارزیابی اثرات عوامل مختلف بر امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانک کشاورزی، از مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای شبیه‌سازی رفتار سیستم در طول زمان استفاده شد.

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار **Vensim PLE** انجام یافتند. این نرم‌افزار به دلیل قابلیت‌های قدرتمند در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و پویا، انتخاب شد. مدل با استفاده از داده‌های تاریخی بانک کشاورزی و نظرات کارشناسان امنیت اطلاعات کالیبره شد.

شبیه‌سازی‌ها برای یک بازه زمانی ۳۶ ماهه انجام شدند تا اثرات بلندمدت سناریوها بر امنیت سیستم‌های اطلاعاتی ارزیابی شود. این بازه زمانی با توجه به چرخه عمر سیستم‌های اطلاعاتی و اهداف استراتژیک بانک انتخاب شده است. نهایتاً، به‌منظور سنجش اعتبار مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم، از روش‌های اعتبار ساختاری و رفتاری استفاده‌شده است.

جدول ۲. متغیرهای اولیه اثرگذار بر سطح امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانک

متغیر	تعریف عملیاتی	واحد	نقش در مدل
سطح امنیت اطلاعات	میزان حفاظت از اطلاعات بر اساس شاخص‌های رخدادهای امنیتی، رعایت سیاست‌ها و آزمون‌های نفوذ	درصد	نشان‌دهنده وضعیت کلی امنیت و تحت تأثیر سرمایه‌گذاری و تهدیدات است
سرمایه‌گذاری در امنیت	میزان منابع مالی و انسانی اختصاص‌یافته به امنیت	واحد پول (ریال)	جریان ورودی به سطح امنیت اطلاعات و عامل افزایش آن.
تعداد کارکنان آموزش‌دیده	تعداد کارکنان دارای آموزش رسمی امنیت اطلاعات	نفر	نشان‌دهنده آگاهی کارکنان و عامل کاهش خطاهای انسانی
تعداد رخدادهای امنیتی	تعداد حملات سایبری موفق و نشت اطلاعات در دوره زمانی مشخص	تعداد	جریان خروجی از سطح امنیت اطلاعات و عامل کاهش آن
آگاهی کارکنان از تهدیدات امنیتی	میانگین نمره کارکنان در آزمون دانش امنیت اطلاعات	درصد	مؤثر بر میزان رعایت سیاست‌های امنیتی و کاهش خطاهای انسانی
آسیب‌پذیری‌های فنی	تعداد نقاط ضعف شناسایی‌شده در سیستم‌ها بر اساس استاندارد **CVSS**	تعداد	نشان‌دهنده نقاط ضعف سیستم‌ها و عامل افزایش احتمال رخدادهای امنیتی.
به‌روزرسانی نرم‌افزارها و سیستم‌عامل‌ها	درصد سیستم‌های دارای آخرین نسخه نرم‌افزار و سیستم‌عامل.	درصد	جریان ورودی به آسیب‌پذیری‌های فنی و عامل کاهش آن
رعایت سیاست‌های امنیتی	درصد کارکنان پایبند به سیاست‌ها و رویه‌های امنیتی.	درصد	مؤثر بر کاهش رخدادهای امنیتی و خطاهای انسانی
تعداد حملات سایبری	تعداد تلاش‌های نفوذ به سیستم‌ها شناسایی‌شده توسط **IDS و SIEM**	تعداد	جریان خروجی از سطح امنیت اطلاعات و عامل کاهش آن.
حجم داده‌های حساس	میزان داده‌های محرمانه ذخیره‌شده در سیستم‌ها.	گیگابایت	نشان‌دهنده خسارت احتمالی ناشی از نشت اطلاعات و عامل افزایش جذابیت برای مهاجمان
سرعت شناسایی تهدیدات	میانگین زمان شناسایی تهدید در سیستم‌ها با استفاده از **IDS و SIEM**	ساعت	مؤثر بر کاهش خسارات ناشی از رخدادهای امنیتی
اثربخشی پاسخ به رخدادها	درصد رخدادهای امنیتی مهار و رفع شده توسط **CSIRT**	درصد	مؤثر بر کاهش خسارات ناشی از رخدادهای امنیتی
بودجه امنیتی	میزان بودجه اختصاص‌یافته به امنیت سیستم‌ها.	واحد پول (ریال)	مؤثر بر افزایش سرمایه‌گذاری در امنیت و تعداد کارکنان آموزش‌دیده

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱- نمودار علت و معلولی آسیب‌پذیری از سوی خطاهای انسانی

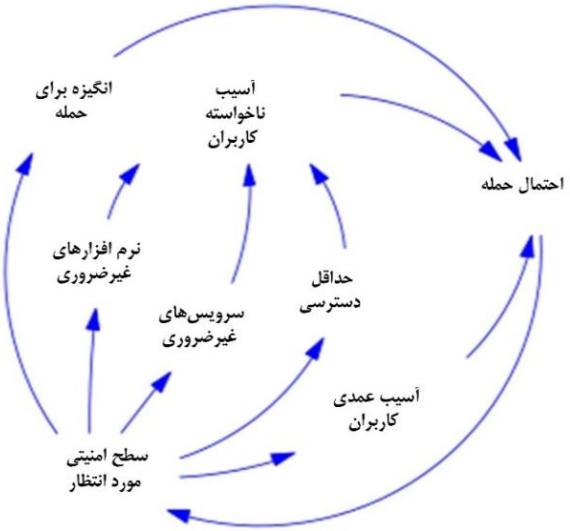
قابلیت پیشگیری یکی از متغیرهای اساسی سیستم است که افزایش آن، انگیزه حملات هکرها به سیستم بانک را کاهش می‌دهد. با کاهش انگیزه هکرها، احتمال حمله از سوی آن‌ها کاهش پیدا می‌کند که افزایش قابلیت پیشگیری را به دنبال خواهد داشت. از سوی دیگر، افزایش قابلیت پیشگیری موجب می‌شود که کاربران به دنبال استفاده از نرم‌افزارها و خدمات غیرضروری نباشند و دسترسی آن‌ها به سطح کاربری تعریف‌شده برایشان محدود گردد. این مسائل موجب کاهش خسارات و صدمات ناخواسته‌ای است که استفاده بدون محدودیت از اینترنت می‌تواند به دنبال داشته باشد. سازوکارهای ذکرشده در شکل ۱ قابل‌بررسی می‌باشند.

۴-۲- نمودار علت و معلولی سطح امنیت

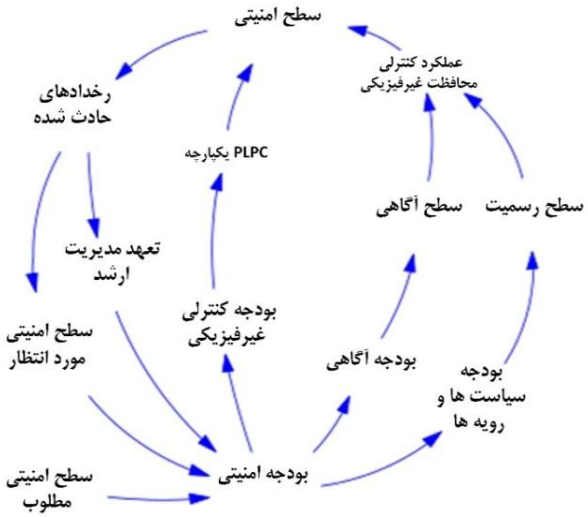
شکل ۲، حلقه‌های علی و معلولی مرتبط با سطح امنیت را نشان می‌دهد. سطح امنیت سیستم اطلاعاتی یکی از مهم‌ترین متغیرهای موجود در سیستم است که سطح پایین آن موجب افزایش حوادث امنیتی می‌شود. این مسئله موجب تقویت تعهد مدیریت ارشد به مسائل حفاظتی و تخصیص بودجه بیشتر به این بخش می‌گردد. شکاف امنیتی که حاصل تفاضل وضع مطلوب و وضع موجود امنیت سیستم اطلاعاتی است هم در بودجه‌بندی ایمنی از سوی مدیریت ارشد تأثیرگذار است. با افزایش بودجه امنیتی، بودجه مربوط به این حوزه به‌خصوص بودجه خط‌مشی‌ها و رویه‌های ایمنی، بودجه آگاه‌سازی کارکنان از خطرات و ریسک‌های سیستم‌های اطلاعاتی و بودجه کنترل حفاظت منطقی صرف بهبود عملکرد سیستم و افزایش سطح امنیتی آن خواهد شد.

۴-۳- نمودار علت و معلولی قابلیت کشف اختلال

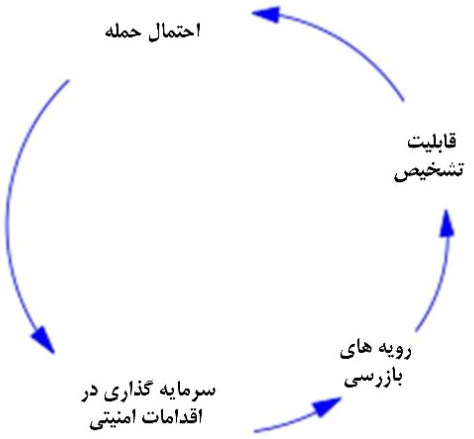
افزایش سرمایه‌گذاری بر روی شاخص‌های امنیتی موجب بهبود رویه‌های کشف اختلال در سیستم اطلاعاتی می‌شود. با بهبود این رویه‌ها، قابلیت‌های سازمان در کشف اختلال افزایش می‌یابد. انتظار می‌رود که این افزایش منجر به کاهش احتمال حمله از سوی هکرها گردد. این روابط از طریق سازوکار ذکرشده در شکل ۳ نمایش داده‌شده است.



شکل ۱. حلقه‌های علی و معلولی آسیب‌های نیروی انسانی



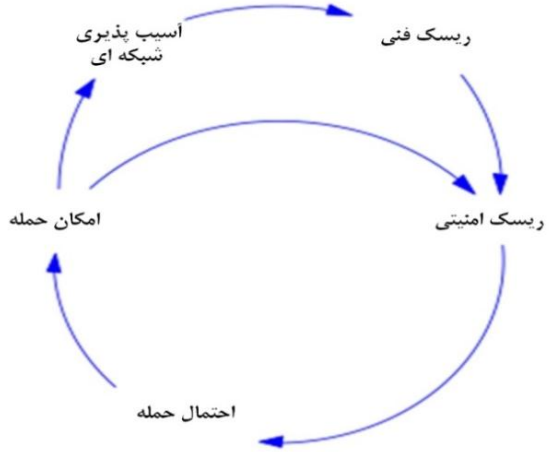
شکل ۲. حلقه‌های علت و معلولی سطح امنیت



شکل ۳. حلقه‌های علت و معلولی قابلیت کشف اختلال

۴-۴- نمودار علت و معلولی حمله سایبری

افزایش امکان حمله سایبری از سوی هکرها، امکان حمله را افزایش می‌دهد و این مساله، آسیب‌پذیری بیشتر شبکه را به دنبال دارد که خود منجر به افزایش ریسک فنی می‌گردد. با افزایش ریسک فنی، ریسک امنیتی سیستم افزایش پیدا می‌کند که افزایش احتمال حمله سایبری را به دنبال دارد. بعلاوه، افزایش امکان حمله سایبری از سوی هکرها، امکان حمله را افزایش می‌دهد که ریسک امنیتی سیستم را بالا برده و مجدداً موجب افزایش امکان حمله سایبری از سوی هکرها می‌شود. فرضیه پویای ارائه شده در قالب شکل ۴ نمایش داده‌شده است.



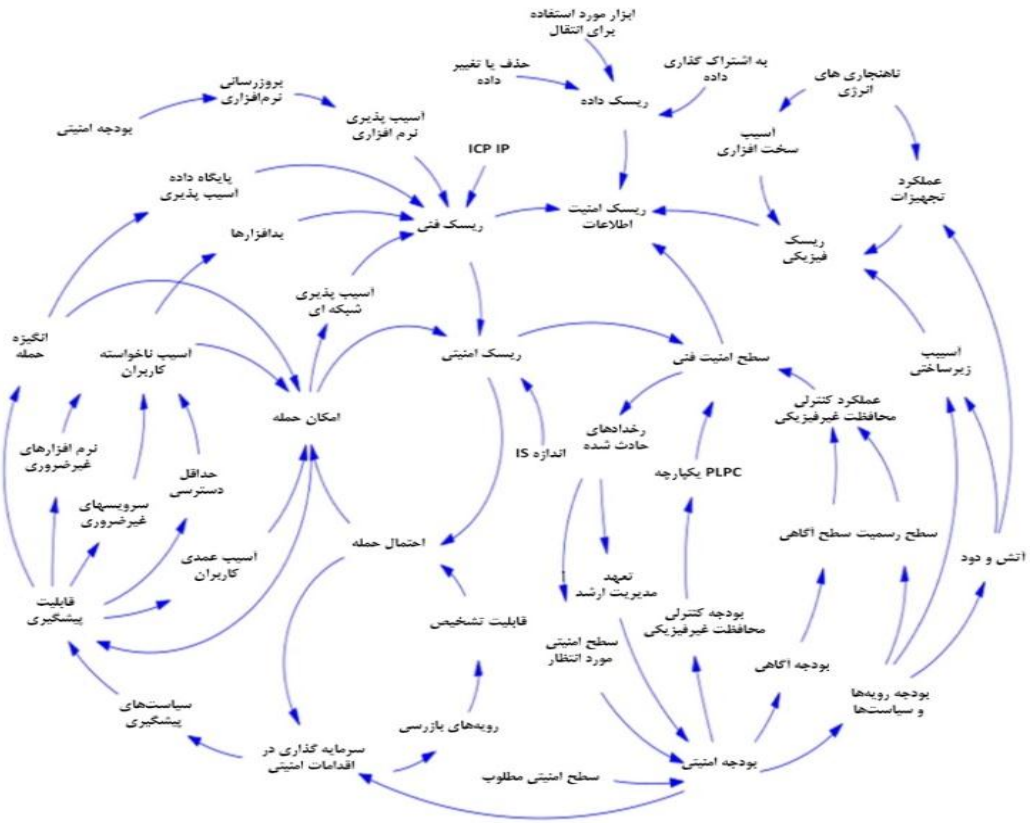
شکل ۴. نمودار علت و معلولی کارایی حمله سایبری

۴-۵- نمودار علت و معلولی امنیت سیستم اطلاعاتی

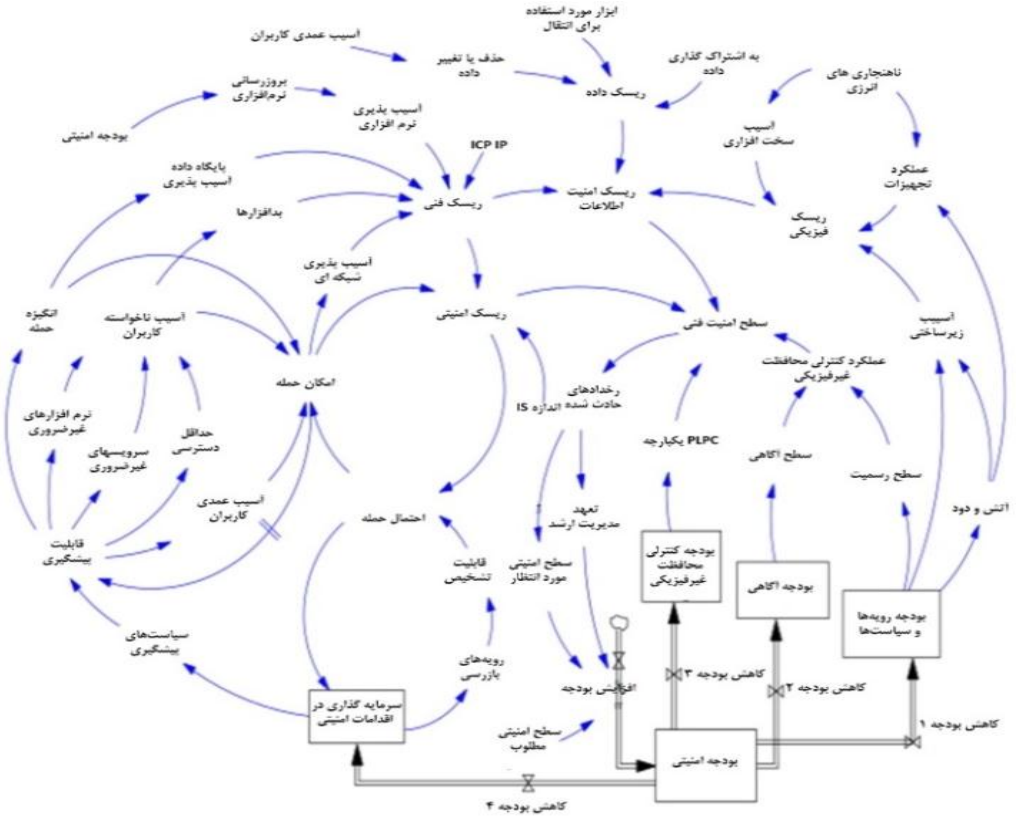
با توجه به نمودارهای علت و معلولی نمایش داده‌شده در بخش‌های قبل، نمودار علت و معلولی پژوهش تشکیل می‌شود که در شکل ۵ نشان داده‌شده است.

۴-۶- نمودار جریان و موجودی

به‌منظور ترسیم نمودار جریان- موجودی ضرورت دارد تا متغیرهای بکار رفته در شکل ۵ در قالب متغیرهای نرخ، موجودی، کمکی و مقادیر ثابت، تقسیم‌بندی شوند. پس از بررسی متغیرهای مدل علت و معلولی و مشورت با خبرگان موضوع، متغیرهای مدل به‌صورت ذکرشده در جدول ۳ دسته‌بندی گردیدند. بر این اساس، مدل نهایی پژوهش دارای ۴ متغیر موجودی، ۵ متغیر نرخ و ۳۹ متغیر کمکی (شامل متغیرهای واسطه و توابع جدولی) و ۴ ثابت است که در شکل ۶ نمایش داده‌شده است.



شکل ۵. نمودار علت و معلولی پژوهش



شکل ۶. مدل موجودی- جریان امنیت اطلاعات

جدول ۳. متغیرهای مدل تحقیق

تغیر	ماهیت	متغیر	ماهیت
انگیزه حمله	کمکی	احتمال حمله	کمکی
توانایی پیشگیری	کمکی	ریسک امنیت شبکه	کمکی
نرم‌افزارهای غیرضروری	کمکی	اندازه سیستم اطلاعاتی	ثابت
خدمات غیرضروری	کمکی	قابلیت کشف	کمکی
حداقل دسترسی	کمکی	رویه بازرسی	کمکی
آسیب عمدی کاربران	کمکی	سرمایه‌گذاری بر روی معیارهای امنیت	کمکی
آسیب غیرعمدی کاربران	کمکی	سیاست‌های پیشگیرانه	کمکی
امکان‌پذیری حمله	کمکی	سطح امنیت	کمکی
آسیب‌پذیری پایگاه داده	کمکی	عملکرد کنترل حفاظت منطقی	کمکی
بدافزارها	کمکی	سطح رسمیت	کمکی
به‌روزرسانی نرم‌افزار	کمکی	سطح آگاهی	کمکی
آسیب‌پذیری نرم‌افزار	کمکی	عملکرد کنترل حفاظت یکپارچه	کمکی
پروتکل کنترل انتقال	کمکی	رویدادهای ناخوشایند	کمکی
آسیب‌پذیری شبکه	کمکی	تعهد مدیریت ارشد	کمکی
ریسک فنی	کمکی	سطح امنیت ادراک‌شده	کمکی
حذف یا تغییر داده‌ها	کمکی	بودجه کنترل حفاظت منطقی	موجودی
محیط انتقال	**ثابت**	بودجه آگاهی	موجودی
به اشتراک‌گذاری داده‌ها	**ثابت**	بودجه سیاست‌ها و رویه‌ها	موجودی
ریسک داده‌ها	کمکی	سطح امنیت مطلوب	کمکی
نوسانات انرژی	کمکی	افزایش بودجه	جریان
آسیب سخت‌افزاری	کمکی	سطح امنیت مطلوب	ثابت
عملکرد تجهیزات	کمکی	بودجه امنیتی	موجودی
ریسک فیزیکی	کمکی	کاهش بودجه ۱	جریان
آسیب زیرساخت‌ها	کمکی	کاهش بودجه ۲	جریان
سیگار و آتش	کمکی	کاهش بودجه ۳	جریان
ریسک امنیت اطلاعات	کمکی	کاهش بودجه ۴	جریان

۴-۷- آزمون‌های اعتبار ساختاری مدل

در این آزمون‌ها اعتبار مدل از جهت تناظر ساختار، اجزا و عناصر آن با سیستم واقعی مورد آزمون قرار می‌گیرد. در این تحقیق با توجه به عدم امکان افشای داده‌های دقیق در مورد سیستم امنیت بانک، از دو روش اعتبارسنجی ساختار مدل با استفاده از نظرات خبرگان و آزمون ساختاری شرایط حدی استفاده‌شده است.

۴-۷-۱- آزمون کفایت مرزهای مدل

آزمون کفایت مرزها، تناسب مرزهای مدل را بر اساس هدف طراحی آن مورد آزمون قرار می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر حدود مدل باید با هدف طراحی آن هماهنگ باشد و همه عوامل و بخش‌های مؤثر بر رفتار متغیر موردبررسی را در برگیرد و تعریف متغیرهای درون‌زا و برون‌زا متناسب با اهداف مدل باشد. این جنبه از اعتبارسنجی مدل، کیفی است و از طریق مطالعه دیاگرام‌ها و نمودارهای جریان توسط صاحب‌نظران و خبرگان میسر می‌گردد. بدین منظور نمودار حالت-جریان برای مشارکت‌کنندگان پژوهش شرح داده شد و با تعدیلاتی مدل نهایی مورد تأیید قرار گرفت.

۴-۷-۲- آزمون سازگاری ابعاد

برای آزمون ساختاری مدل، صحت ابعاد لحاظ شده برای متغیرهای مختلف در نمودارهای جریان که از طریق روابط ریاضی به‌صورت زنجیروار به همدیگر وابسته‌اند، توسط نرم‌افزار **Vensim** مورد ارزیابی قرار گرفت و صحت روابط تعریف‌شده در مدل موجودی- جریان تائید گردید.

۴-۸- آزمون‌های اعتبار رفتاری مدل

۴-۸-۱- آزمون خطای انتگرال‌گیری

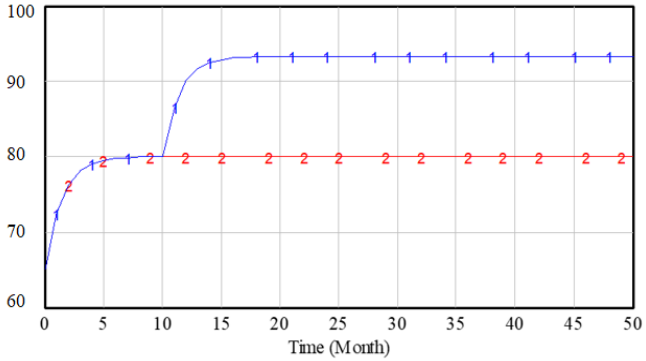
آزمون خطای انتگرال‌گیری منظور تأیید تناسب گام زمانی مدل برقرار می‌شود. بر این اساس علاوه بر شبیه‌سازی اولیه که با ۳ گام زمانی سالیانه صورت گرفت، شبیه‌سازی دیگری با گام‌های شش‌ماهه اجرا و نتایج برای چند متغیر اصلی مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج مدل، در هر دو مورد رفتار متغیرهای اصلی مشابه هستند و خطای انتگرال‌گیری قابل‌چشم‌پوشی است. جهت انجام اعتبارسنجی اول، از نظرات دو خبره که سابقه فعالیت به‌عنوان مدیر فناوری بانک کشاورزی را داشته‌اند، استفاده‌شده است که ساختار علی و معلولی مدل و توابع مورداستفاده در مدل و همچنین رفتار شبیه‌سازی مورد تأیید آن‌ها قرار گرفت.

۴-۸-۲- آزمون بازتولید رفتار

در این آزمون رفتار حاصل‌شده از شبیه‌سازی متغیرهای اصلی با رفتار مرجع آن‌ها مقایسه شده و در صورت اندک بودن درصد خطا می‌توان ادعا کرد که مدل از اعتبار رفتاری برخوردار است. بدین منظور نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخی متغیرها را با مقادیر پیش‌بینی‌شده به روش سری زمانی استخراج‌شده از داده‌ها، مقایسه نمودیم. شاخص **RMSPE** یکی از روش‌های آماری تأیید رفتار مدل است که اختلاف داده‌های واقعی **(At)** و داده‌های شبیه‌سازی‌شده **(St)** را نشان می‌دهد. برای تأیید رفتار سیستم این شاخص باید کمتر از ۰/۱ باشد. با توجه به محاسبات انجام‌شده مقدار شاخص **RMSPE** در این شبیه‌سازی ۰/۰۴ به دست آمد که مقداری کمتر از ۰/۱ دارد و اعتبار رفتاری مدل را تأیید می‌کند.

۴-۹- آزمون تحلیل حساسیت مدل

برای ارزیابی تحلیل حساسیت در نرم‌افزار ونسیم در نمودارهای جریان، چند شبیه‌سازی با تغییرات ناگهانی و شدید در برخی پارامترهای مدل صورت پذیرفت تا صحت واکنش مدل نسبت به این تغییرات مورد بررسی قرار گیرد. به‌عنوان نمونه اگر در حالت مدل پایه، بودجه ایمنی افزایش پیدا کند، سرمایه‌گذاری در بخش‌های سیاست‌ها و رویه‌های امنیت، آگاه‌سازی کارکنان از اصول امنیتی و تبعات عدم رعایت آن‌ها، مسائل حفاظتی و افزایش می‌یابد که این مساله تأثیر فراوانی بر روی سطح امنیت دارد. چنانچه در ماه دهم، بودجه ایمنی از ۱۰۰۰ واحد به ۱۵۰۰ واحد افزایش یابد، سطح ایمنی به حدوداً ۹۵ درصد افزایش خواهد یافت. الگوی این تغییر در شکل ۷ نشان داده‌شده است. الگوی پایه با رنگ قرمز نشان داده‌شده است.



شکل ۷. تحلیل حساسیت متغیر سطح امنیت

۴-۱۰- ارزیابی امنیت سیستم‌های اطلاعاتی

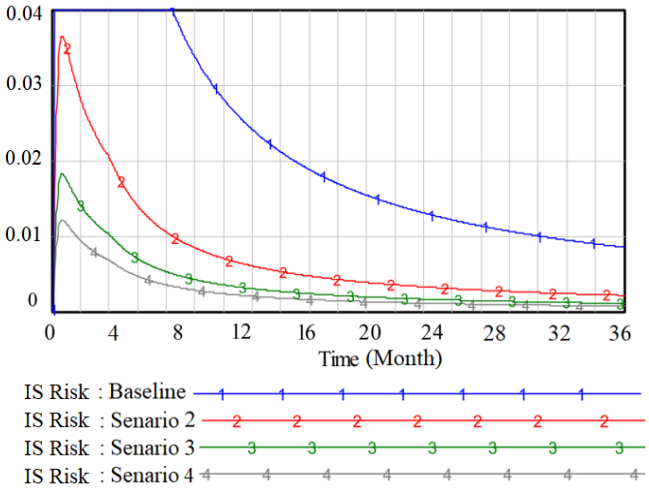
با پشت سر گذاشتن موفقیت‌آمیز آزمون‌های سازگاری ابعاد و ساختار مدل در نرم‌افزار **Vensim** می‌توان شبیه‌سازی اولیه مدل را انجام داد. در این بخش، نمودار تغییرات متغیر ریسک سیستم اطلاعاتی به‌عنوان مهم‌ترین متغیر سیستم در شرایط تغییر متغیرهای مختلف مدل، ارائه می‌شوند.

۱. سناریوی پایه: شبیه‌سازی وضعیت جاری سیستم بدون دست‌کاری در متغیرهای مدل.

۲. سناریوی افزایش بودجه سیاست‌ها و رویه‌ها: در این سناریو، بودجه تخصیص‌یافته به توسعه و به‌روزرسانی سیاست‌ها و رویه‌های امنیتی بانک به میزان ۵ درصد افزایش می‌یابد. هدف اصلی از این سناریو، بررسی تأثیر افزایش بودجه در بهبود امنیت سیستم‌های اطلاعاتی از طریق تقویت سیاست‌ها و پروتکل‌های امنیتی است. با افزایش بودجه، بانک قادر خواهد بود سیاست‌ها و رویه‌های امنیتی موجود را بازنگری کرده و پروتکل‌های جدیدی را برای مقابله با تهدیدات نوظهور تدوین کند. این شامل به‌روزرسانی قوانین مربوط به دسترسی کاربران، مدیریت داده‌ها و نحوه برخورد با رخدادهای امنیتی است.

۳. سناریوی ارتقاء آگاهی کارکنان: در این سناریو، با افزایش بودجه آگاه‌سازی به میزان ۱۰ درصد، تمرکز بر افزایش آموزش‌ها و برنامه‌های آگاهی‌بخشی امنیتی برای کارکنان و کاربران سیستم اطلاعاتی بانک است. هدف بررسی تأثیر افزایش آگاهی و دانش امنیتی بر کاهش ریسک‌های انسانی، خطاهای کاربری و نقض امنیتی است.

۴. سناریوی افزایش بودجه امنیتی: در این سناریو، بودجه تخصیص‌یافته به امنیت اطلاعات به میزان ۵ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند بر عواملی نظیر به‌روزرسانی نرم‌افزارها، آموزش کارکنان و اجرای پروتکل‌های امنیتی تأثیر بگذارد. هدف این سناریو بررسی تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم افزایش بودجه بر ریسک سیستم اطلاعاتی بانک است. شکل ۸ نتایج اجرای هر یک از این سناریوها را نشان می‌دهد.



شکل ۸. بررسی اثر پیاده‌سازی سناریوها بر ریسک سیستم اطلاعاتی

بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۸، سناریوهای چهارم، سوم و دوم به ترتیب بیشترین کاهش ریسک را در افق زمانی ۳۶ ماهه برای سیستم اطلاعاتی بانک به همراه خواهند داشت و اولویت‌بندی اثربخشی سناریوهای مطرح‌شده را مشخص می‌کنند.

در سناریوی پایه، سطح ریسک امنیت اطلاعات در طول زمان کاهش می‌یابد و به حدود ۸۰ درصد در پایان دوره ۳۶ ماهه می‌رسد.

با اجرای سناریوی ۴ (افزایش بودجه توسعه رویه‌های امنیتی بانک

به میزان ۵ درصد)، انتظار می‌رود سطح ریسک سیستم اطلاعاتی بانک در افق زمانی ۳۶ ماهه به پایین‌تر از ۰/۰۰۱ کاهش یابد. درحالی‌که با اجرای سناریوی ۳ (ارتقای بودجه آموزش و آگاه‌سازی کارکنان و کاربران سیستم به میزان ۱۰ درصد)، انتظار می‌رود سطح ریسک سیستم اطلاعاتی در افق ۳۶ ماهه به پایین‌تر از ۰/۰۱ کاهش یابد. در این سناریو، سطح امنیت اطلاعات افزایش می‌یابد، اما این افزایش کمتر از سناریوی افزایش بودجه امنیتی است. این نشان می‌دهد که ارتقاء آگاهی کارکنان یک عامل مهم در بهبود امنیت است، اما به‌تنهایی کافی نیست و باید با سایر اقدامات امنیتی همراه باشد. این یافته با نتایج مطالعات اخیر هم‌راستا است که تأکید دارند که افزایش هدفمند بودجه امنیتی و ارتقای مستمر آگاهی کارکنان، بیشترین نقش را در کاهش ریسک امنیت اطلاعاتی و افزایش تاب‌آوری بانک‌ها در برابر تهدیدات سایبری و عملیاتی ایفا می‌کند [۱۶ و ۲۴].

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف ارزیابی و تحلیل اثربخشی سناریوهای مختلف بهبود امنیت سیستم‌های اطلاعاتی بانک کشاورزی با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها انجام گردید. نتایج نشان داد که تخصیص بهینه منابع با اولویت‌دهی به توسعه رویه‌های امنیتی و زیرساخت‌های فنی (سناریو ۴)، بیشترین تأثیر را در کاهش ریسک در بازه زمانی ۳۶ ماهه دارد و سطح ریسک را به کمتر از ۰/۰۰۱ می‌رساند. درعین‌حال، ارتقاء آگاهی و آموزش کارکنان (سناریو ۳) نیز نقش مهمی در بهبود امنیت ایفا می‌کند اما تأثیر آن به‌تنهایی کمتر از سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های امنیتی است و سطح ریسک را به کمتر از ۰/۰۱ می‌رساند. در سناریوی پایه (وضعیت فعلی)، سطح ریسک در پایان دوره ۳۶ ماهه به حدود ۸۰٪ کاهش می‌یابد. این یافته‌ها بر اهمیت تلفیق سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین و نیروی انسانی آگاه در راستای دستیابی به امنیت پایدار تأکید دارد.

بر اساس نتایج پژوهش، پیشنهاد می‌شود بانک کشاورزی به‌جای افزایش کلی بودجه امنیتی، بخش عمده‌ای از منابع خود را به تقویت زیرساخت‌های حیاتی مانند مراکز داده و سرورهای اصلی، استقرار تجهیزات برق اضطراری و توسعه سامانه‌های پشتیبان اختصاص دهد تا تاب‌آوری بانک در برابر نوسانات انرژی و بلایای طبیعی به شکل هدفمند ارتقا یابد. همچنین، لازم است دوره‌های آموزشی امنیت اطلاعات به‌طور تخصصی برای کارکنان فناوری اطلاعات، مدیران شعب و کارکنان بخش‌های حساس برگزار شود و در این آموزش‌ها سناریوهای واقعی تهدیدات نظیر فیشینگ و مهندسی اجتماعی شبیه‌سازی گردد تا سطح آمادگی عملیاتی افزایش یابد. به‌کارگیری سامانه‌های هوشمند مدیریت رویداد و اطلاعات امنیتی **(SIEM)** و ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی برای پایش لحظه‌ای ترافیک شبکه و شناسایی رفتارهای غیرعادی، امکان کشف سریع تهدیدات و واکنش مؤثر به رخدادهای امنیتی را فراهم می‌کند. همچنین، تدوین و اجرای برنامه منظم برای به‌روزرسانی سیستم‌عامل‌ها، نرم‌افزارهای کاربردی و پروتکل‌های ارتباطی (مانند جایگزینی پروتکل‌های ناامن با **TLS**) و انجام تست نفوذ حداقل هر شش ماه یک‌بار، ضروری است. در حوزه امنیت فیزیکی، استفاده از سامانه‌های کنترل دسترسی بیومتریک، دوربین‌های مداربسته با قابلیت تحلیل تصویر و سامانه‌های هشداردهنده هوشمند جهت حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی بانک توصیه می‌شود. علاوه بر این، برگزاری مانورهای دوره‌ای برای شبیه‌سازی رخدادهای امنیتی مانند قطع برق، حمله سایبری یا نفوذ فیزیکی، به ارزیابی آمادگی تیم‌های عملیاتی و بهبود فرآیندهای واکنش اضطراری کمک می‌کند. درنهایت، ایجاد کانال ارتباطی مستقیم با مراکز هشداردهی تهدیدات سایبری و دریافت هشدارهای به‌روز، بانک را در مقابله سریع و مؤثر با تهدیدات نوظهور یاری خواهد کرد.

یکی از محدودیت‌های اساسی شبیه‌سازی در این پژوهش، وجود عدم قطعیت نسبت به مقادیر دقیق پارامترهای مدل بوده است. به‌منظور کاهش این عدم قطعیت و افزایش اعتبار مدل، داده‌های تاریخی بانک و نظرات کارشناسان برای کالیبراسیون پارامترها مورداستفاده قرارگرفته است. بااین‌حال، تحلیل حساسیت صرفاً بر متغیرهای اصلی مدل متمرکزشده و سایر عوامل تأثیرگذار، ازجمله اثربخشی تجهیزات پشتیبان، نرخ به‌روزرسانی نرم‌افزارها و سیاست‌های دسترسی کاربران، در این تحلیل لحاظ نشده‌اند. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با گسترش دامنه تحلیل حساسیت، متغیرهای بیشتری را به‌صورت منفرد و ترکیبی موردبررسی قرار دهند و از روش‌های پیشرفته‌تری مانند تحلیل حساسیت جهانی یا سناریوهای چندمتغیره بهره ببرند. همچنین، مدل‌سازی و ارزیابی اثر شوک‌های محیطی نظیر قطع برق یا حملات فیزیکی می‌تواند به ارائه تصویری جامع‌تر از رفتار سیستم در شرایط بحرانی منجر شود و اعتبار نتایج را افزایش دهد.

مراجع

[1] Moore, A., & Warkentin, M. “Cybersecurity: Principles and Practices”. Pearson.2019.

[2] Osmanbegović, E., Piric, N., & Suljic, M. “Information Security Controls As Determinant Of Continuity Of Information System Work”. Vol. XV, Issue 2, 35-42, 2017.

[3] Böhme, R., & Moore, T. (2023). The Economics of Cybersecurity: Principles and Policy Options. Annual Review of Economics, 15, 567-592.

[4] Bock, S. “Human Error and Cybersecurity in the Banking Sector”. Journal of Banking Technology, 15(2), 123-135.2021.

[5] Alshaikh, M., Maynard, S. B., Ahmad, A., & Chang, S. (2023). A Human-Centric Risk-Based Investment Model for Information Security: Empirical Evidence from the Financial Sector. Computers & Security, 128, 103234.

[6] Lubua, E.W., Semlambo, A.A., & Mkude, C.G. “Factors Affecting the Security of Information Systems in Africa: A Literature Review”. University of Dar es Salaam Library Journal, 17(2), 94-114.2022.

[7] Alizadeh, A., Chehrehpak, M., Nasr, A.K., & Zamanifard, S. “An empirical study on effective factors on adoption of cloud computing in electronic banking: a case study of Iran banking sector”. Int. J. Bus. Inf. Syst., 33, 408-428.2020.

[8] Khan, H. U., Malik, M. Z., Nazir, S. , and Khan,F., "Utilizing Bio Metric System for Enhancing Cyber Security in Banking Sector: A Systematic Analysis," in IEEE Access, vol. 11, pp. 80181-80198.2023.

[9] Rapina, R., Carolina, Y., Setiawan, S., Gania, A., Sandra, L.M., Darmasetiawan, J.B., & Fuentes, R.O. “Empirical Study on Banking in Indonesia: Factors Affecting Information Systems Quality”. Proceedings of the 2020 12th International Conference on Information Management and Engineering. 2020.

[10] Alsalamah, A. “Security Risk Management in Online System”. 5th Intl Conf on Applied Computing and Information Technology/4th Intl Conf on Computational Science/Intelligence and Applied Informatics/2nd Intl Conf on Big Data, Cloud Computing, Data Science (ACIT-CSII-BCD), 119-124.2017.

[11] Lestari, D., Tama, A., Karlina, S., Sultan, A., & Tarwoto, T. “Factors Affecting Security Information Systems: Information Security, Threats and Cyber Attack, Physical Security, and Information Technology”. International Journal of Informatics and Information Systems, 7(1), 16-21.2024.

[12] Noubissi, A.C., Iguchi-Cartigny, J., & Lanet, J. “Hot updates for Java based smart cards”. IEEE 27th International Conference on Data Engineering Workshops, 168-173.2011.

[13] Putra Utama, F., & Hilmi Nurhadi, R.M. “Uncovering the Risk of Academic Information System Vulnerability through PTES and OWASP Method”, COMMIT (Communication and Information Technology) Journal. 18(1), 39-51.2024.

[14] Smith, J. (2023). The Role of Artificial Intelligence in Banking Risk Management. Journal of Banking and Finance, 134, 1-10.

[15] Rajendran, S. R., N. F., Dipu, Tarek, S., H. M., Kamali, Farahmandi F. and Tehranipoor, M., "Exploring the Abyss? Unveiling Systems-on-Chip Hardware Vulnerabilities Beneath Software," in *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 19, pp. 3914-3926, 2024.

[16] ENISA (European Union Agency for Cybersecurity). (2022). Threat Landscape for Information Integrity in Financial Services.

[17] Duddu, S., Rishita sai, A., Sowjanya, C.L., Rao, G.R., & Siddabattula, K. (2020). Secure Socket Layer Stripping Attack Using Address Resolution Protocol Spoofing. 2020 4th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 973-978.

[18] Gai, K., Qiu, M., & Qiu, L. (2022). Security and Privacy Issues: A Survey on FinTech in Banking Systems. Future Generation Computer Systems, *135*, 386-399.

[19] Brown, L., & Green, T. (2022). The Impact of Data Types on Cyber Threats in Financial Institutions. International Journal of Cyber Studies, 9(2), 123-139.

[20] Li, Z., Xu, W., Shi, H., Zhang, Y., & Yan, Y. “Security and Privacy Risk Assessment of Energy Big Data in Cloud Environment”. Computational intelligence and neuroscience, 2398460. 2021. https://doi.org/10.1155/2021/2398460 (Retraction published Comput Intell Neurosci. 2023 Oct 18; 2023:9896475. doi: 10.1155/2023/9896475).

[21] Blesswin, J., Mary, S.J., Suryawanshi, S., Kshirsagar, V.G., Pabalkar, S.Y., Venkatesan, M., & Karunya, C.E. “Secure transmission of grayscale images with triggered error visual sharing”. Journal of Autonomous Intelligence. 2023.

[۲۲] اکبرنژاد، ابوالقاسم و چشک، کریم، "اولویت‌بندی مؤلفه‌های اثرگذار بر سیاست دفاعی- امنیتی جمهوری اسلامی ایران". ۱۳۹۹

[۲۳] جلالی، محمد و افشاری، مریم و مزینانیان، زینب،"تأثیر ابعاد زیست‌محیطی تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی". ۱۳۹۹.

[24] Alsmadi, I., & Zarour, M. (2023). Cybersecurity in Banking: Risks, Challenges, and Solutions. Journal of Banking and Financial Technology, 7(1), 21-34.

[۲۵] خون جوش, ف.خ. و عاشوری, م. "بررسی تأثیر تنظیمات پارامترهای سخت‌افزاری بر انرژی مصرفی در الگوریتم ضرب برداری ماتریس‌های تنک بر روی پردازنده‌های گرافیکی" فصلنامه فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران، (۹)۳۱، ۷۸-۶۷. ۱۳۹۸.

[26] Lee, S. Y. (2022). Physical Security Threats to Banking Information Systems. Journal of Financial Risk Management, 11(3), 1-12.

[27] Hassan, R., Bandi, C., Tsai, M., Golchin, S., P D, S.M., Rafatirad, S., & Salehi, S. (2023). Automated Supervised Topic Modeling Framework for Hardware Weaknesses. 2023 24th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED), 1-8.

[28] Shehab, R., s.alismail, A., Amin Almaiah, D.M., Alkhdour, D.T., AlWadi, D.B., & Alrawad, D.M. “Assessment of Cybersecurity Risks and threats on Banking and Financial Services. Journal of Internet Services and Information Security” 14(3), 167-190.2024.

[29] White, R., & Black, S. “Historical Cyber Attacks and Their Future Implications for Banks. Cybersecurity Review”, 15(1), 88-102.2023.

[30] Shams, S., & Soltanifar, M. (2023). The Impact of Cyberattacks on Customer Trust in the Banking Sector: Evidence from Emerging Markets. Journal of Financial Crime, 30(2), 545-562.

[31] Lavanya, M., & Mangayarkarasi, D.S. “A Review on Detection of Cybersecurity Threats in Banking Sectors Using AI Based Risk Assessment”. Journal of Electrical Systems. Vol. 20 No. 6s, 1359-1365.2024.

[32] Dawodu, S.O., Omotosho, A., Akindote, O.J., Adegbite, A.O., & Ewuga, S.K. “CYBERSECURITY RISK ASSESSMENT IN BANKING: METHODOLOGIES AND BEST PRACTICES”. Computer Science & IT Research Journal, 4(3), 220-243. 2023.

[۳۳] عزیزی سرخانی, محمدجواد و کردلوئی, حمیدرضا. "بررسی ابزارهای امنیتی بانکداری الکترونیک در بخش بانکداری دولتی بانک‌های هند با مروری بر جهانی شدن". دانش سرمایه‌گذاری، (۱۸) ۵، ۲۶۲-۲۵۳، ۱۳۹۵.

[۳۴] فرزام نیا، نیما، عبدی, بهنام و رضائیان، علی. "ارائه الگوی حکمرانی خوب امنیت فضای سایبری در سازمان‌های دفاعی"، فصلنامه مدیریت نظامی، (۷۷)۲۰، ۸۱-۱۲۰. ۱۳۹۹.

[35] Dhanya, C., & Ramya, K. “Impact of System-Level Indicators of Chatbots on Perceived Usefulness and Intention to use for Banking

Services". The Review of Finance and Banking, 16(1), 43-55.2024.

[36] Fatoki, J.O. "The influence of cyber security on financial fraud in the Nigerian banking industry". International Journal of Science and Research Archive, 9(02), 503–515.2023.

[۳۷] شفیعی نیک‌آبادی، محسن، حکاکی، امیر و غلامشاهی، سارا. "مدلی پویا جهت ارزیابی امنیت سیستم‌های اطلاعاتی با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها" ، فصلنامه رشد فناوری، (۱۶)۶۴، ۶۱-۵۲. ۱۳۹۹.

[38] Damenu, T.K., & Beaumont, C. "Analysing information security in a bank using soft systems methodology". Inf. Comput. Secur., 25, 240-258.2017.

[39] Cheng, L., Liu, F., Yao, D., & Wang, X. (2022). ATM Security: Threats, Vulnerabilities, and Countermeasures in the Era of Digital Banking. Computers & Security, 119, 102765.

[40] Sarumi, J.A., Longe, O.B., & Adelodun, F.O. "An Empirical Evaluation of the Effectiveness of the Computer-Based Network Security and Firewall in Banking Systems". Advances in Multidisciplinary and scientific Research Journal Publication, 10(1), 21-33. 2022.

[41] Ewuga, S.K., Egieya, Z.E., Omotosho, A., & Adegbite, A.O. "ISO 27001 IN BANKING: AN EVALUATION OF ITS IMPLEMENTATION AND EFFECTIVENESS IN ENHANCING INFORMATION SECURITY". Finance & Accounting Research Journal, 5(12), 405-426.2024.

[42] Somogyi, T., & Nagy, R. "The Impact of the War in Ukraine on the Information Security of the European Union's Banking Industry – A Case Study of Hungary And Slovakia". CONTEMPORARY MILITARY CHALLENGES, 25, 23 - 32. 2023.

[43] Al-Hadhrami, A., Alghamdi, A., & Alfarraj, O. (2022). Perceived Security Threats and Their Impact on the Adoption of Accounting Information Systems in the Banking Sector. Journal of Information Security and Applications, 68, 103236.

[44] Zhou, Y., Li, X., & Wang, J. (2023). Security Assessment and Vulnerability Analysis of Online Banking Systems: Recent Advances and Challenges. Computers & Security, 126, 103140.

[45] Pérez, J., et al. "Risk Assessment of Cloud Migration in Banking Sector." Journal of Financial Services Technology.2020.

[۴۶] پیکری، حمیدرضا و بنازاده، بابک. "رابطهٔ آگاهی از امنیت اطلاعات با قصد نقض امنیت اطلاعات با نقش میانجی هنجارهای فردی و خودکنترلی عنوان مکرر: قصد نقض امنیت اطلاعات". پژوهش‌های راهبردی مسائل اجتماعی، (۴)۷، ۴۱-۵۸، ۱۳۹۷.

[47] Zhou, Y., Li, X., & Wang, J. (2023). Security Assessment and Vulnerability Analysis of Online Banking Systems: Recent Advances and Challenges. Computers & Security, 126, 103140.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 69-86

A Self-supervised Sensors' Anomaly Detection Scheme in Industrial Control Systems Based on Ensemble Deep Learning

Armin Salimi-Badr[1], Athena Abdi[2*], Afshin Souzani[3]

[1] Department of Computer Science and Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Department of Computer Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[3] ICT Security, ICT Research Institute, Tehran, Iran

Received: 17 August 2024, Revised: 14 May 2025, Accepted: 02 September 2025
Paper type: Research

Abstract

In this paper, a self-supervised one-class sensors' anomaly detection approach based on ensemble deep learning for industrial control systems (ICS). ICSs were traditionally thoroughly separated from the internet and enterprise networks. However, technological advancements have allowed them to connect to the internet to improve the performance of their remote control. Although this connection provides many advantages for ICS, it causes vulnerabilities against cyber-attacks. Anomaly detection is a prominent process to mitigate faults along with the cyber-attacks. In this context, several anomaly detection methods are proposed that are mainly based on local and short-term analyses of the data. The proposed method employs an ensemble deep learning scheme based on combining various temporal, spatial, local, and global characteristics of the individual detection agents during the prediction process, simultaneously. The detection agents have a homogenous workflow with heterogenous prediction structures to consider various characteristics of the input signal. The considered structures of the proposed detection method are based on Long-Short-Term Memory (LSTM), Convolutional Neural Network (CNN), and fully connected (Dense) encoder-decoder schemes. Each unit calculates a normal degree based on the prediction and reconstruction error for the input signal. The normal degree is calculated based on the statistics of the encoder-decoder error considering the correlations among spatial and temporal features. These structures execute in parallel and send their results to a weighted threshold gate voter to determine the final output. As a result, the combination of critical characteristics of the data is reflected in the final output, and its performance is enhanced in comparison to each detection agent. To evaluate the efficiency of the proposed method, several experiments on a simulated ICS are performed and the results demonstrate an average improvement of 14% in precision compared to related studies.

Keywords: Industrial Control System, Anomaly Detection, Deep Learning, Ensemble Learning, Correlation.

[*] Corresponding Author's email: a_abdi@kntu.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۶۹ الی ۸۶

ارائه یک روش خودنظارتی کشف ناهنجاری حسگرها در سامانه‌های کنترل صنعتی مبتنی بر یادگیری عمیق گروه‌محور

آرمین سلیمی‌بدر[۱]، آتنا عبدی[۲*]، افشین سوزنی[۳]

[۱] دانشکده مهندسی و علوم کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

[۲] دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[۳] پژوهشکده امنیت، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این مقاله رویکرد خودنظارتی کشف ناهنجاری داده‌های حسگر مبتنی بر یادگیری عمیق گروه‌محور و یک دسته‌ای در کاربردهای کنترل صنعتی ارائه شده است. سامانه‌های کنترل صنعتی به‌صورت سنتی از شبکه منفک بوده‌اند اما با پیشرفت فناوری و به منظور افزایش کارایی در کنترل از راه دور به اینترنت متصل شده‌اند. این اتصال در کنار مزایای زیاد منجر به افزایش آسیب‌پذیری در برابر حملات سایبری شده است. کشف ناهنجاری یکی از فرایندهای شناخته شده مواجهه با اشکالات و حملات سایبری می‌باشد. بدین منظور رویکردهای کشف ناهنجاری متعددی ارائه شده‌اند که عموما مبتنی بر تحلیل محلی و کوتاه‌مدت داده‌ها می‌باشند. روش پیشنهادی با بکارگیری رویکردی گروه‌محور متشکل از چندین عامل تشخیص مبتنی بر روش‌های یادگیری عمیق مختلف، ویژگی‌های زمانی، مکانی، محلی و سراسری داده در فرایند پیش‌بینی را به‌صورت همزمان درنظر می‌گیرد. عوامل تشخیص دارای روند کاری همگن و ساختار پیش‌بینی ناهمگن می‌باشند تا هر یک بر اساس ویژگی ساختار مورد استفاده شاخصه‌های متفاوتی از سیگنال ورودی را مورد بررسی قرار دهند. ساختارهای درنظر گرفته شده در روش پیشنهادی برپایه حافظه بلندکوتاه مدت، شبکه عصبی پیچشی و شبکه عصبی تمام‌متصل می‌باشد. هر واحد تشخیص درجه هنجاربودن برای سیگنال ورودی بر مبنای تحلیل آماری خطای پیش‌بینی ساختار کدگذار-کدگشای خود با در نظر گرفتن همبستگی زمانی-مکانی بین ویژگی‌ها محاسبه می‌کند. این ساختارها به‌صورت موازی اجرا شده و رای‌گیری وزن‌دار آستانه‌محور با هدف مشخص کردن نتیجه نهایی از اجماع روش‌ها بر خروجی‌های عوامل تشخیص اعمال می‌شود. به‌این ترتیب، ترکیبی از ویژگی‌های اساسی داده در نتیجه نهایی منعکس می‌شوند و کارایی آن نسبت به تحلیل هر یک از عوامل تشخیص بهبود می‌یابد. به‌منظور بررسی قابلیت‌های روش پیشنهادی، آزمایش‌های متعددی بر بستر سامانه کنترل صنعتی شبیه‌سازی شده انجام گرفته است و نتایج بهبود دقت ۱۴٪ به‌طور میانگین نسبت به رویکردهای پیشین را نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: سامانه‌های کنترل صنعتی، کشف ناهنجاری، یادگیری عمیق، یادگیری گروه‌محور، همبستگی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: a_abdi@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

سامانه‌های کنترل صنعتی (ICS) با هدف پایش و نظارت زیرساخت‌های حیاتی صنعتی مانند تولید انرژی، تصفیه آب، صنایع هوشمند، پالایشگاه‌ها و غیره بکارگرفته می‌شوند. این سامانه‌ها از سه بخش اساسی شبکه تجاری سازمان، شبکه کنترلی و شبکه میدان تشکیل شده‌اند. شبکه تجاری شامل سرورهای ارتباطی متصل به اینترنت، شبکه کنترلی متشکل از سامانه مرکزی پایش و کنترل و شبکه میدان متشکل از حسگرها، محرکه‌ها و کنترلرهای منطقی برنامه‌پذیر می‌باشند[۳-۱]. اتصال سامانه‌های کنترل صنعتی به بستر اینترنت با هدف افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه پایش و مدیریت مطرح شده است. این اتصال در کنار مزایای زیاد منجر به افزایش آسیب‌پذیری این سامانه‌ها بدلیل حملات سایبری می‌شود. این آسیب‌پذیری‌ها با پیشرفت فناوری افزایش یافته و منجر به ایجاد حملات متخاصمانه به این سامانه‌ها و کاهش امنیت آن‌ها در کاربردهای حیاتی می‌شود[۶-۴].

یکی از موثرترین رویکردهای مواجهه با چالش امنیتی سامانه‌های کنترل صنعتی، بکارگیری سامانه‌های تشخیص نفوذ (IDS) می‌باشد. سامانه تشخیص نفوذ به‌طور گسترده به بررسی فعالیت‌های شبکه بر اساس تحلیل لاگ‌ها و ترافیک شبکه می‌پردازد و در صورت تشخیص نفوذ بالفعل یا بالقوه، پیام هشدار ایجاد می‌کند. این ابزار معمولاً مبتنی بر تشخیص فعالیت مشکوک در قالب فعالیت‌های ناهنجار اقدام به تشخیص می‌کند. سامانه‌های تشخیص نفوذ در دو دسته مبتنی بر امضا و مبتنی بر رفتار دسته‌بندی می‌شوند[۳ و ۷]. سامانه‌های تشخیص نفوذ مبتنی بر امضا براساس پایگاه دانش مشخصی از حملات پیشین، حملات را به‌صورت ایستا شناسایی می‌کنند. درصورت بروز حمله جدید، این نوع از سامانه‌ها قابلیت تشخیص حمله را ندارد. از سوی دیگر رویکردهای مبتنی بر رفتار، سعی در استخراج مدل رفتار هنجار سیستم و شناسایی رفتارهای ناهنجار از طریق دسته‌بندی رخدادها را دارند. درنتیجه، توانایی استخراج مدل مناسب در سامانه‌های تشخیص نفوذ مبتنی بر ناهنجاری بسیار حائز اهمیت می‌باشد[۱۴-۸]. این واحد در واحد کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده (SCADA) سامانه‌های کنترل صنعتی تعبیه می‌شود که قابلیت پردازشی مناسبی را فراهم می‌آورد.

به‌منظور استخراج رفتار هنجار سیستم لازم است تحلیل مناسبی بر داده‌ها صورت گیرد. باتوجه به حجم زیاد داده‌ها و تنوع رفتاری موجود، رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین عملکرد توسعه‌یافته و مناسبی در این زمینه دارند. در این رویکردها آموزش به‌صورت خودکار از داده انجام می‌شود و الگوهای موجود شناسایی می‌شوند. از مهم‌ترین مزایای روش‌های مبتنی بر یادگیری می‌توان به هزینه کم عملیات، عدم وابستگی به درخواست‌های کاربردان، بهبود کارایی، کاهش زمان محاسبات، ایجاد دید بهتر از محیط و استخراج ویژگی‌های با اهمیت در عملیات اشاره کرد [۱۷-۱۵]. با پیشرفت فناوری و افزایش داده‌های، بکارگیری یادگیری عمیق و استخراج شبکه‌های عصبی مصنوعی مبتنی بر رفتار هنجار سیستم نتایج بهتری در سامانه‌های تشخیص نفوذ رفتار-محور نشان داده‌اند[۴ و ۱۹-۱۸].

در رویکردهای مبتنی بر یادگیری، آموزش به‌صورت خودکار از داده انجام می‌شود و الگوهای موجود شناسایی شده و بر آن اساس تصمیماتی گرفته می‌شوند. باتوجه به عدم وجود داده‌های برچسب‌دار زیاد در محیط‌های صنعتی، روش‌های کشف حملات عموما براساس یادگیری بدون نظارت و استخراج رفتار صحیح سامانه براساس مدل می‌باشد. شناسایی مدل رفتار هنجار سامانه، حملات و رفتارهای ناهنجار را مشخص می‌کند. طبق پژوهش‌های انجام شده با زیاد شدن حجم داده‌ها و نیاز به تحلیل برخط، یادگیری عمیق در این حیطه از عملکرد بسیار خوبی برخوردارند [۲۲-۲۰]. بزرگترین چالش رویکردهای کشف ناهنجاری مبتنی بر یادگیری عمیق پیشین، پیچیدگی محاسباتی و تمرکز بر حملات به‌صورت محلی می‌باشد. تلاش‌هایی به‌منظور بهبود حجم محاسباتی و درنظر گرفتن همبستگی داده‌های حمله در روش‌های ارائه شده انجام شده‌است اما عموما بر یک ساختار و مدل یادگیری متمرکز می‌باشند و قابلیت خودنظارتی در آن‌ها وجود ندارد.

هدف این مقاله ارائه روشی خودنظارتی مبتنی بر یادگیری عمیق گروه‌محور جهت کشف ناهنجاری حسگرها در سامانه‌های کنترل صنعتی می‌باشد. این روش با درنظر گرفتن موثرترین رویکردهای یادگیری عمیق شامل حافظه بلندکوتاه مدت، شبکه عصبی پیچشی و شبکه عصبی تمام متصل به‌صورت گروه‌محور سعی در بکارگیری مزایای آن‌ها در استخراج ویژگی و بهبود عملکرد کشف ناهنجاری دارد. معماری رویکردهای کشف ناهنجاری روش پیشنهادی مبتنی بر ساختار رمزگذار رمزگشا می‌باشد و با یادگیری رفتار داده به‌صورت بدون نظارت، ناهنجاری‌ها را به‌صورت خودنظارتی کشف می‌کنند. این رویکردها بر جنبه‌های زمانی، مکانی، محلی و سراسری داده‌ها تمرکز داشته و ترکیب گروه‌محور آن‌ها منجر به هم‌افزایی این قابلیت‌ها در یک مدل می‌شود.

به‌منظور اجماع روش‌های کشف ناهنجاری، نتایج شباهت‌سنجی این واحدها به یک رای‌گیر گیت آستانه ارسال می‌شود تا براساس قابلیت اطمینان هر واحد تصمیم آن در نتیجه نهایی اعمال گردد. نوآوری‌های اصلی این پژوهش به شرح زیر خلاصه شده است:

- ارائه یک رویکرد خودنظارتی گروه‌محور کشف ناهنجاری با درنظر گرفتن ویژگی‌های مکانی، زمانی و محلی داده‌های ثبت شده توسط حسگرهای سامانه اینترنت اشیا صنعتی؛
- ارائه رویکرد رای‌گیری حد آستانه وزن‌دار به‌منظور تعیین خروجی نهایی براساس قابلیت اطمینان روش‌های تجمیع شده؛
- درنظر گرفتن مقادیر متغیر قاب‌بندی پنجره تحلیل به‌منظور استخراج همبستگی‌های کوتاه و باند مدت زمانی.

در ادامه و در بخش دوم مطالعات پیشین بررسی می‌شود، در بخش سوم به مرور مفاهیم پایه پرداخته می‌شود، جزئیات روش پیشنهادی و آزمایش‌های تجربی و ارزیابی در فصل‌های چهارم و پنجم ارائه شده است. درنهایت و در بخش ششم به جمع‌بندی و روال آتی پرداخته شده است.

۲- پژوهش‌های پیشین

تجهیزات در سامانه‌های کنترل صنعتی با هدف تعامل با محیط فیزیکی به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات و اعمال تحریک بکارگرفته می‌شوند. در این سیستم‌ها، داده و اطلاعات از محیط فیزیکی توسط حسگرها دریافت می‌شود و پس از پردازش و محاسبات، کنترل‌های لازم به محرکه‌ها جهت بازگشت به محیط فیزیکی داده می‌شود[۲۳]. با پیچیده شدن کاربردها و افزایش بکارگیری این سیستم‌های در ماموریت‌های ایمنی بحرانی، مسئله خطا و خرابی در آن‌ها بیش از پیش مطرح شده است. از سوی دیگر، با افزایش تعداد و حجم اطلاعات حسگرها به‌همراه پیچیدگی پردازش در این سیستم‌ها، مسئله مواجهه با خطاها اهمیت بیشتری یافته‌اند. درنتیجه شناسایی و مدیریت این ناهنجاری‌ها توسط عامل انسانی میسر نیست و لازم است به‌صورت خودکار و ماشینی انجام گیرد. پژوهش‌هایی با هدف کشف ناهنجاری‌ها انجام گرفته است که می‌توان آن‌ها را براساس ماهیت به روش‌های سنتی و داده‌محور دسته‌بندی کرد.

روش‌های کشف ناهنجاری سنتی عموما مبتنی بر رویکردهای آماری-احتمالی، به مدلسازی و تحلیل رفتار نرمال براساس تاریخچه براساس رویکردهای ریاضی می‌پردازند[۲۴و۲۵]. در این زمینه، اطلاعات جمع‌آوری شده توزیع احتمالی را شکل می‌دهند و از عملگرهای آماری مانند میانگین و واریانس برای کشف رفتارهای ناهنجار استفاده می‌شود. مشابهت داده حسگرها در مدل آماری استخراج شده، معیار کشف ناهنجاری در این روش‌ها می‌باشد. روش‌های مبتنی بر رویکردهای آماری، زنجیره مارکف، تحلیل سری زمانی، تطابق الگو و نظریه اطلاعات در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند. این روش‌ها از دقت، سرعت و قطعیت مناسبی برخوردارند و عموما در روش‌های برخط مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۸-۲۶]. گرچه با پیچیده شدن کاربردها و افزایش حجم داده‌ها، پردازش‌های لازم و تخمین توزیع مناسب در این دسته از روش‌ها صورت نمی‌گیرد و در حملات پیچیده به نتیجه مناسب نمی‌رسند [۲۸و۲۹].

روش‌های کشف ناهنجاری داده محور، با بکارگیری رویکردهای یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و یادگیری تقویتی سعی بر تحلیل داده و استخراج ناهنجاری دارند. قابلیت اطمینان و قطعیت مدل‌های داده‌محور از روش‌های سنتی کمتر است اما به‌دلیل عملکرد مناسب در داده‌های زیاد و استخراج ویژگی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این زمینه، رویکردهای مبتنی بر یادگیری به‌صورت بانظارت، بدون نظارت و نیمه‌نظارتی ارائه شده است. در [۲۹]. روش‌های k نزدیک‌ترین همسایه، جنگل تصادفی و درخت تصمیم به‌عنوان راهکارهای بانظارت تشخیص ناهنجاری در واحد تشخیص نفوذ سامانه کنترل صنعتی بکارگرفته شده است. باتوجه به ناشناخته بودن حملات در محیط‌های کنترل صنعتی و پیچیده شدن الگوی آن‌ها با پیشرفت فناوری، تکیه بر رویکردهای بانظارت و استفاده از دانش قبلی به‌منظور برچسب‌دهی به داده‌ها کافی نمی‌باشد.

با گذشت زمان و افزایش حجم داده‌ها و پیشرفته شدن راهکارها در سامانه‌های اینترنت اشیا صنعتی، روش‌های یادگیری عمیق بعنوان موثرترین راهکارهای مواجهه با چالش‌ها کاندید شدند. در این رویکردها، هوشمندی محاسباتی از اطلاعات حسگرها فراهم می‌شود و فرایند تولید به‌طور موثر ادامه می‌یابد. در این روش‌ها عموما از ساختارهای خودرمزگذار، شبکه‌های عصبی پیچشی، شبکه بیز و بوتزمان استفاده شده است. یکی از نخستین سامانه‌های تشخیص نفوذ صنعتی مبتنی بر تحلیل سری زمانی به کمک شبکه عصبی حافظه بلند- کوتاه مدت (LSTM) و ترکیب آن با رویکردهای مبتنی بر امضا در [۳۰] ارائه شده است. یکی از چالش‌های مهم استفاده از این رویکرد توانایی محدود آن در مدیریت تصمیم‌گیری مبتنی بر تحلیل اطلاعات قبلی است. به‌نوعی این ساختار با استفاده از نورون‌های دروازه‌ای مبتنی بر

دروازه‌هایی نظیر فراموشی و انتخاب ورودی و غیره، می‌تواند همبستگی‌های زمانی طولانی را تا حدودی لحاظ کند. اما نهایتاً برای ارتباطات زمانی بسیار طولانی و غیرمارکفی، توانایی مناسبی را از خود نشان نمی‌دهد. در [۳۱] رویکردی مبتنی بر استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) برای تشخیص ناهنجاری در شبکه‌های کنترل صنعتی ارائه شده است. این رویکرد همبستگی بین ویژگی‌ها و توزیع نامتوازن نمونه‌ها را درنظر می‌گیرد و به دلیل تنکی اتصالات و وجود وزن مشترک بین نورون‌های لایه‌های کانوولوشنی، متغیرهای مرتبط را با هدف افزایش سرعت کاهش می‌دهد. با این وجود، شبکه‌عصبی پیچشی به‌دلیل وجود لایه‌های متعدد و استفاده مکرر از عملگرهای ضرب و جمع و اعمال توابع غیرخطی زمان اجرای طولانی دارد که بر کارایی عملیات برخط در واحدهای کنترل صنعتی تاثیر منفی دارد. در در [۳۲] راهکارهایی مبتنی بر استفاده ترکیبی از روش‌های ذکر شده پیشنهاد شده است و در [۳۳] ساختار سلسله‌مراتبی و سبک مبتنی بر شبکه عصبی حافظه بلند و کوتاه مدت با هدف کشف و دسته‌بندی ناهنجاری سامانه‌های سایبرفیزیکی ارائه شده است.

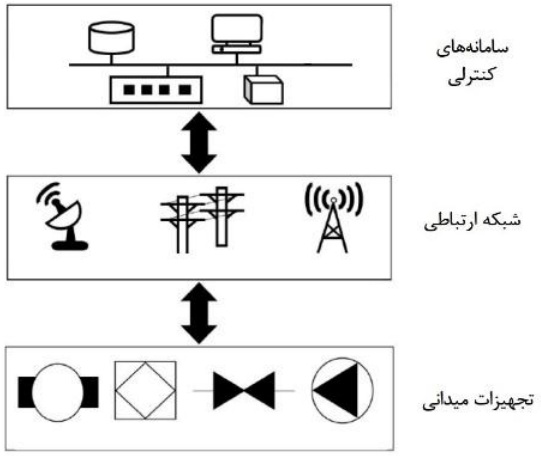
بکارگیری رویکردهای برخط و قابل اطمینان در واحد تشخیص نفوذ سامانه‌های کنترل صنعتی لازم می‌باشد. با افزایش حجم داده‌ها و تنوع رفتار ناهنجاری‌ها و حملات، بکارگیری رویکردهای داده محور مبتنی بر یادگیری کارایی بهتری ایجاد می‌کند. رویکردهای پیشین ارائه شده عموما بر ویژگی‌های زمانی یا مکانی داده‌ها متمرکز بوده‌اند و زمان پردازشی بالایی داشته‌اند. ارائه رویکرد کم هزینه و قابل اطمینان با درنظر داشتن ویژگی‌های مختلف داده و پویایی رفتار آن همچنان یکی از نیازمندی‌های اساسی این سامانه‌ها می‌باشد.

۳- مفاهیم پایه

در این بخش به مروری بر مفاهیم پایه‌ای که در روش پیشنهادی مورداستفاده قرار گرفته است پرداخته می‌شود.

۳-۱- سامانه‌های کنترل صنعتی

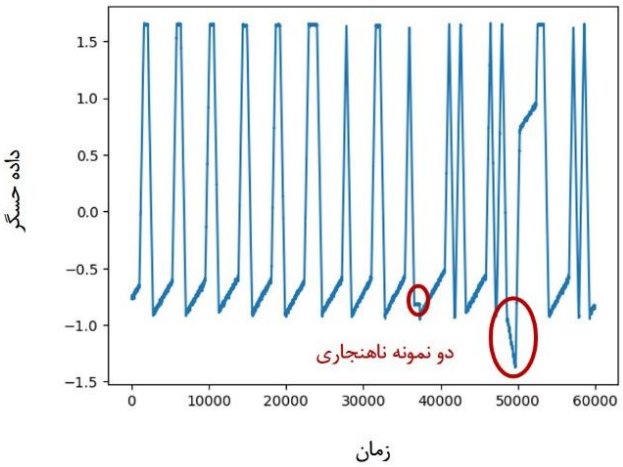
سامانه‌های کنترل صنعتی با هدف مدیریت فرایندهای فیزیکی در محیط‌های صنعتی بکار گرفته می‌شوند. این سامانه‌ها به‌طور متداول از سه شبکه تجاری سازمان، کنترلی و میدان تشکیل می‌شوند. شبکه تجاری سازمان شامل سرورهای ایمیل و وب و غیره بوده و معمولاً با شبکه اینترنت در ارتباط است. شبکه کنترلی از یک ایستگاه نظارت و کنترل مرکزی، تعدادی واسط انسان-ماشین (HMI) برای نمایش اطلاعات در مورد ایستگاه‌های راه‌دور و ارسال مستقیم دستورات به سیستم تشکیل شده است. شبکه میدان متشکل از تجهیزات فیزیکی با هدف جمع‌آوری داده و اعمال فرامین کنترلی می‌باشد. در این شبکه، حسگرها اطلاعات محیطی موردنیاز در پردازش را جمع‌آوری کرده و کنترلر منطقی قابل برنامه‌ریزی (PLC) اطلاعات حسگرها را به‌عنوان ورودی خوانده و دستورات برنامه‌ریزی شده واحد کنترل را هدایت می‌کند[۴،۲-۱]. ساختار و اجزای سامانه کنترل صنعتی براساس شبکه‌های شرح داده شده در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱. ساختار سامانه کنترل صنعتی

۳-۲- ناهنجاری حسگرها

حسگرها با هدف جمع‌آوری اطلاعات محیطی در سامانه‌های کنترل صنعتی بکار گرفته می‌شوند. این اطلاعات به‌صورت سریال در زمان تولید می‌شوند و پس از انجام پردازش و محاسبات با هدف کنترل‌های لازم به محرکه‌ها جهت بازگشت به محیط فیزیکی داده می‌شود [۳۴]. بروز ناهنجاری در این داده‌ها به‌معنای خارج شدن از رفتار موردانتظار و معمول در یک نقطه یا مجموعه‌ای از نقاط است. در حالت کلی نرمال بودن داده‌های حسگر براساس محدوده اندازه‌گیری آن توسط تعریف حد آستانه مشخص می‌شود. خارج شدن محدوده داده از آستانه مشخص شده و قابل قبول سیستم، به‌معنای رخدادن یک ناهنجاری است که می‌بایست پیش از انتشار، مدیریت و اصلاح شود. لازم است ابتدا بر شناسایی و سعی در بررسی عاملی که باعث بروز خطا می‌شود تمرکز کرد تا از انتشار آن در سیستم جلوگیری شود. پس از شناسایی، فرایند تحمل‌پذیر کردن سیستم در برابر آن از طریق ایزوله کردن و حذف اثر اعمال می‌شود. شکل ۲ نمایی از رخداد ناهنجاری در اطلاعات یک حسگر در طول زمان را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمایی از رخداد ناهنجاری در مقادیر یک حسگر در زمان

برحسب نوع رفتار و مدت زمان اثر، ناهنجاری‌ها در انواع مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. داده‌های ناهنجار فاصله‌ی زیادی با الگوی جامع بقیه‌ی داده‌ها دارند و ناشی از بروز خطا در سیستم یا رخداد نویز گذرا براثر پایین آمدن سطح انرژی حسگر می‌باشند. یکی از اساسی‌ترین چالش‌ها در فرایند تشخیص و مواجهه با ناهنجاری، شناسایی و تمیز بین این دو دسته از حیث نوع و زمان تاثیر بر سیستم و اعمال واکنش مناسب برای هریک در سیستم می‌باشد. بدین منظور درنظر گرفتن حدود آستانه مناسب برای تشخیص نوع ناهنجاری سیستم یا اجتناب از بروز ناهنجاری در سیستم روش مناسبی است. براساس دسته‌بندی داده‌ها و شناسایی نوع ناهنجاری، اعمال سازوکارهای کنترلی و پیشگیرانه مناسب منجر به رفع چالش و بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد. لازم به ذکر است که عدم مواجهه صحیح با نویز، روال کشف ناهنجاری را به‌دلیل انتشار آن در سیستم تغییر داده و دشوارتر می‌سازد [۳۵].

۳-۳- ساختارهای یادگیری عمیق

یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان موفقیت الگوریتم‌های یادگیری ماشین، چگونگی نمایش و بازنمایی داده‌ها می‌باشد. روش‌های گوناگون بازنمایی می‌توانند اطلاعات و دانش خاصی را درباره موضوع مورد بررسی آشکار یا نهان نمایند. یکی از ضعف‌ها و مشکلات روش‌های یادگیری فعلی، ضعف آن‌ها در استخراج و توسعه اطلاعات تفکیکی یک مجموعه داده به‌صورت خودکار است.

مهندسی ویژگی یک راه رایج برای جبران دانش خاص پیرامون یک موضوع خاص تحقیقاتی با استفاده از دانش بشری است که می‌تواند در برخی موارد کمک‌کننده باشد. با این وجود یک هدف در هوش مصنوعی، کاهش وابستگی سامانه مبتنی بر آن به انسان است. در حقیقت یک سامانه مبتنی بر هوش مصنوعی بایستی جهان اطراف را درک نموده و این میسر نیست مگر از طریق یادگیری چگونگی استخراج و آشکارسازی دانش نهفته در دل داده‌های خام سطح پایین‌تر.

یادگیری عمیق عبارت است از چگونگی ترکیب نگاشت‌های غیرخطی بر روی دادگان برای رسیدن به نمایشی کم‌حجم‌تر، چکیده‌تر و مفیدتر. در حقیقت در یادگیری عمیق، نگاشت‌های غیرخطی متوالی چنان با یکدیگر ادغام می‌شوند که در هر مرحله اطلاعاتی مفیدتر از چکیده‌سازی و ادغام اطلاعات مراحل قبل و به‌صورت سلسله‌مراتبی حاصل شود[۳۶].

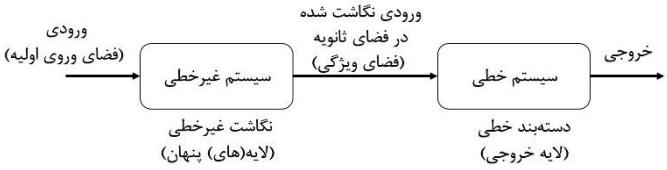
ساختار یادگیری عمیق عموماً مبتنی بر استفاده از شبکه‌های عصبی است که با اعمال نگاشت‌های غیرخطی اقدام به استخراج ویژگی‌های سطح بالاتر در لایه‌های عمیق (نزدیک به ورودی) خود و سپس تصمیم‌گیری مبتنی بر مقادیر این ویژگی‌ها در لایه خروجی خود می‌کنند. شکل ۳ مفهوم کلی استخراج ویژگی در یک ساختار عمیق را نمایش می‌دهد. در این شکل مجموعه‌ای از لایه‌ها در حکم ماشین غیرخطی وظیفه استخراج ویژگی‌های مناسب از دل داده اولیه را داشته و در ادامه، لایه خروجی در حکم یک ماشین خطی اقدام به تصمیم‌گیری نهایی می‌کند.

در ادامه این بخش به مروری بر کلیت سه روش یادگیری عمیق مورد استفاده در این روش شامل شبکه‌عصبی تمام‌متصل[1]، شبکه‌عصبی بلند-کوتاه مدت[2] و شبکه‌عصبی پیچشی[3] می‌پردازیم.

۳-۳-۱- شبکه‌عصبی تمام‌متصل

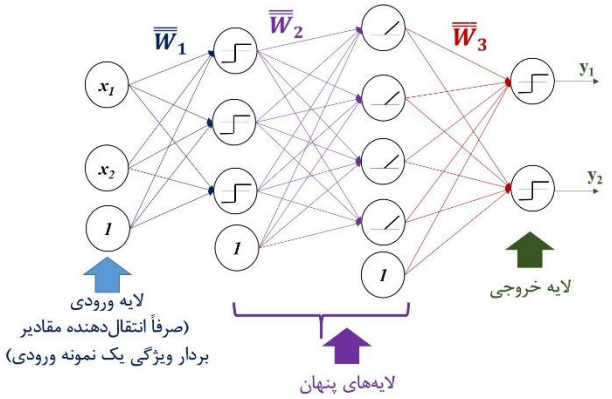
در شبکه‌عصبی تمام‌متصل، نورون‌های هر لایه خروجی همه نورون‌های لایه پیشین خود را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و پس از اعمال بردار وزن و یک تابع غیرخطی، خروجی خود را تولید می‌کنند. مزیت این معماری آگاهی هر نورون از کلیه پردازش‌های لایه پیشین خود و داشتن توانایی در کشف همبستگی و ارتباط بین ویژگی‌های استخراج‌شده در لایه قبل برای تولید خروجی خود می‌باشد. این ارتباط محدود به ارتباط محلی یک ویژگی با ویژگی‌های اطراف خود نیست و در یک مسئله مبتنی بر سری زمانی (نظیر پایش خروجی حسگرها در مسئله تشخیص نفوذ در سامانه‌های کنترل صنعتی) از سوی دیگر، چالشی که این معماری با آن مواجه است وجود اتصالات بسیار زیاد و در نتیجه وزن‌های متعددی است که لازم است در فرایند یادگیری آموزش ببینند.

[1] Fully Connected
[2] Long-Short Term Memory (LSTM)
[3] Convolutional



شکل ۳. مفهوم استخراج ویژگی در ساختار عمیق

بنابراین این مدل با انفجار تعداد پارامترها مواجه است که با توجه به یادگیری ساختارهای عصبی مبتنی بر الگوریتم‌های جستجوی محلی (نظیر الگوریتم تنزل گرادیان[1]) می‌تواند به گیرکردن آن‌ها در کمینه محلی منجر شود[۳۶و۳۷]. شکل ۴ ساختار یک شبکه‌عصبی تمام‌متصل با دو لایه پنهان را نمایش می‌دهد. در این شکل ماتریس وزن هر لایه با $\overline{\overline{W}}_i$ نمایش داده شده است. هر لایه دارای تابع فعالیت غیرخطی خود می‌باشد (در این شکل، لایه پنهان اول دارای تابع فعالیت tanh، لایه پنهان دوم دارای تابع فعالیت ReLU و لایه خروجی دارای تابع فعالیت غیرخطی سیگموئید است.



شکل ۴. نمایی کلی از یک ساختار عصبی تمام‌متصل با دو لایه پنهان، دو بعد ورودی (x) و دو بعد خروجی (y)

۳-۳-۲- حافظه بلند-کوتاه‌مدت

شبکه‌های عصبی بازگشتی۲، دسته‌ای از شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهند که به‌دلیل داشتن بازخورد داخلی، قادر به‌خاطرسپاری دنباله‌ای از حالات می‌باشند. به‌عبارت دیگر، شبکه‌های عصبی بازگشتی، در هر زمان یک گام از یک دنباله‌ی ورودی را مورد پردازش قرار داده و در لایه‌ی پنهان خود، یک بردار حالت نگهداری می‌کنند که به‌طور تلویحی اطلاعاتی از تاریخچه‌ی همه عناصر قبلی دنباله را در خود نگه می‌دارد [۳۸]. بنابراین، این ساختار برای کاربردهایی مبتنی بر دریافت یک دنباله، نظیر سری زمانی یک حسگر مناسب خواهد بود.

با وجود آنکه هدف اصلی شبکه‌های عصبی بازگشتی یادگیری وابستگی‌های زمانی درازمدت است، شواهد نظری و تجربی حاکی از پیچیدگی ذخیره‌سازی اطلاعات برای مدت‌زمان طولانی است [۳۹]. برای مواجهه با این مشکل شبکه‌های عصبی بازگشتی، تلاش‌هایی در جهت ارائه‌ی شبکه‌های عصبی با قابلیت حفظ وابستگی‌های زمانی دراز و کوتاه‌مدت از طریق افزودن یک حافظه‌ی صریح مدیریت‌شده انجام شده است. یکی از موفق‌ترین ساختارهای ارائه شده در این راستا، شبکه‌های عصبی بازگشتی موسوم به حافظه‌های بلند-کوتاه‌مدت۳ می‌باشند [۴۰].

حافظه‌های بلند-کوتاه‌مدت (LSTM)، دسته‌ای موفق از شبکه‌های عصبی بازگشتی می‌باشند که به‌نوعی در آن‌ها عنصر حافظه، توانایی فراموشی و به‌خاطرسپاری موارد مناسب قرار داده شده است. به‌عبارت دیگر، در این شبکه‌های عصبی، همه‌ی موارد گذشته به‌خاطر سپرده نمی‌شوند؛ بلکه موارد زائد فراموش شده و صرفاً موارد مناسب بلندمدت یا کوتاه‌مدت به‌خاطر سپرده می‌شوند. قابلیت فراموشی موارد زائد، توانایی یادگیری وابستگی‌های بلندمدت موجود در یک دنباله را به این شبکه‌ها منتقل می‌کند.

ایده‌ی اساسی در شبکه‌های LSTM، استفاده از واحدهای حافظه مجهز به نورون‌های خاصی با عنوان «نورون‌های دروازه‌ای[4]» می‌باشد. این نورون‌های دروازه‌ای عموماً به سه دسته تقسیم می‌شوند، نورون‌های دروازه‌ی ورودی، خروجی و فراموشی . این سه نورون دروازه، امکانات یک حافظه‌ی رقمی شامل خواندن، نوشتن و راه‌اندازی مجدد را فراهم می‌کنند. به‌عبارت دیگر، ورودی بلوک حافظه، پیش از بررسی در خروجی دروازه‌ی ورودی (که مقدار بین صفر و یک است) ضرب می‌شود تا میزان تأثیر ورودی حساب شود. خروجی پیش از ارائه شدن در خروجی نورون، در خروجی دروازه‌ی خروجی (که مقداری بین صفر و یک است) ضرب می‌شود و همچنین دروازه‌ی فراموشی، که به‌صورت یک عامل ضرب دیگر پیاده‌سازی می‌شود، میزان بخاطرسپاری و تغییر وضعیت نورون را تعریف می‌کند [۳۶و۴۱].

به‌طور کلی، ساختارهای بازگشتی، از واحدهای تکراری تشکیل می‌شوند. به‌طور مثال، شبکه‌ی عصبی بازگشتی معمولی، از یک واحد ساده تک نورون تشکیل شده که در طول زمان تکرار می‌شود. اما ساختار LSTM، خود از چهار لایه یا مسیر مجزا تشکیل می‌شود که در طول زمان تکرار می‌شوند. شکل ۵، کلیت

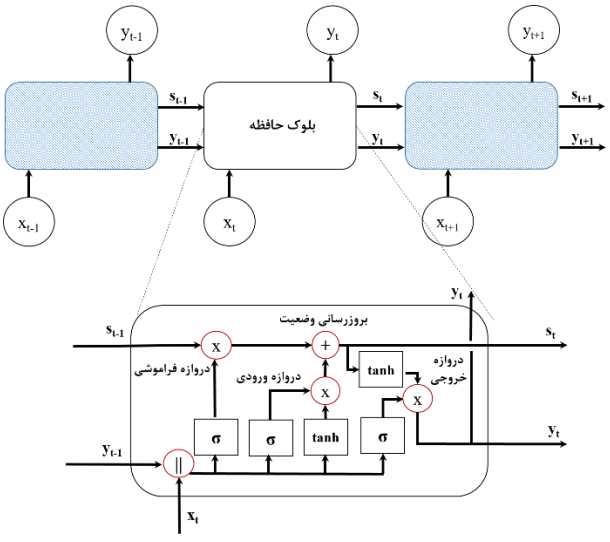
[1] Gradient descent
[2] Recurrent Neural Network (RNN)
[3] Long Short-Term Memory (LSTM)
[4] Gated neuron

ساختار شبکه‌عصبی LSTM را به‌صورت بازشده در طول زمان نمایش می‌دهد. بلوک‌های تکرار شونده در حقیقت، تکرار یک بلوک در طول زمان است. در این شکل، نماد σ، تابع سیگموئیدی با خروجی بین صفر و یک است. سیگنال x، سیگنال ورودی، سیگنال y، سیگنال خروجی و سیگنال s، سیگنال وضعیت سلول است. علامت || به‌معنای ادغام سیگنال ورودی و خروجی است.

در این شبکه، عنصر محوری سیگنال s_t است که در طول زمان تاریخچه اطلاعات ورودی را حفظ می‌کند و سیگنال وضعیت سلول نام دارد. میزانی از این سیگنال که لازم است در طول هر گام زمانی حفظ شود، به‌کمک دروازه‌ی فراموشی، مبتنی بر ورودی جدید و خروجی گام قبل، تعیین می‌شود. بنابراین امکان راه‌اندازی مجدد حافظه از طریق صفر کردن این سیگنال توسط دروازه‌ی فراموشی وجود دارد. چنانچه خروجی تابع سیگموئید دروازه‌ی فراموشی را در زمان t، f_t بنامیم، این مقدار از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$f_t = \sigma(W_f . [y_{t-1}, x_t] + \theta_f) \quad (۱)$$

که در اینجا W_f، بردار وزن دروازه فراموشی، $[y_{t-1},x_t]$، بردار متشکل از ورودی جدید و خروجی گام قبل و θ_f حد آستانه‌ی دروازه‌ی فراموشی است. لازم است بردار وزن و حد آستانه بر اساس روش‌های یادگیری نظیر پس‌انتشار خطا در زمان، یاد گرفته شوند. با ضرب f_t که مقداری بین صفر و یک است ، در سیگنال s_t، میزانی از سیگنال وضعیت سلول که لازم است حفظ شود تعیین می‌شود.



شکل ۵. حافظه بلند-کوتاه‌مدت

لازم است سیگنال وضعیت سلول برای حفظ اطلاعات ورودی جدید، در هر گام به‌طور مناسب بروزرسانی شود. این بروزرسانی می‌تواند از طریق افزایش یا کاهش این سیگنال در بخش بروزرسانی وضعیت انجام شود. در دروازه‌ی ورودی، تعیین می‌شود که چه میزان از اصلاح باید انجام شود و میزان اصلاح به‌صورت مقداری در بازه [۱، ۱-] توسط تابع tanh مشخص می‌شود. نهایتاً این مقدار در یک جمع‌کننده، با میزان حفظ‌شده از سیگنال وضعیت سلول جمع می‌شود. به این ترتیب، میزانی از اطلاعات ورودی که لازم است در حافظه نگهداری شود، مشخص می‌شود. چنانچه میزان خروجی تابع سیگموئیدی دروازه‌ی ورودی، با i_t و میزان اصلاح خروجی از تابع سیگموئیدی دروازه‌ی ورودی با c_t مشخص شوند خواهیم داشت:

$$i_t = \sigma(W_i . [y_{t-1}, x_t] + \theta_i) \quad (۲)$$

$$c_t = tanh(W_c . [y_{t-1}, x_t] + \theta_c) \quad (۳)$$

که در اینجا Wi، بردار وزن دروازه ورودی، θi حد آستانه‌ی دروازه‌ی ورودی، Wc بردار وزن اصلاح و θc حد آستانه میزان اصلاح است. بنابراین میزان سیگنال وضعیت سلول به‌صورت زیر بروزرسانی می‌شود:

$$s_t = f_t \times s_{t-1} + i_t \times c_t \quad (۴)$$

در پایان لازم است خروجی و میزان آن توسط دروازه‌ی خروجی تعیین شود که مشابه با دو دروازه‌ی دیگر عمل می‌کند. خروجی، بر اساس سیگنال وضعیت سلول و مبتنی بر یک تابع tanh مشخص شده و میزان خروجی توسط دروازه‌ی خروجی تعیین می‌شود. چنانچه خروجی تابع سیگموئیدی دروازه‌ی خروجی که تعیین‌کننده‌ی میزان خروجی است را با ot نمایش دهیم خواهیم داشت:

$$o_t = \sigma(W_o . [y_{t-1}, x_t] + \theta_o) \quad (۵)$$

$$y_t = ot \times tanh(s_t) \quad (۶)$$

که در اینجا Wo، بردار وزن دروازه خروجی، [yt-1,xt]، بردار متشکل از ورودی جدید و خروجی گام قبل و θo حد آستانه‌ی دروازه‌ی خروجی است.

عموماً از قاعده پس‌انتشار خطا در زمان[1] برای آموزش این نوع شبکه‌عصبی استفاده می‌شود.

[1] Backporpagation through time (BPTT)

۳-۳-۳- شبکه‌عصبی پیچشی

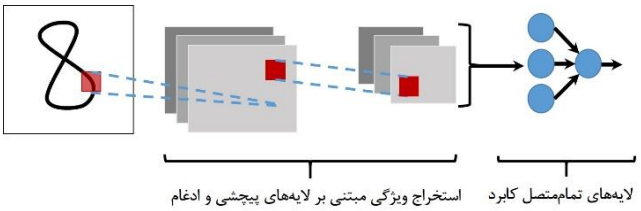
شبکه‌های عصبی پیچشی (کانوولوشنی) [۴۲] نوع خاصی از شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهند که برای پردازش داده با توپولوژی شبکه‌ای مشخص، نظیر سری‌های زمانی (یک‌بعدی) در بازه‌های زمانی مشخص و تصویر (دوبعدی)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. نام کانوولوشن نشئت‌گرفته از استفاده‌ی این شبکه از عملگر کانوولوشن بر روی داده‌های ورودی است. به‌عبارت دیگر، این شبکه‌های عصبی، حداقل در یکی از لایه‌های خود از عملگر کانوولوشن بجای ضرب ماتریسی کلی، استفاده می‌کنند. شبکه‌های عصبی کانوولوشنی، از ساختارهای تأثیرگذار بر روی یادگیری عمیق می‌باشند. چهار ایده‌ی اساسی در شبکه‌های کانوولوشنی عبارت‌اند از: اتصالات محلی، وزن‌های به‌اشتراک‌گذاشته‌شده، ادغام و استفاده از تعداد زیاد لایه.

معماری یک شبکه‌ی عصبی کانوولوشنی از دنباله‌ای از مراحل تشکیل شده است. مراحل اولیه‌ی متشکل دو نوع لایه می‌باشند: ۱- لایه‌ی کانوولوشن[1] و لایه‌ی ادغام[2]. هر واحد هر لایه‌ی کانوولوشنی به‌صورت محلی به بخشی از ویژگی‌های ورودی از لایه‌ی قبل متصل است و این ورودی‌ها را در یک وزن ورودی ضرب می‌کند (به مجموعه‌ی وزن‌ها بانک فیلتر گفته می‌شود). حاصل ضرب وزن در بخش محدود و محلی ویژگی‌های ورودی از یک تابع غیرخطی نظیر سیگموئید یا ReLU عبور داده می‌شود. همه‌ی واحدهای یک بخش دارای وزن‌های یکسان هستند (در حکم کانوولوشن و لغزاندن پنجره که نظیر آن در فیلترکردن تصاویر مورد استفاده قرار می‌گیرد). به هر بخش یک نگاشت ویژگی گفته می‌شود. نگاشت‌های ویژگی مختلف از بانک فیلتر مختلف استفاده می‌کنند [۳۸]. شکل ۶، نمایی از کلیه عملکرد شبکه عصبی پیچشی به همراه عملکرد فیلترها را در یک مثال نمایش می‌دهد.

پس از اعمال فیلترهای مختلف، نتایج لایه‌ی کانوولوشن در لایه‌ی ادغام، تجمیع می‌شود. این ادغام می‌تواند به‌صورت محاسبه‌ی بیشینه در یک نگاشت ویژگی مورد استفاده قرار گیرد. چندین لایه کانوولوشن، نگاشت غیر خطی و ادغام می‌تواند منجر به استخراج ویژگی‌های کمتر با مفهوم سطح بالاتر مختلف محلی شود که می‌توانند برای تصمیم‌گیری مناسب مورد استفاده قرار گیرند. برای یادگیری می‌توان از قانون پس‌انتشار خطا استفاده کرد. مزیت این ساختار، یکسان بودن وزن‌های یک بانک فیلتر و داشتن اتصالات محلی است؛ درواقع هر نورون در این لایه برخلاف مدل تمام‌متصل فقط به یک همسایگی در نورون‌های لایه قبل متصل است. این موضوع منجر به کاهش تعداد پارامترهای این مدل نسبت به رویکرد تمام‌متصل می‌شود.

۳-۳-۴- الگوریتم یادگیری

معمولاً در فرایند یادگیری وزن‌های شبکه‌های عصبی از جمله شبکه‌عصبی تمام‌متصل، LSTM و پیچشی از رویکردهای مبتنی بر پس‌انتشارخطا و تنزل گرادیان استفاده می‌شود. این رویکردها، رویکردهای بهینه‌سازی تکراری مبتنی بر جستجوی محلی برای کاهش خطای بین خروجی شبکه و خروجی به‌کمک مشتق زنجیره‌ای می‌باشند. بر اساس تحلیل بسط تیلور مرتبه اول، بردار گرادیان جهت رشد تابع را نشان می‌دهد. بنابراین تغییر در جهت قرینه آن منجر به کاهش تابع می‌شود. چنانچه هدف از یادگیری، کاهش تابع خطا باشد، می‌توانیم وزن‌های شبکه را در جهت قرینه بردار گرادیان تغییر دهیم (تنزل گرادیان). این رویکرد منجر به کاهش تدریجی خطا خواهد شد. یکی محبوب‌ترین الگوریتم‌های این خانواده که بسیار پراستفاده است الگوریتم ADAM می‌باشد که مبتنی بر تقریبی از مشتق دوم و تقعر تابع ارائه شده است [۳۷]. شبه‌کد این الگوریتم در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۶. ساختار کلی شبکه‌عصبی کانوولشنی

1: Initialize parameters θ, first moment vector m, and second moment vector v
2: Initialize time step $t \leftarrow 0$
3: Set hyperparameters α (learning rate), β_1, β_2 (decay rates), ϵ (small constant)
4: **while** until θ converges **do**
5: $t \leftarrow t+1$
6: Compute gradient of the loss function $g_t \leftarrow \nabla_\theta \mathcal{L}(\theta)$
7: Update first moment estimate $m_t \leftarrow \beta_1 \cdot m_{t-1} + (1-\beta_1) \cdot g_t$
8: Update second moment estimate $v_t \leftarrow \beta_2 \cdot v_{t-1} + (1-\beta_2) \cdot g_t^2$
9: Correct bias in first moment $\hat{m}_t \leftarrow m_t / (1-\beta_1^t)$
10: Correct bias in second moment $\hat{v}_t \leftarrow v_t / (1-\beta_2^t)$
11: Apply update $\Delta\theta \leftarrow -\alpha \cdot \hat{m}_t / (\sqrt{\hat{v}_t} + \epsilon)$
12: Update parameters $\theta \leftarrow \theta + \Delta\theta$
13: **end while**

شکل ۷. الگوریتم بهینه‌سازی ADAM [۳۷]

[1] Convolution layer
[2] Pooling layer

۳-۴- یادگیری خودنظارتی

رویکردهای خودنظارتی[1] به‌منظور یادگیری ویژگی‌های تمیزدهنده مناسب سطح بالا از انبوده‌ی داده بدون برچسب ارائه شده‌اند. شکل ۸ نمایی کلی از رویکرد خودنظارتی را نمایش می‌دهد. در این فرایند، ابتدا در مرحله پیش‌تعلیم[2] به‌منظور استخراج ویژگی، یک وظیفه کمکی[3] تعریف می‌شود که به‌کمک داده بدون برچسب قابل حل است. در این مرحله، شبه‌برچسب‌هایی برای وظیفه کمکی تعریف می‌شوند. پس از تکمیل فرایند پیش‌تعلیم، مدل بدست آمده برای انجام وظیفه اصلی انتقال می‌یابد [۴۳-۴۴].

معمولاً ساختار در هنگام پیش‌تعلیم، مشابه رویکرد خودرمزگذار[4] از دو بخش کدگذار[5] و کدگشا[6] تشکیل می‌شود. در مرحله کدگذاری، داده ورودی به فضای ویژگی نگاشت می‌شود که بخش کدگشا به‌کمک آن بتواند وظیفه کمکی را حل کند. درواقع اطلاعات سطح بالایی از دل داده اصلی در این فضای ویژگی کدگذاری شده است. برخی وظایف کمکی متداول عبارتند از پرکردن بخشی از تصویر، پیش‌بینی قاب بعدی در ویدئو و بازسازی تصویر سه‌بعدی از روی تصاویر دوبعدی.

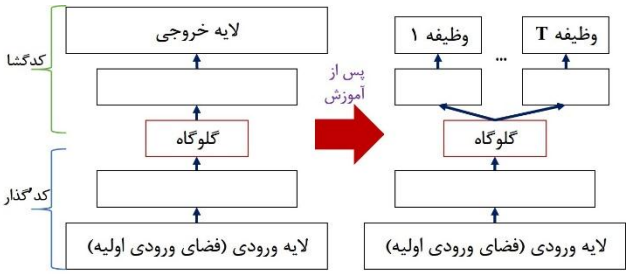
۴- روش پیشنهادی

۱-۴- بیان مسئله

روش پیشنهادی با هدف کشف ناهنجاری در حسگرهای سامانه‌های کنترل صنعتی که ناشی از حملات سایبرفیزیکی یا کارکرد نادرست است ارائه شده است. به‌دلیل حجم زیاد داده‌ها و نیاز به استخراج ویژگی‌های داده هنجار در سطوح مختلف، روش پیشنهادی مبتنی بر رویکردهای خودنظارتی و یادگیری عمیق گروه‌محور ارائه شده است. معلومات و اهداف روش پیشنهادی در ادامه بیان می‌شوند.

معلومات روش پیشنهادی:

- معماری زیرساخت سامانه کنترلی هدف
- داده‌های خروجی حسگرها در قالب سری زمانی
- الگوی رفتاری هنجار داده‌های حسگرها



شکل ۸. خط لوله متداول رویکردهای یادگیری خودنظارتی

اهداف روش پیشنهادی:

- تشخیص الگوی ناهنجار در داده‌های حسگرها
- استخراج الگوی هنجار مبتنی بر تحلیل همبستگی ویژگی‌های زمانی-مکانی داده‌های حسگرها
- ارائه راهکار گروه‌محور به‌منظور تمرکز بر ویژگی‌های مختلف با هدف بهبود اطمینان
- پیکربندی سامانه کنترلی هدف با حذف اثر ناهنجاری کشف شده و اعلام هشدار در بازه زمان مشخص

۲-۴- جزئیات روش پیشنهادی

روش پیشنهادی با هدف کشف ناهنجاری حسگرهای سامانه‌های کنترل صنعتی مبتنی بر یادگیری عمیق گروه‌محور ارائه شده است. برای تشخیص ناهنجاری در این روش، ابتدا داده‌های حسگرها پیش‌پردازش می‌شوند و سپس این داده‌ها به ساختارهای تصمیم‌گیر طراحی شده داده می‌شوند تا هنجار یا ناهنجار بودن آنها مشخص گردد. شکل ۹ معماری ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد. طبق این شکل، ابتدا داده‌های خام حسگرها به واحد پیش‌پردازش وارد می‌شوند و استانداردسازی، انتخاب ویژگی و قاب‌بندی زمانی بر آن‌ها اعمال می‌گردند. در واحد تشخیص، سیگنال‌های پیش‌پردازش شده به‌صورت موازی به سه عامل تشخیص از پیش تعلیم داده شده وارد می‌شوند. هریک از این عوامل تشخیص، داده ورودی را براساس عوامل مختلف زمانی، مکانی، محلی و سراسری تحلیل می‌کنند. مبتنی بر تحلیل خطای بازسازی، پیش‌بینی و همبستگی بین خطا در حسگرهای مختلف، قاب زمانی ورودی توسط هریک از عامل‌های تشخیص به‌عنوان هنجار یا ناهنجار معین می‌گردد. در نهایت، بین عوامل تشخیص رای‌گیری انجام می‌شود تا خروجی نهایی براساس تصمیم هر عامل مشخص گردد. براساس دقت یادگیری هر عامل، وزن اطمینان مشخصی برای هریک از عوامل تشخیص در رای‌گیر اعمال می‌شود. سازوکار رای‌گیری براساس رویکرد گیت آستانه درنظر گرفته شده است. در ادامه، جزئیات معماری پیشنهادی شرح داده می‌شود.

[1] Self-supervised learning
[2] Pre-training
[3] Pretext task
[4] Auto-encoder
[5] Encoder
[6] Decoder

شکل ۹. معماری ساختار تشخیص ناهنجاری پیشنهادی

۴-۲-۱- پیش‌پردازش

در ساختار روش پیشنهادی، داده ورودی از حسگرها به واحد پیش‌پردازش وارد می‌شود. این داده‌ها محدوده تغییرات متنوعی دارند که می‌بایست قبل از پردازش به قالب قابل یکسانی تغییر داده شوند. همچنین همه ویژگی‌های ورودی در فرایند تشخیص مفید نبوده، و برخی از آن‌ها فاقد تغییرات می‌باشند. بنابراین، در واحد پیش‌پردازش، داده‌های خام حسگرها با درنظر داشتن میانگین و انحراف از معیار استانداردسازی می‌شوند و در بازه مقادیر یکسانی قرار می‌گیرند. این رویکرد که در حوزه یادگیری ماشین به استانداردسازی معروف است، پراکندگی مقادیر ویژگی‌ها را در یکسان‌کردن دامنه هر یک لحاظ می‌کند. به‌علاوه برای داده‌های ورودی ویژگی‌های متفاوتی تعریف شده است که ناهنجاری در تمامی این ویژگی‌ها منعکس نشده است. درنتیجه به‌منظور بهبود فرایند یادگیری و تمرکز بر تشخیص ناهنجاری، ویژگی‌های ثابت شناسایی و حذف می‌شوند.

داده ورودی سامانه از حسگرها تامین می‌شود و در قالب سری زمانی می‌باشد پس لازم است قاب‌بندی درستی روی آن اعمال شود. اندازه قاب در کارایی روش پیشنهادی و پیش‌بینی اهمیت دارد، قاب کوچک مشخصه‌های وابستگی داده را بدرستی منعکس نمی‌کند و قاب بزرگ تحلیل پیچیده‌ای بر سیستم اعمال می‌کند. درنتیجه براساس آزمایش‌های تجربی و روش‌های پیشین، قاب‌بندی مناسبی بر داده ورودی اعمال می‌شود.

۴-۲-۲- واحد تشخیص و تصمیم

پس از پیش‌پردازش، داده وارد واحد تشخیص ناهنجاری و تصمیم می‌شود. در روش پیشنهادی این واحد از سه عامل تشکیل شده است که به‌صورت موازی داده ورودی را دریافت کرده و به تحلیل آن می‌پردازند. این عامل‌ها با بکارگیری رویکردهای یادگیری عمیق متفاوت که بر جنبه‌های زمانی، مکانی، سراسری و محلی تاکید دارند به بررسی و تحلیل داده حسگرها می‌پردازند. سپس نتیجه نهایی از اجماع این عامل‌ها در قالب رویکردی گروه‌محور و رای‌گیری وزن‌دار مبتنی بر اطمینان و گیت آستانه به‌دست می‌آید. نتیجه نهایی ناهنجار بودن یا نبودن قاب زمانی سری زمانی ورودی را نشان می‌دهد.

این واحد از سه عامل تشخیص تشکیل شده است که در کنار هم به‌صورت گروه‌محور وظیفه تشخیص را انجام می‌دهند. عوامل تشخیص دارای روند کاری همگن، اما ساختار ناهمگن هستند تا هر یک بر اساس ویژگی ساختار مورد استفاده شاخصه‌های متفاوتی از سیگنال ورودی را مورد بررسی قرار دهند. عملکرد کلی هر عامل تشخیص مبتنی بر معماری رمزگذار-رمزگشاست که بخش زمانی از یک قاب ورودی را دریافت کرده، به فضای کد برده و در فرایند کدگشایی به بخش باقیمانده زمانی از قاب در خروجی می‌رسد. این وظیفه کمکی پیش‌بینی بخشی از سیگنال ورودی منجر به کاهش فضای خروجی و تسهیل یادگیری می‌شود که به‌صورت خودنظارتی مبتنی بر داده هنجار تعلیم دیده است.

پس از بازسازی بخش دوم سیگنال ورودی (پیش‌بینی بخش دوم مبتنی بر بخش اول)، خروجی بدست آمده با بخش دوم از داده اصلی مقایسه شده و بردار خطای فرایند بازسازی تولید می‌شود. در زمان آموزش، بردارهای خطای داده هنجار محاسبه شده و جمعیت آماری خطای ساختار کدگذار-کدگشا را برای داده هنجار ایجاد می‌کند. خطای موجود در هر بعد، می‌تواند با خطای حاصل از بازسازی سایر ابعاد همبستگی داشته باشد. با فرض توصیف توزیع احتمال خطای بازسازی مبتنی بر یک توزیع گاوسی چندمتغیره که همبستگی ابعاد را نیز لحاظ می‌کند، این توزیع مبتنی بر بردار میانگین و ماتریس کواریانس خطا به‌صورت روابط زیر مبتنی بر قانون اعداد بزرگ[1] و قضیه حد مرکزی[2] قابل محاسبه خواهد بود:

$$e_i^{(k)} = x_i^{(k)} - \hat{x}_i^{(k)} \quad (۷)$$

$$m_i = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} e_i^{(k)} \quad (۸)$$

$$C_i = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \left(e_i^{(k)} - m_i\right)^T \left(e_i^{(k)} - m_i\right) \quad (۹)$$

که در این روابط، $x_i^{(k)}$ و $\hat{x}_i^{(k)}$ به‌ترتیب بردار خروجی مطلوب و خروجی تولیدشده توسط عامل iام برای نمونه kام، $e_i^{(k)}$ بردار خطای بازسازی عامل iام برای نمونه kام، N تعداد نمونه‌های آموزشی، m_i بردار میانگین خطای بازسازی عامل iام و C_i ماتریس

[1] Law of Large Numbers
[2] Central Theorem Law

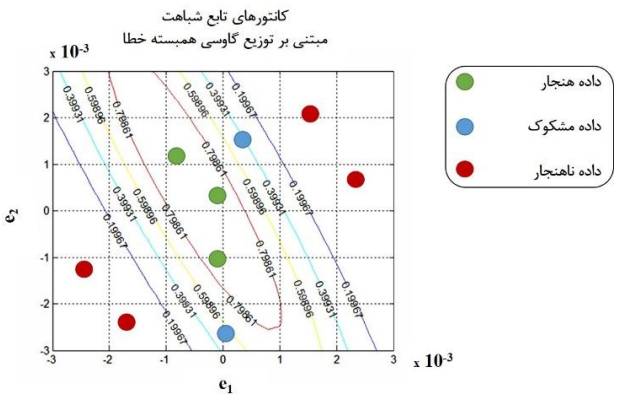
کواریانس عامل iام برای بردارهای خطا می‌باشد. در اینجا مبتنی بر فاصله ماهالانوبیس[1] به‌منظور در نظرگرفتن همبستگی ابعاد در شباهت‌سنجی، معیار شباهت زیر برای بردار خطای بازسازی تعریف می‌شود:

$$s_i(e_i) = \exp\left(-(\mathrm{e_i} - m_i)^T C_i^{-1}(\mathrm{e_i} - m_i)\right) \qquad (۱۰)$$

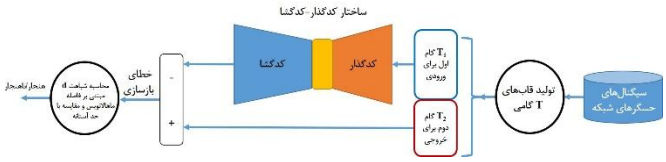
که s_i معیار شباهت است و مقداری در بازه [۰ ، ۱] دارد و هر چه بردار خطا ورودی به میانگین نزدیک‌تر باشد، مقداری نزدیک‌تر به ۱ دریافت می‌کند. برای تصمیم در مورد وجود ناهنجاری یک قاب این مقدار شباهت با یک حد آستانه از پیش تعریف شده مقایسه شده و در صورت بیشتر بودن شباهت از حد آستانه، داده هنجار و در غیراینصورت ناهنجار تلقی خواهد شد. شکل ۱۰ مفهوم نمونه‌های هنجار و ناهنجار در این روش را نمایش می‌دهد. همچنین شکل ۱۱ کلیت عملکرد هر عامل را نمایش می‌دهد.

اولین عامل دارای ساختار رمزگذار-رمزگشا مبتنی بر حافظه بلندکوتاه مدت می‌باشد. باتوجه به اینکه داده ورودی در قالب سری زمانی است، بکارگیری ساختار حافظه بلندکوتاه مدت عملکرد مناسبی در تخمین وابستگی‌های طولانی مدت و پیش‌بینی دنباله داده‌ها دارد. درنتیجه خاصیت‌های تحلیل زمانی، مکانی و سراسری محدودی بر پیش‌بینی داده‌ها اعمال می‌کند. در این ساختار داده‌ها با موارد پیش‌بینی شده مقایسه شده و درصورت عدم برابری رفتار ناهنجار گزارش می‌شود. عامل دوم مبتنی بر معماری تمام‌متصل است که بیشتر بر بررسی سراسری ویژگی‌ها متمرکز است. آخرین عامل، مبتنی بر ساختار پیچشی است (کدگذار پیچشی و کدگشای پیچشی ترانهاده) که مبتنی بر فیلترها، به بررسی محلی سیگنال‌های ورودی می‌پردازد.

به‌منظور شکل‌دهی رویکرد گروه‌محور پیشنهادی، نتایج بدست آمده از سه عامل تشخیص در واحد رای‌گیر مجتمع می‌شوند. رای‌گیر تعبیه‌شده نتایج را از عوامل تشخیص گرفته و وزن‌دهی می‌کند. وزن‌دهی به عوامل براساس پارامتر اطمینان مستخرج از معیار میانگین مربعات خطای یادگیری انجام می‌گیرد. پارامتر میانگین مربعات خطای یادگیری، معرف انحراف از معیار توزیع خطا می‌باشد که میزان پراکندگی خطا و عدم اطمینان روش را به‌خوبی نشان می‌دهد. بنابراین معکوس این معیار، شناسه مناسبی برای تعیین کارایی و اطمینان عامل‌های تشخیص می‌باشد که در روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱۰. مفهوم نمونه‌های هنجار و ناهنجار مبتنی بر رابطه شباهت پیشنهادی



شکل ۱۱. معماری هر یک از عوامل تشخیص

همانگونه که شرح داده شد، خروجی عوامل تشخیص ناهنجاری، نتیجه تحلیل و بررسی آن‌هاست که بازه تغییرات صفر تا یک دارد. واحد رای‌گیر در روش پیشنهادی از نوع مبتنی بر آستانه درنظر گرفته شده است. این واحد، نتایج ضرب شده در وزن اطمینان هریک از عوامل را جمع کرده و با آستانه از پیش تعیین شده مقایسه می‌کند. اگر نتیجه بدست آمده از آستانه بیشتر بود، ناهنجاری رخ داده است. سازوکار واحد رای‌گیر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y = \begin{cases} 0, & \sum w_i \times s_i < \theta \\ 1, & \sum w_i \times s_i \geq \theta \end{cases} \qquad (۱۱)$$

در این رابطه، Y خروجی واحد تشخیص است که یک بودن آن رخداد ناهنجاری را نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای w_i و s_i به‌ترتیب بیانگر وزن اطمینان و معیار شباهت بردار خطای بازسازی عوامل تشخیص طبق رابطه (۴) می‌باشند. پارامتر θ حد آستانه در نظر گرفته شده تصمیم برای رای‌گیر است که به‌صورت تجربی و در حین فرایند یادگیری عوامل تشخیص بدست می‌آید.

۵- نتایج

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی در کشف ناهنجاری، در این بخش تنظیمات محیط شبیه‌سازی، مجموعه داده مورد استفاده، تحلیل ویژگی‌ها و قابلیت‌های روش پیشنهادی و مقایسه با

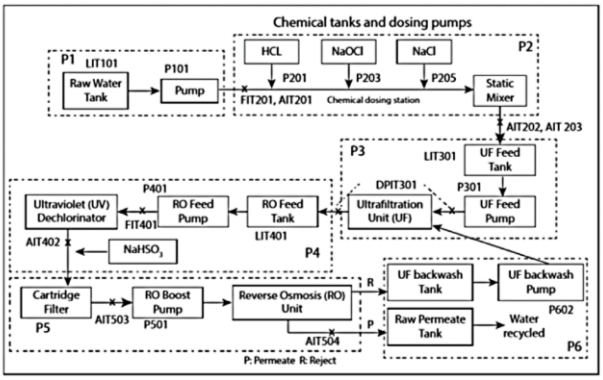
[1] Mahalanobis distance

رویکردهای پیشین مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است.

۵-۱- تنظیمات محیط آزمایش و مجموعه داده

روش پیشنهادی در زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شده و برای آموزش مدل‌های موازی آن از محیط Google Colab استفاده شده است. بستر آزمون یک سیستم پردازشی عام‌منظوره با پردازنده Intel Corei7 و حافظه 16GB بوده است که این پیکربندی در واحد کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده (SCADA) سامانه‌های کنترل صنعتی قابل دستیابی است. باتوجه به اهمیت مجموعه داده در مطالعات مبتنی بر یادگیری عمیق، جمع‌آوری حجم داده زیاد از سامانه‌های کنترل صنعتی مستلزم آلوده کردن آن‌ها با هدف مشخص نمودن الگوی ناهنجاری است که منجر به خسارات زیادی می‌شود. درنتیجه در پژوهش‌های این حیطه عموما از مجموعه داده‌هایی که در بستر آزمایشی با درنظر گرفتن ویژگی‌های محیط صنعتی واقعی ساخته شده‌اند استفاده می‌شود. در این پژوهش از مجموعه داده SWAT[1] که مربوط به سامانه کنترلی تصفیه آب می‌باشد استفاده شده است[۴۵]. این مجموعه داده از ۵۱ حسگر و محرکه موجود در سامانه کنترل تصفیه آب در طی ۱۱ روز جمع‌آوری شده است. نمونه‌های جمع‌آوری شده، شامل خروجی حسگرها و وضعیت محرکه‌ها می‌باشد. این نمونه‌ها در دو دسته عادی و ناهنجار طبقه‌بندی می‌شوند که ۱۱/۹٪ از آن‌ها مربوط به بخش ناهنجار است.

سامانه کنترلی و نظارت بر پردازه‌های کنترلی صنعت تصفیه آب هدف در این مجموعه داده، ۷ روز عملکرد عادی و ۴ روز وضعیت تحت حمله برای جمع‌آوری نمونه‌ها را داشته است. داده‌ها از شش فرایند ورودی آب خالص اولیه (P1)، گندزدایی شیمیایی(P2)، فرافیلترسازی (P3)، دکلره به‌کمک لامپ‌های فرابنفش (P4)، خالص‌سازی (P5) و فرافیلترسازی غشا و تمیزسازی (P6) تشکیل شده است. این سامانه مجهز به یک بخش سایبری است که ارتباطات، تعامل انسانی، PLCها، SCADA و تاریخچه داده را مدیریت می‌کند. در این پژوهش، سناریوهای حملات انجام شده بر روی فرایند P1 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این فرایند شامل ۵ حسگر و محرکه 'MV101'، 'P101'، 'P102'، 'LIT101' و 'FIT101' می‌باشد که دو مورد آخر حسگر هستند. شکل ۱۲ بستر سامانه هدف را براساس اجزای شرح داده شده نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. بستر آزمایش مجموعه داده SWAT [۴۵]

داده‌های هفت روز ابتدایی براساس رفتار هنجار سامانه است و در چهار روز بعدی ناهنجاری ناشی از ۴۱ نوع حمله لحاظ شده است. بر اساس بررسی داده حسگرها و با پیروی از پژوهش پیشین انجام شده در [۷،۴]، نمونه‌های اولیه مربوط به ۱۰۰،۰۰۰ گام اولیه حذف شده‌اند. این موارد مربوط به راه‌اندازی اولیه سامانه بوده و پایداری و قابلیت اتکای کافی را دارا نمی‌باشند. همچنین ۱۱ ویژگی که در طی زمان هیچ تغییراتی نداشته‌اند از روند یادگیری حذف شده‌اند. مجموعه داده مورد استفاده از دو بخش تشکیل شده است: ۱- ارتباطات عادی شبکه و ۲- ارتباطات تحت شرایط حملات. برای آموزش عامل‌های تشخیص از ارتباطات عادی شبکه استفاده شده است.

۵-۲- معیارهای ارزیابی

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی معیارهای متداول دسته‌بندی شامل «دقت[2]» و «فراخوانی[3]» مورد استفاده قرار می‌گیرند که به‌صورت روابط زیر قابل تعریف می‌باشند:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (۱۲)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۱۳)$$

که در این رابطه TP، تعداد مثب صحیح، FN تعداد منفی کاذب، TN تعداد منفی صحیح و FP تعداد مثبت کاذب است. همچنین رابطه امتیاز F_1 نیز برای تجمیع دو معیار فوق قابل تعریف است:

$$F_1 = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (۱۴)$$

همچنین معیار مورد استفاده برای آموزش شبکه‌های عصبی کدگذار-کدگشار (عامل‌های تشخیص) میانگین مجموع مربعات

[1] Secure Water Treatment

[2] Precision

[3] Recall

خطا می‌باشد که در رابطه زیر تعریف شده است:

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\|\bar{y}_k^* - \bar{y}_k\|_2^2 \quad (۱۵)$$

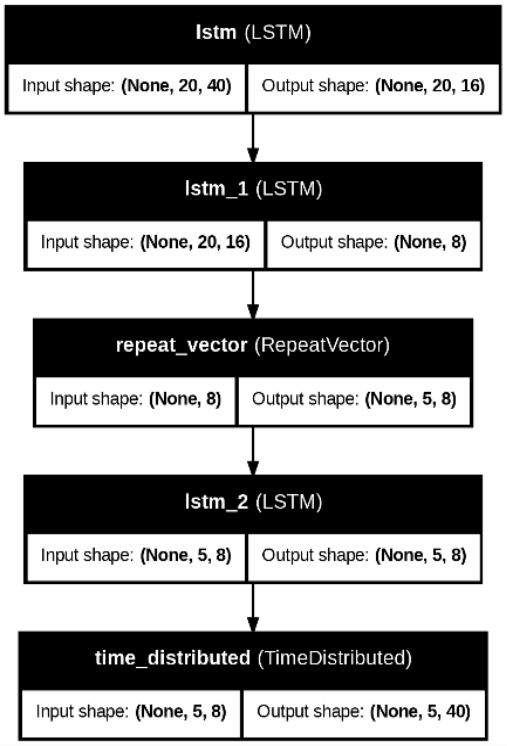
که در این رابطه N تعداد داده‌های آموزشی، $\bar{y}_k^*$ بردار خروجی مطلوب و $\bar{y}_k$ بردار خروجی شبکه عصبی می‌باشند.

۵-۳- آزمایشات و نتایج

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی و بررسی قابلیت‌های آن در کشف ناهنجاری حسگرها، در این بخش دو دسته آزمایش درنظر گرفته شده است. اولین آزمایش به بررسی کارایی عوامل تشخیص پیشنهادی و تاثیر تجمیع گروه‌محور آن‌ها می‌پردازد. در دومین آزمایش، کارایی رویکرد پیشنهادی با روش‌های پیشین مقایسه می‌گردد.

۵-۳-۱- بررسی کارایی روش پیشنهادی در کشف ناهنجاری

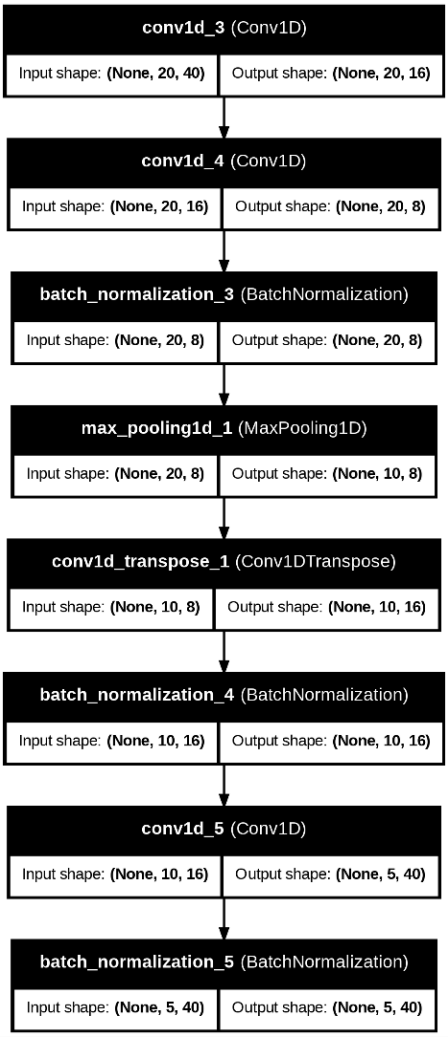
همانگونه که در بخش‌های پیشین شرح داده شد، روش کشف ناهنجاری پیشنهادی از ترکیبی گروه‌محور از سه عامل تشخیص می‌باشد. اولین عامل مبتنی بر ساختار عمیق حافظه بلندکوتاه مدت می‌باشد. شکل ۱۳ ساختار این عامل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. ساختار عامل تشخیص مبتنی بر حافظه کوتاه بلندمدت

همانگونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، ساختار عامل از دو بخش رمزگذار و رمزگشا با تعداد نورون محدود تشکیل شده است. در بخش رمزگذار، دولایه حافظه بلندکوتاه مدت ۱۶ و ۸ واحدی سیگنال ورودی ۴۰ بعدی در پنجره زمانی به طول ۲۰ را به فضای کد ۸ بعدی نگاشت می‌کنند. باتوجه به کمتر بودن طول پنجره خروجی (۵ واحد) بخش رمزگشا، صرفا از یک لایه ۸ واحدی به‌همراه لایه خروجی با ۴۰ نورون خطی تشکیل می‌شود.

عامل تشخیص دوم مبتنی بر یک کدگذار-کدگشای مبتنی بر لایه‌های پیچشی و ترانهاده پیچشی تشکیل شده است. این عامل در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. تابع فعالیت لایه‌های مختلف به‌غیر از لایه خروجی تابع فعالیت ReLU است. بین لایه‌های پیچشی از لایه هنجارسازی دسته[1] به‌منظور استانداردسازی خروجی لایه‌ها استفاده شده است.



شکل ۱۴. ساختار عامل تشخیص مبتنی بر شبکه‌عصبی پیچشی و ترانهاده پیچشی

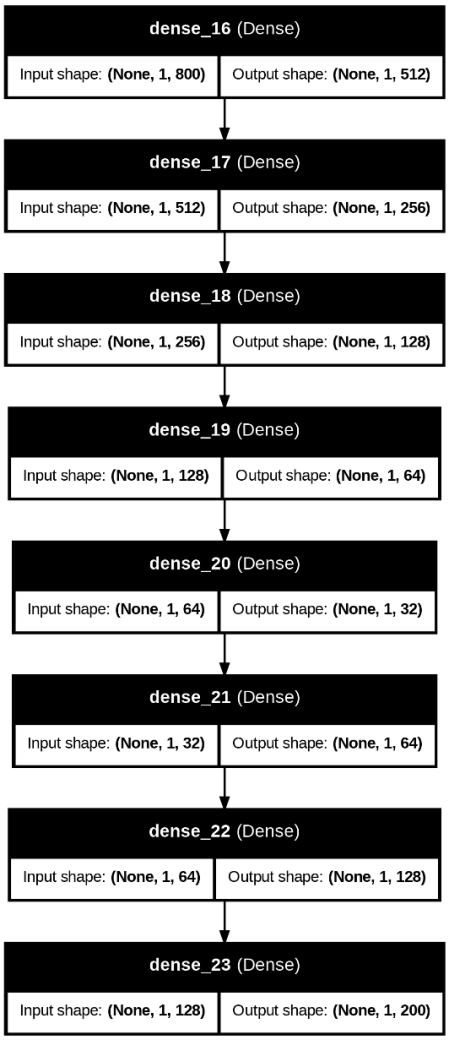
[1] Batch Normalization

نهایتاً شکل ۱۵ آخرین عامل تشخیص مبتنی بر ساختار تمام‌متصل را نمایش می‌دهد که ۲۰ واحد زمانی سیگنال ۴۰ بعدی را دریافت کرده و به یک بردار ویژگی ۸۰۰ بعدی تبدیل می‌کند. سپس بخش کدگذار، مبتنی بر لایه‌های تمام‌متصل با تابع فعالیت ReLU این بردار ۸۰۰بعدی را به فضای ویژگی ۳۲ بعدی در لایه گلوگاه می‌رساند. سپس بازسازی و پیش‌بینی ۵ واحد زمانی سیگنال ۴۰ بعدی (بردار ۲۰۰ بعدی) درخروجی انجام می‌شود. لایه خروجی مبتنی بر نورون‌های خطی است.

هر یک از روش‌های فوق با الگوریتم ADAM بر روی داده هنجار، آموزش داده می‌شوند. مشخصات فراپارامترهای یادگیری مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. پس از آموزش، برای هر یک از این رویکردها، آمارگان خطای بازسازی ۵ واحد زمانی مطابق با توضیحات ارائه‌شده در بخش ۴-۲-۲ در قالب یک توزیع گاوسی همبسته محاسبه می‌شود. برای تشخیص شباهت خطای بازسازی مطابق رابطه (۴) محاسبه شده و حد آستانه ۰٫۷ برای تشخیص به‌عنوان داده هنجار لحاظ می‌شود.

رویکرد گروه‌محور مبتنی بر استفاده از سامانه رأی‌گیر مشروح در بخش ۴-۲-۲ و رابطه (۵) استفاده می‌کند. مبتنی بر آموزش سه عامل تشخیص و RMSE آموزش هر روش، بردار وزن رابطه (۵) برای رأی‌گیر مطابق جدول ۲ خواهد بود.

جدول ۳ کارایی روش گروه‌محور پیشنهادی و سه عامل تشخیص (هریک به تنهایی) را با یکدیگر مقایسه می‌کند. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، روش گروه‌محور پیشنهادی تقریباً مزیت هر سه روش در کنار هم را دارد و دارای بالاترین مقدار دقت، فراخوانی و امتیاز F1 می‌باشد. به‌دلیل نامتوازن بودن مجموعه داده و اهمیت تشخیص صحیح رفتار ناهنجار، در مسئله هدف این پژوهش معیارهای فراخوانی و امتیاز F1 از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. بهبود این معیارها منجر به افزایش نرخ مثبت صحیح و حفظ تعادل آن با کاهش نرخ مثبت کاذب می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌های ناهنجار مختلف لزوماً توسط یک تحلیل قابل تشخیص نبوده و برخی بر اساس هم‌افزایی روش‌های مختلف با توجه به جوانب مختلف سیگنال، قابل تشخیص هستند.



شکل ۱۵. ساختار عامل تشخیص مبتنی بر شبکه‌عصبی تمام‌متصل

جدول ۱. فراپارامترهای آموزش

فراپارامتر	مقدار
معیار آموزش	MSE
نرخ یادگیری اولیه	۰٫۰۱
اندازه دسته (Batch)	۱۲۸
تعداد تکرار یادگیری	۴۰

جدول ۲. وزن‌های رأی‌گیر

وزن عامل	مقدار
حافظه بلند-کوتاه‌مدت	۲٫۳۹
پیچشی-ترانهاده پیچشی	۳٫۲۵
تمام‌متصل	۴٫۳۴

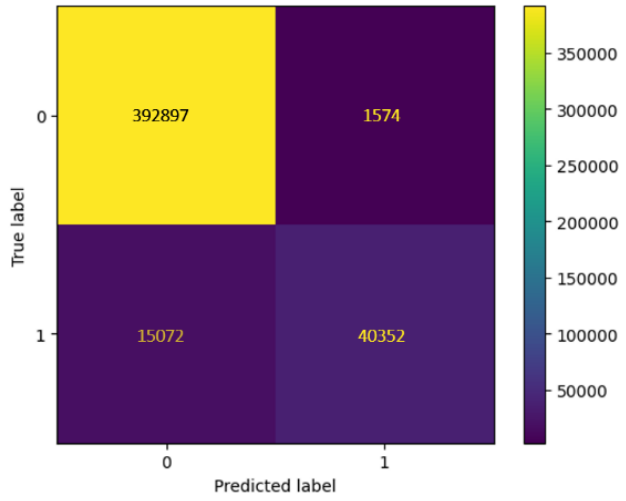
جدول ۳. مقایسه کارایی عامل‌های تشخیص بصورت مجزا و گروه محور

روش	دقت	فراخوانی	F1
پیچشی-ترانهاده پیچشی	۰٫۸۹	۰٫۶۸	۰٫۷۷
حافظه بلند-کوتاه‌مدت	۰٫۸۸	۰٫۶۵	۰٫۷۵
تمام‌متصل	۰٫۹۳	۰٫۶۵	۰٫۷۷
گروه‌محور	۰٫۹۶	۰٫۷۳	۰٫۸۳

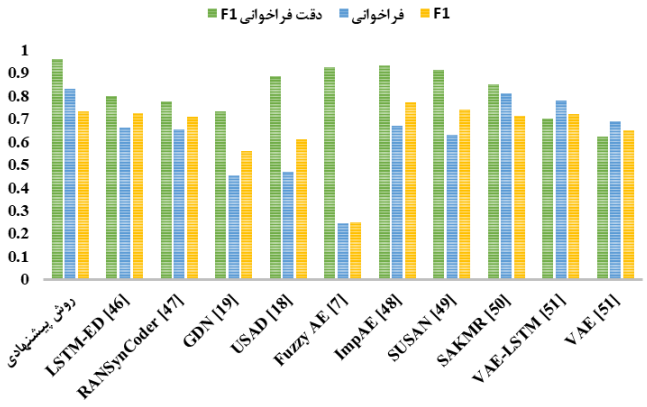
براساس نتایج ارائه شده، روش گروه‌محور پیشنهادی در این پژوهش معیارهای فراخوانی، امتیاز F1 و دقت را نسبت به روش‌های مجزای تشخیص به‌طور میانگین به‌اندازه ۱۰/۶٪، ۹/۷٪ و ۶/۷٪ بهبود داده است. همچنین به‌منظور بررسی جزئی‌تر روش پیشنهادی، ماتریس درهم‌ریختگی آن که دربرگیرنده تعداد تشخیص‌های مثبت و منفی کاذب و صحیح است در شکل ۱۶ نشان داده شده است که طبق آن، روش پیشنهادی عموم نمونه‌های هنجار را به‌درستی شناسایی کرده و در نمونه‌های ناهنجار عملکرد خوبی داشته است.

۵-۳-۲- مقایسه روش پیشنهادی با پژوهش‌های پیشین

به‌منظور ارزیابی قابلیت‌های روش پیشنهادی در کشف موثر ناهنجاری‌ها، عملکرد آن با پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، روش‌های کشف ناهنجاری مبتنی بر تحلیل سری زمانی در سامانه‌های کنترل صنعتی هدف قرار داده شد و موثرترین آن‌ها برای مقایسه انتخاب شد. به‌منظور مقایسه کارایی، از معیارهای دقت، فراخوانی و F1 استفاده شده است. روش‌های برگزیده LSTM-ED [۴۶]، RanSynCoder [۴۷]،GDN [۱۹]، USAD [۱۸] ، Fuzzy-ED [۷]، ImpAE [۴۸]، SUSAN [۴۹]، SAKMR [۵۰]، VAE و VAE-LSTM [۵۱] می‌باشند که همگی مبتنی بر یادگیری عمیق بدون نظارت ارائه شده‌اند. شکل ۱۷ نمودار مقایسه روش پیشنهادی با ۱۰ روش برگزیده پیشین را در معیارهای بیان‌شده نشان می‌دهد. همانگونه که این شکل نشان می‌دهد، روش پیشنهادی دقت، فراخوانی و امتیاز F1 بالاتری نسبت به سایر پژوهش‌ها دارد. علت این امر، درنظر گرفتن موازی تحلیل‌های گوناگون زمانی، مکانی، محلی و سراسری در روش پیشنهادی است. همچنین همبستگی بین ابعاد به‌خوبی در این روش منعکس شده است. سایر روش‌ها عموما از یک رویکرد تحلیلی بهره برده‌اند و خاصیت اجماع در آن‌ها دیده نشده است.



شکل ۱۶. ماتریس درهم‌ریختگی روش گروه‌محور پیشنهادی



شکل ۱۷. مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های پیشین

۶- جمع‌بندی و روال آتی

در این مقاله رویکرد خودنظارتی مبتنی بر یادگیری عمیق گروه‌محور به‌منظور کشف ناهنجاری در سامانه‌های کنترل صنعتی ارائه شد. سامانه‌های کنترل صنعتی شامل دستگاه‌ها، شبکه‌ها، سیستم‌ها و کنترل‌هایی است که برای بهره‌برداری فرآیندهای صنعتی استفاده می‌شوند. با پیشرفت فناوری و اتصال این سامانه‌ها به شبکه، حملات سایبرفیزیکی به‌عنوان یکی از آسیب‌پذیری‌های آنها مطرح است و رویکردهای کشف ناهنجاری با هدف مواجهه با این حملات در حین کار مطرح می‌شوند.

روش پیشنهادی در این مقاله، از دو مرحله پیش‌پردازش و تصمیم تشکیل شده است که در گام اول داده‌های خام حسگرها استانداردسازی و قاب‌بندی می‌شوند. در گام دوم، سه عامل تشخیص ناهنجاری مبتنی بر موثرترین رویکردهای یادگیری عمیق به‌صورت موازی بکارگرفته شده‌اند. این عامل‌ها با تکیه بر جنبه‌های گوناگون زمانی، مکانی، محلی و سراسری در فرایند پیش‌بینی دنباله، شباهت داده‌ها را با مقدار موردانتظار می‌سنجند و ناهنجار بودن آن را معین می‌کنند. عامل‌های لحاظ شده در روش پیشنهادی عامل‌های تشخیص ساختار یکپارچه رمزگذار رمزگشا دارند و از مدل‌های حافظه بلندکوتاه مدت، شبکه عصبی پیچشی و شبکه عصبی تمام‌متصل شکل داده شده‌اند. خروجی هر واحد تشخیص درجه هنجاربودن برای سیگنال ورودی بر مبنای تحلیل آماری خطای پیش‌بینی با استفاده از ساختار کدگذار-کدگشای خود و درنظر داشتن همبستگی زمانی-مکانی بین ویژگی‌ها می‌باشد. به‌منظور اجماع عوامل و استناج براساس آن‌ها،

نتایج عوامل تشخیص به یک رای‌گیر آستانه گیت وزن‌دار داده می‌شود که براساس قابلیت اطمینان هرواحد خروجی آن را در نتیجه نهایی تاثیر می‌دهد. واحد پیشنهادی در بخش تشخیص نفوذ سامانه کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده که قابلیت پردازشی مناسبی دارد بکارگرفته می‌شود.

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی، آزمایش‌های متعددی بر بستر سامانه کنترل صنعتی شبیه‌سازی شده تصفیه آب انجام شده است. در این آزمایش‌ها کارایی هریک از عوامل تشخیص و ترکیب گروه‌محور آن‌ها از نظر معیارهای دقت، فراخوانی و امتیاز F1 گزارش شده است. همچنین روش پیشنهادی با پنج پژوهش برگزیده پیشین که بهترین نتایج را داشته‌اند مقایسه شده است. طبق نتایج بدست آمده، روش پیشنهادی دقت روش‌های پیشین را به‌طور میانگین ۱۴٪ افزایش داده است. به‌عنوان روال آتی، اعمال یادگیری بر آستانه رای‌گیر و همچینن بکارگیری روش‌های یادگیری فعال در واحد تشخیص به‌منظور واردکردن بازخورد در تشخیص ناهنجاری پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[1] E. Knapp, Industrial Network Security: Securing critical infrastructure networks for smart grid, SCADA, and other Industrial Control Systems. Elsevier, 2024

[2] R. Radvanovsky and J. Brodsky, Handbook of SCADA. Boca Raton Crc Press, 2016.

[3] B. Zhu and S. Sastry, "Scada-specific intrusion detection/prevention systems: a survey and taxonomy," in Proceedings of the 1st Workshop on Secure Control Systems (SCS), 2010.

[4] B. Kim, M. Alawami, E. Kim, S. Oh, J. Park, H. Kim, "A comparative study of time series anomaly detection models for industrial control systems," *Sensors*, vol. *23*, p. 1310, January 2023.

[5] M. Nawrocki, M, T. Schmidt, M. Wählisch, "Uncovering Vulnerable Industrial Control Systems from the Internet Core," In Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Budapest, Hungary, 20–24 April 2020.

[6] A. Di Pinto, Y. Dragoni, A. Carcano, "The First ICS Cyber Attack on Safety Instrument Systems," In Proceedings of the Black Hat USA, Las Vegas, NV, USA, 4–9 August 2018.

[7] K. D. Gupta, K. Singhal, D. K. Sharma, N. Sharma, and S. J. Malebary, "Fuzzy Controller-empowered Autoencoder Framework for anomaly detection in Cyber Physical Systems," Computers & Electrical Engineering, vol. 108, p. 108685, May 2023.

[8] D. Pliatsios, P. Sarigiannidis, T. Lagkas, and A. Sarigiannidis, "A survey on SCADA systems: secure protocols, incidents, threats and tactics," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, pp.1942-1976, April 2020.

[9] Y. Yang, K. McLaughlin, T. Littler, S. Sezer, B. Pranggono, and H. Wang, "Intrusion detection system for IEC 60870-5-104 based scada networks," in Proceeding IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2013.

[10] S. Alem, D. Espes, L. Nana, E. Martin, F. De Lamotte, "A novel bi-anomaly-based intrusion detection system approach for industry 4.0," Future Generation Computer Systems, vol. 145, pp.267-283, August 2023.

[11] F. Skopik, I. Friedberg, and R. Fiedler, "Dealing with advanced persistent threats in smart grid ict networks," in Proceeding Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014.

[12] I. Friedberg, F. Skopik, G. Settanni, and R. Fiedler, "Combating advanced persistent threats: From network event correlation to incident detection," Computers & Security, vol. 48, pp. 35–57, 2015.

[13] F. Zhang, H. Kodituwakku, J. Hines, J. Coble, " Multilayer Data-Driven Cyber-Attack Detection System for Industrial Control Systems Based on Network, System, and Process Data," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, pp.4362-4369, January 2019.

[14] GR. MR, N. Somu, A. Mathur, "A Multilayer Perceptron Model for Anomaly Detection in Water Treatment Plants," International Journal of Critical Infrastructure Protection, vol. 31, p. 100393, December 2020.

[15] R. Khalil, N. Saeed, M. Masood, Y. Fard, M. Alouini, T. Al-Naffouri, "Deep learning in the industrial internet of things: Potentials, challenges, and emerging applications," IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, pp. 11016-11040, 2021.

[16] H. Mao, M. Alizadeh, I. Menache, S. Kandula, "Resource management with deep reinforcement learning," in Proceedings of the 15th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, 2016.

[17] Y. Lu, S. Chai, Y. Suo, F. Yao, C. Zhang, "Intrusion detection for Industrial Internet of Things based on deep learning," Neurocomputing, vol. 564, 2024.

[18] J. Audibert, P. Michiardi, F. Guyard, S. Marti, M. Zuluaga, "USAD: Unsupervised Anomaly Detection on Multivariate Time Series," In Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, 2020.

[19] A. Deng, B. Hooi, "Graph Neural Network-Based Anomaly Detection in Multivariate Time Series," In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2021.

[20] Z. Li, Y. Zhao, J. Han, Y. Su, R. Jiao, X. Wen, D. Pei, "Multivariate Time Series Anomaly Detection and Interpretation using Hierarchical Inter-Metric and Temporal Embedding," In Proceedings of the ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, 2021.

[21] A. Koay, R. Ko, H. Hettema, K. Radke, "Machine learning in industrial control system (ICS) security: current landscape, opportunities and challenges," Journal of Intelligent Information Systems, vol. 60, pp. 377-405, 2023.

[22] M. Nankya, R. Chataut, R. Akl, "Securing industrial control systems: components, cyber threats, and machine learning-driven defense strategies," Sensors, vol. 23, p. 8840, 2023.

[23] L. Yuan, X. Ya, C. Long, P. Guojun, Y. Danfeng "Deep Learning-Based Anomaly Detection in Cyber-Physical Systems: Progress and Opportunities," ACM Computing Surveys, vol. 54, pp. 1-36, 2021.

[24] W. Hilal, S. Gadsden, J. Yawney, "Financial fraud: a review of anomaly detection techniques and recent advances," Expert systems With applications, vol. 193, p. 116429, 2022.

[25] A. Sgueglia, A. Sorbo, C. Visaggio, G. Canfora, 'A systematic literature review of IoT time series anomaly detection solutions,' Future Generation Computer Systems, Vol. 134, PP. 170-186, 2022.

[26] A.Cook, G. Mısırlı, Z. Fan, "Anomaly Detection for IoT Time-Series Data: A Survey," IEEE Internet of Things Journal, December 2019.

[27] L. Erhan, M. Ndubuaku, M. Di Mauro, W. Song, M. Chen, G. Fortino, O. Bagdasar, A. Liotta, 'Smart anomaly detection in sensor systems: A multi-perspective review', Information Fusion,2020.

[28] A. Blázquez-García, A. Conde, U. Mori, J. Lozano, "A review on outlier/anomaly detection in time series data," ACM computing surveys (CSUR), vol. 54, pp. 1-33, 2021.

[29] M. Van Onsem, D. De Paepe, S. Hautte, P. Bonte, V. Ledoux, A. Lejon, S. Van Hoecke, "Hierarchical pattern matching for anomaly detection in time series," Computer Communications, vol. 193, pp. 75-81, 2022.

[42] E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag, M. Gidlund, “Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions,” IEEE transactions on industrial informatics, vol. 14, pp. 4724-4734, 2018.

[43] J. Yu, H. Yin, X. Xia, T. Chen, J. Li and Z. Huang, "Self-Supervised Learning for Recommender Systems: A Survey," in *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 36, pp. 335-355, Jan. 2024.

[44] J. Gui, T. Chen, J. Zhang, Q. Cao, Z. Sun, H. Luo, D. Tao, “A Survey on Self-supervised Learning: Algorithms, Applications, and Future Trends,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, June 2024.

[45] A. Mathur, N. Tippenhauer, “SWaT: A Water Treatment Testbed for Research and Training on ICS Security,” In Proceedings of the International Workshop on Cyber-Physical Systems for Smart Water Networks, 2016.

[46] M, Macas, W. Chunming, “Enhanced Cyber-Physical Security through Deep Learning Techniques,” In Proceedings of the CPS Summer School PhD Workshop, 2019.

[47] A. Abdulaal, Z. Liu, T. Lancewicki, “ Practical Approach to Asynchronous Multivariate Time Series Anomaly Detection and Localization,” In Proceedings of the ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, 2021.

[48] M. Aslam, A. Tufail, L. Chandratilak De Silva, R. Anna Awg Haji Mohd Apong, A. Namoun. "An improved autoencoder-based approach for anomaly detection in industrial control systems." Systems Science & Control Engineering, vol. 12, 2024.

[49] A. Gómez, L. Fernández Maimó, A. Huertas Celdrán, F. García Clemente. "SUSAN: A Deep Learning based anomaly detection framework for sustainable industry," Sustainable Computing: Informatics and Systems, vol. 37, 2023.

[50] S. Tang, Y. Ding, M. Zhao, H. Wang, "SAKMR: Industrial control anomaly detection based on semi-supervised hybrid deep learning," Peer-to-Peer Networking and Applications, vol. 17, 2024.

[51] L. Pinto, L. Herrera, Y. Donoso, J. Gutierrez. "Enhancing Critical Infrastructure Security: Unsupervised Learning Approaches for Anomaly Detection." International Journal of Computational Intelligence Systems, vol. 17, 2024.

[30] C. Feng, T. Li and D. Chana, "Multi-level Anomaly Detection in Industrial Control Systems via Package Signatures and LSTM Networks," 2017 47th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), 2017.

[31] Y. Lai, J. Zhang, and Z. Liu, “Industrial Anomaly Detection and Attack Classification Method Based on Convolutional Neural Network,” Security and Communication Networks, vol. 2019, pp. 1–11, Sep. 2019.

[32] M. Kravchik and A. Shabtai, “Detecting Cyber Attacks in Industrial Control Systems Using Convolutional Neural Networks,” Proceedings of the 2018 Workshop on Cyber-Physical Systems Security and PrivaCy, 2018.

[33] A. Abdi, A. Ghasemi-Tabar, "ARAD: Automated and Real-Time Anomaly Detection in Sensors of Autonomous Vehicles Through a Lightweight Supervised Learning Approach," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 90432-90441, 2024

[34] L. Yuan, X. Ya, C. Long, P. Guojun, Y. Danfeng “Deep Learning-Based Anomaly Detection in Cyber-Physical Systems: Progress and Opportunities,” ACM Computing Surveys, vol. 54, pp. 1-36, 2021.

[35] Y. Wu, H. Dai, H. Tang, H, “Graph neural networks for anomaly detection in industrial internet of things,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, pp. 9214-9231, 2021.

[36] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, “Deep Learning,” Nature, vol. 521, pp. 436-444, 2015.

[37] A. Géron, Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. “O’Reilly Media, Inc.,” 2022.

[38] H. Mao, M. Alizadeh, I. Menache, S. Kandula, “Resource management with deep reinforcement learning,” in Proceedings of the 15th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. ACM, 2016, pp. 50-56.

[39] Y. Lu, S. Chai, Y. Suo, F. Yao, C. Zhang, “Intrusion detection for Industrial Internet of Things based on deep learning,” Neurocomputing, vol. 564, 2024.

[40] Y. LeCun, Generalization and network design strategies, Technical Report, CRG-TR-89-4, University of Toronto, 1989.

[41] M.T. Jones, A beginner’s guide to artificial intelligence, machine learning, and cognitive computing, Technical Report, IBM, 2017.

ITRC
ICT Research Institute
(Iran Telecommunication Research Center)

Journal of Information and Communication Technology

Iranian Society of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 87-101

Message Transfer Protocol Between Social Messengers

Hamzeh Sezavar[1], Hamed Monkaresi[1, 2*], Hassan Nikaein[3], Mehdi Mozaffari [2]

[1] Department of Computer Engineering and Information Technology, Razi University, Kermanshah, Iran
[2] Information Technology Organization of Iran, Tehran, Iran
[3] Department of Computer Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Received: 08 April 2025, Revised: 25 September 2025, Accepted: 27 September 2025
Paper type: Research

Abstract

The proliferation of social networking platforms has fundamentally transformed the way we communicate. The sheer number of these networks and the diversity of services they offer have led individuals to register on one or more platforms according to their personal preferences. However, this dispersion has made it difficult to interact with users of other social networks, forcing individuals to maintain accounts on multiple services merely to preserve connections with different social circles. This paper introduces a web-based protocol designed to enable seamless, unified message exchange across heterogeneous social networks, thereby eliminating the need for users to juggle multiple messaging applications. The proposed system supports both channels and groups and fosters interoperability among disparate platforms. European Union legislation governing social networks with over 45 million monthly users underscores the urgent need for such a solution to facilitate cross-platform messaging. As a few global networks have grown so dominant that they effectively stifle competition, our approach offers a means for emerging social platforms to compete on a level playing field, ultimately enhancing user experience while safeguarding privacy. In this study, the protocol was ultimately implemented across five popular messaging platforms in Iran, which collectively boast over 40 million monthly active users. Within less than three months of implementation, more than 1.5 million users had established communication with one another through different messaging applications using this protocol.

Keywords: Message Exchange Protocol, Interoperability, Social Messengers, Security, Privacy.

* Corresponding Author's email: h.monkaresi@razi.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۸۷ الی ۱۰۱

ارائه‌ی یک پروتکل تبادل پیام بین پیام‌رسان‌های اجتماعی

حمزه سزاوار[۱]، حامد منکرسی[۱،۲*]، حسن نیک آیین[۳]، مهدی مظفری[۲]

[۱] گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

[۲] سازمان فناوری اطلاعات ایران، تهران، ایران

[۳] گروه مهندس کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

گسترش شبکه‌های اجتماعی، منجر به یک تحول اساسی در ارتباطات شده‌است .فراوانی این شبکه‌ها و تنوع سرویس‌هایی که به کاربران خود ارائه می‌هند، باعث شده تا اشخاص مطابق سلیقه و صلاحدید خود، در یک یا چند مورد از آن‌ها ثبت‌نام کنند؛ همین موضوع سبب شده تا ارتباط با اشخاصی که از شبکه‌های اجتماعی دیگری استفاده می‌کنند مشکل شود و جهت حفظ ارتباط با گروه‌های مختلف، کاربران را ملزم به ثبت‌نام در چندین پلتفرم، کرده‌است. این تحقیق، یک پروتکل مبتنی‌بر وب را معرفی می‌کند که باهدف تسهیل تبادل پیام یکپارچه بین شبکه‌های اجتماعی متفاوت، طراحی شده‌است و درنتیجه نیاز کاربران به نگه‌داری چندین پیام‌رسان را از بین می‌برد .این سیستم پیشنهادی، از کانال‌ها و گروه‌ها پیشتیبانی می‌کند و درعین‌حال، قابلیت همکاری بین شبکه‌های اجتماعی مختلف را ممکن می‌سازد. قانون اتحادیه‌اروپا، بر ضرورت چنین راه‌حلی برای شبکه‌های اجتماعی با بیش از ماهانه ۴۵ میلیون کاربر، جهت پشتیبانی از ارتباطات بین پیام‌رسانی، تاکید می‌کند؛ چرا که درحال‌حاضر، برخی از شبکه‌های اجتماعی جهانی، به حدی گسترش یافته‌اند که عملاً امکان رقابت در این حوزه را از بین برده‌اند. این تحقیق یک راه حل مناسب برای محدودیت‌های فعلی قابلیت همکاری شبکه‌های اجتماعی، بهبود تجربه کاربری و حفظ حریم خصوصی ارائه می‌دهد. پروتکل معرفی شده در این مقاله در نهایت توسط ۵ پیام رسان محبوب در ایران که در مجموع بیش از ۴۰ میلیون کاربر فعال ماهانه دارند پیاده سازی شده و در کمتر از ۳ ماه پس از پیاده‌سازی، بیش از ۱،۵ میلیون کاربر با استفاده از این پروتکل از طریق پیام‌رسان‌های متفاوت با یکدیگر ارتباط برقرار کرده‌اند.

کلیدواژگان: تبادل پیام بین شبکه‌های اجتماعی، قابلیت همکاری، پیام‌رسان اجتماعی، امنیت، حریم خصوصی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: h.monkaresi@razi.ac.ir

۱- مقدمه

انسان‌ها همواره به‌دنبال راه‌حل‌هایی برای ارتباط و انتقال پیام به یک‌دیگر هستند و در جهت افزایش فراوانی، دردسترس بودن وکاهش هزینه و... این راه‌های ارتباطی می‌کوشند. اینترنت و دنیای دیجیتال، تحولی عظیم در زمینه ارتباط و انتقال پیام ایجاد کرد و با ظهور شبکه‌های اجتماعی، این تحول به اوج خود رسید. شبکه‌های اجتماعی، یکی از پرمخاطب‌ترین سرویس‌های اینترنتی به‌شمار می‌روند. امروزه شبکه‌های اجتماعی، در ذهن ما، به اولین راه ارتباطی با دوستان ، آشنایان ، همکاران و... تبدیل شده‌است.

تا ماه جولای ۲۰۲۳، حدود ۵,۱۹ میلیارد کاربر اینترنت در سراسر جهان وجودداشت که ۶۴,۶ درصد از جمعیت جهان را تشکیل می‌داد[۱]. تا سال ۲۰۲۳، حدود ۴,۹ میلیارد نفر (۶۰ درصد از جمعیت جهان)، در سراسر جهان از رسانه‌های اجتماعی استفاده می‌کنند. انتظار می‌رود تعداد کاربران رسانه‌های اجتماعی در سراسر جهان تا سال ۲۰۲۷، به ۵,۸۵ میلیارد کاربر افزایش یابد[۲]. کاربران به‌طور متوسط، هر ماه در شش تا هفت پلتفرم فعال هستند[۳]. پرکاربردترین پلتفرم رسانه اجتماعی در جهان، فیس‌بوک با ۲,۹ میلیارد کاربر فعال ماهانه است[۳][۴].

امروزه برخی از شبکه‌های اجتماعیِ خاص، رشد بسیاری کرده‌اند و به غول‌هایی در این حوزه تبدیل شده‌اند؛ این شبکه‌های اجتماعی، با توجه به اینکه دارای منابع و سرورهای بسیار قدرتمندی هستند، عملاً امکان رقابت در این حوزه را از بین برده‌اند، حتی اگر یک شبکه اجتماعی جدیدی ایجاد شود که امکانات بیشتری را نسبت به این شبکه‌های اجتماعی خاص ارائه دهد ، و یا امکاناتی را عرضه کند که از دید برخی از کاربران مناسب و بهتر به نظر برسد. کاربر علی‌رغم میل‌باطنی خود، به‌دلیل عدم‌حضور دیگر مخاطبین که به‌طور روزمره با آن‌ها در ارتباط است، مجبور به مهاجرت به شبکه اجتماعی می‌شود که بیشتر مخاطبین مورد نظرش در آن حضور دارند. همچنین وضعیت موجود باعث شده‌است تا مصرف پهنای‌باند اینترنت کاربران، به علت نصب پیام‌رسان‌های متعدد افزایش پیداکند و گوشی‌های هوشمند کاربران، به علت نصب پیام‌رسان‌های متعدد، (افزایش سرویس‌های پس‌زمینه و مصرف حافظه اصلی و کاهش عمر باتری) کند شوند. این مسائل به یک چالش در اتحادیه‌اروپا تبدیل شده‌است. شورای قانون‌گذاری اتحادیه‌اروپا، برای بهبود این شرایط، با تصویب یک قانون، شبکه‌های اجتماعی را که ماهانه دارای بیش از ۴۵ میلیون استفاده‌کننده هستند، ملزم به ایجاد زمینه ارتباط و انتقال و دریافت پیام با سایر شبکه‌های اجتماعی کرده‌است[۶][۷].

در این پژوهش، یک پروتکل تبادل پیام بین شبکه‌های اجتماعی مبتنی‌بر وب را ارائه می‌گردد که می‌تواند با فراهم کردن امکان تبادل پیام بین پیام‌رسان‌های مختلف زمینه رقابت و رشد پیام‌رسان‌های نوظهور را فراهم آورد و همچنین وضعیت موجود و تجربه کاربری کاربران شبکه‌های اجتماعی استفاده‌کننده از راه‌حل پیشنهادی را ، بهبود بخشد.

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش، به بررسی تحقیقات و طرح‌های پیشین دیگر پژوهشگران در زمینه انتقال پیام پرداخته می‌شود.

ری فلین[۸] در این گزارش رسمی که توسط شرکت اوپن‌مایند[1] منتشر شده‌است، طرحی را برای ایجاد یک هاب [2] RCS، معرفی کرده‌است. در RCS، هر اپراتور باید از طریق I-SBC[3] توسط یک ارتباط [4] NNI به اپراتور دیگر وصل‌شود.

هاب‌های RCS به‌طور ایده‌آل می‌توانند با ارائه دروازه‌های WebRTC[5] برای توسعه دسترسی RCS به VoIP[6] و ویدیو برای مرورگرهای وب استفاده‌شوند. درنهایت، رابط‌های مرکز پیام کوتاه[7] و مرکز سرویس پیام چندرسانه‌ای[8] در هاب RCS، امکان ارتباط متقابل با سرویس پیام‌کوتاه و سرویس پیام چندرسانه‌ای را فراهم می‌کنند.

پروتکل ماتریکس [۹]،یک استاندارد باز برای ارتباط متقابل، غیرمتمرکز و بلادرنگ از طریق IP است. از این پروتکل می‌توان برای تقویت پیام‌رسانی فوری، VoIP/WebRTC، ارتباطات اینترنت اشیا و یا هرجایی که به یک واسط برنامه‌نویسی کاربردی (API[9]) استاندارد HTTP[10] برای انتشار و اشتراک داده‌ها نیاز است، بهره برد. پروتکل ماتریکس، استانداردی را تعریف می‌کند و و در ادامه امکاناتی همچون پیاده‌سازی منبع باز سرورهای سازگار با پروتکل ماتریکس،

[1] openmind
[2] Rich Communication Services
[3] Interconnect Session Border Controller
[4] Network-Network Interface
[5] Web Real-Time Communication
[6] Voice over IP
[7] Short Message service center
[8] Multimedia Messaging Service center
[9] Application Programming Interface
[10] Hypertext Transfer Protocol

بسته توسعه نرم افزار سمت کاربر[1] و خدمات کاربردی[2] را به‌منظور کمک به ایجاد راه‌حل‌های ارتباطی جدید و یا گسترش قابلیت‌ها و دسترسی به راه‌حل‌های موجود، ارائه می‌دهد. هدف اولیه ماتریس، رفع مشکل پراکنده ارتباطات IP است، به بیان ساده‌تر، اجازه دادن به کاربران برای پیام دادن و تماس با یکدیگر بدون توجه به اینکه کاربر دیگر در چه برنامه‌ای حضور دارد.

جولیان اسپاربر[۱۰] یک سیستم پیشنهادی از نرم افزار Matrix را برای انتقال پیام بین کاربران مورداستفاده قرار می‌دهد و رمزگذاری پیام را از طریق قرارداد هوشمند و زنجیره بلوکی اتریوم پیاده‌سازی می‌کند. در این طرح، سیستم ایجاد شده از یک شبکه اتریوم برای ذخیره کلیدهای عمومی و خصوصی استفاده می‌کند. به طور خاص، کلیدها با استفاده از فناوری هسته OpenEthereum به نام Secret Store ذخیره می‌شوند. به کمک قرارداد هوشمندی که به عنوان قرارداد مجوز استفاده می‌شود، سیستم با یک فرآیند کنترل دسترسی پیشرفته، امکان دسترسی‌دادن یا لغو دسترسی به یک پیام را فراهم می‌کند. Secret Store از تعدادی گره اتریوم تشکیل شده‌است. در این طرح، هر کاربری که می‌خواهد از این سیستم رمزگذاری سرتاسری استفاده‌کند، نیازمند دسترسی به گره OpenEthereum است و برای این‌کار باید یک حساب اتریوم ایجاد کند.

بررسی نقاط و ضعف طرح‌های پیشین:

- پروتکل RCS:
  - نقاط قوت: امکان تعامل‌پذیری بین اپراتورها و ارائه خدمات اضافی مانند WebRTC.
  - نقاط ضعف: وابستگی شدید به اپراتورهای متمرکز و عدم ارائه معماری کاملاً غیرمتمرکز.
- پروتکل ماتریکس:
  - نقاط قوت: طراحی غیرمتمرکز، استاندارد باز و قابلیت استفاده در حوزه‌های مختلف (پیام‌رسانی، VoIP، IoT).
  - نقاط ضعف: چالش‌هایی در مقیاس‌پذیری در برخی موارد استفاده خاص.
- سیستم جولیان اسپاربر (رمزگذاری مبتنی بر زنجیره بلوکی):
  - نقاط قوت: استفاده از فناوری زنجیره بلوکی برای ذخیره کلیدهای رمزنگاری و پیاده‌سازی فرآیندهای پیشرفته دسترسی.
  - نقاط ضعف: وابستگی به حساب اتریوم و شبکه‌های زنجیره بلوکی که ممکن است منجر به افزایش هزینه‌ها یا محدودیت‌های مقیاس‌پذیری شود

جدول ۱ به بررسی و مقایسه استانداردهای موجود در حوزه تبادل پیام و مقایسه با پروتکل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۳- قانون بازارهای دیجیتال اتحادیه اروپا

قانون بازارهای دیجیتال (DMA)[۱۱]، یکی از قوانین اتحادیه اروپا است که هدف آن عادلانه‌تر کردن اقتصاد دیجیتال و رقابت‌پذیرتر کردن شرایط است. این قانون در ۱ نوامبر ۲۰۲۲ لازم الاجرا شد و در بیشتر موارد در ۲ مه ۲۰۲۳ به مرحله اجرا رسید[۱۲][۱۳]. هدف DMA، تضمین درجه بالاتری از رقابت در بازارهای دیجیتال اروپا، ازطریق جلوگیری از سوءاستفاده شرکت‌های بزرگ از قدرت خود در بازار و اجازه‌دادن به بازیگران جدید برای ورود به بازار است[۱۴]. این قانون، بزرگترین پلتفرم‌های دیجیتال فعال در اتحادیه اروپا را مورد هدف قرار می‌دهد. پلتفرم‌ها به دلیل موقعیت پایداری که در برخی از بخش‌های دیجیتال بازار دارند و به دلیل دارا بودن معیارهای خاص مربوط به تعداد کاربران، گردش مالی آنها یا سرمایه‌گذاری، به عنوان دروازه‌بان[3] شناخته می‌شوند [۱۵][۱۶][۱۷].

جدول ۱. بررسی استانداردهای موجود در حوزه تبادل پیام و مقایسه با پروتکل پیشنهادی

ویژگی/استاندارد	XMPP	SIP	Signal	Matrix	پروتکل پیشنهادی
رمزنگاری سرتاسری	اختیاری	ندارد	دارد	دارد	بهبود یافته (AES-256-GCM + RSA-4096)
معماری	متمرکز	متمرکز	نیمه-متمرکز	غیرمتمرکز	هیبرید (متمرکز برای تبادل، غیرمتمرکز برای احراز هویت)
پشتیبانی از چندرسانه‌ای	محدود	کامل	محدود	کامل	کامل + بهینه‌سازی ترافیک
تایید هویت دوطرفه	دارد	ندارد	دارد	دارد	دارد(هویت پیام رسان دیگر تایید می شود.)
تحمل خطا	متوسط	بالا	پایین	متوسط	متوسط

[1] Client Software Development Kit

[2] Application Services

[3] Gatekeepers

بیست و دو سرویس در شش شرکت (که دروازه‌بان تلقی می‌شوند) آلفابت، آمازون، اپل، بایت‌دنس، متا و مایکروسافت در سپتامبر ۲۰۲۳ توسط اتحادیه اروپا به عنوان سرویس پلتفرم‌های اصلی[1] شناسایی شدند[۱۸]. این شرکت‌ها تا ۶ مارس ۲۰۲۴ فرصت داشتند تا از تمام بندهای این قانون، پیروی کنند[۱۹]. یکی از بندهای این قانون، شامل ممنوعیت ترکیب داده‌های جمع‌آوری‌شده از دو سرویس مختلف متعلق به یک شرکت است (به عنوان مثال، در مورد متا، شبکه اجتماعی فیس‌بوک و پلتفرم ارتباطی آن WhatsApp مجاز به استفاده از داده‌های یکدیگر نیستند.)؛ [۲۰] در این قانون، مقرراتی برای حفاظت از تجارت پلتفرم‌های کاربران (از جمله تبلیغ‌کنندگان و ناشران) وجود دارد؛ این قانون در برابر روش‌های خودترجیحیِ پلتفرم‌ها برای تبلیغ محصولاتشان (مانند نتایج ترجیحی برای محصولات یا خدمات Google هنگام استفاده از موتور جستجوی Google) قرار دارد[۲۱]. مقررات مربوط به شیوه‌های بسته‌بندی و مقرراتی برای اطمینان از قابلیت همکاری، قابلیت دسترسی و انتقال داده برای مشاغل و کاربران نهایی پلتفرم‌ها[۶]، بخش‌های دیگر این قانون هستند. عدم رعایت این قوانین، می‌تواند منجر به جریمه تا ۱۰ درصد گردش مالی جهانی شرکت شود[۱۶][۱۷].

۴- وضعیت کنونی پیام‌رسان‌های جهانی

در این بخش، به بررسی آخرین وضعیت پیام‌رسان‌های بزرگ جهانی که مشمول قانون بازارهای دیجیتال اتحادیه اروپا می‌شوند خواهیم پرداخت. جدول ۲ آخرین وضعیت هر پیام‌رسان را در پیاده‌سازی قابلیت ارسال و دریافت پیام بین پیام‌رسانی نمایش می‌دهد.

جدول ۲. وضع پیاده‌سازی قابلیت ارسال و دریافت پیام بین پیام‌رسانی

پلتفرم‌های پیام‌رسان	قابلیت ارسال و دریافت پیام بین پیام رسانی
WhatsApp	تا حدی پیاده‌سازی شده‌است. ارسال و دریافت پیام کاربر به کاربر در پلتفرم‌های دیگر (به عنوان مثال، اینستاگرام، مسنجر) در اکوسیستم متا پشتیبانی شده‌است[۲۲][۲۳].
Messenger	تا حدی پیاده‌سازی شده است. مشابه واتس‌اپ، امکان ارسال و دریافت پیام کاربر به کاربر، در سایر پلتفرم‌های متا فراهم شده‌است[۲۲][۲۳].
Instagram	تا حدی پیاده‌سازی شده‌است. امکان ارسال و دریافت پیام کاربر به کاربر در سایر پلتفرم‌های متا فراهم شده‌است[۲۲][۲۳].
Signal	در حال پیاده‌سازی[۲۴][۲۵]
Telegram	در حال پیاده‌سازی[۲۶][۲۷]
Threema	در حال پیاده‌سازی[۲۸]

۵- طرح پیشنهادی

این بخش به بررسی بخش‌های مختلف طرح پیشنهادی می‌پردازد.

۵-۱- موجودیت‌ها

طرح پیشنهادی، از موجودیت‌هایی تشکیل شده‌است که ابتدا به معرفی آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۵-۱-۱- پیام‌رسان

موجودیت پیام‌رسان، برای ثبت پیام‌رسان‌های موجود و به اشتراک‌گذاشتن اطلاعات عمومی آن‌ها با سایر پیام‌رسان‌ها است. پیام‌رسان شامل فیلدهای زیر می‌باشد:

id: شناسه یکتای پیام‌رسان که توسط متپ (مرکز تبادل پیام) در هنگام ایجاد پیام‌رسان تولید می‌گردد و به آن اختصاص می‌یابد.

Name: نام پیام‌رسان که یک رشته با حداکثر ۳۲ کاراکتر است.

server_url: آدرس پایه‌ی سرور پیام‌رسان می‌باشد، که سایر آدرس‌ها بر روی این آدرس تعریف شده‌اند.

sender_url: این آدرس endpoint پیام‌رسان است که پیام‌های سایر پیام‌رسان‌ها، به این آدرس ارسال می‌گردد. این آدرس در حالتی استفاده می‌شود که پیام‌رسان نیازمند ارسال داده توسط سرور متپ باشد و در صورتی که خود پیام‌رسان از سرور متپ داده‌ها را استخراج کند، این آدرس تعریف نمی‌گردد.

receiver_url: آدرس endpoint پیام‌رسان است که پیام‌های خود برای سایر پیام‌رسان‌هارا در این آدرس ارائه می‌دهد. این آدرس در حالتی است که پیام‌رسان نیازمند دریافت داده توسط سرور متپ باشد و در صورتی که خود، به سرور متپ داده‌ها را ارسال کند، این آدرس تعریف نمی‌گردد.

public_key_url: آدرس کلید عمومی پیام‌رسان است که بایستی بر روی دامنه‌ی خودِ پیام‌رسان، میزبانی شده باشد. کلید عمومی، باید یک کلید RSA با طول ۴۰۹۶ بیت باشد که با فرمت PEM ذخیره شده‌است.

file_size_limit: حداکثر اندازه فایلی است که این پیام‌رسان قابلیت دریافت آن‌را دارد (بر اساس بایت).

secret_key: کلید امن پیام‌رسان که برای ارتباط با متپ از آن

[1] Core Platforms Services

استفاده می‌کند. این کلید با فرمت base۶۴ ذخیره شده‌است.

۵-۱-۲- کاربر

موجودیت کاربر، نماینده وجود یک کاربر در متپ می‌باشد. در صورتی که کاربر، حساب کاربری خود را در پیام‌رسان حذف نمود، پیام‌رسان نیز بایستی نسبت به حذف کاربر از متپ اقدام نماید و درصورتی که کاربر فقط نسبت به غیرفعال‌سازی متپ اقدام نمود، پیام‌رسان بایستی نسبت به غیرفعال‌سازی کاربر در متپ اقدام نموده و از پاک کردن کاربر خودداری نماید. این موجودیت دارای فیلدهای شناسه، شماره‌تلفن متعلق به حساب کاربری، شناسه پیام‌رسانِ ثبت‌کننده کاربر، نام نمایشی کاربر و تصویر نمایه کاربر است.

۵-۱-۳- پیام

از پیام، به منظور ارسال یک پیام از یک کاربر به کاربر دیگر و همچنین برای ارسال خطا /ویرایش /حذف /خوانده‌شدن و... بین سرورهای پیام‌رسان‌ها استفاده می‌گردد. پیام از فیلدهای زیر تشکیل شده‌است.

Id: یک شناسه عددی ۸ بایتی یکتای پیام که توسط متپ در هنگام ایجاد پیام تولید می‌شود.

sender_id: شناسه کاربر فرستنده پیام؛ در هر حالتی این شناسه الزاما بایستی متعلق به پیام‌رسان فرستنده باشد. در صورتی که این پیام، به یک تغییر در اطلاعات گروه/ کانال مربوط باشد، این فیلد شناسه کاربر ایجاد کننده تغییر می‌یابد.

receiver_id: شناسه کاربر /گروه /کانال گیرنده پیام است. سرویس متپ بر اساس این شناسه، پیام‌رسان گیرنده را تشخیص می‌دهد. فقط مالک/ مدیران کانال اجازه ارسال مطلب به کانال را دارند.

category: این فیلد نشان‌دهنده نوع دریافت‌کننده است. اگر خالی باشد یعنی دریافت‌کننده، یک شخص است، اگر برابر«group» باشد یعنی دریافت‌کننده یک گروه است و اگر برابر «channel» باشد، یعنی دریافت‌کننده یک کانال است.

receiver_messenger_id: در صورتی که receiver_id شناسه یک گروه/ کانال را در خود داشته باشد، این فیلد نشان‌دهنده آن است که این پیام برای کدام پیام‌رسان مقصد ایجاد و رمزنگاری شده‌است.

send_time: زمان ایجاد پیام در پیام‌رسان فرستنده است.

message_sender_uid: یک عدد حداکثر ۱۲ بایتی، که به صورت یکتا توسط پیام‌رسان فرستنده ایجاد می‌گردد. این عدد در الگوریتم AES-GCM رمزنگاری encrypted_message هم به عنوان nonce استفاده می‌گردد (نکته‌ی امنیتی: برای یک کلید رمزنگاری یکسان برای AES-GCM، هیچ‌گاه نباید دو پیام مختلف با یک nonce رمزنگاری گردند. به همین علت، یکتا بودن این فیلد برای یک گیرنده ثابت، اهمیت امنیتی دارد.). این عدد بایستی به‌ازای تمامی پیام‌های ارسالی از سمت پیام‌رسان، یکتا باشد.

Encryption_key: محتوای این فیلد، کلید ۲۵۶ بیتی برای رمزنگاری AES-GCM مورد استفاده در این پیام است. این کلید توسط کلید عمومی گیرنده (که در داده پیام‌رسان وجود دارد) رمز شده است. جهت رمزنگاری، از الگوریتم OAEP با MGF۱ و SHA۵۱۲ (برای درهم‌ساز) و بدون برچسب، برای padding استفاده می‌شود. کلید پس از رمز شدن، توسط base٦٤ کدبندی می‌شود. هر فرستنده، بایستی این کلیدرا به ازای هر receiver_id ثابت نگه دارد و فقط در مواقع ضروری و در بازه‌های یک‌ماهه اقدام به تغییر این کلید بنماید. در صورت وجود encrypted_message، این فیلد نیز بایستی وجود داشته باشد و در صورت عدم وجود فیلد encrypted_message این فیلد هم نباید وجود داشته باشد.

Encrypted_message: محتوای این فیلد شامل پیام ارسال شده از سمت فرستنده است. این محتوا توسط الگوریتم AES-GCM با nonce برابر با فیلد sender_message_uid و تگ برابر با None (یا Null) رمزگذاری و سپس با استفاده از base۶۴ کدبندی شده است. طول پیام می‌تواند حداکثر ۴۰۹۶ کاراکتر باشد. زمانی که رشته‌ی ارسالی خالی است، این فیلد باید حضور داشته و با ترتیب بالا رمزنگاری گردد. در حالاتی که ۸ بیت اول message_type برابر با 0xFF است، این فیلد نباید وجود داشته‌باشد؛ در چنین حالتی در محاسبه‌ی sign، مقدار پیام، برابر با رشته‌ی خالی در نظر گرفته‌می‌شود.

Sign: محتوای این فیلد، مقدار امضای محتوای ذیل با استفاده از کلید خصوصی فرستنده است. جهت امضا بایستی از الگوریتم PSS به همراه MGF۱ (برای mgf) و SHA۵۱۲ (برای درهم‌ساز) و با طول بیشینه (۴۴۶ بیت) برای padding استفاده گردد. در نهایت مقدار امضا با استفاده از base۶۴ کدبندی می‌شود.

```
Sign_text = messsage_sender_uid +"|"+ message +"|"+ send_time +"|"+ message_type +"|"+ sender_id +"|"+ receiver_id
```

message_type: این فیلد، مشخص‌کننده نوع پیام ارسالی است. ۸ بیت راست آن مشخص‌کننده نوع محتوا (جدول ۳) و مابقی بیت‌ها، مشخص‌کننده عملیات می‌باشند (جدول ۴).

جدول ۳. معنای ۸ بیت اول (کم ارزشترین) نوع پیام

پیام متنی	0x00
پیام دارای فایل	0x01
پیام دارای فایل تصویری	0x02
پیام دارای فایل صوتی	0x03
پیام دارای فایل ویدئویی	0x04
پیام دارای فایل گیف	0x05
پیام دارای محتوای موقعیت مکانی	0x06
پیام دارای محتوای .contact	0x07
پیام دارای فایل وویس	0x08
پیام یک پیام خطا و یا نشان‌دهنده حذف یک پیام دیگر است	0xFF

جدول ۴. معنای ۸ بیت دوم (کم ارزش‌ترین) نوع پیام

پیام جدید	0x00
پیام خوانده‌شده. امکان ارسال خوانده‌شدن پیام فقط توسط گیرنده پیام وجود دارد.	0x01
پیام ویرایش‌شده. امکان ویرایش پیام فقط توسط فرستنده پیام وجود دارد.	0x02
پیام حذف شده. از این کد برای اعلان حذف یک پیام قدیمی استفاده می‌شود. پس از حذف شدن یک پیام، امکان ارسال هیچ‌گونه به‌روزرسانی بر روی آن وجود ندارد. امکان حذف پیام فقط توسط فرستنده پیام یا مدیر/ مالک گروه/ کانال وجود دارد.	0x06
فیلد encryption_key به درستی رمز نشده‌است (در صورتی که پیام‌رسان گیرنده، تغییر کلید داشته‌باشد و فرستنده همچنان با استفاده از کلید قبلی رمزنگاری انجام دهد، رخ می‌دهد.)	0x22
فیلد encrypted_message به درستی رمز نشده‌است.	0x26
امضا به درستی انجام نشده‌است.	0x2A
در سایر فیلدها عدم‌تطابق وجود دارد.	0x2E
پیام ارسالی پیاده‌سازی نشده است.(پیام‌رسان مقصد این نوع پیام را پشتیبانی نمی‌کند.)	0x32
خطا در دریافت پیام به دلایل دیگر	0x32
(ارسالی از سمت متپ) پیام‌رسان گیرنده در دریافت پیام به خطا خورده‌است.	0x52
(ارسالی از سمت متپ) پیام‌رسان گیرنده در حال حاضر پاسخ‌گو نیست. (و پیام، دیگر به گیرنده ارسال نمی‌گردد.)	0x56
در اطلاعات گروه/ کانال مقصد، تغییراتی داده شده‌است.	0x72
در فهرست مدیران و یا مالک گروه/کانال مقصد تغییراتی داده شده‌است.	0x76
در فهرست اعضای گروه/شنوندگان کانال مقصد، تغییراتی داده شده‌است.	0x7A

مثال:

۰x۰۰۰۰: این پیام، حاوی پیام جدید متنی است.

۰x۰۲۰۱: این پیام، یک ویرایش برروی پیام فایلی قدیمی است.

۰x۰۶FF: این پیام، نشان‌دهنده‌ی حذف شدن پیام تصویری قدیمی است.

۰x۲۲FF: این پیام، نشان‌دهنده‌ی وجود خطا از دید پیام‌رسان گیرنده بر روی فیلد encryption_key می‌باشد.

۰x۵۶FF: این پیام، نشان‌دهنده آن است که پیام‌رسان گیرنده در دریافت پیام، به خطا خورده‌است و متپ با ارسال پیام با این message_type به پیام‌رسان فرستنده، فرستنده را از این موضوع آگاه می‌کند.

از آنجایی که متپ یک پروتکل آسنکرون بین دو پیام‌رسان است، خطاهای رخ داده در پیام‌رسان گیرنده نیز به‌صورت پیام به پیام‌رسان فرستنده (توسط پیام‌رسان گیرنده یا متپ) ارسال می‌گردد MTPکه در آن message_type بیان کننده مشکل رخداده است.

original_message_id: در صورتی که این پیام، برای ویرایش یک پیام دیگر باشد، یا اطلاعات/ دستوری را در مورد یک پیام دیگر همانند حذف کردن، خوانده شدن، وجود خطا و ... داشته باشد، id پیام اصلی در این فیلد ارسال می‌گردد.

update_time: زمان انجام تغییر /دستور /اطلاعات بهTimestamp. این فیلد همزمان با original_message_id ،یا باید وجود داشته‌باشد یا نداشته‌نباشد. این مقدار برحسب میلی ثانیه است.

reply_to_message_id: درصورتی که این پیام، ریپلای به یک پیام دیگر باشد، id پیام اصلی در این فیلد ارسال می‌گردد. در صورت وجود این فیلد، sender_id و receiver_id این پیام و پیام ریپلای شده بایستی یکسان و یا برعکس باشند.

forwarded_from: این فیلد نشان‌دهنده آن است که پیام از فرد /کانال فوروارد شده‌است و نام فرد /کانال در این رشته وجود دارد.

file_id: شناسه فایل همراه پیام.

file_encryption_key: محتوای این فیلد، کلید ۲۵۶ بیتی برای رمزنگاری AES-GCM مورد استفاده برای رمزنگاری فایل اشاره شده در file_id است. این کلید همانند فیلد encryption_key رمزنگاری و کدبندی می‌گردد. در صورت وجود file_id، این فیلد نیز بایستی وجود داشته باشد و در صورت عدم وجود آن، این فیلد نیز نبایستی وجود داشته باشد.

۵-۱-۴- فایل

فایل از فیلدهای زیر تشکیل شده است:

Id: شناسه عددی ۸ بایتی یکتای فایل که توسط متپ در هنگام ایجاد فایل تولید می‌گردد و بازگردانده می‌شود.

file_name: محتوای این فیلد، برابر با نام فایل ارسال شده از سمت فرستنده است. این محتوا نیز همانند file_content رمزنگاری و کدبندی می‌گردد.

message_sender_file_uid: یک عدد حداکثر ۱۲ بایتی است، که به‌صورت یکتا توسط پیام‌رسان فرستنده ایجاد می‌گردد. این عدد در الگوریتم AES-GCM جهت رمزنگاری file_content هم به‌عنوان nonce استفاده می‌گردد.

file_content: محتوای این فیلد، برابر با محتوای فایل ارسال شده از سمت فرستنده است. این محتوا نیز مانند encrypted_message رمزنگاری و کدبندی می‌گردد.

شکل ۱ فرایند ارسال یک پیام دارای فایل را از ابتدای ایجاد تا خوانده‌شدن توسط کاربر مقصد نمایش می‌دهد.

۵-۱-۵- گروه

گروه‌هایی که در متپ ساخته می‌شوند فقط شامل افرادی هستند که در متپ وجود دارند. بنابراین به‌طور مثال در صورتی که فردی خواهان خروج از متپ بوده و در گروهی نیز عضویت داشته‌باشد، بایستی به اطلاع کاربر رسانده‌شود که خروج وی از متپ منجر به حذف کاربر از گروه خواهدشد. یا به‌طور مثال درصورتی که مالک گروه، تمایل داشت گروه خود را به گروه متپ تبدیل نماید، و در گروه، فردی خارج از متپ وجود داشت، فهرست افراد خارج از متپ، باید به مالک نمایش داده‌شود و به اطلاع وی رسانده‌شود که با حضور این افراد، امکان تبدیل گروه به گروه متپ وجود ندارد.

در صورتی که یک گروه، در متپ وجود داشته‌باشد، برای اضافه کردن فرد به گروه، مالک /مدیر گروه می‌تواند از فهرست کاربران خود، کاربران عادی و کاربران متپ را به گروه اضافه کند. همچنین روال‌های پیشینِ اضافه کردن عضو به گروه در پیام‌رسان‌ها (مانند لینک دعوت) برای گروه متپ نیز فعال می‌باشد. همچنین جهت اتصال یک پیام‌رسان جدید به یک گروه در متپ، هنگام ایجاد گروه در پیام‌رسان بایستی گزینه‌ای وجود داشته‌باشد که کاربر بتواند شناسه گروه متپ را به پیام‌رسان ارائه دهد و درنتیجه، گروه ایجاد شده، یک گروه متصل به متپ خواهد بود.

تغییرات در گروه، از طریق یک پیام به پیام‌رسان‌هایی که عضوی در members دارند، به‌وسیله‌ی پیام‌رسان تغییردهنده اطلاع داده می‌شود.

گروه از فیلدهای زیر تشکیل شده‌است:

Id: یک شناسه ۸ بایتی یکتا برای گروه، که توسط متپ در هنگام ایجاد گروه تولید می‌گردد.

name: نام گروه (رشته‌ای، الزامی، حداکثر ۲۵۵ کاراکتر)

description: توضیحاتی درباره گروه، که توسط ایجادکننده گروه نوشته شده‌است.

Members: فهرست شناسه کاربرانی که در گروه عضو هستند.

admins: فهرست شناسه کاربرانی که توسط ایجادکننده گروه به عنوان مدیران گروه انتخاب شده‌اند. این فهرست، زیرمجموعه‌ی فهرست members می‌باشد.

Owner: شناسه کاربر ایجادکننده گروه. ایجادکننده گروه الزاما باید عضوی از پیام‌رسان ایجادکننده گروه باشد و نمی‌تواند به عضوی که از یک پیام‌رسان دیگر هست، انتقال یابد. مالک یکی از اعضای admins می‌باشد.

Avatar: یک فایل با فرمت jpeg که توسط base۶۴ کدبندی شده است. حجم فایل حداکثر برابر با ۲۰۰ کیلوبایت می‌باشد.

group_type: بیت‌های مختلف این فیلد، مشخص‌کننده نوع گروه می‌باشد.

شکل ۲ مراحل ایجاد گروه ازطریق انتقال پیام‌های آن به‌صورت خودکار، در بستر متب به سایر پیام‌رسان‌ها را نمایش می‌دهد.

۵-۱-۶- کانال

کانال‌هایی که در متپ ساخته می‌شوند، ابزاری برای مدیریت محتوا بین کانال‌های مختلف، در پیام‌رسان‌های مختلف هستند. در واقع هدف از کانال‌ها در متپ، آن است که با مدیریت محتوا در یک پیام‌رسان، محتوا در پیام‌رسان‌های دیگر نیز به‌روزرسانی شود. از یک‌سو به‌دلیل تغییرات عضو زیاد در کانال‌ها و عدم‌اهمیت این موضوع برای کانال‌داران ، و از سوی دیگر جهت فراهم‌سازی امکان عضویت کاربران غیر متپ در کانال‌ها، اساسا اعضا در کانال‌های متپ نگه‌داری نمی‌گردند. با این‌حال، مدیران یک کانال متپ، باید در متپ حضور داشته‌باشند تا سایر پیام‌رسان‌ها بتوانند از تغییرات توسط آنها مطلع گردند.

شیوه‌ی کار کانال در متپ به این‌صورت است که یک شخص، کانالی را در متپ ایجاد می‌کند (مثلا از طریق یک دکمه در قسمت مدیریت کانال) و سپس کانال خود در سایر پیام‌رسان‌ها را ازطریق شناسه کانالِ ایجاد شده در متپ (با استفاده از کپی شناسه در قسمت مدیریت کانال)، به کانال متپ متصل می‌کند (مثلا از طریق یک

فیلد در مدیریت کانال، که شناسه کانال متپ را دربرمی‌گیرد.). در هنگام اتصال بایستی چک شود که کلیه مدیران کانال در متپ حضور داشته‌باشند.

تغییرات در کانال، ازطریق یک پیام به پیام‌رسان‌هایی که عضو listeners هستند، توسط پیام‌رسان تغییردهنده اطلاع داده‌می‌شود. همچنین پیام‌رسان‌ها باید در هنگام عضویت یک فرد در یک کانال، توجه کنند در صورتی که آن شخص عضو متپ نباشد، باید ابتدا به عضویت آن درآید.

کانال از فیلدهای زیر تشکیل شده‌است:

Id: یک شناسه ۸ بایتی یکتا که توسط متپ برای کانال در هنگام ایجاد کانال تولید می‌گردد.

name: نام کانال (رشته‌ای، الزامی، حداکثر ۲۵۵ کاراکتر)

description: توضیحاتی درباره کانال که توسط ایجادکننده کانال نوشته شده‌است.

admins: فهرست شناسه کاربرانی که توسط ایجادکننده کانال به عنوان مدیران کانال انتخاب شده‌اند.

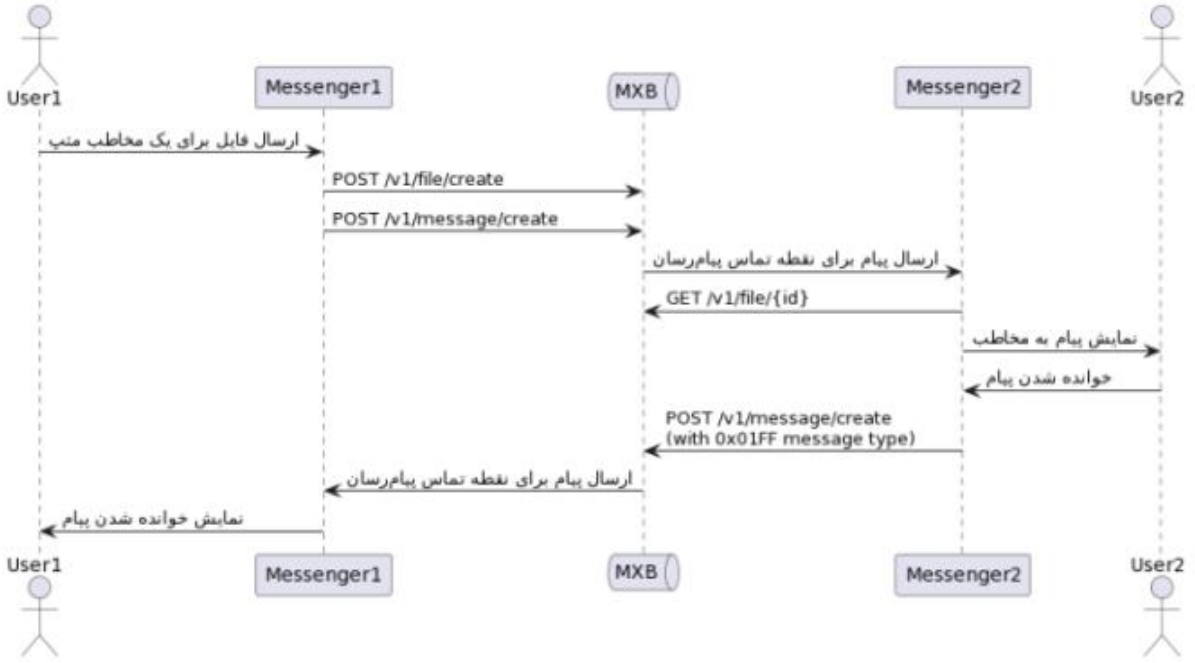
Owner: شناسه کاربر ایجادکننده کانال؛ ایجادکننده باید یکی از اعضای admins باشد.

listeners: فهرست شناسه پیام‌رسان‌هایی که به این کانال متصل هستند و تمایل دارند از تغییرات محتوا و نیز تغییرات خود کانال، مطلع گردند. پیام‌رسان ایجادکننده کانال همواره عضو اول این فهرست خواهد بود. با هر تغییر در این فهرست، پیام‌رسانِ تغییردهنده موظف است این تغییر را به تمامی اعضای این فهرست (به جز خود)، از طریق یک پیام، ارسال نماید.

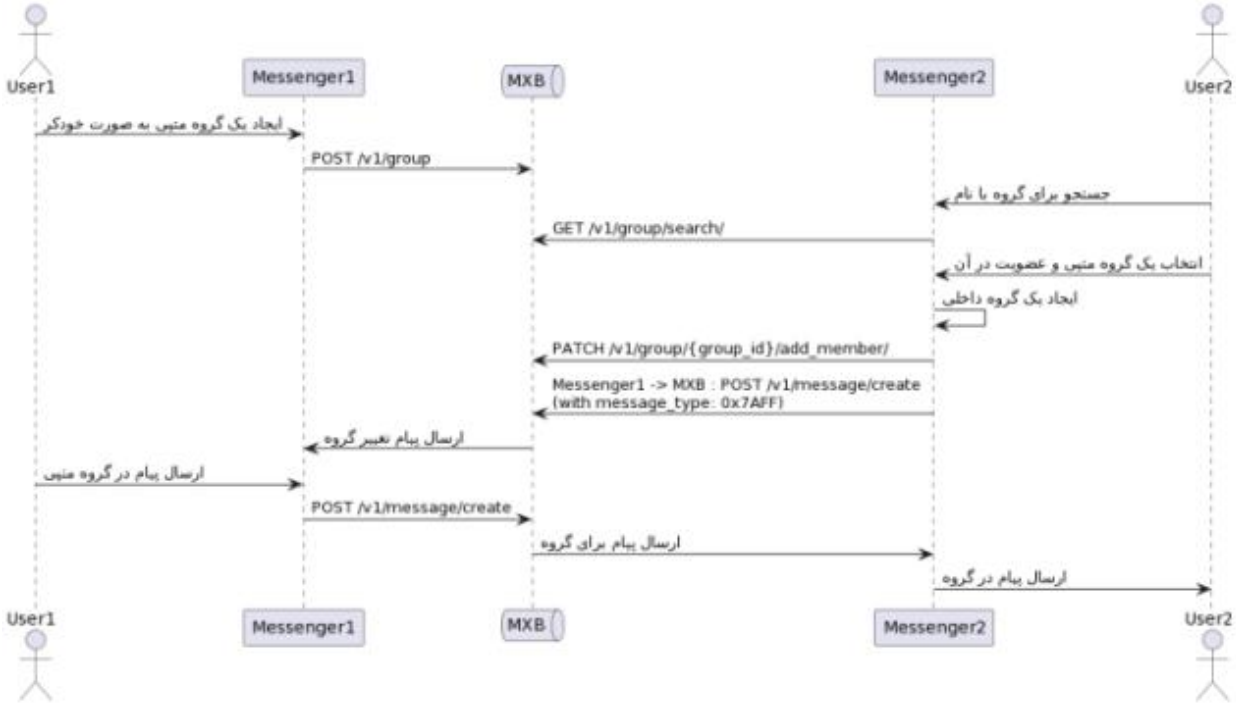
Avatar: یک فایل با فرمت jpeg که توسط base۶۴ کدبندی شده است. حجم فایل حداکثر برابر با ۲۰۰ کیلوبایت می‌باشد.

channel_type: بیت‌های مختلف این فیلد مشخص‌کننده نوع کانال می‌باشد.

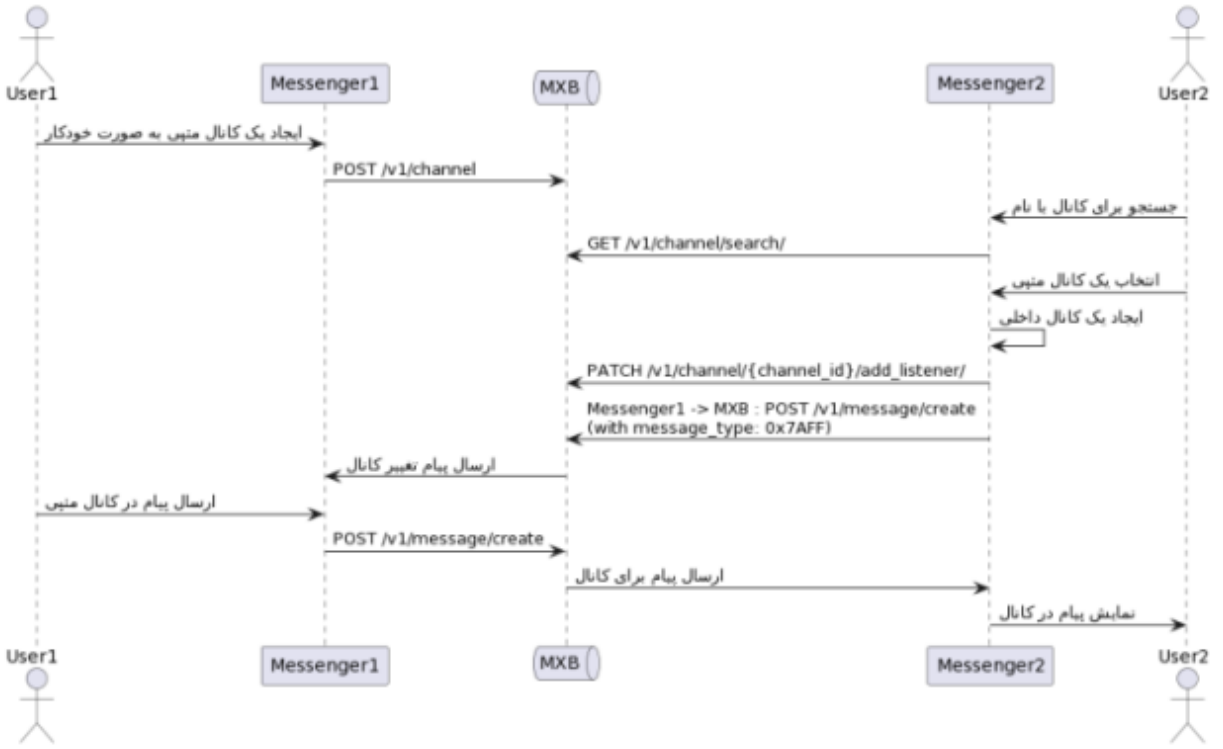
شکل ۳ فرایند ایجاد یک کانال و ارسال پیام‌های آن به‌صورت خودکار به دیگر پیام رسان‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. فرایند ارسال یک پیام دارای فایل



شکل ۲. فرآیند ایجاد گروه با انتقال پیام‌های آن



شکل ۳. ایجاد یک کانال و ارسال پیام‌های آن

۵-۲- رابط کاربری

رابط کاربریِ طرح پیشنهادی ما، یک API تحت‌وب است که به بررسی endpoint های آن برای هر موجودیت خواهیم پرداخت.

۵-۲-۱- پیام‌رسان

دریافت فهرست پیام‌رسان‌ها

GET /v۱/messenger/info/all

در این endpoint، فهرست اطلاعات عمومی کلیه‌ی پیام‌رسان‌های موجود در متپ ارائه می‌گردد. این فهرست شامل موارد زیر است.

id, name, public_key_url, file_ size_limit

۵-۲-۲- کاربر

ایجاد کاربر

POST /v۱/user/create

با استفاده از این endpoint، یک پیام‌رسان می‌تواند یک کاربر را فعال نماید. بدین‌منظور، پیام‌رسان، فیلدهای nickname, avatar, phone, messenger_id را ارسال نموده و در جواب، id کاربر در متپ را دریافت می‌نماید.

دریافت اطلاعات کاربر با شناسه

GET /v۱/user/{id}

با استفاده از این endpoint، یک پیام‌رسان می‌تواند اطلاعات نمایه یک کاربر را با استفاده از شناسه کاربری دریافت نماید.

دریافت اطلاعات کاربر با شناسه پیام‌رسان و تلفن

GET /v۱/user/{messenger_id}/{phone}

با استفاده از این endpoint، یک پیام‌رسان می‌تواند اطلاعات نمایه یک کاربر را ازطریق از شناسه پیام‌رسان و شماره تلفن کاربر دریافت نماید.

غیرفعال‌سازی کاربر با شناسه پیام‌رسان و شماره تلفن

DELETE /v۱/user/{messenger_id}/{phone}/delete

با استفاده از این endpoint، یک پیام‌رسان می‌تواند کاربر خود را با استفاده از شناسه پیام‌رسان و شماره تلفن کاربر غیرفعال نماید.

به‌روزرسانی کاربر با شناسه پیام‌رسان و شماره تلفن

PUT /v۱/user/{messenger_id}/{phone}/update

با استفاده از این endpoint، یک پیام‌رسان می‌تواند نمایه کاربر خود را با استفاده از شناسه پیام‌رسان و شماره‌تلفن کاربر به‌روزرسانی نماید.

دریافت اطلاعات کاربر با شماره تلفن

GET /v۱/user/search/{phone}

با استفاده از این endpoint، یک پیام‌رسان می‌تواند اطلاعات نمایه مربوط به یک کاربر را با استفاده از شماره تلفن کاربر دریافت نماید. با توجه به اینکه ممکن است کاربر در چند پیام‌رسان عضو باشد، خروجی آن، فهرستی از داده‌های کاربر خواهد بود.

دریافت اطلاعات چند کاربر با شماره‌تلفن

POST /v۱/user/search/

در این endpoint، فهرستی از شماره‌تلفن‌های مورد جستجو ارسال می‌گردد و در جواب، یک شی با نگاشت هر شماره تلفن به فهرست جواب بر می‌گردد.

۵-۲-۳- پیام

ایجاد پیام

POST /v۱/message/create

این endpoint، برای ایجاد یک پیام، مورداستفاده قرار می‌گیرد؛ در ورودی فیلدها، مطابق با توضیحات پیام در یک شی ارسال می‌گردد و درخروجی آن، پیامِ ایجادشده به همراه شناسه بر می‌گردد.

دریافت پیام با شناسه

GET /v۱/message/{id}

این endpoint، برای دریافت اطلاعاتِ یک پیام خاص با ارائه‌ی شناسه‌ی آن پیام استفاده می‌گردد. هر پیام‌رسان صرفا به پیام‌های مرتبط با خود دسترسی خواهد داشت.

دریافت پیام‌های دریافتی از شناسه به میزان

GET /v۱/messenger/received/{id}/{limit}

با استفاده از این endpoint، یک پیام‌رسان می‌تواند پیام‌هایی را که برای او ارسال شده‌است، دریافت نماید. بدین منظور شناسه پیام، ابتدا و تعداد پیام‌های مد نظر را ارسال کرده و فهرستی از پیام‌ها را دریافت می‌نماید.

دریافت پیام‌های ارسالی از شناسه به میزان

GET /v۱/messenger/sended/{id}/{limit}

با استفاده از این endpoint، یک پیام‌رسان می‌تواند پیام‌هایی را که ارسال کرده‌است، دریافت نماید. بدین منظور شناسه پیام، ابتدا و

تعداد پیام مدنظر خود را به عنوان ورودی ارسال می‌کند و در پاسخ فهرستی از پیام‌هارا دریافت می‌نماید.

۵-۲-۴- فایل

ایجاد فایل

POST /v۱/file/create

با استفاده از این endpoint، یک پیام‌رسان می‌تواند فایل جدیدی را در متپ ایجاد نماید. برای ایجاد یک فایل، بایستی تمام فیلدهای فایل به جز id ارسال گردیده و در پاسخ، تمام فیلدها به جز محتوای فایل برگردانده شود.

GET /v۱/file/{id}

با استفاده از این endpoint، امکان دریافت فایل متناسب با یک id وجود دارد. در پاسخ این endpoint یک شی با کلیه‌ی فیلدهای فایل برگردانده می‌شود.

۵-۲-۵- گروه

ساخت گروه

POST /v۱/group

در این endpoint پیام‌رسان ایجادکننده گروه، با ارائه تمام فیلدهای گروه به جز شناسه(id)، گروه را در متپ ایجاد می‌نماید. خروجی این endpoint مقدار شناسه(id) گروه ایجاد شده می‌باشد .

ویرایش اطلاعات گروه

PUT /v۱/group/{group_id}

در این endpoint، پیام‌رسان ایجادکننده گروه، با ارائه‌ی تمام فیلدها، گروه را ویرایش می‌نماید.

تغییرات مجاز توسط مدیران: نام، آواتار، توضیحات گروه

تغییرات مجاز توسط مالک: نام، آواتار، توضیحات گروه، مدیران

دریافت اطلاعات گروه

GET /v۱/group/{group_id}

در این endpoint، یک پیام‌رسان با ارائه‌ی شناسه(id)، تمام اطلاعات یک گروه را دریافت می‌نماید.

پیام‌رسان‌هایی که در فهرست listeners یک گروه قرار دارند، موظف هستند به‌طور متناوب نسبت به دریافت اطلاعات گروه و به‌روزرسانی خود اقدام نمایند. این به‌روزرسانی بایستی حداکثر با فاصله زمانی یک ساعت انجام پذیرد. از سوی دیگر درصورت ارسال ویرایش یک پیام توسط کاربری که در فهرست admins قرار ندارد، پیام‌رسان باید مجددا اطلاعات گروه را دریافت کرده و بررسی نماید که فرد ویرایشگر در فهرست admins حضور دارد یا خیر.

در صورتی که این گروه حذف و یا غیرفعال شده‌باشد، خروجی این endpoint، کد خطای مربوط به وضعیت گروه خواهد بود.

جستجو در عنوان گروه‌ها

GET /v۱/group/search/

در این endpoint، یک پیام‌رسان با ارسال یک رشته، فهرست شناسه(id) گروه‌هایی که در name خود آن رشته را دارند، دریافت می‌نماید. حداقل طول ارسالی رشته برابر با ۳ کاراکتر خواهد بود.

اضافه کردن یک عضو به اعضای گروه

PATCH /v۱/group/{group_id}/add_member/{user_id}/

هر پیام‌رسان با استفاده از این endpoint می‌تواند یک عضو خود را در یک گروه عضو نماید.

حذف کردن یک عضو از گروه

PATCH /v۱/group/{group_id}/remove_member/{user_id}/

هر پیام‌رسان با استفاده از این endpoint می‌تواند یک عضو ثبت شده خود را از گروه حذف نماید.

غیرفعالسازی/فعالسازی گروه

PATCH /v۱/group/{group_id}/status/

پیام‌رسان ایجاد کننده گروه با استفاده از این endpoint و با ارائه شناسه(id) گروه می‌تواند اقدام به غیرفعال‌سازی و فعال‌سازی گروه در متپ نماید. با فراخوانی این endpoint، وضعیت گروه برعکس خواهد شد. گروه‌های غیرفعال‌شده در جستجوی گروه با عنوان و دریافت اطلاعات گروه نمایش داده نمی‌شود.

حذف گروه

DELETE /v۱/group/{group_id}/

پیام‌رسان ایجادکننده گروه با استفاده از این endpoint و با ارائه شناسه(id) گروه می‌تواند اقدام به حذف گروه در متپ نماید.

۵-۲-۶- کانال

ساخت کانال

POST /v۱/channel

در این endpoint، پیام‌رسان ایجادکننده کانال، با ارائه‌ی اطلاعات زیر (مطابق مدل دادگان)، کانالی را در متپ ایجاد می‌نماید.

name, admins, owner, avatar, description, username, channel_type

خروجی این endpoint مقدار id کانال می‌باشد.

ویرایش اطلاعات کانال

PUT /v۱/channel/{channel_id}

در این endpoint پیام‌رسان ایجادکننده کانال، با ارائه‌ی اطلاعات (مطابق مدل دادگان)، کانال را ویرایش می‌نماید. channel_id مقدار شناسه(id) کانال مورد ویرایش و موارد بعدی، فهرست تغییرات خواهد بود. لازم به ذکر است که همواره باید owner عضو پیام‌رسان ایجاد کننده کانال باشد.

تغییرات مجاز توسط مدیران: نام، آواتار، توضیحات کانال

تغییرات مجاز توسط کاربر ایجادکننده: نام، آواتار، توضیحات کانال، مدیران

دریافت اطلاعات کانال

GET /v۱/channel/{channel_id}

در این endpoint یک پیام‌رسان با ارائه‌ی شناسه(id)، اطلاعات کانال موردنظر را دریافت می‌کند.

پیام‌رسان‌هایی که در فهرست listeners یک کانال قرار دارند، موظف هستند به طور متناوب نسبت به دریافت اطلاعات کانال و به‌روزرسانی خود اقدام نمایند. این به روزرسانی بایستی حداکثر با فاصله زمانی یک ساعت انجام پذیرد. از سوی دیگر در صورت ارسال ویرایش یک پیام توسط یک کاربر که در فهرست admins وجود ندارد، پیام‌رسان بایستی مجددا اطلاعات کانال را دریافت کرده و بررسی نماید که کاربر ویرایشگر در فهرست admins قراردارد یا خیر.

همچنین درصورتی که یک ویرایش پیام از پیام‌رسانی غیر از پیام‌رسان ایجادکننده کانال انجام پذیرد، پیام‌رسان ویرایش‌کننده قبل از ارسال پیام ویرایش، بایستی مجددا فهرست admins خود را به‌روز نماید.

در صورتی که این کانال حذف و یا غیرفعال شده‌باشد، خروجی این endpoint، کد خطای مربوط به وضعیت کانال خواهد بود. تنها درصورت حذف شدن کانال از متپ و در صورتی که آخرین حالت کانال بر روی حالت انتقال خودکار بوده‌باشد، سایر پیام‌رسان‌ها نیز بایستی نسبت به حذف کانال اقدام نمایند.

جستجو در عنوان کانال‌ها

GET /v۱/channel/search/

در این endpoint، یک پیام‌رسان با ارسال یک رشته، فهرست شناسه(id) کانال‌هایی که در name خود آن رشته را دارند، دریافت می‌نماید. حداقل طول ارسالی رشته برابر با ۳ کاراکتر خواهد بود.

اضافه کردن یک پیام‌رسان به عنوان شنونده

PATCH /v۱/channel/{channel_id}/add_listener/

هر پیام‌رسان با استفاده از این endpoint می‌تواند خود را به عنوان listener به یک کانال اضافه کند.

حذف کردن یک پیام‌رسان به عنوان شنونده

PATCH /v۱/channel/{channel_id}/remove_listener/

هر پیام‌رسان با استفاده از این endpoint می‌تواند خود را به عنوان listener از یک کانال حذف کند.

غیرفعال‌سازی/فعال‌سازی کانال

PATCH /v۱/channel/{channel_id}/status/

پیام‌رسان ایجاد کننده کانال با استفاده از این endpoint و با ارائه شناسه(id) کانال می‌تواند اقدام به غیرفعال‌سازی و فعال‌سازی کانال در متپ نماید. با فراخوانی این endpoint وضعیت کانال برعکس خواهد شد. کانال‌های غیرفعال شده در جستجوی کانال با عنوان و دریافت اطلاعات کانال نمایش داده‌نمی‌شوند.

حذف کانال

DELETE /v۱/channel/{channel_id}/

پیام‌رسان ایجاد کننده کانال با استفاده از این endpoint و با ارائه شناسه(id) کانال می‌تواند اقدام به حذف کانال در متپ نماید.

۶- نتیجه‌گیری

دولت‌ها و سیاست‌گذاران فضای مجازی در دنیا، به این نتیجه رسیده‌اند که با توجه به رشد بیش از اندازه برخی پیام‌رسان‌های جهانی همچون فیسبوک، تلگرام، اینستاگرام و...، امکان رشد برای پیام‌رسان‌های نوپا و جدید بسیار کم است. بنابراین قوانینی برای رفع این مشکل تصویب کرده‌اند. به عنوان مثال شورای قانون‌گذاری اتحادیه‌اروپا، با تصویب یک قانون، شبکه‌های اجتماعی را که دارای ماهانه بیش از ۴۵ میلیون استفاده‌کننده هستند، ملزم به ایجاد زمینه ارتباط و انتقال و دریافت پیام به سایر شبکه‌های اجتماعی کرده‌است[۶][۷].

برقراری ارتباط بین پیام‌رسانی، خود یک چالش به‌شمار می‌رود؛ چرا که پیام‌رسان‌ها دارای ساختار متفاوت و روش‌های متفاوتی برای تبادل پیام کاربران هستند. همچنین تبادل امن پیام بین

پیام‌رسان‌های مختلف هم یک چالش است؛ چرا که این پیام‌رسان‌ها، دارای الگوریتم‌های متفاوتی برای رمزنگاری پیام‌های خود هستند. چالش بعدی، ارتباطات گروهی مانند تبادل پیام در گروه‌ها و کانال‌ها است.

در این پژوهش سعی گردید تا با ارائه پروتکل تبادل پیام بین شبکه‌های اجتماعی متپ، بر چالش‌های ذکرشده غلبه شود. در طرح ارائه‌شده، قابلیت رمزنگاری انتها به انتها بین پیام‌رسان‌ها وجود دارد و از ارتباطات گروهی مانند تبادل پیام در گروه‌ها و کانال‌ها پشتیبانی می‌شود. پژوهش‌های آتی می‌تواند بر چندین حوزه جهت تقویت سیستم پیشنهادی تمرکز کند. یکی از زمینه‌های مورد علاقه، توسعه روش‌هایی برای ارائه خدمات تماس صوتی و تصویری بین پلتفرم‌های پیام‌رسانی است. ارائه این ویژگی‌های ارتباطی، به طور قابل‌توجهی کارایی و تجربه کاربری سیستم پیشنهادی را افزایش می‌دهد.

علاوه‌بر این، می‌توان پژوهش‌هایی برای استفاده از پروتکل متپ برای زیرساخت اشتراک گذاری کلید عمومی انجام شود همچنین می‌توان پژوهش‌هایی برای پیاده‌سازی رمزنگاری انتها به انتها بین کاربران و استفاده از سیستم‌های غیر متمرکز مانند زنجیره بلوکی برای پیاده‌سازی سیستم مشابه انجام داد. به عنوان مثال می‌توان با ارائه یک مدل با استفاده از زنجیره بلوکی پروتکلی مانند متپ ارائه کرد که نیاز به سرور اضافی نداشته باشد و با استفاده از سرورهای موجود پیام‌رسان‌ها یک شبکه نظیر به نظیر برای تبادل پیام بین پیام رسانی بر بستر زنجیره بلوکی فراهم کرد این مدل چون به هیچ سرور خاصی وابسته نیست از مقاومت و پایداری بالاتری نیز برخوردار است.

مراجع

[1] J. Gottfried, “Americans’ Social Media Use,” Pew Research Center, Jan. 13, 2024. [Online]. Available: https://www.pewresearch.org/internet/2024/01/31/americans-social-media-use/. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[2] M. Anderson, M. Faverio, and J. Gottfried, “Teens, Social Media and Technology 2023,” Pew Research Center, Dec. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.pewresearch.org/internet/2023/12/11/teens-social-media-and-technology-2023/. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[3] M. Nurudeen, S. Abdul-Samad, E. Owusu-Oware, G. Y. Koi-Akrofi, and H. A. Tanye, “Measuring the effect of social media on student academic performance using a social media influence factor model,” Educ. Inform. Technol., vol. 28, pp. 1165-1188, 2023. doi: 10.1007/s10639-022-11196-0.

[4] K. K. Kapoor, K. Tamilmani, N. P. Rana, P. Patil, Y. K. Dwivedi, and S. Nerur, “Advances in Social Media Research: Past, Present and Future,” Inf. Syst. Frontiers, vol. 20, pp. 531-558, 2018. doi: 10.1007/s10796-017-9810-y.

[5] S. Nakamoto, “Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system,” 2008, pp. 1-8.

[6] T. Madiega, “Digital services act,” European Parliamentary Research Service, PE, pp. 1-8, 2020.

[7] C. O’Halloran, “Social media giants face annual audits under new EU law,” The Journal.ie, Aug. 2023. [Online]. Available: https://www.thejournal.ie/social-media-audits-digital-services-act-6151679-Aug2023/. [Accessed: Nov. 20, 2023].

[8] R. Flynn, “RCS Interconnect Hub: Driving global interconnectivity of RCS,” Openmind Networks, pp. 3-10, 2013

[9] J. Simmons, J. Mackenzie, T. Martin, T. Ralston, and D. Almeida, “Matrix,” [Online]. Available: https://matrix.org/. [Accessed: Jul. 20, 2023], 2018

[10] S. Ferretti, M. Zichichi, and J. Sparber, “Blockchain-based end-to-end encryption for Matrix instant messaging,” 2021

[11] European Parliament and Council of the European Union, “Regulation (EU) 2022/1925 of 14 September 2022 on contestable and fair markets in the digital sector and amending Directives (EU) 2019/1937 and (EU) 2020/1828 (Digital Markets Act),” Official Journal of the European Union, L 265, pp. 1-66, Oct. 12, 2022.

[12] European Parliament and Council of the European Union, “Regulation (EU) 2022/1925 on contestable and fair markets in the digital sector,” Official Journal of the European Union, L 265, Oct. 12, 2022. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/1925/oj. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[13] F. Liberatore, “DMA: EU Publishes The New Digital Markets Act,” [Online]. Available: https://www.privacyworld.blog/2022/10/dma-eu-publishes-the-new-digital-markets-act/. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[14] S. Amaro, “EU announces sweeping new rules that could force breakups and hefty fines for Big Tech,” [Online]. Available: https://www.cnbc.com/2020/12/15/digital-markets-act-eus-new-rules-on-big-tech.html. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[15] European Commission, “Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on European Data Governance (Data Governance Act),” EUR-Lex, Nov. 25, 2020. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0842. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[16] F. S. Morton and C. Caffarra, “The European Commission Digital Markets Act: A translation,” Jan. 5, 2021. [Online]. Available: https://cepr.org/voxeu/columns/european-commission-digital-markets-act-translation. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[17] M. Mariniello and J. Anderson, “Regulating big tech: the Digital Markets Act,” [Online]. Available: https://www.bruegel.org/blog-post/regulating-big-tech-digital-markets-act. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[18] K. Holt, “EU confirms the six tech giants subject to its strict new competition laws,” [Online]. Available: https://www.engadget.com/eu-confirms-the-six-tech-giants-subject-to-its-strict-new-competition-laws-161917822.html. [Accessed: May 22, 2024].

[19] European Commission, “Commission Proposes New EU Cybersecurity Strategy,” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6423. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[20] M. Murgia, “Facebook Fined €110m by European Commission over WhatsApp Deal,” Financial Times, [Online]. Available: https://www.ft.com/content/a2dadc48-3bb1-11e7-821a-6027b8a20f23. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[21] A. Satariano, “Google Fined $5.1 Billion by E.U. in Android Antitrust Case,” The New York Times, [Online]. Available: https://www.nytimes.com/2018/07/18/technology/google-eu-android-fine.html. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[22] D. Brouwer, “Making messaging interoperability with third parties safe for users in Europe,” Mar. 6, 2024. [Online]. Available: https://engineering.fb.com/2024/03/06/security/whatsapp-messenger-messaging-interoperability-eu/. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[23] K. Holt, “Meta explains how third-party apps will hook into Messenger and WhatsApp,” Mar. 6, 2024. [Online]. Available: https://www.engadget.com/meta-explains-how-third-party-apps-will-hook-into-messenger-and-whatsapp-192532065.htm. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[24] B. Vigliarolo, “Meta killing off Instagram, Messenger cross-platform chatting,” Dec. 5, 2023. [Online]. Available: https://www.theregister.com/2023/12/05/meta_instagram_messenger. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[25] “WhatsApp, Instagram, and Messenger will be integrated: cross-chatting option will be available,” Joy of Android, Sep. 29, 2021. [Online]. Available: https://joyofandroid.com/news/whatsapp-instagram-and-messenger-will-be-integrated-cross-chatting-option-will-be-available/. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[26] N. Sarwar, “WhatsApp Cross-Chat With Messenger & Instagram Will Be Optional... For Now,” Sep. 28, 2021. [Online]. Available: https://screenrant.com/whatsapp-cross-chat-facebook-messenger-instagram-optional-interoperability/. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[27] “An Update on How We’re Building Safe and Secure Third-Party Chats for Users in Europe,” Sep. 6, 2024. [Online]. Available: https://about.fb.com/news/2024/09/an-update-on-how-were-building-safe-and-secure-third-party-chats-for-users-in-europe/. [Accessed: Aug. 22, 2024].

[28] P. Sawers, “Inside Matrix, the protocol that might finally make messaging apps interoperable,” TechCrunch, Dec. 30, 2022. [Online]. Available: https://techcrunch.com/2022/12/30/inside-matrix-the-protocol-that-might-finally-make-messaging-apps-interoperable/. [Accessed: Aug. 22, 2024].

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 102-127

Personalization of the Radiology Residency Training Process Using Deep Learning and Interactive Extraction of Diagnostic Error Patterns

Seyed Ali Kianmehr[1,2], Mahdi Hashemzadeh[1,2*]

[1] Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
[2] Artificial Intelligence and Machine Learning Research Laboratory, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Received: 20 January 2025, Revised: 30 August 2025, Accepted: 22 October 2025
Paper type: Research

Abstract

Radiological imaging is an fundamental diagnostic tool widely utilized by physicians for the diagnosis and monitoring of various medical conditions. Accurate interpretation of these images demands training of specialized residents and medical experts to ensure high diagnostic precision. This study presents an intelligent system that leverages machine learning to provide a personalized radiology residency training program through the interactive extraction of false-positive and false-negative diagnostic error patterns. The proposed approach is designed as an online personalized training platform that employs an iterative process to evaluate residents through adaptive tests generated by a question-selection algorithm based on each resident's performance, with the aim of extracting diagnostic error models of them independently. The proposed method employs a deep learning-based model to evaluate the difficulty level of educational radiographic images. Test questions for residents are then systematically designed to ensure an optimal distribution of disease classes and a diverse range of image difficulty levels. In subsequent tests, by analyzing each resident's mistakes in previous tests and finding their error patterns, the evaluation weight of each test image is determined according to each resident's mistakes in previous similar images. During this iterative process, each resident's training period is conducted taking into account their strengths and weaknesses in previous tests. Experimental results demonstrate notable improvements in diagnostic accuracy of residents across across various disease types and difficulty levels, along with significant reductions in both false-positive and false-negative rates. The successful performance of this system indicates its usefulness and possibility of being used in personalized education of residents and medical students in other specialties and disease domains, as well.

Keywords: Personalized education, Error prediction, False-negative errors, False-positive errors, Machine learning, Deep learning, Computer vision.

* Corresponding Author's email: hashemzadeh@azaruniv.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۰۱ الی ۱۲۷

شخصی‌سازی فرایند آموزش رزیدنت‌های رادیولوژی با استفاده از یادگیری عمیق و استخراج تعاملی مدل خطاهای تشخیصی آنان

سید علی کیان‌مهر[۲،۱]، مهدی هاشم‌زاده[۲،۱*]

[۱] دانشکده فناوری اطلاعات و مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

[۲] آزمایشگاه تحقیقاتی هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

تصاویر رادیولوژی از ابزارهای رایج و پرکاربرد تشخیصی هستند که به طور گسترده توسط پزشکان برای تشخیص و نظارت بر روند درمان بیماری‌های مختلف استفاده می‌شوند. تفسیر صحیح این تصاویر نیازمند آموزش رزیدنت‌ها و کارشناسان متخصص با دقت تشخیصی بالا است. در این پژوهش، یک سامانه هوشمند، مبتنی بر یادگیری ماشین، طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی می‌شود که با استفاده از استخراج تعاملی مدل خطاهای تشخیصی مثبتِ کاذب و منفیِ کاذب رزیدنت‌های تحت آموزش، دوره آموزش آنها را بصورت شخصی‌سازی‌شده انجام دهد. راهکار پیشنهادی در قالب یک سامانه برخطِ آموزش شخصی‌سازی‌شده طراحی می‌شود که طی فرایندی تکرارشونده، رزیدنت‌ها را در آزمون‌های تطبیقی طراحی‌شده توسط الگوریتم انتخاب سؤالات، مبتنی بر عملکرد هر رزیدنت، ارزیابی کرده و مدل خطاهای تشخیصی آنها را استخراج می‌کند. در این سامانه، با بهره‌گیری از یک مدل مبتنی بر یادگیری عمیق، ویژگی درجه سختی هر یک از تصاویر رادیوگرافیِ آموزشی استخراج می‌شود. سپس با رعایت پراکندگی مناسب انواع کلاس‌های بیماری و تنوع درجه سختی تصاویر، سؤالات آزمون‌های رزیدنت‌ها طراحی می‌شود. در آزمون‌های بعدی، با تحلیل خطاهای هر فرد در آزمون‌های قبلی و الگویابی آن‌ها، وزن ارزیابی هر تصویر مطابق با خطاهای تشخیصی پیشین هر فرد در تصاویر مشابه قبلی، مشخص می‌شود. در طی این فرایند تکرارشونده، دوره آموزش هر رزیدنت با در نظر گرفتن نقاط ضعف و قوت او در آزمون‌های قبلی طی می‌شود. نتایج آزمایش‌های انجام شده، نشان‌دهنده بهبود عملکرد کاربران سامانه، هم از نظر دقت تشخیص آنها در هر کلاس با هر درجه سختی تصویر، و هم از نظر کاهش نرخ خطاهای مثبت کاذب و منفی کاذب آنها است. عملکرد موفق و کارآمد این سامانه حاکی از سودمندی و امکان بکارگیری آن در آموزش هوشمند و شخصی‌سازی شده رزیدنت‌ها و دانشجویان پزشکی در دیگر تخصص‌ها و شاخه‌های مختلف انواع بیماری‌ها نیز است.

کلیدواژگان: شخصی‌سازی آموزش، پیش‌بینی خطا، خطاهای منفی کاذب، خطاهای مثبت کاذب، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، بینایی ماشین.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: hashemzadeh@azaruniv.ac.ir

۱- مقدمه

تشخیص به‌موقع و دقیق یک بیماری، مهمترین اقدام در پیشگیری و درمان آن است. خطاها و اختلاف نظرها در تفسیر تصاویر رادیولوژی، مشکلی رایج است که طبق آمار نرخ روزانه آن حدود ۳ تا ۵ درصد تخمین زده شده است. در بررسی هدفمند گزارشات این درصد به مراتب بالاتر نیز است [۱] و [۲]. این خطاها و اختلاف نظرها می‌توانند ناشی از عوامل سیستمی و انسانی باشند، بنابراین نمی‌توان تمام خطاها را به سهل‌انگاری رادیولوژیست‌ها نسبت داد. علاوه بر این، اختلافات در تفسیر تصاویر ممکن است به دلیل تفاوت در دیدگاه‌ها و رویکردهای رادیولوژیست‌ها نیز باشد. برای کاهش این خطاها، لازم است که علل دقیق آن‌ها شناسایی و در هر دو بُعد سیستمی و انسانی اقداماتی اصلاحی انجام شود.

رادیولوژی دارای روش‌های مختلفی همچون رادیوگرافی[۱]، فلوروسکوپی[۲] و سونوگرافی[۳] است. تصویربرداری اشعه ایکس یا همان رادیوگرافی، به دلیل در دسترس بودن آن حتی در مناطق کم‌برخوردار و همچنین هزینه‌ی پایین‌تر نسبت به دیگر روش‌های موجود، اغلب در تشخیص اورژانسی و اولیه‌ی اغلب بیماری‌ها، جزء رایج‌ترین ابزارهای تشخیص بوده و مورد توجه و استفاده پزشکان قرار دارد [۳]. تصاویر اشعه ایکس قفسه سینه برای بررسی و ارزیابی وضعیت ریه‌ها، قلب و دیواره قفسه سینه و همچنین برای کمک به تشخیص علت تنگی نفس، سرفه‌های مزمن و درد قفسه سینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تصاویر ممکن است برای کمک به تشخیص و نظارت بر روند درمان انواع بیماری‌های ریوی مانند ذات‌الریه، آمفیزم و سرطان استفاده شود. همه‌ی این موارد نیازمند رادیولوژیستی متخصص و نخبه با دقت تشخیصی مناسب برای تشخیص انواع عارضه‌های موجود در تصویر اشعه ایکس است، تا مرتبط‌ترین و مناسب‌ترین نظر کارشناسی ارائه گردد.

امروزه حوزه‌ی رادیولوژی، همچون بسیاری از حوزه‌های کاربردی دیگر، به دنبال ایجاد تحول و گسترش با استفاده هرچه بیشتر از هوش مصنوعی و ابزارهای آن است. به عنوان مثال، در حوزه‌ی تصاویر اشعه ایکس قفسه سینه، مدل‌های یادگیری ماشین در امر تشخیص در سه بُعدِ ۱) تشخیص مستقل خودکار با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی به صورت تشخیص باینری [۴] و چند کلاسه [۳]، ۲) دستیار رادیولوژیست (به صورت ارائه‌ی پیشنهاد کلاسی خاص و یا ناحیه‌ای مشکوک) با استفاده از روش‌های قطعه‌بندی [۵]، و ۳) تفسیر گزارش رادیولوژیست با استفاده از تکنیک‌های پردازش زبان‌های طبیعی [۶]، ورود و توسعه پیدا کرده است.

در سیستم‌های نوین آموزشی، سامانه‌های کامپیوتری در دو بخش آموزش سنتی و شخصی‌سازی شده توسعه داده شده‌اند. آموزش هدفمند رزیدنت‌های رادیولوژی یکی از عوامل مهم در کاهش خطاهای تشخیصی است. روش‌های سنتی آموزش نمی‌توانند به‌خوبی نیازهای فردی هر رزیدنت را برآورده کنند و به تمام جنبه‌های خطاهای رایج در تفسیر تصاویر بپردازند. به‌عبارتی این سیستم‌ها بر اساس مدل‌سازی کاربر کار نمی‌کنند و معمولاً یک الگوی ثابت آموزشی دارند و بدون در نظر گرفتن تفاوت‌های فردی هر رزیدنت، امکانات و محتویات آموزشی یکسانی را برای تمامی رزیدنت‌ها در حوزه‌های مختلف رادیولوژی ارائه می‌دهند [۷].

سامانه‌های شخصی‌سازی آموزش بر اساس این فرضیه طراحی شده‌اند که بسیاری از خطاهای تشخیصی تصادفی نیستند و می‌توان با استخراج الگوهای خطاهای گذشته، آموزش هر فرد را بهبود بخشید. با استفاده از فنون مختلف یادگیری ماشین، می‌توان خطاهای احتمالی آینده را پیش‌بینی و بر اساس آن‌ها برنامه‌های آموزشی شخصی‌سازی‌شده‌ای ارائه کرد که به بهبود نقاط ضعف رزیدنت‌ها کمک کند. با این‌حال، سامانه‌های آموزش به کمک رایانه مبتنی بر مدل‌سازی کاربر که تاکنون توسعه یافته‌اند، با چالش‌هایی نیز روبرو هستند. این چالش‌ها شامل معیارهای پیچیده داده‌ای، محدودیت در اندازه و تنوع داده‌ها، محدودیت در تعداد و نوع توصیفگرهای ورودی، و نبود یکپارچگی در سامانه برای پیش‌بینی و اصلاح انواع مختلف خطاهای تشخیصی است [۱] و [۶] تا [۱۱].

در این پژوهش، یک سامانه برخط آموزش شخصی‌سازی شده تصاویر پزشکی برای بهبود مهارت‌های رزیدنت‌ها و متخصصان رادیولوژی با هدف کاهش خطاهای تشخیصی مثبت کاذب و منفی کاذب که ترکیبی از یک شبکه عصبی کانولوشنی عمیق و یک الگوریتم آزمون تطبیقی و تعاملی است ارائه می‌شود. سامانه مدنظر با طراحی فرایند محور، رزیدنت‌های رادیولوژی را در یک چرخه‌ی تکرار شونده قرار می‌دهد که با طی کردن مراحل مختلف در قالب آزمون‌های طراحی شده توسط سامانه، مهارت و دقت تشخیصی خود را افزایش دهند. نتایج آزمایشات انجام شده بر روی یک پایگاه تصاویر جامع رادیوگرافی قفسه سینه، حاوی سه کلاس بیماری کوید-۱۹، ذات‌الریه و ریه سالم، و بررسی کارایی سامانه پیشنهادی بر اساس آزمون‌های کاربران واقعی از آن نشان می‌دهد کاربران با تکرار آموزش‌ها و آزمون‌های سامانه و دریافت بازخوردهای تعاملی،

[1] Radiography
[2] Fluoroscopy
[3] Sonography

به‌تدریج دقت عملکرد خود را در تشخیص بیماری‌ها بهبود داده و میزان خطاهای مثبتِ کاذب و منفیِ کاذب خود را کاهش می‌دهند. همچنین، تحلیل دقیق نتایج آزمون‌ها به تفکیک هر کلاس و درجه سختی سؤالات، نشان دهنده تأثیر مثبت این سامانه آموزشی شخصی‌سازی شده بر یادگیری و توانمندسازی رزیدنت‌ها است.

در ادامه، در بخش دوم پژوهش‌های پیشین در حوزه‌ی شخصی‌سازی آموزش، به‌ویژه رزیدنت‌های رادیولوژی، مرور می‌شوند. در بخش سوم جزئیات طراحی و پیاده‌سازی سامانه پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش چهارم نتایج آزمون‌ها و آزمایش‌های انجام‌شده برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی گزارش می‌شود، و نهایتاً در بخش پنجم نتیجه کلی پژوهش ارائه شده و در مورد کارهای آتی بحث می‌شود.

۲- کارهای مرتبط پیشین

با گسترش هوش مصنوعی در حوزه‌های مختلف به‌ویژه در بخش سلامت و تشخیص بیماری‌ها، بر اساس پژوهش‌های منتشر شده در دهه اخیر، تحقیقات در زمینه تشخیص بیماری‌ها از روی تصاویر پزشکی به دو گروه کلی تقسیم می‌شوند: ۱) سیستم‌های تشخیص و شناسایی مبتنی بر کامپیوتر[1] (CAD) و ۲) سیستم‌های کمک‌آموزشی مبتنی بر کامپیوتر[2] (CAE). علاوه بر توسعه سیستم‌های CAD که نقش حیاتی در تشخیص بیماری‌ها دارند، طراحی سیستم‌های CAE برای بهبود عملکرد و مهارت‌های پزشکان و مخصوصاً رادیولوژیست‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیستم‌های CAE از لحاظ استراتژی آموزشی به دو رویکرد سنتی و شخصی‌سازی‌شده، به شرح ذیل، تقسیم می‌شوند.

۲-۱- سیستم‌های آموزش سنتی

در سیستم‌های آموزشی سنتی یا «یکسان برای همه»، محتوای آموزشی از پیش تعیین شده و به‌صورت یکسان برای همه‌ی کاربران ارائه می‌شود. در چنین رویکردهایی، آموزش بیشتر به تلاش فردی هر کارآموز وابسته است و کمترین توجه به نیازهای خاص هر فرد داده می‌شود. برای مثال، رزیدنتی که در تشخیص یک ناهنجاری خاص ماهرتر است، همان آموزشی را دریافت می‌کند که رزیدنتی با ضعف در آن زمینه دریافت می‌کند، و برعکس. این مسئله باعث می‌شود اغلب رزیدنت‌ها نتوانند در دوره آموزشی خویش به‌طور صحیح و کامل نقاط ضعف خود را برطرف کنند و از زمان دوره آموزشی خود بطور بهینه استفاده نمایند. عواقب چنین سیستم‌های آموزشی در مرحله بکارگیری عملی این رزیدنت‌ها بسیار جبران‌ناپذیر می‌تواند باشد.

۲-۲- سیستم‌های آموزش شخصی‌سازی شده

سامانه‌های آموزشی شخصی‌سازی‌شده با تحلیل دقیق عملکرد هر رزیدنت، آموزش‌هایی متناسب با نقاط قوت و ضعف فردی ارائه می‌دهند. این سامانه‌ها با شناسایی خطاهای تشخیصی و تحلیل الگوهای یادگیری، قادرند برنامه‌های آموزشی ویژه‌ای برای هر کاربر تنظیم کنند. به‌عنوان مثال، اگر رزیدنتی در تشخیص توده‌های خاص دچار مشکل باشد، سیستم قادر به پیش‌بینی این خطاها در تصاویر ورودی جدید خواهد بود. این رویکرد بصورت تدریجی در طی دوره آموزشی باعث بهبود دقت تشخیصی و کاهش خطاهای پزشکی می‌شود. تاکنون برخی پژوهش‌ها در این خصوص در ارتباط با حوزه آموزش رادیولوژیست‌ها انجام شده است که در همه این پژوهش‌ها [۸] تا [۱۰] و [۱۲] تا [۱۸] تصاویر ماموگرافی[3] به عنوان مورد مطالعه انتخاب شده و فقط در مرجع [۱۴] علاوه بر تصاویر ماموگرافی، تصاویر سی‌تی اسکن[4] ریه نیز مورد استفاده قرار گرفته است. این پژوهش‌ها به چهار دسته قابل دسته‌بندی هستند: ۱) استفاده از توصیفگرهای BI-RADs[5] و ویژگی‌های تصویر، ۲) استفاده از ویژگی‌های تصویر با ترکیب ردیابی حرکت چشم، ۳) روش فیلترسازی مشارکتی، و ۴) روش فیلترسازی مشارکتی تقویت‌شده با محتوا[6]. در ادامه به بررسی هر یک از این دسته‌ها و پژوهش‌های انجام شده در هر دسته می‌پردازیم.

۲-۲-۱- استفاده از توصیفگرهای BI-RADs و ویژگی‌های تصویر

پژوهش انجام شده در مرجع [۸] که توسط مِژوروسکی و همکاران در سال ۲۰۱۰ منتشر شد، رویکردی پیشگامانه برای آموزش رایانه‌ای فردی در ماموگرافی از طریق مدل‌سازی کاربران ارائه داد. این مطالعه بر این فرضیه استوار بود که رادیولوژیست‌های در حال آموزش معمولاً الگوهای تکرارشونده‌ای در خطاهای تشخیصی خود دارند که می‌توان این الگوها را شناسایی و پیش‌بینی کرد. آنها با ساخت مدل‌های کاربر برای رزیدنت‌های رادیولوژی بر اساس ویژگی‌های تصویری BI-RADS، به‌ویژه در زمینه تشخیص توده‌های پستان در ماموگرافی، این فرضیه را آزمایش کردند. این مطالعه نشان داد که نتایج به طور آماری معنادار است و مدل‌های پیشنهادی

[1] Computer Aided Diagnosis (CAD)
[2] Computer-aided education (CAE)
[3] Mammography
[4] CT Scan
[5] Breast Imaging-Reporting and Data System
[6] Content-Boosted Collaborative Filtering (CBCF)

می‌توانند تا حدودی سطح دشواری موارد را بر اساس ویژگی‌های تصویری پیش‌بینی کنند که برای کاربردهای عملی حیاتی است. از معایب روش‌های پیاده‌سازی شده در این پژوهش، استفاده از تنها دو ویژگی تصویری و بررسی روش پیشنهادی فقط با ۳۰ تصویر ماموگرافی اشاره کرد. همچنین ویژگی‌های تصویری استفاده شده، توسط کارشناسان بصورت دستی استخراج و ارائه شده بود. این مطالعه پایه‌ای برای توسعه سامانه‌های آموزشی تطبیقی فراهم کرد که می‌توانست به نیازها و چالش‌های خاص هر رادیولوژیست به طور فردی پاسخ دهد.

مِژوروسکی و همکاران در سال ۲۰۱۴ در ادامه پژوهش قبلی خویش، این بار مرحله‌ی استخراج ویژگی‌ها از ماموگرافی‌ها را به صورت کاملاً خودکار بجای استفاده از ویژگی‌های انسانی به کار گرفتند [۱۵]. با استفاده از رگرسیون لُجستیک بر روی این ویژگی‌های استخراج شده توسط کامپیوتر، آنان سعی کردند پیش‌بینی کنند که آیا یک رزیدنت به درستی یک توده ماموگرافی را شناسایی خواهد کرد یا خیر. این مطالعه با استفاده از داده‌های سه کارشناس و سه رزیدنت انجام شد و نشان داد که مدل‌های آن‌ها می‌توانند خطاها را با دقتی بهتر از شانس تصادفی پیش‌بینی کنند.

در مطالعه‌ای که توسط ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ انجام شد [۱۶]، پژوهشگران به بررسی رویکردی نوین برای بهبود آموزش رادیولوژی از طریق الگوریتم‌های بینایی کامپیوتر پرداختند. این تحقیق بر پیش‌بینی احتمال از دست دادن توده‌های ماموگرافی توسط کارآموزان رادیولوژی با استفاده از ویژگی‌هایی که به طور خودکار از تصاویر استخراج شده بودند، متمرکز بود. این مطالعه بر اساس کارهای پیشین نویسندگان که شامل مدل‌سازی اشتباهات کارآموزان بر اساس ویژگی‌های ارزیابی‌شده توسط انسان بود، گسترش یافته و از ویژگی‌های استخراج‌شده توسط کامپیوتر استفاده می‌کرد. با ایجاد مدل‌های فردی برای هر کارآموز، سامانه می‌توانست موارد چالشی که احتمالاً آشکار و ملموس نمی‌شوند را شناسایی کند و بدین ترتیب امکان آموزش کارآمدتر را فراهم می‌کرد. نتایج آزمایشات نشان داد که مدل‌ها توانستند بهتر از شانس تصادفی خطاهای کارآموزان را پیش‌بینی کنند.

تمامی مطالعاتی که تا کنون بحث شد بر روی ماموگرافی معمولی بوده‌اند؛ اما رویکردهای ارائه شده توسط وَنگ و همکاران در مراجع [۹] و [۱۰]، روی ماموگرافی دیجیتال انجام شده است. هدف مرجع [۱۰]، استخراج یک مدل کاربر بود که احتمال از دست رفتن و عدم تشخیص یک ضایعه توسط رزیدنت رادیولوژی پیش‌بینی کند. ابتدا داده‌های مورد نیاز توسط سه نفر متخصص خبره برچسب‌گذاری شدند. از رزیدنت‌ها برای مدل‌سازی و ارزیابی سیستم هدف استفاده شده و خطای آنها، که بر اساس محاسبه میزان خطای تشخیص رزیدنت از تشخیص متخصصین بود، محاسبه گردید. در نهایت الگوریتم پیش‌بینی خطا، در سه مرحله‌ی متوالیِ ناحیه‌بندی تصویر، استخراج ویژگی و مدل‌سازی پیش‌بینی کننده‌ی خطا پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد که الگوریتم ارائه شده به طور موفقیت‌آمیزی موارد دشوار را شناسایی می‌کند و رویکردی امیدوارکننده برای بهبود فرایند آموزشی با تمرکز بر دشوارترین موارد برای هر کارآموز ارائه می‌دهد و از این طریق کارایی آموزش را افزایش می‌دهد.

در پژوهش [۹]، هدف تکمیل پژوهش ارائه شده در مرجع [۱۰] بود. اساس مراحل تا بخش مدل‌سازی خطا در این دو پژوهش یکسان بوده است؛ اما هدف جدید پیش‌بینی خطای مثبت کاذب بود که در پژوهش قبلی انجام نشده بود. الگوریتم پیش‌بینی خطا، در چهار مرحله‌ی متوالی، یعنی خوشه‌بندی برای استخراج مکان‌های کاندید مثبت کاذب، ناحیه‌بندی تصویر، استخراج ویژگی، و ساخت مدل پیش‌بینی کننده پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد الگوریتم پیشنهادی در پیش‌بینی نقاط غیرعادی که کارآموز احتمالاً آن‌ها را از دست خواهد داد، بهبود می‌بخشد. در واقع، این روش به پتانسیل ادغام فن‌های کمک کامپیوتری در محیط‌های آموزشی برای هدف‌گذاری نقاط ضعف خاص کارآموزان و در نتیجه بهبود دقت کلی تشخیصی تمرکز داشت.

۲-۲-۲- استفاده از ویژگی‌های تصویر با ترکیب ردیابی حرکت چشم

وُیسین و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۳] به بررسی امکان پیش‌بینی خطاهای تشخیصی در ماموگرافی با ادغام فنّاوری پیگیری چشم[1] با ویژگی‌های تصاویر که توسط کامپیوتر و انسان استخراج شده، پرداختند. آنها آزمایش‌هایی با رادیولوژیست‌هایی با سطوح تجربه متفاوت انجام دادند و مدل‌های یادگیری ماشین پیش‌بینی گروهی و شخصی‌سازی‌شده توسعه دادند. نتایج نشان داد در حالی که مدل‌های گروهی دقت معقولی ارائه دادند، مدل‌های شخصی‌سازی‌شده، به‌ویژه برای رادیولوژیست‌های باتجربه، موثرتر بودند. گندم‌کار و همکاران در سال ۲۰۱۶ روشی پیشنهاد دادند که این عناصر را برای طبقه‌بندی نواحی مشکوک شناسایی‌شده در ماموگرافی به‌عنوان مثبت حقیقی (TP) یا مثبتِ کاذب (FP) ترکیب می‌کرد [۱۸]. با ردیابی حرکات چشم رادیولوژیست‌ها و خوشه‌بندی

[1] Eye-Tracking

تثبیت‌های دیداری[1]، این مطالعه معیارهای مختلف مرتبط با حرکات چشم، مانند مدت زمان تمرکز، تعداد تثبیت‌ها، و بزرگی حرکت چشمی را استخراج کرده و آن‌ها را با ویژگی‌های مبتنی بر تصویر مانند شدت، شکل و توصیف‌کننده‌های بافت ترکیب کرد. این ترکیب به ساخت یک بردار ویژگی ۴۵ بعدی منجر شد که برای آموزش ماشین‌های بردار پشتیبان[2] برای هر رادیولوژیست استفاده شد؛ که این امر امکان پیش‌بینی خطاهای شخصی‌سازی‌شده را فراهم می‌کرد. این روش بهبودهای قابل توجهی در امتیازات JAFROC[3] برای اکثر رادیولوژیست‌های مورد آزمایش نشان داد که نشان‌دهنده‌ی دقت بیشتر در تشخیص بین TP وFP است و در نتیجه نرخ بازخوانی مثبتِ کاذب کاهش می‌یابد [۱۹].

۲-۲-۳- روش فیلترسازی مشارکتی

مِژوروسکی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ [۱۲] چارچوبی برای یک سامانه‌ی آموزش کامپیوتری تطبیقی ارائه کردند که از مدل‌سازی کاربران برای تطبیق پروتکل‌های آموزشی با نیازهای خاص رادیولوژیست‌ها استفاده می‌کرد. این سامانه از فیلترسازی مشارکتی[4] (CF) برای پیش‌بینی سطح دشواری موارد ناشناخته برای کارآموزان بر اساس عملکرد گذشته آن‌ها بهره می‌برد. سامانه‌هایی که از فیلترسازی مشارکتی بهره می‌گیرند، مزایای مهمی چون استفاده از بازخورد کاربران مشابه و یادگیری از تاریخچه تعاملات گسترده را ارائه می‌دهند. این روش به‌ویژه در پیش‌بینی دقیق‌تر موارد ناشناخته و شخصی‌سازی محتوا برای کاربران مؤثر است. اما معایب این روش شامل وابستگی به داده‌های موجود است؛ در صورتی که داده‌های کافی از تعاملات کاربران وجود نداشته باشد (مشکل داده‌های کم)، یا کاربران جدیدی به سامانه اضافه شوند، عملکرد مدل کاهش می‌یابد. همچنین، ممکن است این روش در مواجهه با موارد جدیدی که کاربران دیگر هنوز آن را ارزیابی نکرده‌اند (مشکل «مورد ناآشنا»)، ناکارآمد باشد.

۲-۲-۴- روش فیلترسازی مشارکتی تقویت‌شده با محتوا

هر دو روش فیلترسازی مبتنی بر محتوا[5] (CBF) و فیلترسازی مشارکتی، دارای محدودیت‌های ذاتی هستند. دو روش رایج فیلترسازی مبتنی بر محتوا و فیلترسازی مشارکتی به‌طور جداگانه با مشکلاتی نظیر کارآموزان جدید با تعاملات محدود[6] و موارد جدید بدون بازخورد کافی[7] مواجه‌اند که دقت پیش‌بینی را کاهش می‌دهد. برای رفع این چالش‌ها، روش ترکیبی که CBF و CF را با هم ادغام می‌کند، توسط هونگ‌لی لین و همکاران پیشنهاد شد [۱۴]. این روش با بهره‌گیری از نقاط قوت هر دو تکنیک و کاهش نقاط ضعف آن‌ها، بهبودهایی را ارائه داد. الگوریتم فیلترسازی مشارکتی تقویت‌شده با محتوا، دقت پیش‌بینی را با تولید یک ماتریس متراکم ساختگی کارآموز-دسته‌بندی[8] با استفاده ازCBF و سپس اعمال CFبرای پیش‌بینی‌های نهایی، افزایش می‌دهد. این رویکرد به طور مؤثری مشکلات کارآموز و موارد ناآشنا را حل می‌کند و آن را به یک راه‌حل امیدبخش برای توسعه سامانه‌های آموزشی شخصی‌سازی شده در آموزش رادیولوژی تبدیل می‌کند.

هریک از مطالعات ذکر شده در هر یک از دسته‌ها دارای موفقیت‌ها و کاستی‌هایی بودند. روش‌های دسته اول غیراحتمالی بودن خطاهای رزیدنت‌ها را اثبات نمود؛ اما کاستی‌هایی داشت. از جمله تعداد کم نمونه و امکان رخ دادن بیش‌برازش، استفاده از تعداد کم توصیفگرهای BI-RADs، تعلق مقادیر گسسته و اسمی به توصیفگرها به‌جای مقادیر پیوسته که منجر به دقت کم، ابهام و پیچیدگی در تشخیص نهایی شده بود. روش‌های دسته دوم، توانست با تلفیق ردیابی چشم رزیدنت‌ها با مقداردهی توصیفگرهای BI-RADs به دقت خوبی در پیش‌بینی و مدل‌سازی خطا برسد و مدل مناسبی به دست آورد. اما عیب‌های مهمی داشت؛ از جمله دشواری پیاده‌سازی در هر محیط آموزشی با هر سطح از امکانات، وابسته بودن به پروتکل‌های خاص، انجام در محیط آزمایشگاهی به‌جای محیط بالینی ماموگرافی و استفاده از تعداد محدودی از توصیفگرها.

در مورد سابقه آزمون‌های تطبیقی نیز، که در سامانه پیشنهادی از این رویکرد بهره گرفته شده است، می‌توان گفت این نوع از آزمون‌ها در اوایل قرن بیستم با آلفرد بینه (روان‌شناسی که در سال ۱۹۰۵ اولین شکل از آزمون تطبیقی را به‌عنوان یک آزمون هوش توسعه داد) آغاز شد [۲۰]. در دهه ۱۹۵۰، کامپیوترها شروع به تبدیل آزمون‌های تطبیقی به چیزی کردند که امروزه به‌عنوان CAT شناخته می‌شوند. کارهای پیشگامانه در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ پایه‌های CAT را تثبیت کرد و بهبودهای بعدی دقت و کارایی آن را افزایش داد [۲۱]. یکی از پیشرفت‌های مهم، ادغام مدل رَش[9] با تئوری پاسخ به آیتم (IRT) بود [۲۲]. این مهم به CAT اجازه داد

[1] Clustering Fixations
[2] SVM
[3] Jack-knife Alternative Free-response Receiver Operating Characteristics
[4] Collaborative Filtering (CF)
[5] Content-Boosted Filtering (CBF)
[6] Naive Trainee
[7] Naive Case
[8] Dense Pseudo Trainee-Ratings Matrix
[9] Rasch Model

دشواری سؤالات را به طور تطبیقی با سطح مهارت تخمینی فرد تطبیق دهد و به این ترتیب دقت ارزیابی مهارت را بهبود بخشد.

در دهه ۱۹۹۰، ظهور اینترنت CAT را در دسترس‌تر کرد و منجر به پذیرش آن توسط آزمون‌های بزرگی مانند GRE و TOEFL شد. درحالی‌که این آزمون‌ها از پارادایم کلاسیک CAT فراتر رفته‌اند، اصول آزمون تطبیقی همچنان پایه مدل‌های آزمونی کنونی را شکل می‌دهد. روش‌های آماری مختلفی مانند بیزی[1]، حداکثر احتمال[2]، یا روش‌های اطلاعات حداکثری[3] برای بهینه‌سازی تجربه آزمون استفاده می‌شوند. در واقع، CAT به یک موضوع غالب در گروه‌های سنجش آموزشی تبدیل شده است. برای مثال، در نشست سالانه شورای ملی سنجش آموزشی در سال ۱۹۹۹، یک‌چهارم مقالات ارائه شده به CAT اختصاص داشت [۲۳]. تحقیقات فعلی CAT موضوعات گسترده‌ای را شامل می‌شود، از جمله توسعه بانک سؤالات، انتخاب سؤالات، تخمین مهارت‌ها و مسائل مختلف مرتبط با امنیت و اعتبار آزمون. این مسائل برای اطمینان از اینکه CAT همچنان یک ارزیابی قابل اعتماد، معتبر و منصفانه باقی بماند، حیاتی هستند. یادگیری ماشین، به‌ویژه از طریق شاخه‌هایی مانند یادگیری عمیق و یادگیری تقویتی، CAT را با تحلیل‌های پیشرفته بر روی مجموعه داده‌های بزرگ، مدل‌سازی رفتارهای دقیق، و تطبیق انعطاف‌پذیر با محیط‌های آزمون مختلف، متحول می‌کند [۲۴]. با اینکه فناوری یادگیری ماشین در CAT هنوز در مراحل اولیه خود قرار دارد، پتانسیل آن مشهود است و یادگیری عمیق، پردازش زبان طبیعی و یادگیری تقویتی در بهبود ویژگی سؤالات، فرایندهای نمره‌دهی و مدل‌سازی تطبیقی نویدبخش موفقیت‌های بزرگ در آینده هستند [۲۵].

۳- روش پیشنهادی

شکل ۱ ساختار کلی سامانه معرفی شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، داده مورد استفاده در این سامانه تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه است (که می‌تواند با هر داده پزشکی دیگری جایگزین شود) و فرایند طراحی شده دارای سه بخش اصلی است: ۱) پیش پردازش، ۲) مدل یادگیری عمیق، و ۳) سامانه برخط آموزش شخصی‌سازی شده. در ادامه، ابتدا مجموعه تصاویر استفاده شده در این پژوهش معرفی می‌شوند و سپس جزئیات مربوط به این سه بخش ارائه می‌گردد.

۳-۱- مجموعه داده استفاده شده در پژوهش

مجموعه‌داده تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه که در مراحل مختلف سیستم استفاده شده است، ترکیبی از سه مجموعه‌داده زیر است:

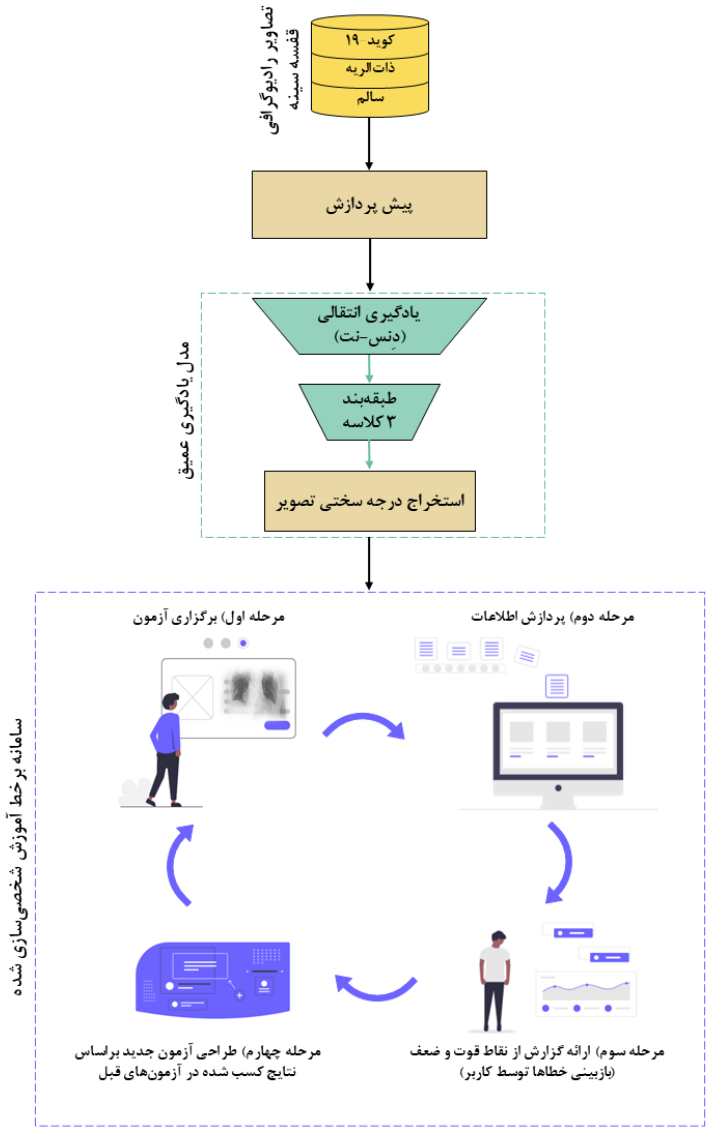
۱) مجموعه‌داده با عنوان « Labeled Optical Coherence Tomography (OCT) and Chest X-Ray Images for Classification» [۲۶] و [۲۷]: این مجموعه‌داده، متشکل از تصاویر OCT و تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه است. در این پژوهش صرفاً از بخش تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه این مجموعه‌داده استفاده می‌شود که در مجموع ۵۸۵۶ تصویر رادیوگرافی قفسه سینه شامل ۴۲۷۳ تصویر دارای ذات‌الریه (۲۷۸۰ مورد باکتریایی، ۱۴۹۳ مورد ویروسی) و ۱۵۸۳ تصویر با وضعیت سالم و عادی وجود دارد.

۲) مجموعه‌داده تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه کوید-۱۹[4]: این مجموعه‌داده ارائه شده توسط کوهن و همکاران [۲۸] در مخزن منبع باز گیت-هاب به اشتراک گذاشته شده است. تصاویر این مجموعه‌داده از منابع عمومی و همچنین از طریق جمع‌آوری غیرمستقیم از بیمارستان‌ها و پزشکان گردآوری شده است. این پروژه توسط کمیته اخلاق دانشگاه مونترال تایید شده است.

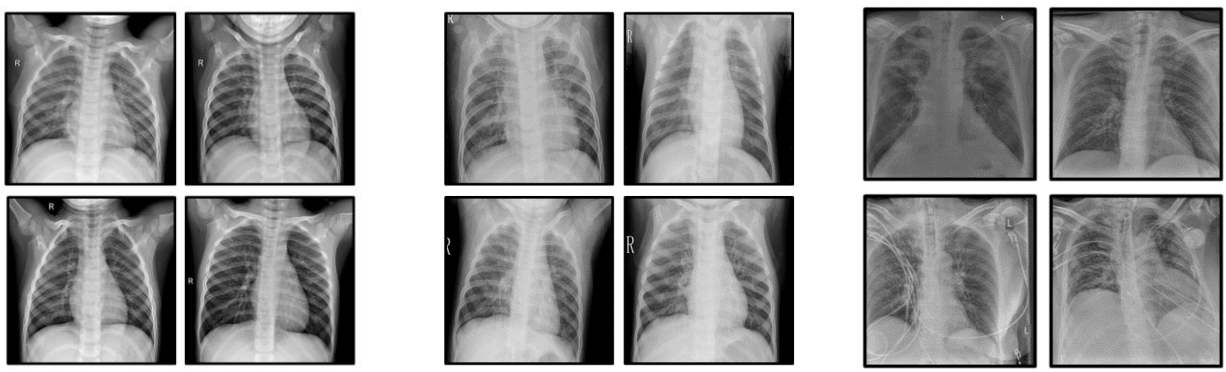
۳) مجموعه‌داده تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه کوید-۱۹ ارائه شده توسط چانگ و همکاران [۲۹] و [۳۰]: این مجموعه‌داده نیز در مخزن منبع باز گیت-هاب توسط چانگ و همکاران آن از شرکت داروین-ای‌آی کانادا[5] و گروه تحقیقاتی پردازش تصویر و بینایی، دانشگاه واترلو کانادا[6] منتشر شده است.

پس از انتخاب و ادغام تصاویر موجود در سه مجموعه‌داده فوق، مجموعه‌داده نهایی مورد استفاده در این پژوهش، حاوی ۴۲۷۳ تصویر بیماری ذات‌الریه، ۱۵۸۳ تصویر با وضعیت سالم (طبیعی) و ۵۷۶ تصویر بیماری کوید-۱۹ است. شکل ۲ نمونه‌هایی از پایگاه تصاویر گردآوری شده را نشان می‌دهد.

[1] Bayesian
[2] Maximum likelihood
[3] Maximum information methods
[4] https://github.com/ieee8023/covid-chestxray-dataset
[5] Canada DarwinAI Corp
[6] Canada and Vision and Image Processing Research Group, University of Waterloo, Canada



شکل ۱. ساختار کلی روش پیشنهادی



(الف) (ب) (ج)

شکل ۲. نمونه‌هایی از تصاویر پایگاه‌داده گردآوری شده از کلاس‌های (الف) کوید-۱۹، (ب) ذات‌الریه، و (ج) ریه طبیعی

۳-۲- پیش‌پردازش داده‌ها

با توجه به گردآوری تصاویر از منابع مختلف داده‌ای، ابتدا تصاویر خام جمع‌آوری شده تحت یک سری عملیات آماده‌سازی قرار می‌گیرند تا برای استفاده در مدل یادگیری عمیق مناسب شوند. مرحله پیش پردازش شامل عملیات به شرح ذیل است:

۱) بارگذاری و تغییر اندازه: تصاویر گردآوری‌شده به ابعاد ثابت ۲۲۴×۲۲۴ پیکسل تغییر اندازه می‌یابند. این اندازه به‌طور خاص با معماری مدل‌های یادگیری انتقالی سازگار است. تغییر اندازه با حفظ نسبت‌ها و کیفیت تصویر انجام می‌شود تا جزئیات مهم برای تحلیل حفظ شود.**۲) نرمال‌سازی تصاویر:** مقادیر پیکسل‌ها به بازه [۰, ۱] نرمال می‌شوند. این کار باعث یکنواخت‌سازی داده‌ها، بهبود پایداری عددی و تسریع روند یادگیری مدل‌های عمیق می‌شود.

۳) برچسب‌گذاری و کدگذاری: به هر تصویر یک برچسب متنی بر اساس کلاس تعلق می‌گیرد (کوید-۱۹، سالم، ذات‌الریه) که سپس به صورت عددی کدگذاری می‌شود. کلاس ۰ برای کوید-۱۹، کلاس ۱ برای حالت سالم و کلاس ۲ برای تصاویر ذات‌الریه تعریف می‌شود.

۴) افزایش داده‌ها: برای بهبود توان تعمیم مدل و کاهش بیش‌برازش، تصاویر آموزشی به‌صورت تصادفی دستخوش تغییراتی چون چرخش، بزرگ‌نمایی، تغییر کنتراست و انعکاس افقی می‌شوند. این تکنیک‌ها موجب تولید نمونه‌های متنوع و یادگیری ویژگی‌های عمومی‌تر از داده می‌گردد.

۵) تقسیم داده‌ها: در نهایت، داده‌ها به سه بخش آموزشی، اعتبارسنجی و ارزیابی تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی به‌گونه‌ای انجام می‌شود که نسبت کلاس‌ها در هر سه بخش حفظ شود، تا هر سه بخش نماینده‌ای مناسب از کل مجموعه‌داده باشد.

۳-۳- مدل یادگیری عمیق

همانطورکه در شکل ۱ نمایش داده شد، بخش مدل یادگیری عمیق شامل سه بخش استفاده از تکنیک یادگیری انتقالی از شبکه دِنس-نت ، یک طبقه‌بند سه کلاسه، و استخراج درجه سختی تصاویر است. در ادامه هریک از این بخش‌ها توضیح داده می‌شود.

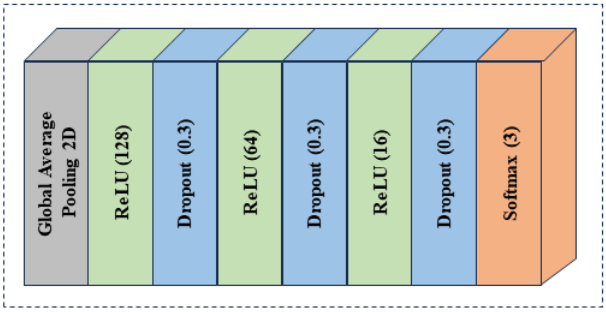
۳-۳-۱- یادگیری انتقالی دِنس-نت

یادگیری انتقالی یکی از فن‌های مهم در یادگیری عمیق است که در حوزه بینایی کامپیوتر کاربردهای موفقی داشته است. هدف اصلی یادگیری انتقالی این است که از وزن‌های به دست آمده در یک کاربرد عمومی، که به‌عنوان دانش شناخته می‌شوند، برای بهبود تعمیم‌پذیری در کاربردی دیگر استفاده شود. این روش به ما اجازه می‌دهد تا از مدل‌هایی که بر روی مجموعه‌داده‌های بزرگ و عمومی آموزش دیده‌اند، برای حل مسائل خاص با داده‌های محدود بهره‌مند شویم [۳۱]. در این پژوهش نیز یادگیری انتقالی به منظور بهره‌برداری از دانش مدل‌های از پیش‌آموزش‌دیده به کار رفته است. در روش پیشنهادی، از مدل یادگیری انتقالی دِنس-نت [۳۲] استفاده می‌شود. دِنس-نت توسط گائو هوانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ معرفی شد. این معماری به دلیل نوآوری در اتصال لایه‌ها و کارایی بالا در پردازش تصویر بسیار مورد توجه قرار گرفت. ایده‌ی اصلی دِنس-نت این است که هر لایه در شبکه، به تمام لایه‌های قبلی خود متصل می‌شود. این نوع اتصال منجر به بهبود جریان اطلاعات و گرادیان‌ها در سراسر شبکه می‌شود که به یادگیری بهتر و کارایی بالاتر کمک می‌کند. دِنس-نت-۱۲۱ یکی از نسخه‌های پرکاربرد و متداول دِنس-بلوک است. عدد ۱۲۱ نشان‌دهنده تعداد کل لایه‌های موجود در شبکه است.

۳-۳-۲- طبقه‌بند سه کلاسه

خروجی بخش یادگیری انتقالی به یک طبقه‌بند سه کلاسه، که از یک معماری ساده شبکه عصبی کانولوشنی برخوردار است، داده می‌شود. جزئیات لایه‌های شبکه عصبی عمیق این طبقه‌بند سه طبقه در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، ابتدا از یک لایه پولینگِ میانگین کلّی دوبُعدی[1] استفاده می‌شود. از این لایه به عنوان یک پل بین لایه‌های کانولوشنی و لایه‌های خروجی شبکه دِنس-نت استفاده شده است. در ادامه سه لایه کاملاً متصل[2] با تعداد نورون‌های ۱۲۸، ۶۴، ۱۶ قرار دارد. برای هر یک از این لایه‌ها، از یک لایه حذف تصادفی[3] با نرخ ۰/۳ و تابع فعال‌ساز واحد خطی اصلاح شده[4] استفاده می‌شود. خروجی آخرین لایه به تابع فعال‌ساز سافت‌مکس[5] داده می‌شود.

[1] GlobalAveragePooling2D
[2] Fully Connected Layer
[3] Dropout
[4] ReLU
[5] Softmax



شکل ۳. جزئیات لایه‌های شبکه عصبی عمیق طراحی شده برای بخش طبقه‌بندی

شبکه عصبی کانولوشنی پیشنهادی با استفاده از داده‌های آموزشی با نرخ یادگیری اولیه ۰/۰۰۱، تعداد ۱۰۰ دور آموزش، تابع هزینه اختلاف آنتروپی موضوعی[1] و بهینه‌ساز آدام[2] با نرخ یادگیری ۰/۰۰۱ آموزش داده می‌شود. در مدل پیشنهادی، از بهینه‌ساز آدام استفاده شده که به دلیل کارایی بالا و تنظیمات ساده، به طور گسترده‌ای در شبکه‌های عصبی عمیق استفاده می‌شود.

همچنین، برای جلوگیری از بیش‌برازش، از فن‌های حذف تصادفی با نرخ ۰/۳ و Callbackها استفاده می‌شود. توقف زودهنگام و کاهش نرخ یادگیری، دو نوع از Callbackهایی هستند که در این پژوهش استفاده می‌شوند. تکنیک توقف زودهنگام زمانی که عملکرد مدل در داده‌های اعتبارسنجی بهبود نمی‌یابد، آموزش را زودتر متوقف می‌کند تا از بیش‌برازش جلوگیری شود. تکنیک کاهش نرخ یادگیری نیز در صورتی که بهبودی در تابع هزینه مشاهده نشود، نرخ یادگیری را کاهش می‌دهد تا مدل بتواند با دقت بیشتری به سمت کمینه‌های محلی هدایت شود. کلاس‌های نامتوازن نیز در داده‌های آموزشی با استفاده از وزن‌دهی کلاس‌ها متعادل شده‌اند. در مسائل طبقه‌بندی که داده‌ها نامتوازن هستند، به‌منظور جلوگیری از سوگیری مدل به سمت کلاس‌هایی که تعداد بیشتری از نمونه‌ها را دارند، وزن‌های کلاس‌ها محاسبه می‌شود. این وزن‌ها به مدل کمک می‌کنند تا به هر کلاس اهمیت بیشتری نسبت به میزان فراوانی آن در داده‌های آموزشی بدهد. وزن‌های کلاس در هنگام آموزش به تابع هزینه اضافه می‌شوند تا مدل بر اساس این وزن‌ها آموزش ببیند.

۳-۳-۳- استخراج درجه سختی تصویر

برای استخراج ویژگی درجه سختی هر یک از تصاویر موجود در پایگاه تصاویر استفاده شده در این پژوهش، هر یک از تصاویر پیش‌پردازش شده پایگاه تصاویر به‌عنوان ورودی به مدل آموزش‌دیده وارد می‌شود. در واقع مدل آموزش‌دیده با کلیه تصاویر آزمایش می‌شود. البته بجای استفاده از تشخیص برچسب نهایی مدل، مقادیر احتمالاتی خروجی مدل به‌عنوان میزان اطمینان مدل از پیش‌بینی خود از هر کلاس در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه درجه سختی یک تصویر، احتمال پیش‌بینی شده برای کلاس واقعی آن تصویر (کلاسی که برچسب صحیح تصویر است) در نظر گرفته شده و سپس درجه سختی، که مقدار مکمل این احتمال تعریف می‌شود، محاسبه می‌گردد. به عبارت دیگر درجه سختی هر تصویر $d = 1 - p$ تعریف می‌شود که p برابر است با مقدار احتمال پیش‌بینی شده توسط مدل برای کلاس واقعی هر تصویر. بنابراین، اگر مدل احتمال بالایی برای کلاس واقعی ارائه دهد، مقدار درجه سختی پایین خواهد بود (چون مدل در این پیش‌بینی اطمینان بالایی دارد). برعکس، اگر احتمال برای کلاس واقعی پایین باشد، مقدار درجه سختی بالا خواهد بود (چون مدل در این پیش‌بینی اطمینان کمی دارد).

پس از محاسبه درجه سختی هر یک از تصاویر، مجموعه تصاویر پایگاه به سه گروه آسان (تصاویر با درجه سختی کمتر از ۰/۳۴)، متوسط (تصاویر با درجه سختی بزرگتر یا مساوی ۰/۳۴ و کوچکتر یا مساوی ۰/۶۸)، و سخت (تصاویر با درجه سختی بیشتر از ۰/۶۸) تقسیم می‌شوند (در واقع بازه احتمالاتی ۰ تا ۱ به سه قسمت تقسیم شده است). این تصاویر دسته‌بندی شده از نظر درجه سختیِ تشخیص در مراحل بعدی و در طراحی ترکیبی سوالات آزمون کاربران خواهند شد.

۳-۴- سامانه برخط آموزش شخصی‌سازی شده

همانطورکه در شکل ۱ نشان داده شده است، سامانه برخط آموزش شخصی‌سازی شده دارای چهار مرحله اصلی در فرایند آموزش رزیدنت‌ها است: ۱. مرحله اول: در آزمون اول سؤالات به‌صورت متوازن از تمامی کلاس‌ها و از هر نوع درجه سختی به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. این مرحله با هدف جمع‌آوری داده‌های پایه‌ای برای شناخت اولیه از توانمندی‌ها و ضعف‌های کاربر طراحی شده است؛ ۲. مرحله دوم: بعد از پایان هر آزمون، عملکرد کاربر مشخص شده و اطلاعات آزمون پردازش می‌شود؛ ۳. مرحله سوم: به کاربر گزارشی از نقاط قوت و ضعف او ارائه می‌شود. در این مرحله کاربر امکان بازبینی سؤالات را برای بررسی خطاهای خود دارد تا اینکه با نقاط ضعف خود آشنا شود و سؤالات آزمون(های) قبل را بررسی کند؛ ۴. مرحله چهارم: آزمون جدید بر اساس نتایج کسب شده توسط کاربر در آزمون(های) قبل با استفاده از الگوریتم آزمون تطبیقی و تعاملی

[1] Categorical Cross entropy

[2] Adam

که در ادامه شرح داده خواهد شد، طراحی می‌شود. سؤالات آزمون‌های بعدی، با هدف تمرکز بیشتر بر نقاط ضعف هر کاربر انتخاب می‌شوند. این مراحل تا زمانی که میزان دقت و میزان خطای مثبتِ کاذب و منفیِ کاذب کاربر در هر سه کلاس مدنظر به مقدار قابل‌قبولی برسد، تکرار شده و ادامه خواهد داشت. البته در هر تکرار، تمام داده‌های آزمون‌های قبلی برای جلوگیری از سوگیری و تأثیر عوامل حاشیه‌ای لحاظ می‌گردد.

در سامانه‌ی طراحی‌شده، شخصی‌سازی بر مبنای ترکیبی از تحلیل عملکرد گذشته‌ی هر رزیدنت، الگوی خطاهای او، و به‌کارگیری آزمون تطبیقی و تعاملی انجام می‌گیرد. شخصی‌سازی مدنظر در این سامانه نه فقط انتخاب سؤال ساده یا دشوار، بلکه یک فرایند عمیقِ تشخیص الگوهای رفتاری و شناختی در تصمیم‌گیری‌های تشخیصی کاربران است. این سیستم با بهره‌گیری از بازخورد مستمر، سعی در بهینه‌سازی فرآیند یادگیری انفرادی و هدایت کاربر به سمت رفع نواقص شناختی خاص خود دارد. در ادامه هر چهار مرحله مذکور به‌صورت کامل تشریح می‌شود.

۳-۴-۱- مرحله اول: برگزاری آزمون

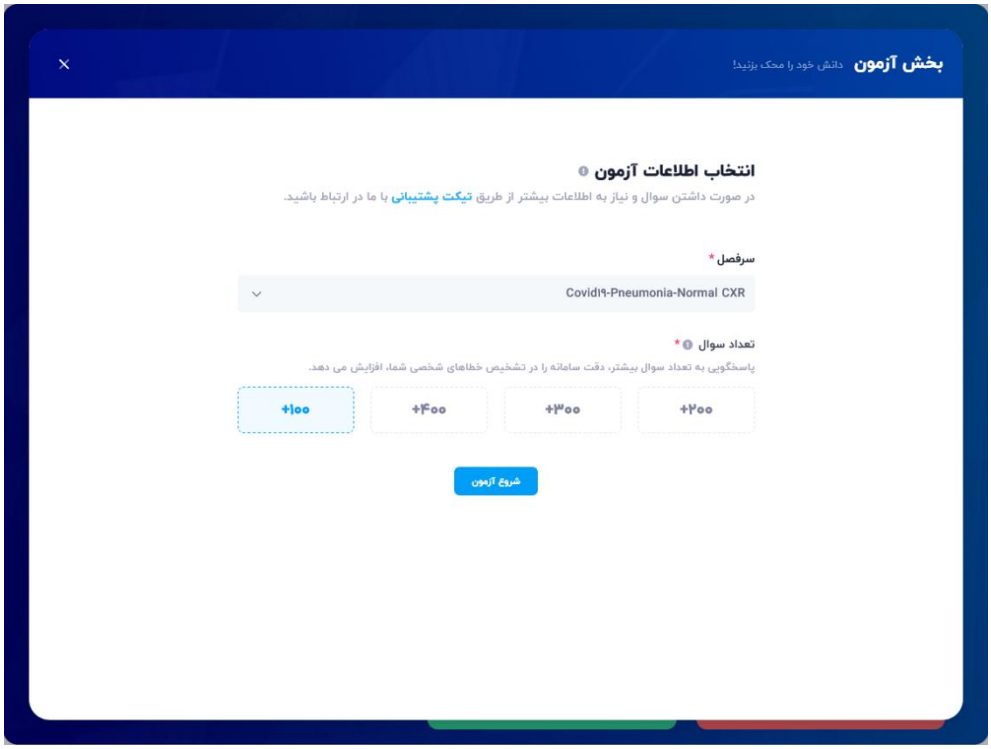
در آزمون اولیه، تعداد کل سؤالات تعیین شده برای آزمون، به طور مساوی بین سه کلاس کوید-۱۹، ذات‌الریه و ریه سالم تقسیم می‌شود. برای هر کلاس، سؤالات بر اساس سطح دشواری به سه گروه آسان، متوسط، و سخت تقسیم می‌شوند. ۳۰ درصد از سؤالات انتخابی برای هر کلاس از میان تصاویر با درجه سختی آسان، ۴۰ درصد از سؤالات از میان تصاویر با درجه سختی متوسط، و ۳۰ درصد باقی‌مانده از میان تصاویر با درجه سختی سخت انتخاب می‌شوند. سؤالات انتخاب شده برای هر کلاس با هم ترکیب می‌شوند و به طور تصادفی مرتب می‌شوند تا ترتیب نهایی سوالات آزمون مشخص شود. این روش ترکیبی سوالات آزمون سبب می‌شود که آزمون‌ها از تنوع کافی در سطوح دشواری و کلاس‌ها برخوردار بوده و ترتیب سؤالات به طور تصادفی و بدون الگو مشخص شود که به برقراری عدالت در ارزیابی کاربران کمک می‌کند. رابط‌های کاربری مبتنی بر وب پیاده‌سازی شده برای سامانه پیشنهادی در مرحله برگزاری آزمون در شکل ۴ و شکل ۵ نمایش داده شده است.

۳-۴-۲- مرحله دوم: پردازش اطلاعات

پس از آنکه کاربر به آزمون خود پایان داد، در بخش پردازش اطلاعات بر اساس تشخیص‌های کاربر، معیارهای عملکرد او در آزمون برگزار شده محاسبه می‌شود. در این قسمت ابتدا شمارش تعداد تشخیص‌های مثبتِ کاذب[۱]، منفیِ کاذب[۲]، مثبتِ واقعی[۳] و منفیِ واقعی[۴] برای هر کلاس انجام شده و ذخیره می‌شود. سپس با استفاده از این اطلاعات، محاسبه‌ی معیارهای ارزیابیِ صحت[۵]، بازیابی[۶]، دقت[۷] و امتیاز اِف[۸] برای هر کلاس بصورت مجزا و تجمیعی انجام می‌شود. در ادامه کارنامه کاربر بر اساس این اطلاعات به‌روزرسانی می‌شود. به عبارتی در این مرحله علاوه بر محاسبه‌ی دقیق معیارهای عملکرد برای آزمون، کارنامه کاربر که اطلاعات مهمی همچون وضعیت کاربر و نقاط ضعف و قدرت وی در آن ذخیره شده، به‌روزرسانی می‌شود.

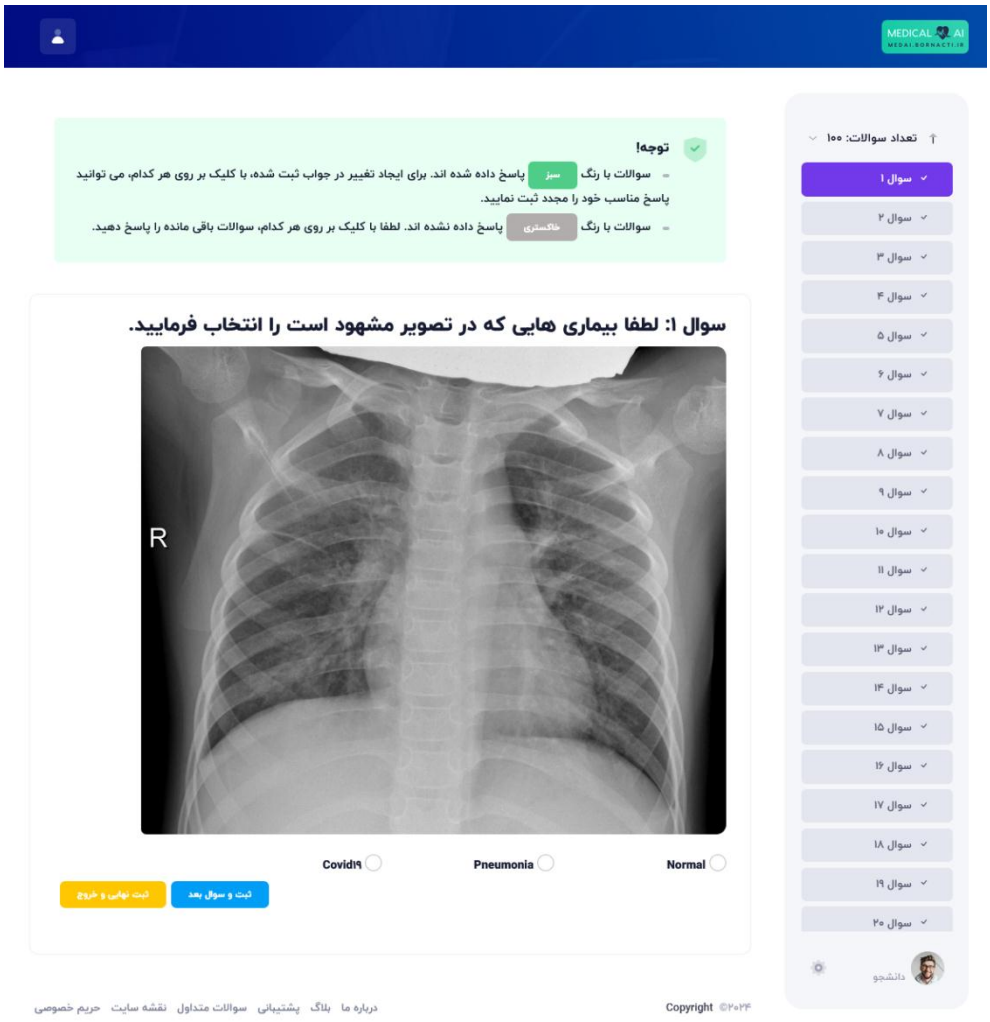
[1] False Positive (FP)
[2] False Negative (FN)
[3] True Positive (TP)
[4] True Negative (TN)
[5] Accuracy
[6] Recall
[7] Precision
[8] F-score

(الف)



(ب)

شکل ۴. رابط‌های کاربری مبتنی بر وب پیاده‌سازی شده برای مرحله اول سامانه برخط آموزشی. (الف) صفحه پیشخوان هر کاربر، و (ب) بخش انتخاب سر فصل و تعداد سؤالات برای کاربران

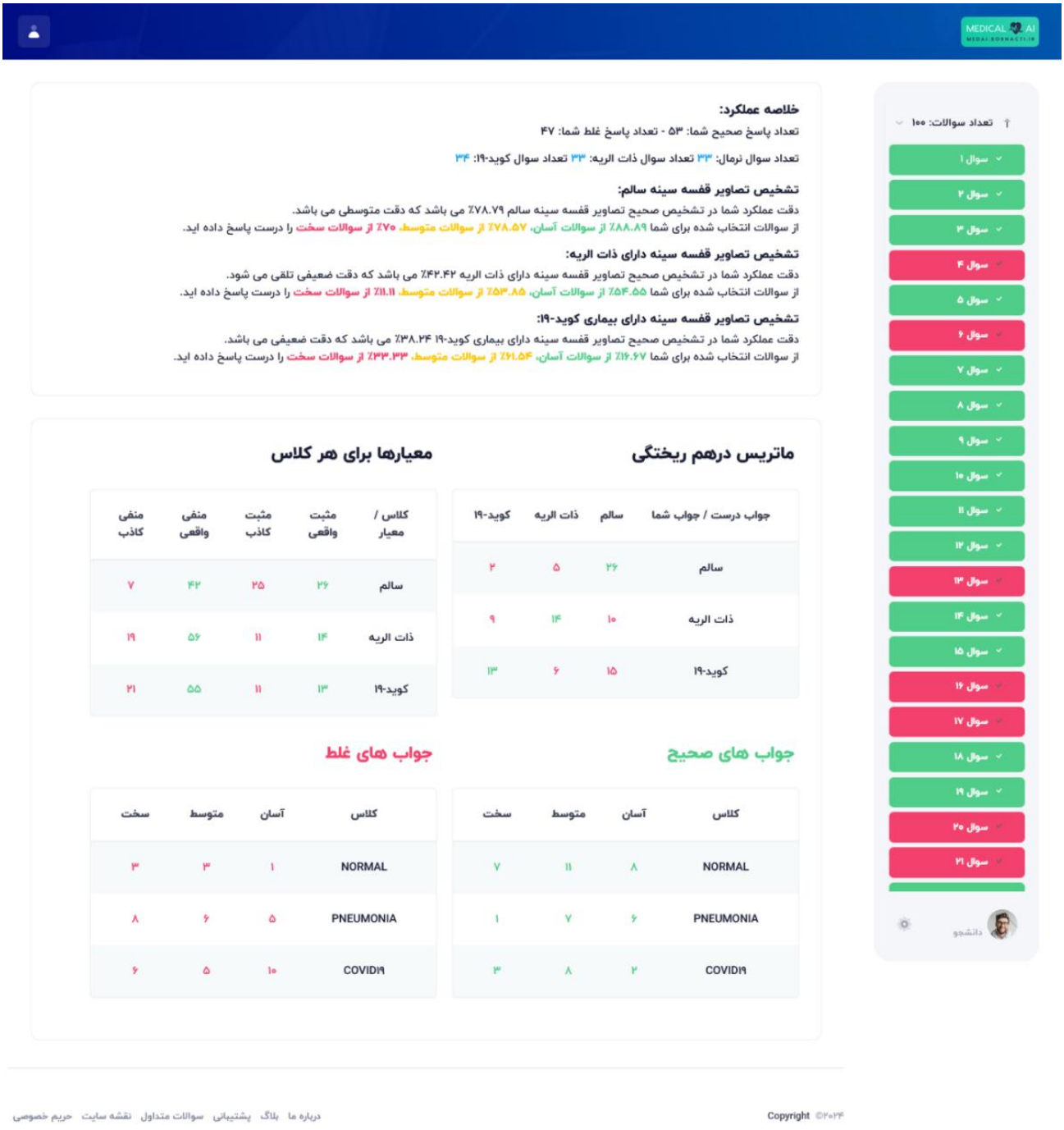


شکل ۵. رابط کاربری مبتنی بر وب پیاده‌سازی شده برای صفحه آزمون

۳-۴-۳- مرحله سوم: ارائه گزارش از نقاط قوت و ضعف به کاربر

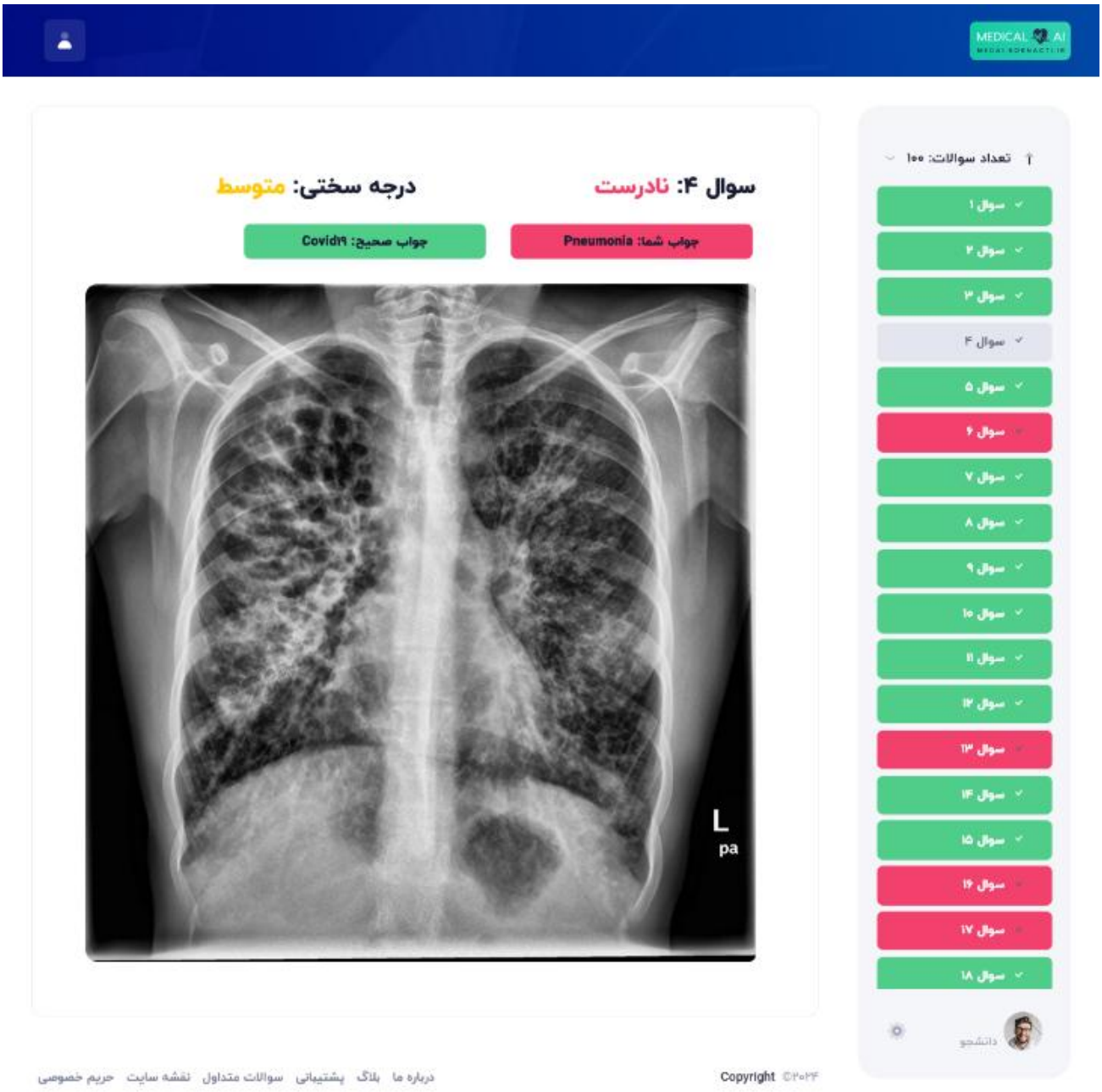
در این بخش، گزارشی اختصاصی برای هر آزمون ارائه می‌شود. هنگامی که کاربر برای بررسی آزمون خود وارد صفحه‌ی گزارش آزمون می‌شود، یک رابط کاربری همانند نمونه موجود در شکل ۶ را مشاهده می‌کند. در این قسمت، گزارش تعداد پاسخ صحیح و غلط کاربر از تعداد کل سؤالات نشان داده شده و به تفکیک هر کلاس دقت کاربر گزارش می‌شود. همچنین برای هر کلاس مشخص می‌شود که از سؤالات انتخاب شده برای هر کلاس، کاربر توانسته چه درصدی از هر نوع درجه سختی را درست پاسخ دهد. در قسمت پائین این رابط کاربری (شکل ۶)، چهار جدول طراحی شده که به ترتیب ماتریس درهم‌ریختگی، معیارها برای هر کلاس، جواب‌های صحیح و جواب‌های غلط را نشان می‌دهد.

از جدول درهم‌ریختگی، کاربر می‌تواند آگاه شود که چه تعداد از پاسخ‌های اشتباهی که برای یک کلاس داده است، مربوط به کدامین کلاس‌ها است. جدول جواب‌های صحیح، اطلاعاتی در مورد اینکه کاربر چه تعداد سؤال از درجات سختی مختلف در کلاس‌های مختلف توانسته پاسخ صحیح دهد، را ارائه می‌دهد. در مورد جدول جواب‌های غلط نیز همان اطلاعات برای سؤالاتی است که کاربر نتوانسته درست پاسخ دهد. این جداول کمک می‌کند تا کاربر یک ارزیابی جامع از میزان دقت و سهل‌انگاری خود به دست آورد.



شکل ۶. نمونه رابط کاربری پیاده‌سازی شده برای گزارش خلاصه عملکرد هر آزمون در مرحله سوم سامانه برخط آموزشی

همچنین امکان بررسی سؤال به سؤال برای کاربر فراهم شده است. در شکل ۷ نحوه نمایش هر سؤال برای کاربر نشان‌داده‌شده است. مشاهده می‌شود که برای کاربر، علاوه بر نمایش صحیح یا غلط بودن پاسخ ارسالی، جواب صحیح و درجه سختی سؤال نیز برای راهنمایی بهتر و توجه به جزئیات مطلوب نمایش داده می‌شود. علاوه بر این اطلاعات، بخشی با عنوان آموزش برای کاربر تدارک دیده شده تا در هر مرحله از مراحل سامانه که کاربر نیاز به مشاهده نمونه‌هایی از یک کلاس و یا مرور نحوه تشخیص و تمیز سه کلاس از یکدیگر داشته باشد، بتواند به‌صورت خلاصه به اطلاعات آموزشی کافی دسترسی داشته باشد. در شکل ۸ نمونه‌ای از نحوه‌ی نمایش اطلاعات در صفحه آموزش نشان داده شده است.



شکل ۷. نمونه رابط کاربری پیاده‌سازی شده برای نمایش سؤالات در قسمت بازبینی مرحله سوم سامانه برخط آموزشی

آموزش تشخیص بیماری های ذات الریه و کوید-۱۹ از تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه:

تصویربرداری با اشعه ایکس از قفسه سینه (Chest X-Ray یا CXR) یکی از ابزارهای اصلی برای تشخیص بیماری‌های ریوی مانند پنومونی و کووید-۱۹ است. در ادامه، جزئیاتی از نحوه تشخیص این بیماری‌ها بر اساس تصاویر CXR با دقت بیشتری بررسی خواهد شد.

- **سایه‌بندی (Opacity)**

ویژگی‌ها: نواحی سایه‌بندی به صورت مناطق خاکستری یا سفید در تصاویر CXR دیده می‌شوند که منعکس کننده تجمع مایعات، سلول‌های التهابی یا مواد دیگر در آلوئول‌ها هستند.
مفهوم: این سایه‌بندی نمایانگر التهاب یا عفونت در ریه است.
در پنومونی: سایه‌بندی ممکن است به صورت مناطق کوچک یا بزرگ، معمولاً با لبه‌های نامنظم، دیده شود. این مناطق ممکن است در لوب‌های خاصی متمرکز شوند.
در کووید-۱۹: سایه‌بندی های پراکنده، به ویژه در مناطق زیر پلورال و محیطی (پریفرال) ریه‌ها، دیده می‌شود. این الگو ممکن است در هر دو سمت ریه‌ها ظاهر شود و در مراحل پیشرفته تر بیماری، این سایه بندی ها افزایش یابد.

- **کنسیلویداسیون (Consolidation)**

ویژگی‌ها: مناطق کنسیلویداسیون به‌صورت نواحی سفید و چگالی بالا دیده می‌شوند.
مفهوم: این نواحی نشان‌دهنده تجمع مایع، پروتئین و سلول‌های التهابی در آلوئول‌ها و به دلیل عفونت یا التهاب شدید هستند.
در پنومونی: کنسیلویداسیون معمولاً به صورت مناطق موضعی و متمرکز دیده می‌شود که می‌تواند لوب یا بخش خاصی از ریه را درگیر کند. این الگو به‌عنوان نشانه‌ای از عفونت باکتریایی شایع است.
در کووید-۱۹: کنسیلویداسیون نیز ممکن است دیده شود، اما اغلب به‌صورت پراکنده‌تر و در مناطق وسیع‌تری قرار دارد. این نواحی معمولاً در مراحل پیشرفته عفونت ویروسی افزایش می‌یابند.

- **ضایعات شیشه مات (Ground-Glass Opacities یا GGO)**

ویژگی‌ها: این ضایعات به‌صورت نواحی نیمه‌شفاف خاکستری دیده می‌شوند.
مفهوم: ضایعات شیشه مات نشان‌دهنده التهاب بینابینی و التهابات غیرموضعی در آلوئول‌ها هستند.
در پنومونی: این ضایعات ممکن است دیده شوند، اما معمولاً کمتر شایعند و بسته به نوع پنومونی، ممکن است شدت آنها متفاوت باشد.
در کووید-۱۹: ضایعات شیشه مات یکی از ویژگی‌های کلیدی کووید-۱۹ در سی‌تی اسکن و CXR است. این ضایعات اغلب در هر دو لوب ریه و در مناطق زیر پلورال و محیطی دیده می‌شوند.

- **ضخیم‌شدن پلورا (Pleural Thickening)**

ویژگی‌ها: ضخیم‌شدن پلورا به‌صورت نوارهای سفید و متراکم در امتداد جداره ریه‌ها دیده می‌شود.
مفهوم: این حالت ممکن است نشان‌دهنده التهاب یا عفونت مزمن در پلورا باشد.
در پنومونی: ممکن است ضخیم‌شدن پلورا دیده شود، اما معمولاً شایع نیست.
در کووید-۱۹: ضخیم‌شدن پلورا ممکن است کمتر دیده شود و این ویژگی به‌عنوان مشخصه اصلی کووید-۱۹ محسوب نمی‌شود.

- **نکات مهم در تشخیص تفاوت پنومونی و کووید-۱۹ در CXR**

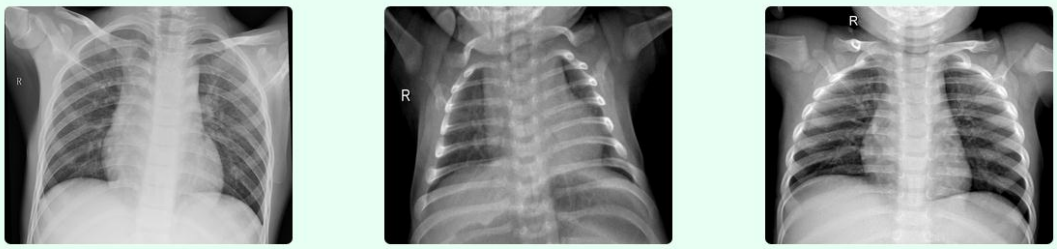
الگوی توزیع: در پنومونی باکتریایی، کنسیلویداسیون‌ها معمولاً به صورت متمرکز و در یک لوب خاص ظاهر می‌شوند، در حالی که در کووید-۱۹ الگوی ضایعات پراکنده‌تر و در هر دو لوب دیده می‌شود.
شدت و پراکندگی ضایعات: شدت و گستردگی ضایعات شیشه مات و کنسیلویداسیون در کووید-۱۹ به‌مراتب بیشتر و پراکنده‌تر است.
مقایسه با سایر روش‌های تشخیصی: برای تشخیص دقیق‌تر، نتایج CXR معمولاً با نتایج سی‌تی اسکن و شواهد بالینی دیگر مانند آزمایش‌های PCR مقایسه می‌شود.

- **نتیجه‌گیری**

تصویربرداری با اشعه ایکس از قفسه سینه یکی از روش‌های مؤثر برای تشخیص بیماری‌های ریوی از جمله پنومونی و کووید-۱۹ است. با تفسیر دقیق و استفاده از دانش تخصصی برای تشخیص الگوهای مشخصه، پزشکان می‌توانند این بیماری‌ها را به‌موقع تشخیص داده و درمان مناسبی را برای بیماران تجویز کنند.

نمونه تصاویر مربوط به هر بیماری و قفسه سینه سالم

- نمونه های زیر برای یادگیری وضعیت **نرمال** قفسه سینه در تصویر رادیوگرافی گردآوری شده است:



- نمونه های زیر برای یادگیری وضعیت **ذات الریه** قفسه سینه در تصویر رادیوگرافی گردآوری شده است:

- نمونه های زیر برای یادگیری وضعیت **کووید-۱۹** قفسه سینه در تصویر رادیوگرافی گردآوری شده است:

شکل ۸. نمونه رابط کاربری پیاده‌سازی شده برای صفحه‌ی آموزشی سامانه برخط آموزشی

۳-۴-۴- مرحله چهارم: طراحی آزمون بر اساس نتایج کسب شده در آزمون‌های قبل

هدف اصلی سامانه‌های آزمون تطبیقی، بهینه‌سازی فرایند ارزیابی با انتخاب سؤالاتی است که با سطح دانش و توانایی‌های فرد آزمون دهنده هماهنگ باشند. در این پژوهش یک الگوریتم برای انتخاب سؤالات بر اساس عملکرد کاربر در آزمون‌های قبلی ارائه می‌شود، که از فن‌های آماری و تئوری‌های مطرح در آزمون‌سازی استفاده می‌کند. این فنون در مراجع [۳۳] و [۳۴] توضیح داده شده است. آزمون انطباقی کامپیوتری[۱] که از روان‌سنجی سرچشمه می‌گیرد، امکان ارزیابی کارآمد را فراهم می‌کند [۳۵] و [۳۶]. این روش به طور گسترده در سناریوهای برگزاری آزمون از جمله در دولینگو[۲]، جی‌آرای[۳]، تافل[۴] و جی‌مَت[۵] استفاده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی برای انتخاب سؤالات بر اساس عملکرد قبلی هر کاربر از ترکیبی از معیارهای عملکرد کاربر و مفاهیم نظریه پاسخ به آیتم[۶] و یادگیری تطبیقی[۷] که بخشی از یادگیری تعاملی[۸] است، برای انتخاب بهینه سؤالات استفاده می‌کند. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، الگوریتم پیشنهادی از چهار مرحله تشکیل می‌شود که عبارتند از: ۱) محاسبه‌ی معیار خطا، ۲) تخصیص وزن به کلاس‌ها، ۳) انتخاب سؤالات، و ۴) تنظیم نهایی و ارائه‌ی سؤالات. در ادامه، هر یک از این مراحل تشریح می‌شوند.

۱) محاسبه‌ی معیار خطا: بر اساس اطلاعاتی که در مرحله دوم پردازش و استخراج شده، دو معیار نرخ منفیِ کاذب[۹] و نرخ مثبتِ کاذب[۱۰] محاسبه می‌شود. معیار نرخ منفیِ کاذب نشان می‌دهد که چه نسبتی از نمونه‌های مثبتِ واقعی به‌اشتباه به‌عنوان منفی پیش‌بینی شده‌اند. در زمینه‌هایی مانند پزشکی، امنیت و یا مسائل حیاتی دیگر، نرخ منفیِ کاذب باید تا حد ممکن پایین باشد، زیرا از دست دادن موارد مثبت (به‌خصوص در موارد حیاتی مثل بیماری) می‌تواند منجر به پیامدهای جدی شود. به‌عنوان‌مثال، در یک سامانه تشخیص کوید-۱۹، اگر نرخ منفیِ کاذب بالا باشد، این بدان معناست که بیماران مبتلا به کوید-۱۹ به اشتباه سالم تشخیص داده شده‌اند و این امر می‌تواند منجر به عدم درمان به‌موقع شود. به همین دلیل، در چنین کاربردهایی، مدل‌ها یا افرادی که نرخ منفیِ کاذب کمتری دارند، ترجیح داده می‌شوند. رابطه (۱)، تعریف ریاضی این معیار را معرفی می‌کند.

$$FNR_{class} = \frac{FN_{class}}{TP_{class} + FN_{class}} \quad (۱)$$

معیار نرخ مثبتِ کاذب نیز نشان می‌دهد که چه نسبتی از نمونه‌های منفیِ واقعی به‌اشتباه به‌عنوان مثبت پیش‌بینی شده‌اند. رابطه (۲)، تعریف ریاضی این معیار را نشان می‌دهد.

$$FPR_{class} = \frac{FP_{class}}{FP_{class} + TN_{class}} \quad (۲)$$

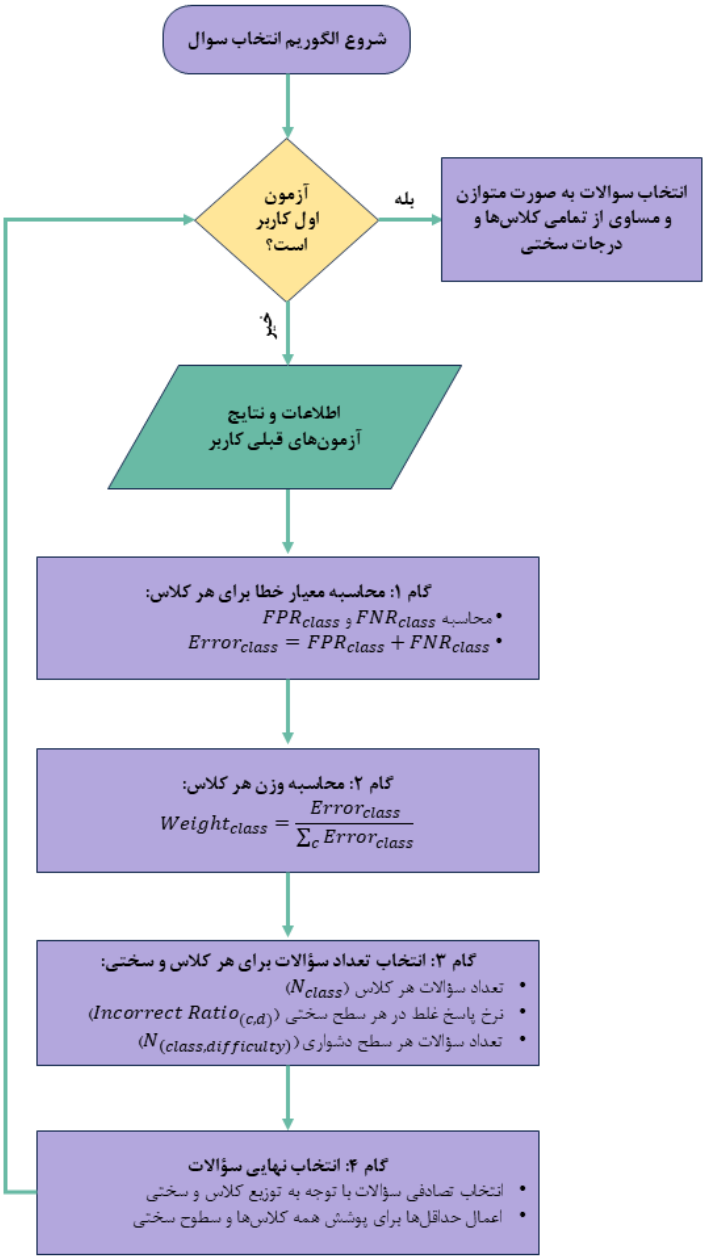
نهایتاً معیار خطای کاربر در این پژوهش، مجموع دو نرخ منفیِ کاذب و مثبتِ کاذب تعریف می‌شود که رابطه (۳) مبین آن است.

$$Error_{class} = FPR_{class} + FNR_{class} \quad (۳)$$

مجموع این دو نرخ به دلیل پوشش جامع‌تر خطاهای سامانه، تعادل بین خطاهای مثبت و منفی کاذب، و قابلیت تنظیم و بهینه‌سازی ساده‌تر، یک معیار قدرتمند و مناسب برای ارزیابی عملکرد کاربر در سامانه آموزش شخصی‌سازی شده براساس الگوریتم انتخاب سوال تطبیقی و تعاملی است. برای مثال، در مسئله مورد بحث در این پژوهش، اینکه یک رزیدنت به یک بیمار که دارای بیماری کوید-۱۹ است، تشخیص سالم بدهد (یعنی بیمار دارای کوید-۱۹ نیست که خطای منفیِ کاذب تلقی می‌شود)، و یا به بیماری که سالم است تشخیص کوید-۱۹ بدهد (خطای مثبتِ کاذب)، هر دو به یک اندازه خطایی فاحش و گاه جبران‌ناپذیر هستند که می‌تواند پیامدهای جدی به همراه داشته باشد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که این معیار برای هر کلاس به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شود.

۲) تخصیص وزن به کلاس‌ها: بر اساس معیار خطای کاربر، محاسبه شده برای هر کلاس، وزن‌های مربوط به هر کلاس تعیین می‌شوند. این وزن‌ها با استفاده از ترکیب نرخ مثبتِ کاذب و نرخ منفیِ کاذب که به‌عنوان خطای کاربر در نظر گرفته شده است، محاسبه می‌شوند. رابطه (۴) نحوه محاسبه وزن هر کلاس را در انتخاب سؤالات تعریف می‌کند. بر اساس این رابطه، هرچه مقدار خطای یک کلاس، بالاتر باشد، وزن بیشتری به آن در انتخاب سوالات اختصاص داده می‌شود، به این معنا که سامانه به این کلاس توجه بیشتری خواهد داشت.

[1] Coputerized Adaptive Testing (CAT)
[2] Duolingo
[3] GRE
[4] TOEFL
[5] GMAT
[6] Item Response Theory (IRT)
[7] Adaptive Learning
[8] Interactive Learning
[9] False Positive Rate (FPR)
[10] False Negative Rate (FNR)



شکل ۹. نمای کلی الگوریتم انتخاب سؤال در سامانه برخطِ آموزش شخصی‌سازی‌شده

$$Weight_{class} = \frac{Error_{class}}{\sum_c Error_{class}} \qquad (۴)$$

۳) انتخاب سؤالات: تعداد سؤالات مورد نیاز از هر کلاس و سطح دشواری بر اساس وزن‌های محاسبه‌شده و نسبت خطاهای کاربر تعیین می‌شود. الگوریتم به‌گونه‌ای طراحی شده که سؤالات را به نحوی انتخاب کند که توازن بین سطح دشواری و عملکرد کاربر در هر کلاس نیز حفظ شود. رابطه (۵) نحوه محاسبه تعداد سؤالات انتخابی از هر کلاس بر اساس وزن‌های تعیین شده را تعریف می‌کند. در این رابطه N_{class} نشانگر تعداد سؤالات برای هر کلاس بوده و N_{Total} بیانگر تعداد کل سؤالات تعیین شده برای آزمون است.

$$N_{class} = max((20 \times N_{Total})/100, Weight_{class} \times N_{Total}) \qquad (۵)$$

اگر کاربر بتواند در یک کلاس به دقت بالایی برسد (کاهش قابل توجه میزان خطا)، در حالت عادی این مهم باعث خواهد شد تا وزن آن کلاس کاهش یافته و به تبع آن تعداد سؤالات انتخابی از آن کلاس به حداقل برسد. به دلیل آن که آموزش در حوزه‌ی تصاویر پزشکی، تک مرحله‌ای اتفاق نمی‌افتد، این روش ممکن است در چندین مرحله باعث شود کاربر دقت به دست آمده در آن کلاس را

از دست داده و یا دچار مشکل شود. به همین دلیل برای جلوگیری از سوءگیری کاربر و امکان مواجه با کلاس‌های مختلف، شرط انتخاب حداقل ۲۰ درصد از تعداد کل سؤالات در هر شرایطی از هر کلاس اعمال می‌شود.

پس از مشخص‌شدن تعداد سؤالات انتخابی برای هر کلاس، ترکیب درجه سختی سؤالات برای هر کلاس تعیین می‌شود. رابطه (۶) تعریف ریاضی نحوه‌ی محاسبه‌ی نرخ پاسخ‌های غلط در هر کلاس بر اساس سه درجه سختی آسان، متوسط و سخت را بیان می‌کند. در این رابطه، $Num\ Incorrect_{(c,d)}$ تعداد پاسخ‌های غلط در کلاس c با درجه سختی d است و به تبع آن $Num\ correct_{(c,d)}$ تعداد پاسخ‌های صحیح در کلاس c با درجه سختی d است. منظور از $Incorrect\ Ratio_{(c,d)}$ نیز، نرخ پاسخ‌های غلط برای سؤالات با درجه سختی d در کلاس c است.

$$Incorrect\ Ratio_{(c,d)} = \frac{Num\ Incorrect_{(c,d)}}{Num\ Incorrect_{(c,d)} + Num\ correct_{(c,d)}} \quad (۶)$$

رابطه (۷) نیز تعریف ریاضی نحوه‌ی محاسبه‌ی تعداد سؤالات مربوط به هر درجه سختی در هر کلاس را بیان می‌کند. در این رابطه $N_{(class,difficulty)}$ تعداد سؤالات انتخابی با درجه سختی d از کلاس c نشان می‌دهد.

$$N_{(class,difficulty)} = max\big(((4 \times N_{Total}), Incorrect\ Ratio_{(class,difficulty)} \times N_{class}\big) \quad (۷)$$

مشابه آنچه در بخش تعیین تعداد کل سؤالات یک کلاس گفته شد، اگر کاربر بتواند در یک کلاس، در سؤالات با درجه سختی خاصی به تسلط بالایی برسد، در حالت عادی این مهم باعث خواهد شد تا وزن سؤالات با آن درجه سختی در کلاس مد نظر کاهش یافته و به تبع آن تعداد سؤالات انتخابی از آن کلاس به حداقل و حتی به صفر برسد. به دلیل آن که آموزش در حوزه‌ی تصاویر پزشکی، نیازمند کسب تجربه با مشاهده مداوم نمونه‌های مختلف میسر می‌شود، این روش ممکن است در چندین مرحله باعث شود کاربر تسلط به دست آمده در یک درجه سختی از کلاس مد نظر را از دست داده و یا دچار مشکل شود. به همین دلیل برای جلوگیری از سوگیری کاربر به یک درجه سختی خاص و امکان مواجه با سؤالات با درجه سختی متنوع در هر مرحله از آزمون، شرط انتخاب حداقل ۴ درصد از تعداد کل سؤالات در هر شرایطی از هر درجه سختی برای هر کلاس اعمال می‌شود.

لازم به ذکر است که در محاسبات انجام شده، در هر مرحله اطلاعات تمامی آزمون‌های برگزار شده دخیل هستند و معیار برای طراحی آزمون جدید، فقط آخرین آزمون برگزار شده نیست. دلیل این کار جلوگیری از تأثیرگذاری عوامل حاشیه‌ای همچون حواس‌پرتی و خستگی در یک آزمون، بر کل روند آموزشی است.

۴) تنظیم نهایی و ارائه سؤالات: پس از تعیین ترکیب تعداد سؤالات بر اساس وزن‌ها و سطوح دشواری مختلف، سؤالات نهایی به‌صورت تصادفی از بین سؤالات دسته‌بندی شده در مرحله دوم این الگوریتم انتخاب و به کاربر ارائه می‌شوند. این تصادفی‌سازی در انتخاب سؤالات نهایی کمک می‌کند تا از یکنواختی جلوگیری شود و تنوع در سؤالات حفظ گردد. همچنین، این مرحله به جلوگیری از پیش‌بینی‌پذیری در آزمون کمک می‌کند و امنیت آزمون را افزایش می‌دهد.

۴- آزمایش‌ها و نتایج عملی

در این بخش، کارایی روش پیشنهادی توسط آزمایش‌های عملی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابتدا نتایج آزمایش‌های انجام گرفته برای ارزیابی کارایی و دقت مدل تعیین کننده‌ی درجه سختی گزارش می‌شود. سپس نتایج آزمون‌های برگزار شده توسط کاربران واقعی سامانه، تحلیل و بررسی شده و به ارزیابی کارآمدی سامانه معرفی شده پرداخته می‌شود.

۴-۱- ارزیابی مدل یادگیری انتقالی عمیق

در این بخش، به بررسی و تحلیل عملکرد مدل یادگیری انتقالی عمیق در روش پیشنهادی می‌پردازیم. برای این منظور، دو معماری مختلف یادگیری انتقالی، شامل دِنس-نت و اِکسپشن[1] با تنظیمات مختلف، بررسی می‌شوند. بسته به ساختار معماری اِکسپشن، قسمت طبقه‌بندی سه کلاسه نیز دستخوش تغییرات در تعداد لایه‌ها، نورون‌ها و تنظیمات اَبَرپارامترها می‌شود. آزمایشات با تنظیمات مختلفی از جمله اندازه‌های دسته[2]، نرخ یادگیری، و فن‌های افزایش داده[3] متفاوت انجام می‌شود تا دلیل انتخاب مدل بهینه مناسب سامانه پیشنهادی نشان داده شود. جزئیات طراحی مدل‌ها و تنظیمات مربوط به آنها در زیربخش بعدی تشریح می‌شود.

۴-۱-۱- جزئیات و تنظیمات مدل‌های یادگیری عمیق

به منظور ارزیابی و انتخاب مدل یادگیری مناسب برای سامانه

[1] Xception
[2] DenseNet
[3] Data Augmentation

پیشنهادی، از ۱۴ مدل مختلف با پیکربندی‌های متنوع استفاده می‌شود. مدل‌ها از سه منظر بررسی می‌شوند: ۱) معماری مورد استفاده، ۲) تنظیمات نرخ یادگیری و اندازه دسته، و ۳) روش‌های افزایش داده برای بهبود تعمیم مدل. جزئیات و تنظیمات ۱۴ مدل آزمایش شده در جدول ۱ شرح داده شده‌اند. جدول ۲ نیز انواع فنون افزایش داده‌ی استفاده شده را تعریف می‌کند.

شکل ۱۰.

شکل ۱۱. جدول ۱. جزئیات و تنظیمات ۱۴ مدل آزمایش شده

شماره مدل	مدل یادگیری انتقالی	اندازه دسته	فن افزایش داده	نرخ یادگیری	شرط توقف زودهنگام
۱	دِنس-نت	۶۴	نوع ۱	۰/۰۰۱	۵ دوره
۲	دِنس-نت	۶۴	نوع ۲	۰/۰۰۱	۵ دوره
۳	دِنس-نت	۱۲۸	نوع ۱	۰/۰۰۱	۵ دوره
۴	دِنس-نت	۱۲۸	نوع ۲	۰/۰۰۱	۵ دوره
۵	دِنس-نت	۶۴	نوع ۳	۰/۰۰۱	۵ دوره
۶	دِنس-نت	۶۴	نوع ۴	۰/۰۰۱	۵ دوره
۷	دِنس-نت	۳۲	نوع ۴	۰/۰۰۳	۱۰ دوره
۸	دِنس-نت	۶۴	نوع ۴	۰/۰۰۱	۱۰ دوره
۹	دِنس-نت	۱۲۸	نوع ۴	۰/۰۰۱	۵ دوره
۱۰	دِنس-نت	۱۲۸	نوع ۳	۰/۰۰۱	۵ دوره
۱۱	اِکسپشن	۱۶	نوع ۲	۰/۰۰۱	۱۰ دوره
۱۲	اِکسپشن	۶۴	نوع ۲	۰/۰۰۱	۱۰ دوره
۱۳	اِکسپشن	۱۲۸	نوع ۲	۰/۰۰۱	۱۰ دوره
۱۴	اِکسپشن	۱۲۸	نوع ۱	۰/۰۰۱	۱۰ دوره

جدول ۲. فنون بکار گرفته شده در هر یک از انواع افزایش داده‌ی استفاده شده بر روی تصاویر پایگاه داده

	فن				
نوع افزایش داده	بزرگ‌نمایی	چرخش	انعکاس افقی	جابه‌جایی	کنتراست
نوع ۱	✓	✓	X	X	X
نوع ۲	✓	✓	✓	✓	X
نوع ۳	X	X	X	X	✓
نوع ۴	X	X	X	X	X

۴-۱-۲- ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌ها

عملکرد ۱۴ مدل معرفی شده در بخش قبلی بر اساس چهار معیار ارزیابی شامل صحت، بازیابی، امتیاز-اف۲، و دقت ارزیابی شده و نتایج حاصل از آزمایشات در جدول ۳ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مدل ۶ (بدون استفاده از فن‌های افزایش داده) و مدل ۵ (با استفاده از فن افزایش داده تغییر کنتراست) به ترتیب بهترین عملکرد را نسبت به ۱۲ مدل دیگر کسب کرده‌اند. مدل ۶ با دقت ۹۱/۹۳ درصد و مدل ۵ با دقت ۹۱/۸۵ درصد برترین نتیجه را بر روی داده‌های ارزیابی داشته‌اند. از نتایج ارزیابی مدل‌های مختلف می‌توان متوجه شد که تأثیرپذیری مدل بیش از آن که از اندازه دسته‌های ورودی و دیگر عامل‌های مدل همچون نرخ یادگیری و شروط جلوگیری‌کننده از بیش برازش باشد، از کیفیت داده‌ی ورودی و پیش‌پردازش‌های انجام شده است.

برخلاف تصور ما، با توجه به اینکه مجموعه‌داده استفاده شده از منابع مختلف گردآوری شده است و دارای تنوع مناسب در معیارهای مختلف از جمله تنوع در کیفیت دستگاه‌های تصویربرداری است، اعمال فن‌های افزایش داده، کمک شایانی در بهبود عملکرد مدل‌ها نداشته است. همچنان که در جدول ۳ قابل‌مشاهده است، کمترین میزان دقت در مدل‌های معرفی شده، به ترتیب مربوط به مدل ۴ و ۲ است که از فن‌های مختلفی برای پیش‌پردازش داده‌های ورودی در آن‌ها استفاده شده است.

جدول ۳. عملکرد ۱۴ مدل مختلف بر اساس چهار معیار ارزیابی

شماره مدل	صحت (٪)	بازیابی (٪)	امتیاز-اِف۲ (٪)	دقت (٪)
۱	۸۶/۸۴	۸۴/۴۷	۸۴/۵۳	۸۴/۴۷
۲	۸۵/۶۹	۸۴/۲۴	۸۴/۳۲	۸۴/۲۴
۳	۸۶/۹۷	۸۵/۲۵	۸۵/۲۹	۸۵/۲۵
۴	۸۵/۷۸	۸۳/۱۵	۸۳/۲۲	۸۳/۱۵
۵	۹۲/۵۳	۹۱/۸۵	۹۱/۸۷	۹۱/۸۵
۶	۹۲/۳۸	۹۱/۹۳	۹۱/۹۵	۹۱/۹۳
۷	۹۱/۷۰	۹۱/۳۸	۹۱/۴۱	۹۱/۳۸
۸	۸۸/۹۹	۸۷/۵۸	۸۷/۶۳	۸۷/۵۸
۹	۹۰/۸۱	۸۰/۵۳	۹۰/۵۵	۹۰/۵۳
۱۰	۹۰/۱۰	۸۹/۶۰	۸۹/۶۴	۸۹/۶۰
۱۱	۸۵/۸۹	۸۹/۶۰	۸۸/۷۷	۹۰/۵۳
۱۲	۸۶/۷۵	۸۸/۶۴	۸۸/۲۱	۹۰/۷۶
۱۳	۸۸/۴۶	۸۷/۵۵	۸۷/۶۹	۹۱/۴۶
۱۴	۸۵/۵۱	۸۶/۳۶	۸۶/۰۳	۸۹/۷۵

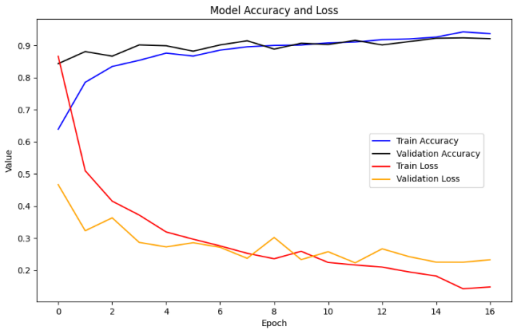
در شکل ۱۰ منحنی‌های خطا و دقت داده‌های بخش آموزش و اعتبارسنجی دو مدل ۶ و ۵ که به ترتیب بالاترین میزان دقت را در بین مدل‌های معرفی شده به دست آورده‌اند، نشان داده شده است. منحنی‌های ارائه شده عملکرد مدل یادگیری عمیق در دوره‌های آموزش را به تصویر می‌کشند. این نمودارها شامل دقت و خطا برای هر دو مجموعه داده‌ی آموزش و اعتبارسنجی هستند. نتایج نشان می‌دهد که هر دو مدل با گذر زمان بهبود قابل‌توجهی داشته‌اند و این بهبود در هر دو مجموعه آموزش و اعتبارسنجی مشهود است. در ابتدا قرار بود که مدل‌ها به مدت ۱۰۰ دوره آموزش داده شود، اما با استفاده از فن CallBack با دو تابع توقف زودهنگام و کاهش نرخ یادگیری، آموزش مدل به طور خودکار در دوره ۲۵ برای مدل ۶ و دوره ۱۶ برای مدل ۵ متوقف شده است. این توقف خودکار نشان‌دهنده‌ی تثبیت عملکرد مدل‌ها و جلوگیری از آموزش بیش از حد است. نکته مهم و حائز اهمیت دیگری که از این نمودارها برداشت می‌شود، دقت و خطای بهتر در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی نسبت به داده‌های آموزش است. به طور معمول، انتظار می‌رود که دقت روی داده‌های آموزشی بهتر باشد و خطا نیز روی داده‌های اعتبارسنجی بیشتر باشد. بااین‌حال، در این مدل‌ها نتایج خلاف این انتظار رخ داده است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل‌ها بر روی داده‌های اعتبارسنجی بهتر عمل کرده و توانسته‌اند داده‌های نادیده را به‌خوبی پیش‌بینی کنند. همچنین، در نمودار خطا، کاهش پیوسته‌ی خطا در هر دو مدل و در هر دو مجموعه‌داده‌ی آموزش و اعتبارسنجی مشاهده می‌شود. این کاهش هم‌زمان خطا بیانگر آن است که مدل‌ها نه‌تنها توانسته‌اند داده‌های آموزشی را به‌خوبی یاد بگیرند، بلکه الگوهای موجود در داده‌های اعتبارسنجی را نیز به‌درستی تشخیص داده‌اند و از بیش برازش جلوگیری کرده‌اند.

بر اساس ارزیابی‌ها و بررسی‌های تشریح شده فوق، از میان ۱۴ مدل بررسی شده، مدل ۶ با دقت تشخیصی ۹۱/۹۳ درصد به‌عنوان مدل برتر انتخاب می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که معماری دِنس-نت در مقایسه با اِکسپشن عملکرد بهتری در اکثر معیارهای کلیدی، به‌ویژه دقت نهایی و توانایی تعمیم به داده‌های جدید، دارد. علاوه بر این، معماری دنس‌نت به دلیل اتصال‌های متراکم بین لایه‌ها و استفاده کارآمدتر از ویژگی‌های استخراج شده، توانایی بیشتری در یادگیری و شناسایی الگوهای پیچیده دارد. این معماری ضمن کاهش تعداد پارامترها نسبت به اکسپشن، منجر به پایداری بهتر در فرآیند آموزش و جلوگیری از نوسانات عملکرد در داده‌های اعتبارسنجی نیز می‌شود. همچنین معماری اکسپشن به دلیل پیچیدگی بیشتر و حساسیت بالا به تنظیمات اَبَرپارامترها، به تنظیمات دقیق‌تری نیاز دارد که منجر به افزایش بار زمانی و منابع محاسباتی می‌شود. با لحاظ کردن موارد فوق، مدل ۶ (با معماری دِنس-نت) به دلیل توانایی بالا در پیش‌بینی صحیح داده‌های نادیده و عدم نیاز به اعمال افزایش داده، در سامانه پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت.

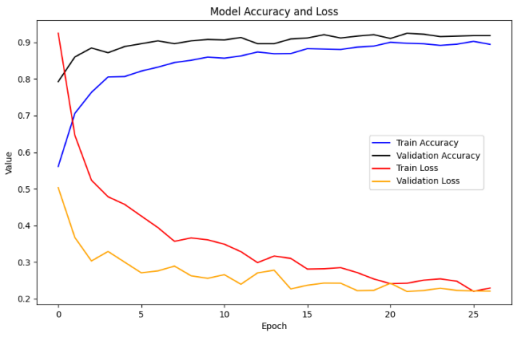
۴-۲- ارزیابی عملکرد سامانه آموزشی شخصی‌سازی شده و تحلیل عملکرد کاربران

در این بخش، نتایج حاصل از استفاده کاربران واقعی از سامانه پیشنهادی تحلیل می‌شود. در آزمایشات انجام شده تعداد ۱۰ نفر رزیدنت رادیوگرافی داوطلب مشارکت کردند. با دریافت مشاوره‌های لازم از پزشکان و اساتید دانشگاه متخصص حوزه سعی بر این بوده

است که حتی‌المقدور کلیه جوانب آموزشی و پزشکی در انجام آزمایشات سامانه رعایت گردد. برای ارزیابی عملکرد سامانه آموزشی و تحلیل عملکرد کاربران آن، معیارهای مختلفی نظیر دقت تشخیص کلی، دقت ثبت شده برای هر کلاس، نرخ مثبتِ کاذب و منفیِ کاذب به تفکیک کلاس‌های تعریف شده و ماتریس درهم‌ریختگی و همچنین تعداد سؤالات پاسخ داده شده‌ی صحیح و ناصحیح به تفکیک درجه سختی (آسان، متوسط و سخت) برای هر آزمون و هر کاربر مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه، ابتدا دقت کلی عملکرد کاربران سامانه ارزیابی و تحلیل می‌شود و سپس دقت عملکرد هر یک از کاربران بصورت جزئی و بر روی کلاس‌های مختلف بیماری‌ها گزارش شده و تحلیل می‌شوند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. شکل ۱۰. منحنی‌های خطا و دقت بدست آمده روی مجموعه‌داده‌ی آموزشی و اعتبارسنجی در طی تکرارهای آموزشی توسط برترین مدل‌ها. (الف) مدل ۶ و (ب) مدل ۵

۴-۲-۱- ارزیابی دقت کلی عملکرد کاربران

در جدول ۴ دقت کلی به‌دست آمده توسط ۱۰ کاربر سامانه طی ۶ آزمون متوالی گزارش شده است. در برگزاری آزمون‌ها، حد آستانه دستیابی به دقت بیش از ۸۰ درصد در تمامی سه کلاس به‌عنوان شرط توقف آموزش کاربر تعریف شده است (به همین دلیل در جدول ۴ تعداد آزمون‌های کاربران مختلف متفاوت است). این حد آستانه برای ارزیابی اولیه و آزمایشگاهی سامانه تعیین شده و طبیعتاً در استفاده بالینی و دانشگاهی، این مقدار به‌مراتب نسبت به استانداردهای تعریفی بالاتر و دقیق‌تر تنظیم می‌شود.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که کاربران در آزمون‌های آغازین با دقت‌های نسبتاً پایینی شروع کرده‌اند (بین ۳۹/۲۳ درصد تا ۷۰/۵۹ درصد در آزمون اول). این موضوع نشان می‌دهد که در ابتدا کاربران در تشخیص صحیح تصاویر با چالش‌های مختلفی مواجه بوده‌اند. با این حال، روند پیشرفت کاربران در طول آزمون‌های متوالی بعدی به طور واضح قابل مشاهده است. به مرور زمان و با کمک سامانه آموزشی، دقت کلی همه کاربران بهبود یافته است. به عنوان نمونه، کاربر شماره ۱ از دقت ۵۳/۰۳ درصد در آزمون اول به دقت ۹۰/۳۱ درصد در آزمون پنجم رسیده است. این نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت سامانه در افزایش توانایی‌های تشخیصی کاربران است.

بسیاری از کاربران پس از چند آزمون به دقت بالای ۸۰ درصد رسیده‌اند و در برخی موارد به دقت نزدیک به ۹۶ درصد نیز دست یافته‌اند (مانند کاربران ۷، ۸ و ۱۰). این امر نشان می‌دهد که سامانه آموزشی توانسته است به‌خوبی کاربران را به سطحی برساند که دقت تشخیصی قابل قبولی داشته باشند.

لازم به ذکر است که برخی از کاربران در برخی آزمون‌ها کاهش دقت را تجربه کرده‌اند (مانند کاربر ۳ در آزمون ۳). این نوسانات ممکن است به دلیل پیچیدگی سؤالات یا عدم تمرکز کافی کاربران در برخی آزمون‌ها باشد. بررسی جزئیات دقت هر کاربر نشان می‌دهد که سامانه آموزشی توانسته است در تمام سطوح، از کاربران ضعیف‌تر تا کاربران قوی‌تر، تأثیرات مثبت داشته باشد. کاربران ضعیف‌تر (مانند کاربران ۵ و ۶) که در ابتدا دقت‌های پایینی داشته‌اند، با ادامه استفاده از سامانه به دقت‌های بالایی دست یافته‌اند (به ترتیب ۸۸/۸۱ درصد و ۹۳/۱۲ درصد).

در نهایت، نتایج حاکی از آن است که سامانه آموزشی شخصی‌سازی شده نه‌تنها توانسته است دقت تشخیصی کاربران را بهبود بخشد، بلکه با ارائه محتوای آموزشی مناسب، روند یادگیری را نیز تسریع کرده است. عملکرد کاربران در آزمون‌های متوالی نشان از توانمندی سامانه در تشخیص نیازهای آموزشی کاربران و ارائه محتوای مناسب به آن‌ها دارد. این موفقیت در آزمایش‌های اولیه، نویدبخش کاربردهای وسیع‌تر سامانه در محیط‌های بالینی و دانشگاهی است.

جدول ۴. دقت کلی (بر اساس درصد) به‌دست‌آمده توسط ۱۰ کاربر در آزمون‌های برگزار شده

شماره کاربر	شماره آزمون					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۵۳/۰۳	۵۹/۵۳	۵۹/۵۶	۷۸/۰۸	۹۰/۳۱	–
۲	۵۰/۶۲	۶۹/۱۸	۹۰/۱۳	–	–	–
۳	۵۰/۳۶	۶۳/۲۳	۵۳/۳۵	۶۸/۳۸	۷۷/۲۹	۹۳/۹۸
۴	۵۳/۱۵	۴۵/۷۷	۷۳/۰۲	۶۹/۹۳	۸۳/۹۶	–
۵	۴۶/۷۶	۷۱/۱۴	۸۸/۸۱	–	–	–
۶	۳۹/۲۳	۵۵/۰۸	۸۱/۱۲	۹۳/۱۲	–	–
۷	۶۱/۴۹	۶۲/۹۱	۸۱/۱۵	۹۶/۱۵	–	–
۸	۷۰/۵۹	۸۶/۳۰	۹۶/۵۹	–	–	–
۹	۶۴/۹۶	۸۱/۶۳	۸۶/۹۲	–	–	–
۱۰	۶۰/۱۸	۶۸/۱۶	۸۲/۱۵	۹۵/۲۶	–	–

۴-۲-۲- ارزیابی و تحلیل جزئی عملکرد نمونه موردی از کاربران

در این بخش جزئیات نتایج آموزشی و تشخیصی به دست آمده توسط یک کاربر موردی (مشخصاً کاربر شماره ۱) به‌صورت تحلیلی و بر روی هر یک از کلاس‌های تشخیصی گزارش شده و مورد بررسی می‌گیرد.

در آزمون اول، دقت به‌دست‌آمده توسط این کاربر در کلاس کوید-۱۹، ۷۲ درصد بوده که در طی پنج آزمون طراحی شده با رشد متوالی به ۱۰۰ درصد رسیده است. همچنین مجموع نرخ خطا برای کلاس کوید-۱۹ برابر با ۰/۵۷ بوده که نشان‌دهنده وجود چالش‌های قابل‌توجهی برای این کاربر در تشخیص موارد کوید-۱۹ است. اما با گذشت زمان، این نرخ به‌تدریج کاهش یافته و در آزمون پنجم به ۰/۰۹ رسیده است. با وجود دستیابی به دقت ۱۰۰ درصد در این کلاس، همچنان نرخ خطا، مقدار مثبتی را که ناشی از خطای مثبتِ کاذب برای این کلاس است، نشان می‌دهد. دلیل انتخاب این معیار برای بررسی عملکرد کاربر و استفاده از آن در طراحی آزمون‌ها، بروز چنین مسائلی است. خطای مثبتِ کاذب در این کلاس بدین معنا است که این کاربر، به تعدادی سؤال که دارای بیماری دیگر یا سالم بوده‌اند، تشخیص کوید-۱۹ داده است که در عمل می‌تواند هزینه‌زا برای تمامی ارکان باشد.

از جنبه‌ی درجه سختی سؤالات پاسخ داده شده توسط کاربر ۱، در آزمون اول، درصد پاسخ‌های نادرست به سؤالات سخت‌تر بیشتر از سؤالات آسان‌تر بوده است. این روند نشان می‌دهد که کاربر در ابتدا با سؤالات سخت‌تر مشکل بیشتری داشته است. با گذر زمان، این درصد به‌تدریج کاهش‌یافته و در آزمون پنجم به مقدار صفر برای تمامی درجات سختی رسیده است.

در کلاس ذات‌الریه، دقت این کاربر نوسانات بیشتری داشته است. دقت از ۰/۵۰ در آزمون اول به ۰/۲۲ در آزمون دوم کاهش یافته، سپس در آزمون‌های بعدی به‌تدریج افزایش‌یافته و در آزمون پنجم به ۰/۸۲ رسیده است. با بررسی نتایج حاصل توسط این کاربر، می‌توان گفت این نوسانات ممکن است به دلیل افزایش حساسیت کاربر نسبت به سؤالات با پیچیدگی بالا و غفلت از مسائل ساده‌تر که ناشی از نتایج آزمون اول است رخ داده باشد. در ادامه با افزایش داده‌ها و شخصی‌سازی شدن سؤالات بر اساس مدل پیشنهادی، کاربر ۱ توانسته است تشخیص صحیح سؤالات با پیچیدگی کم‌تر را نیز بهبود دهد. همچنین ممکن است این نوسانات، ناشی از پیچیدگی تشخیص ذات‌الریه و یا نیاز به زمان بیشتر برای بهبود تشخیص در این کلاس برای این کاربر باشد.

نرخ خطای این کاربر، در آزمون اول نسبتاً بالا (۰/۷۵) بوده است. این میزان خطا نشان دهنده‌ی مشکلاتی در تشخیص صحیح موارد ذات‌الریه بوده است. با تکرار آزمون‌ها، نرخ خطا در این کلاس نیز به طور پیوسته کاهش یافته و در آزمون پنجم به ۰/۲۴ رسیده است. این کاهش نرخ خطا نشان دهنده‌ی بهبود تدریجی در توانایی کاربر در تشخیص این کلاس است؛ هرچند که روند کاهش خطا در این کلاس نسبت به کلاس کوید-۱۹ کندتر بوده است.

این کاربر در تشخیص کلاس سالم نیز در ابتدا با چالش‌هایی روبرو بوده است، به‌طوری‌که نرخ خطا در آزمون اول برابر با ۰/۷۸ بوده است. اما به مرور زمان و با استفاده از سامانه آموزشی، نرخ خطا در این کلاس نیز کاهش یافته و در آزمون پنجم به ۰/۱۱ رسیده است. دقت کاربر در این کلاس از ۰/۳۶ در آزمون اول به ۰/۸۸ در آزمون پنجم رسیده است. در آزمون اول، درصد پاسخ‌های نادرست به سؤالات آسان‌تر (۰/۸۰) بیشتر از سؤالات سخت‌تر (۰/۵۵) بوده است. این امر ممکن است به دلیل توجه کمتر کاربر به جزئیات در

سؤالات آسان‌تر باشد. با گذر زمان، درصد پاسخ‌های نادرست به سوالات آسان به‌تدریج کاهش یافته و در آزمون پنجم، به مقدار قابل‌قبولی (۰/۰۸) رسیده است.

در جمع‌بندی برای کاربر ۱ می‌توان گفت، کاربر در تشخیص موارد کوید-۱۹ به تسلط کامل رسیده است و هیچ خطایی در آزمون‌های نهایی نداشته است ولیکن همچنان با خطای مثبتِ کاذب درگیر است که نیازمند چند مرحله آموزش بیشتر است. در مورد ذات‌الریه این کاربر با وجود پیشرفت، همچنان در تشخیص موارد ذات‌الریه چالش‌هایی داشته است که این امر نشان‌دهنده‌ی پیچیدگی بیشتر این کلاس برای این کاربر است. در تشخیص موارد سالم نیز پیشرفت قابل‌توجهی داشته، اما همچنان نیاز به بهبود در مواجهه با سؤالات با درجات سختی متفاوت دارد. این تحلیل نشان دهنده‌ی تأثیر مثبت سامانه آموزشی بر بهبود عملکرد تشخیصی این کاربر است و همچنین به نقاطی که کاربر نیاز به تمرین بیشتر دارد، اشاره می‌کند.

با وجود آن‌که در این بخش تنها عملکرد یک کاربر به‌صورت تفصیلی بررسی شد، مرور نتایج سایر کاربران نشان می‌دهد که الگوی کلی پیشرفت تقریباً در تمامی موارد مشابه و رو به بهبود بوده است. اغلب کاربران در ابتدا دارای سطح دقت متوسط یا پایین بوده‌اند، اما در طول مراحل آزمون و با بهره‌گیری از سامانه، دقت و صحت عملکرد آن‌ها به‌طور پیوسته بهبود یافته و نرخ خطاهای مثبت و منفی کاذب کاهش یافته است.

تفاوت‌های اصلی در میان کاربران بیشتر به سرعت یادگیری و توانایی مقابله با سؤالات پیچیده‌تر مربوط می‌شود. برخی افراد در مدت کوتاهی به سطح بالایی از عملکرد دست یافته‌اند، در حالی که برخی دیگر مسیر تدریجی‌تری را طی کرده‌اند و نیازمند تمرین و بازخورد بیشتری بوده‌اند. در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده از تمامی نمونه‌ها مؤید آن است که سامانه پیشنهادی در ارتقای مهارت‌ها و دقت تشخیصی کاربران مؤثر بوده و توانسته است روندی باثبات از بهبود عملکرد را ایجاد کند.

۵- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

در این پژوهش، به طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه آموزشی آنلاین برای شخصی‌سازی آموزش رزیدنت‌های رادیولوژی با تمرکز بر استخراج تعاملی مدل خطاهای تشخیصی مثبتِ کاذب و منفیِ کاذب در تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه پرداخته شد. هدف اصلی این سامانه، افزایش دقت تشخیصی رزیدنت‌ها از طریق آزمون‌های متوالی و تحلیل خطاها بود. باتوجه به اهمیت دقت در تشخیص‌های پزشکی، مخصوصاً از روی تصاویر رادیولوژی، و نیاز به آموزش مداوم و بهینه برای رزیدنت‌ها، این سامانه می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در بهبود عملکرد تشخیصی و کاهش خطاهای پزشکی مورد استفاده قرار گیرد.

در سامانه‌ی پیشنهادی، برای کاهش تأثیرات نامطلوب و گاه غیرقابل جبران حاصل از تشخیص‌های منفیِ کاذب و مثبتِ کاذب بر روند درمان بیماری و سیستم درمان، ابتدا یک راهکار مبتنی بر یادگیری انتقالی عمیق جهت تشخیص سه کلاس بیماری کوید-۱۹، ذات‌الریه و وضعیت سالم با استفاده از تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه و استخراج درجه سختی تصاویر معرفی شد. در روش پیشنهادی، یکی از اهداف پیگیری این موضوع بود که مدل تولید شده، بتواند با حداقل پیش‌پردازش بر روی داده‌های ورودی به نتایج مطلوبی برسد. چراکه معمولا کاربران سامانه، تشخیص‌های خود را با استفاده از تصاویر خام انجام می‌دهند. با استفاده از یک شبکه یادگیری انتقالی عمیق (دِنس-نت) ویژگی درجه سختی تشخیص تصاویر ورودی استخراج شد. همچنین با استفاده از یک الگوریتم تطبیقی و تعاملی طراحی شده برای انتخاب سؤالات در هر آزمون، به‌تدریج سطح دشواری سؤالات متناسب با عملکرد هر کاربر تنظیم شد. این روش نه‌تنها به افزایش دقت رزیدنت‌ها در تشخیص بیماری‌های مرتبط با تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه کمک می‌کند، بلکه با تمرکز بر خطاهای تشخیصی گذشته، فرایند یادگیری را برای هر کاربر به‌صورت شخصی‌سازی شده ارائه می‌دهد.

نتایج حاصل از بررسی کارایی سامانه بر اساس آزمون‌های واقعی نشان داد که کاربران با تکرار آزمون‌ها و دریافت بازخوردهای تعاملی، به‌تدریج دقت خود را در تشخیص بیماری‌ها بهبود داده و میزان خطاهای مثبتِ کاذب و منفیِ کاذب خود را کاهش می‌دهند. همچنین، تحلیل دقیق نتایج آزمون‌ها به تفکیک هر کلاس و درجه سختی سؤالات، نشان دهنده تأثیر مثبت این رویکرد آموزشی بر یادگیری و توانمندسازی رزیدنت‌ها و کارکنان کادر درمان بود.

نوآوری بارز این پژوهش در تلفیق یکپارچه‌ی یادگیری عمیق، آزمون‌های تطبیقی و تحلیل عملکرد کاربران در قالب یک سامانه‌ی شخصی‌سازی‌شده‌ی آموزش برخط نهفته است. برخلاف پژوهش‌های پیشین [۸] تا [۱۰] و [۱۲] تا [۱۸] که عمدتاً فقط محدود به تحلیل خطاهای تشخیصی مثبتِ کاذب یا فقط منفیِ کاذب بودند، رویکرد ارائه‌شده در این پژوهش با تمرکز بر طراحی آزمون‌های پویای مبتنی بر تحلیل عملکرد پیشین کاربران با استفاده از تصاویر رادیوگرافی قفسه سینه و ارائه بازخورد دقیق از نقاط ضعف در خطاهای مثبتِ کاذب و منفیِ کاذب بصورت همزمان، بستری عملی و قابل‌اجرا در محیط بالینی برای آموزش رادیولوژیست‌ها فراهم ساخته است. همچنین، استفاده از مدل‌های عمیق برای

خودکارسازی تحلیل‌ها، این سامانه را نسبت به سیستم‌های آموزشی گذشته کاربردی‌تر و مقیاس‌پذیرتر کرده است.

از محورهای مطالعه و توسعه بیشتر این پژوهش می‌توان به کاربرد سامانه پیشنهادی در سایر تصاویر پزشکی و بیماری‌های مرتبط اشاره کرد. این امر موجب تنوع بیشتر در آموزش و افزایش قابلیت‌های سامانه خواهد شد. همچنین با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی کانولوشنی دقیق‌تر و بیشتر و استفاده از روش‌های یادگیری جمعی و گروهی[1] می‌توان دقت در تشخیص الگوی خطاهای مثبتِ کاذب و منفیِ کاذب را با دستیابی به معیارهای دقیق‌تر و قابل‌تعمیم‌تر تعیین‌کننده‌ی درجه سختی تصاویر بهبود بخشید. این الگوریتم‌ها می‌توانند با تحلیل الگوهای پیچیده‌تر در تصاویر، دقت بیشتری را در سامانه ایجاد کنند. طراحی و پیاده‌سازی ویژگی‌های تعاملی بیشتر مانند بازخوردهای بصری دقیق‌تر و نقشه‌های حرارتی برای نمایش نواحی مشکوک در تصاویر، می‌تواند به فهم بهتر رزیدنت‌ها از نقاط ضعف و قوت خود در تشخیص کمک کند و یادگیری را کارآمدتر سازد. همچنین استفاده از فن‌های قطعه‌بندی برای نمایش نواحی دارای درگیری به بیماری در تصاویر مورد بررسی، در مراحل آموزش کاربر می‌تواند در یافتن نواحی و موارد تشخیص داده نشده کمک بسزایی بکند. پیشنهاد می‌شود مطالعه‌ای طولانی مدت برای بررسی تأثیرات ماندگار این نوع آموزش بر دقت تشخیصی رزیدنت‌ها انجام شود. این مطالعه می‌تواند نشان دهد که آیا آموزش شخصی‌سازی شده موجب بهبود مداوم در عملکرد تشخیصی می‌شود یا نیاز به بازبینی و اصلاح دوره‌ای دارد.

مراجع

[1] A. P. Brady, "Error and discrepancy in radiology: inevitable or avoidable?," (in eng), *Insights Imaging*, vol. 8, no. 1, pp. 171-182, 2017, doi: 10.1007/s13244-016-0534-1.

[2] S. Waite *et al.*, "A Review of Perceptual Expertise in Radiology-How it develops, How we can test it, and Why humans still matter in the era of Artificial Intelligence," *Academic Radiology*, vol. 27, no. 1, pp. 26-38, 2020/01/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.08.018.

[3] J. Irvin *et al.*, "CheXpert: A Large Chest Radiograph Dataset with Uncertainty Labels and Expert Comparison," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 33, pp. 590-597, 07/17 2019, doi: 10.1609/aaai.v33i01.3301590.

[4] M. Perumal, A. Nayak, R. P. Sree, and M. Srinivas, "INASNET: Automatic identification of coronavirus disease (COVID-19) based on chest X-ray using deep neural network," *ISA Transactions*, 2022/03/03/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.02.033.

[5] B. Qi et al., GREN: Graph-Regularized Embedding Network for Weakly-Supervised Disease Localization in X-ray images. 2021.

[6] V. Sorin, Y. Barash, E. Konen, and E. Klang, "Deep Learning for Natural Language Processing in Radiology—Fundamentals and a Systematic Review," *Journal of the American College of Radiology*, vol. 17, no. 5, pp. 639-648, 2020/05/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.jacr.2019.12.026.

[7] L. Guo, A. Tahir, D. Zhang, Z. Wang, and R. Ward, *Automatic Medical Report Generation: Methods and Applications*. 2024.

[8] M. Mazurowski, J. Baker, H. Barnhart, and G. Tourassi, "Individualized computer-aided education in mammography based on user modeling: Concept and preliminary experiments," *Medical physics*, vol. 37, pp. 1152-60, 03/01 2010, doi: 10.1118/1.3301575.

[9] M. Wang, M. Wang, L. J .Grimm, and M. A. Mazurowski, "A computer vision-based algorithm to predict false positive errors in radiology trainees when interpreting digital breast tomosynthesis cases," *Expert Systems with Applications*, vol. 64, pp. 490-499, 2016/12/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.023.

[10] M. Wang *et al.*, "Predicting false negative errors in digital breast tomosynthesis among radiology trainees using a computer vision-based approach," *Expert Systems with Applications*, vol. 56, pp. 1-8, 2016/09 ,۲۰۱۶ /۰۱/doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.053.

[11] S. Burti, A. Zotti, and T. Banzato, "Role of AI in diagnostic imaging error reduction," *Frontiers in Veterinary Science*, vol. 11, 08/30 2024, doi: 10.3389/fvets.2024.1437284.

[12] M. A. Mazurowski and G. D. Tourassi, "Exploring the potential of collaborative filtering for user-adaptive mammography education," in *Proceedings of the 2011 Biomedical Sciences and Engineering Conference: Image Informatics and Analytics in Biomedicine*, 15-17 March ,۲۰۱۱ ۲۰۱۱ pp. 1-4, doi: 10.1109/BSEC.2011.5872325 .

[13] S. Voisin, F. Pinto, G. Morin-Ducote, K. B. Hudson, and G. D. Tourassi, "Predicting diagnostic error in radiology via eye-tracking and image analytics: preliminary investigation in mammography," (in eng), *Med Phys*, vol. 40, no. 10, p. 101906, Oct 2013, doi: 10.1118/1.4820536.

[14] H. Lin, X. Yang, and W. Wang, "A content-boosted collaborative filtering algorithm for personalized training in interpretation of radiological imaging," *Journal of digital imaging*, vol. 27, pp. 449-456, 2014.

[15] M. A. Mazurowski, J. Zhang, J. Y. Lo, C. M. Kuzmiak, S. V. Ghate, and S. Yoon, "Modeling resident error-making patterns in detection of mammographic masses using computer-extracted image features: preliminary experiments," in *Medical Imaging 2014: Image Perception, Observer Performance, and Technology Assessment*, 2014, vol. 9037: SPIE, pp. 197-202 .

[16] J. Zhang, J. Y. Lo, C. M. Kuzmiak, S. V. Ghate, S. C. Yoon, and M. A. Mazurowski, "Using computer- extracted image features for modeling of error- making patterns in detection of mammographic masses among radiology residents," *Medical physics*, vol. 41, no. 9, p. 091907, 2014.

[17] J. Zhang, J. I. Silber, and M. A. Mazurowski, "Modeling false positive error making patterns in radiology trainees for improved mammography education," *Journal of biomedical informatics*, vol. 54, pp. 50-57, 2015.

[18] Z. Gandomkar, K. Tay, W. Ryder, P. Brennan, and C. Mello-Thoms, Predicting radiologists' true and false positive decisions in reading

[1] Ensemble Learning

[28] J. Cohen, P. Morrison, L. Dao, K. Roth, T. Duong, and M. Ghassemi, *COVID-19 Image Data Collection: Prospective Predictions Are the Future*. 2020.

[29] A. Chung, "Actualmed COVID-19 chest x-ray data initiative," 2020. [Online]. Available: https://github.com/agchung/Actualmed-COVID-chestxray-dataset.

[30] A. Chung, "Figure 1 COVID-19 chest x-ray data initiative," 2020. [Online]. Available: https://github.com/agchung/Figure1-COVID-chestxray-dataset.

[31] P. Garg, M. Gautam, B. Chugh, and K. Dwivedi, "Employing transfer learning techniques for COVID-19 detection using chest X-ray," *International Journal of Advances in Applied Sciences*, vol. 13, p. 680, 09/01 2024, doi: 10.11591/ijaas.v13.i3.pp680-688.

[32] G. Huang, Z. Liu, L. V. D. Maaten, and K. Q. Weinberger, "Densely Connected Convolutional Networks," in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 21-26 July 2017 2017, pp. 2261-2269, doi: 10.1109/CVPR.2017.243 .

[33] J. Yu *et al.*, "A Unified Adaptive Testing System Enabled by Hierarchical Structure Search," in *Forty-first International Conference on Machine Learning* .

[34] Q. Liu *et al.*, "Survey of computerized Adaptive Testing: A machine learning perspective," 2024 2024, doi: 10.48550/ARXIV.2404.00712.

[35] S. J. Chen, A. Choi, and A. Darwiche, "Computer Adaptive Testing Using the Same-Decision Probability," in *BMA@ UAI*, 2015, pp. 34-43 .

[36] J.-J. Vie, F. Popineau, É. Bruillard, and Y. Bourda, "A Review of Recent Advances in Adaptive Assessment," in *Learning Analytics: Fundaments, Applications, and Trends: A View of the Current State of the Art to Enhance e-Learning*, A. Peña-Ayala Ed. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 113-142.

mammograms by using gaze parameters and image-based features. 2016, p. 978715.

[19] B. Ibragimov and C. Mello-Thoms, "The Use of Machine Learning in Eye Tracking Studies in Medical Imaging: A Review," *IEEE journal of biomedical and health informatics*, vol. PP, 02/29 2024, doi: 10.1109/JBHI.2024.3371893.

[20] H. Wainer, N. J. Dorans, R. Flaugher, B. F. Green, and R. J. Mislevy, *Computerized Adaptive Testing: A Primer*. Taylor & Francis, 2000.

[21] W. A. Sands, B. K. Waters, and J. R. McBride, *Computerized adaptive testing: From inquiry to operation*. American Psychological Association, 1997.

[22] E. E. Roskam and P. G. Jansen, "A new derivation of the Rasch model," in *Advances in Psychology*, vol. 20: Elsevier, 1984, pp. 293-307.

[23] A. D. Mead" ,An introduction to multistage testing," *Applied Measurement in Education*, vol. 19, no. 3, pp. 185-187, 2006.

[24] Y. Zhuang, Q. Liu, Z. Huang, Z. Li, S. Shen, and H. Ma, "Fully adaptive framework: Neural computerized adaptive testing for online education," in *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, 2022, vol. 36, no. 4, pp. 4734-4742 .

[25] D. F. Mujtaba and N. R. Mahapatra, "Artificial intelligence in computerized adaptive testing," in *2020 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 2020: IEEE, pp. 649-654 .

[26] D. Kermany. Large dataset of labeled optical coherence tomography (OCT) and Chest X-Ray images, Mendeley, 2018, doi: 10.17632/RSCBJBR9SJ.3.

[27] D. S. Kermany *et al.*, "Identifying medical diagnoses and treatable diseases by image-based deep learning," *Cell*, vol. 172, no. 5, pp. 1122-1131.e9, 2018/2 2018, doi: 10.1016/j.cell.2018.02.010.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 128-148

Modeling the Future Efficiency of the Green Supply Chain of the Poultry Farming Industry Using Multistage DEA and Artificial Neural Networks

Tahere Torkashvand[1], Fatemeh Saghafi[2], Mohamadhossein DarvishMotevalli[3*]

[1] Department of Information Technology Management, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

[2] Department of System Management and Decision Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

[3] Department of Industrial Management, WT. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 28 April 2025, Revised: 12 November 2025, Accepted: 30 January 2026

Paper type: Research

Abstract

Traditional DEA and multi-stage DEA models cannot predict future performance. In other words, all DEA and multi-stage DEA models evaluate units based on past performance. This paper seeks to move from previous monitoring models to a future planning approach that includes new contributions. In this study, artificial neural networks (ANN) are combined with multi-stage DEA to predict the future performance of 9 green supply chains of the poultry industry in Tehran province. For this purpose, first, after identifying the indicators affecting the green supply chain by combining the fuzzy Delphi method and the BWM method, 8 input indicators and 8 output indicators were identified. In this study, the fuzzy Delphi method was used to integrate the opinions of the experts. Triangular fuzzy numbers were used to convert linguistic opinions into numerical values. The process of combining views was based on the geometric mean of the fuzzy values. In the model design, data uncertainty was considered using a fuzzy approach in the process of identifying indicators and data envelopment analysis. After collecting information from the studied chains using an artificial neural network, the data was predicted for 5 years. In order to ensure the stability of the model, a sensitivity analysis was performed based on the change in the number of neurons and different activation functions in the neural network, the results of which showed that the network with 10 neurons in the hidden layer had the best performance and the mean square error (MSE) was 3.24×10^{-6}. Then, the predicted data from the artificial neural network was used in multi-stage data envelopment analysis. Multi-stage DEA evaluates the efficiency of the green poultry supply chain in the past, present, and future periods simultaneously. These results are useful for policy-making and efficiency performance trend analysis.

Keywords: Artificial neural network, multi-stage data envelopment analysis, green supply chain of poultry farming industry.

* Corresponding Author's email: Mhd.darvish@iau.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۲۸ الی ۱۴۸

مدل‌سازی کارایی آینده زنجیره تامین سبز صنعت پرورش طیور با استفاده از DEA چندمرحله‌ای و شبکه‌های عصبی مصنوعی

طاهره ترکاشوند[۱]، فاطمه ثقفی[۲]، محمدحسین درویش متولی[۳]*

[۱] گروه مدیریت فناوری اطلاعات، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

[۲] گروه مدیریت سیستم و علوم تصمیم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۳] گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

مدل‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) و تحلیل پوششی داده‌های چندمرحله‌ای نمی‌توانند کارایی آینده را پیش‌بینی کنند. به عبارت دیگر، همه مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها و تحلیل پوششی داده‌های چندمرحله‌ای بر اساس عملکرد گذشته، واحدها را ارزیابی می‌کنند. این مقاله به دنبال انتقال از مدل‌های نظارتی قبلی به رویکرد برنامه‌ریزی آینده است که شامل مشارکت‌های جدید است. در این پژوهش شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) با DEA چند مرحله‌ای ترکیب می‌شود تا کارایی آینده ۹ زنجیره تامین سبز صنعت پرورش طیور را در استان تهران پیش‌بینی کند. برای این منظور، ابتدا پس از شناسایی شاخص‌های تاثیر گذار بر روی زنجیره تامین سبز با تلفیق روش دلفی فازی و روش BWM، ۸ شاخص ورودی و ۸ شاخص خروجی شناسایی شد در این پژوهش به‌منظور تلفیق نظرات خبرگان از روش دلفی فازی استفاده گردید. برای تبدیل نظرات زبانی به مقادیر عددی از اعداد فازی مثلثی استفاده شد. فرایند تجمیع دیدگاه‌ها بر اساس میانگین هندسی مقادیر فازی صورت گرفت. در طراحی مدل، عدم قطعیت داده‌ها با استفاده از رویکرد فازی در فرآیند شناسایی شاخص‌ها و تحلیل پوششی داده‌ها لحاظ گردید و پس از جمع آوری اطلاعات زنجیره‌های مورد مطالعه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، داده‌ها برای ۵ سال پیش‌بینی شد. به‌منظور اطمینان از پایداری مدل، تحلیل حساسیت بر اساس تغییر تعداد نورون‌ها و توابع فعال‌سازی مختلف در شبکه عصبی انجام شد که نتایج آن نشان داد که شبکه با ۱۰ نورون در لایه پنهان بهترین عملکرد را داشته و مقدار خطای میانگین مربعات (MSE) برابر با $۳,۲۴\times۱۰^{-۶}$ است. سپس از داده‌های پیش‌بینی شده حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در تحلیل پوششی داده‌های چند مرحله‌ای استفاده شد. DEA چندمرحله‌ای کارایی زنجیره تامین سبز طیور را در دوره‌های گذشته، حال و آینده به طور همزمان ارزیابی می‌کند. این نتایج برای سیاست گذاری تحلیل روند عملکرد کارایی مفید است.

کلیدواژگان: شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل پوششی داده‌های چند مرحله‌ای، زنجیره تامین سبز صنعت پرورش طیور.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: Mhd.darvish@iau.ac.ir

۱- مقدمه

صنعت پروش طیور به عنوان یکی از ارکان اساسی تولید پروتئین و تأمین امنیت غذایی در ایران، نقش کلیدی در اشتغال‌زایی و توسعه اقتصادی ایفا می‌کند. زنجیره تأمین مؤثر می‌تواند به کاهش نوسانات قیمت و افزایش دسترسی به محصولات طیور کمک کند، که این امر به نوبه خود بر امنیت غذایی جامعه تأثیرگذار است با یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین، می‌توان هزینه‌های تولید را کاهش داد و بهره‌وری را افزایش داد. این امر به تولیدکنندگان کمک می‌کند تا بتوانند محصولات با کیفیت‌تری را با قیمت مناسب‌تری به بازار عرضه کنند. مدیریت بهینه زنجیره تأمین موجب می‌شود که تولیدکنندگان بتوانند در بازارهای داخلی و خارجی رقابت کنند[1]. این مسئله به ویژه در شرایطی که تولیدکنندگان سنتی در حال حذف از بازار هستند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.تمرکز بر زنجیره تأمین پایدار نه تنها به حفظ محیط زیست کمک می‌کند، بلکه موجب افزایش ارزش افزوده در صنعت طیور نیز می‌شود. این موضوع به ویژه در راستای سیاست‌های کلان کشور برای کاهش فقر و ایجاد اشتغال در مناطق روستایی اهمیت دارد . با وجود مزایای متعدد، صنعت طیور در ایران با چالش‌های زیادی مواجه است. عدم یکپارچگی زنجیره، نوسانات قیمت نهاده‌ها، و مشکلات ساختاری از جمله این چالش‌ها هستند که نیازمند توجه جدی می‌باشند. تحقیقات در زمینه زنجیره تأمین می‌تواند به شناسایی نقاط قوت و ضعف موجود کمک کند و راهکارهای عملی برای بهبود عملکرد این زنجیره ارائه دهد. همچنین، توسعه مدل‌های منبع‌یابی مناسب می‌تواند به شناسایی تأمین‌کنندگان کارآمد و کاهش ریسک‌های موجود کمک کند[2] .

زنجیره تأمین سبز به عنوان یک رویکرد نوین در مدیریت زنجیره تأمین، به دنبال کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و بهبود کارایی اقتصادی است. این رویکرد شامل تمام مراحل زنجیره تأمین از تأمین مواد اولیه تا توزیع محصولات نهایی می‌شود و هدف آن دستیابی به پایداری در عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی است[3] از طرفی با توجه به افزایش رقابت جهانی، بخش‌های مختلف جامعه در تلاش هستند تا کارایی خود را به حداکثر برسانند. برای انجام این کار، هر بخش باید عملکرد خود را از طریق یک معیار عملکرد مناسب نظارت کند . مدل‌های DEA به عنوان ابزاری برای ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری (DMUs) مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدل‌ها می‌توانند به شناسایی نقاط قوت و ضعف در عملکرد زنجیره تأمین کمک کنند و با استفاده از داده‌های چندمرحله‌ای، پیچیدگی‌های موجود در زنجیره تأمین را بهتر تحلیل کنند[4].

از سویی شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به عنوان یک ابزار پیشرفته برای پیش‌بینی و مدل‌سازی رفتار سیستم‌ها شناخته می‌شوند. در ترکیب با DEA، ANN می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف در زنجیره تأمین سبز کمک کند. این ترکیب، امکان شناسایی الگوهای پیچیده و غیرخطی را فراهم می‌آورد که ممکن است در داده‌های زنجیره تأمین وجود داشته باشد[5] .

شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستم‌های هوشمندی‌اند که براساس خصوصیات نورونهای بیولوژیکی و ارتباطات بین آنها طراحی شده‌اند. هرچند که مدل‌های مصنوعی طراحی شده بسیار ساده‌تر از ساختار بیولوژیکی‌اند، اما قابلیت‌ها و توانمندی‌های آنها بسیار زیاد است؛ به عبارت دیگر شبکه‌های عصبی ساختار منحصر به فردی را برای حل مسائلی که به روش‌های معمول به سختی امکان حل آنهاست ارائه می‌دهند[6] .

مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های قبلی و حتی فعلی (DEA) به شدت به داده‌های تاریخی (عملکرد گذشته) وابسته هستند و کارایی آینده نگر واحدهای تصمیم‌گیری (DMU) را ارزیابی نمی‌کنند. با توجه به این مباحث، هدف از مقاله بررسی کارایی آینده زنجیره تأمین سبز در صنعت پرورش طیور با استفاده از DEA چندمرحله‌ای و شبکه‌های عصبی مصنوعی است. این تحقیق می‌تواند به مدیران کمک کند تا تصمیمات بهتری در راستای پایداری و کارایی اقتصادی اتخاذ کنند.

استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی کارایی زنجیره تأمین، امکان پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها و شناسایی الگوهای پیچیده را فراهم می‌آورد. این فناوری می‌تواند به تحلیل داده‌ها و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف کمک کند، که در نهایت منجر به تصمیم‌گیری‌های بهتری در زمینه مدیریت زنجیره تأمین سبز می‌شود [7][8].

مدل‌سازی کارایی آینده زنجیره تأمین سبز در صنعت پرورش طیور به عنوان یک حوزه تحقیقاتی نوین، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با توجه به افزایش نگرانی‌ها در مورد پایداری محیطی و تأثیرات منفی تولیدات صنعتی، بهینه‌سازی زنجیره تأمین با رویکرد سبز اهمیت زیادی پیدا کرده است[6]. با توجه به افزایش تقاضا برای محصولات ارگانیک و پایدار، نیاز به بهینه‌سازی زنجیره تأمین برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش کارایی اقتصادی احساس می‌شود [9].

۲- مرور ادبیات

۲-۱- مدیریت زنجیره تامین سبز

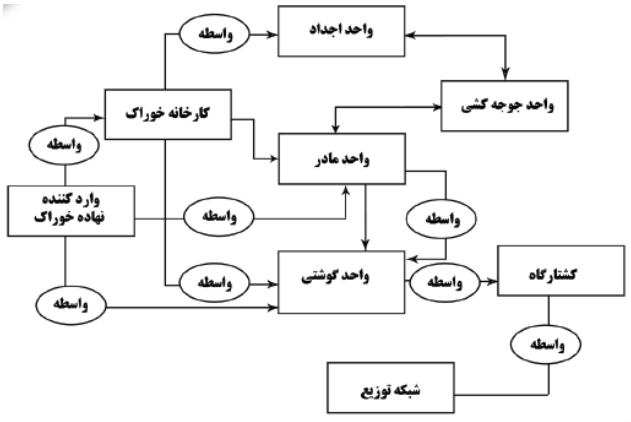
زنجیره تامین فرآیندی است که از مدیریت مواد خام شروع می‌شود تا مصرف کننده نهایی با تامین کننده مربوطه، خرده فروشان، سایر طرف‌هایی که خدمات را به مشتری ارائه می‌کنند و نقاط مختلف مصرف شروع می‌شود. اساساً، زنجیره تأمین ترکیبی از احزاب و فرآیندهای مختلف از جمله تولید، و فرآیندهای عقب و جلو در یک شرکت است. بار دیگر، زنجیره تامین شامل هر مرحله به سمت تولید و توزیع محصول نهایی، بر روی یا بعد از تامین کننده تامین کننده به مشتری مشتری است . علاوه بر این، زنجیره تامین فرآیند برنامه‌ریزی مناسب، منبع یابی، ساخت و تحویل را دنبال می‌کند که وضعیت عرضه-تقاضا، تامین مواد اولیه، سیستم تولید، انبارداری و موجودی، مدیریت سفارش و عنوان توزیع به مصرف‌کنندگان را مدیریت می‌کند. علاوه بر این، زنجیره تامین را به عنوان یک جزء تجاری متعارف برای هماهنگی سیستمی، استراتژیک و تاکتیکی با سایر عملکردها برجسته کرد. مدیریت زنجیره تامین تمام این فعالیت‌ها را مدیریت و در یک فرآیند یکپارچه ترکیب می‌کند[۱۰].

مدیریت زنجیره تامین سبز به عنوان مدیریت مواد اولیه، اجزا، عناصر و روندها از تأمین‌کنندگان تا تولیدکنندگان، تأمین‌کنندگان و مصرف‌کنندگان مصرف کننده برای کاهش اثرات زیست محیطی تعریف شده است. مدیریت زنجیره تامین سبز می‌تواند به سازمان‌ها در تجارت خود کمک کند تا مزایا و سودهای رقابتی را در محیط زنجیره تأمین با ریسک بالا افزایش دهند[۱۱].

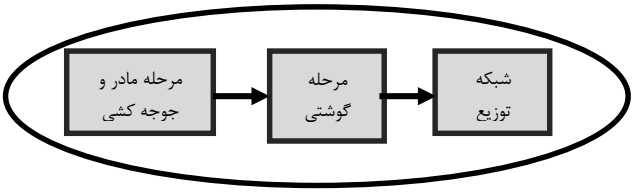
کشاورزی مدرن اکنون ۶۰۰۰ میلیون نفر در سراسر جهان را از طریق برکات علم و فناوری تغذیه می‌کند در عین حال، یک زنجیره تامین کارآمد به یک صنعت کمک می‌کند تا به موقع به مشتریان خود خدمات‌رسانی کند. به عنوان مثال، تولید جهانی گوشت حیوانات در چند دهه گذشته دو برابر شده است، عمدتاً به دلیل عملکرد بهتر ناشی از مدیریت موثر زنجیره تأمین و فناوری‌های برتر همراه با خوراک مصنوعی زنجیره تامین پایداری در حال تبدیل شدن به کانون اصلی صنعت طیور در سرتاسر جهان است، زیرا منابع، از جمله مواد خام، در تامین تقاضای رو به نوآوری نظری این پژوهش در توسعه یک رویکرد ترکیبی آینده‌نگر است که در آن مدل DEA چندمرحله‌ای به‌کمک شبکه عصبی مصنوعی به قابلیت پیش‌بینی مجهز می‌شود. برخلاف مطالعات پیشین که DEA را صرفاً برای ارزیابی کارایی تاریخی به کار برده‌اند، در این پژوهش ANN برای برآورد داده‌های آینده استفاده شده تا مسیر عملکرد آتی زنجیره‌ها شبیه‌سازی گردد. انتخاب ANN به‌دلیل توانایی آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی و یادگیری الگوهای پیچیده میان شاخص‌های سبز زنجیره تأمین صورت گرفته است. این ویژگی موجب می‌شود که مدل پیشنهادی، نسبت به تغییرات داده‌های واقعی و شرایط محیطی حساسیت بالاتری داشته و از دقت پیش‌بینی بیشتری برخوردار باشد.

رشد محدود و گران می‌شوند. برای طراحی یک صنعت مرغداری پایدار، یک شبکه زنجیره تامین موثر برای حفظ تقاضا و عرضه بهینه مورد نیاز است. در واقع، زنجیره تامین طیور فرآیند پیچیده‌ای است که شامل تعدادی از طرفین مانند تامین‌کنندگان، کشاورزان، توزیع‌کنندگان، نمایندگان، نمایندگی‌های فرعی، پردازشگرهای گوشت و غیره است.[12]. پیچیدگی زنجیره تامین طیور به زمینه (موقعیت)، مهارت‌ها، حفظ فرآیند ایمنی، کنترل کیفیت و قابلیت‌های مالی برای سرمایه گذاری بستگی دارد[13] شکل ۱ ساختار عمومی تولید گوشت مرغ در ایران را نشان می‌دهد.

با توجه به لزوم افزایش بهره‌وری و نیز حذف واسطه‌ها، یکی از راهکارهای اساسی ایجاد برنامه‌ریزی و مدیریت یکپارچه با هدف کاهش نوسانات قیمت نهاده‌ها و محصول و نیز کنترل بهتر پرورش از طریق راه‌اندازی سیستم‌های تولیدی یکپارچه می‌باشد. در همین راستا توالی زنجیره تامین یکپارچه صنعت طیور در ایران، در انجام این تحقیق طبق نظر خبرگان صنعت طیور در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار عمومی تولید گوشت مرغ در کشور [14]



شکل ۲. توالی زنجیره تامین یکپارچه طیور در ایران

نوآوری نظری این پژوهش در توسعه یک رویکرد ترکیبی آینده‌نگر است که در آن مدل DEA چندمرحله‌ای به‌کمک شبکه عصبی مصنوعی به قابلیت پیش‌بینی مجهز می‌شود. برخلاف مطالعات پیشین که DEA را صرفاً برای ارزیابی کارایی تاریخی به کار برده‌اند، در این پژوهش ANN برای برآورد داده‌های آینده استفاده شده تا مسیر عملکرد آتی زنجیره‌ها شبیه‌سازی گردد. انتخاب ANN به‌دلیل توانایی آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی و یادگیری الگوهای پیچیده میان شاخص‌های سبز زنجیره تأمین صورت گرفته است. این ویژگی موجب می‌شود که مدل پیشنهادی، نسبت به تغییرات داده‌های واقعی و شرایط محیطی حساسیت بالاتری داشته و از دقت پیش‌بینی بیشتری برخوردار باشد.

۲-۲- تحلیل پوششی داده‌ها و تحلیل پوششی داده‌های شبکه

در سال ۱۹۵۷، فارل توانست یک تابع را با ورودی چند ورودی و یک خروجی برای هر واحد پوشش دهد و عملکرد را به عنوان تابع تولید داده محاسبه کند و با کمک این تابع، کارایی نسبی همه واحدها را محاسبه کند. با پیشرفت کار فارل در حالت چند ورودی و چند خروجی، چارنز و همکاران[15] توانستند تکنیک جدیدی ایجاد کنند که بتواند با چندین فاکتور ورودی و خروجی به یک معیار عملکرد دست یابد. این روش تجزیه و تحلیل پوششی داده نامیده می‌شود. بسیاری از فرایندهای تولید و زنجیره‌های تأمین دارای ساختار شبکه‌ای هستند، به عبارت دیگر رویکردهای شبکه از فرایندها و فرایندها با ورودی و خروجی و مراحل میانی بین مراحل تشکیل شده‌اند. در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه را ایجاد کرده‌اند .ساختارهای چند مرحله‌ای را برای تجزیه و تحلیل پوشش داده‌های شبکه ارائه دادند [۱۶]. در همین مرجع، کلیه رویکردهای تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به طور کامل نشان داده شده است یکی از مهمترین کاربردهای تحلیل پوششی شبکه‌ای چند مرحله در محاسبه کارایی زنجیره تامین است.

در حوزه محاسبه کارایی در مطالعات قبلی بیشتر بررسی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری مرغداری DMU صورت گرفته است. و در خصوص تحلیل کارایی زنجیره تامین مطالعه‌ای مشاهده نشده است. همچنین در مطالعات قبلی توجه به شاخص‌های کلیدی و تاثیر گذار بر عملکرد زنجیره تامین سبز در صنعت پرورش طیور و بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی به منظور شناخت کارایی زنجیره تامین سبز با ساختار چند مرحله‌ای و تاثیرگذاری مراحل مختلف بر روی عملکرد مراحل بعدی در طول این زنجیره تامین مشاهده نشده است. در ضمن عدم شناخت و بکارگیری از مکانیزم مناسب به منظور پیش‌بینی وضعیت کارایی و عملکرد این زنجیره در دوره‌های آتی جهت جلوگیری یا پیشگیری از مخاطرات و زیان‌های رایج در این صنعت از مسائل مهم دیگری است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این درحالی است که تعیین کارایی شبکه تامین صنعت پرورش طیور با ساختار چند مرحله‌ای و شبکه‌ای بر مبنای مدلی از تحلیل پوششی داده‌ها در هیچ یک از تحقیقات قبلی مدنظر قرار نگرفته است و بهره‌گیری از داده کاوی به منظور پیش‌بینی عملکرد و کارایی شاخص‌های این زنجیره تامین در مطالعات مشابه یافت نشده است. وجه تمایز تحقیق حاضر با پژوهش‌های قبلی به طور خاص به ترکیب ارائه مدلی از DEA[1] چند مرحله‌ای و داده کاوی جهت تعیین کارایی زنجیره تامین این صنعت با توجه به عامل سبز بودن عملیات زنجیره و پیش‌بینی عملکرد در دوره‌های آتی معطوف خواهد بود.

وجه تمایز نظری و کاربردی این مطالعه تنها محدود به تلفیق دو روش نیست؛ بلکه نوآوری اصلی در «به‌کارگیری ANN به‌عنوان ابزار پیش‌بینی غیرخطی» در ترکیب با DEA چندمرحله‌ای برای برآورد کارایی آینده زنجیره‌های تأمین سبز است. در حالی‌که DEA رویکردی قوی برای ارزیابی کارایی در شرایط قطعی و تاریخی فراهم می‌آورد، این روش ذاتاً پیش‌بینی‌پذیر نیست. از سوی دیگر، ANN توانایی مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین شاخص‌های ورودی و خروجی را دارد و می‌تواند روندها و الگوهای مستتر در داده‌های تاریخی را یاد بگیرد و برای تولید پیش‌بینی‌های چندساله به‌کار رود. بنابراین، ادغام ANN و DEA زمینه‌ای برای حرکت از ارزیابی ایستا به **برنامه‌ریزی آینده‌نگر** فراهم می‌کند و این همان وجه نوآوری نظری و کارکردی است که مقاله حاضر پیگیری می‌کند.

به منظور حل مشکل باید ساختار و مدلی ارائه شود که با ایجاد شیوه‌های مناسب عوامل موثر بر عملکرد سبز را در زنجیره تامین شناسایی کند و از آنها برای اندازه‌گیری کارایی[2] و برآمد هزینه‌های کاهش آلودگی و عوامل نامطلوب استفاده نمایند و در همین راستا تصمیمات مناسب را در راستای بهبود کارایی (کارایی تابعی از شاخص‌های درون سازمانی می‌باشد) و بهبود اثر بخشی[3] (اثر بخشی تابعی از شاخص‌های برون سازمانی می‌باشد) اتخاذ کنند. به همین

[1] Data Envelopment Analysis (DEA)
[2] Efficiency
[3] Productivity

دلیل از تحلیل پوششی داده‌ها که ابزار توانمندی در ارزیابی عملکرد واحدهایی با چند ورودی و چند خروجی است، استفاده می‌شود.

و از آنجا که پیش‌بینی عملکرد یا برداشت محصول در دوره‌های آتی می‌تواند در تخصیص بهینه منابع و دستیابی به یک زنجیره تامین سبز و پایدار برای این صنعت موثر باشد، با استفاده از داده کاوی و تلفیق آن با مدل جدید تحلیل پوششی داده‌ها، به حل این مساله مهم می‌پردازیم.

مراحل انجام پژوهش به صورت زیر است:

۱. شناسایی شاخص‌های ورودی و خروجی با استفاده از دلفی فازی و روشBWM
۲. اجرای مدل DEA چندمرحله‌ای برای محاسبه کارایی فعلی
۳. آموزش مدل ANN برای پیش‌بینی کارایی آینده
۴. انجام تحلیل حساسیت برای ارزیابی پایداری مدل
۵. تفسیر و مقایسه نتایج

۲-۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی[1] (ANN)

شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستم‌های هوشمندی‌اند که براساس خصوصیات نورونهای بیولوژیکی و ارتباطات بین آنها طراحی شده‌اند. هرچند که مدل‌های مصنوعی طراحی شده بسیار ساده‌تر از ساختار بیولوژیکی‌اند، اما قابلیت‌ها و توانمندی‌های آنها بسیار زیاد است؛ به عبارت دیگر شبکه‌های عصبی ساختار منحصر به فردی را برای حل مسائلی که به روش‌های معمول به سختی امکان حل آنهاست ارائه می‌دهند [17].

شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای ویژگی‌هایی می‌باشند که آنها را در برخی از کاربردها مانند تخمین توابع، پیش‌بینی، تشخیص الگو، کنترل، رباتیک و به طور کلی در هرجا که نیاز به یادگیری یک نگاشت خطی و یا غیرخطی باشد، ممتاز می‌نماید. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به قابلیت یادگیری، قابلیت تعمیم، پردازش موازی و مقاوم بودن، اشاره نمود. تنوع مدل‌های شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های یادگیری آنها، امکان کاربردهای مختلفی را برای آنها فراهم می‌آورد (راعی، ۱۴۹:۱۳۸۰). به منظور موفقیت در انطباق با مسایل دنیای واقعی، باید ابعاد زیادی از جمله مدل شبکه، اندازه شبکه، تابع فعالیت، پارامترهای یادگیری و تعداد نمونه‌های آموزشی را مد نظر قرار داد. [18]

اگرچه انواع مختلفی از مدل‌های شبکه عصبی توسعه داده شده است اما محبوب‌ترین آنها مدل شبکه عصبی پس انتشار (BP) است. شبکه عصبی پس انتشار شبکه عصبی پیش خور چند لایه می‌باشد که توسط الگوریتم‌های پس انتشار خطا آموزش داده می‌شوند. [19]

شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های پیش‌بینی می‌باشند که کاربردهای مفیدی در پیش‌بینی مسائل اجتماعی، اقتصادی، مهندسی، مبادلات خارجی، سهام و غیره دارند. شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای چند ویژگی متمایز می‌باشند که آنها را در زمینه پیش‌بینی، ارزشمند و جذاب می‌نماید. اول اینکه برخلاف روشهای سنتی در شبکه‌های عصبی پیش فرض‌های کمی درباره مدل مسئله تحت بررسی وجود دارد. دوم اینکه شبکه‌های عصبی قابلیت تعمیم دهی دارند. بعد از یادگیری داده‌های موردنظر (یک نمونه) شبکه‌های عصبی در اکثر مواقع می‌توانند بخش مشاهده نشده یک جمعیت را حتی اگر داده‌های نمونه شامل اطلاعات ناقص باشند به درستی استنتاج نمایند. سوم اینکه شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند هر تابع پیوسته‌ای را با دقت مورد نظر تقریب بزنند و نهایتاً اینکه شبکه‌های عصبی غیرخطی می‌باشند و این درحالی است که سیستم‌های دنیای واقعی نیز اغلب غیر خطی هستند. [20]

شبکه‌های عصبی، همانند رگرسیون، ابزاری برای تقریب توابع و یافتن ارتباط میان متغیرهای مستقل و وابسته است. مهمترین تفاوت میان شبکه‌های عصبی و رویکردهای سنتی آماری، در تقریب توابع آنها است که شبکه‌های عصبی بر خلاف روش‌های سنتی آماری هیچ پیش فرضی در مورد توزیع و یا خواص آماری داده‌ها به عمل نمی‌آورند و از این نظر می‌توانند در عمل کارآیی زیادی داشته باشند. ضمن آنکه این شبکه‌ها، در زمره رویکردهای غیرخطی در تدوین مدل‌ها قرار دارند و از این منظر نیز در مواجهه با داده‌هایی که پیچیده و غیرخطی هستند، با دقت بیشتری می‌توانند آنها را در قالب یک مدل مشخص بیان کنند. [21]

امروزه ANN کاربردهای زیادی دارد. خوشه‌بندی [22]، طبقه‌بندی [23] و رتبه‌بندی [24] برخی از کاربردهای ANN هستند. ANN همچنین برای پیش‌بینی مجموعه داده‌های آینده اعمال شده است [25]; [26]. در این مطالعه از شبکه عصبی مصنوعی به همراه تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای برای پیش‌بینی کارایی استفاده شده است. برای این منظور، پس از شناسایی شاخص‌های زنجیره تامین سبز صنعت پرورش طیور، ورودی‌ها، خروجی‌ها با استفاده از ANN پیش‌بینی شده و سپس DMU ها در دوره‌های مختلف با اجرای DEA شبکه‌ای ارزیابی شده است. متعاقبا با اطلاع رسانی به

[1] Artificial neural networks

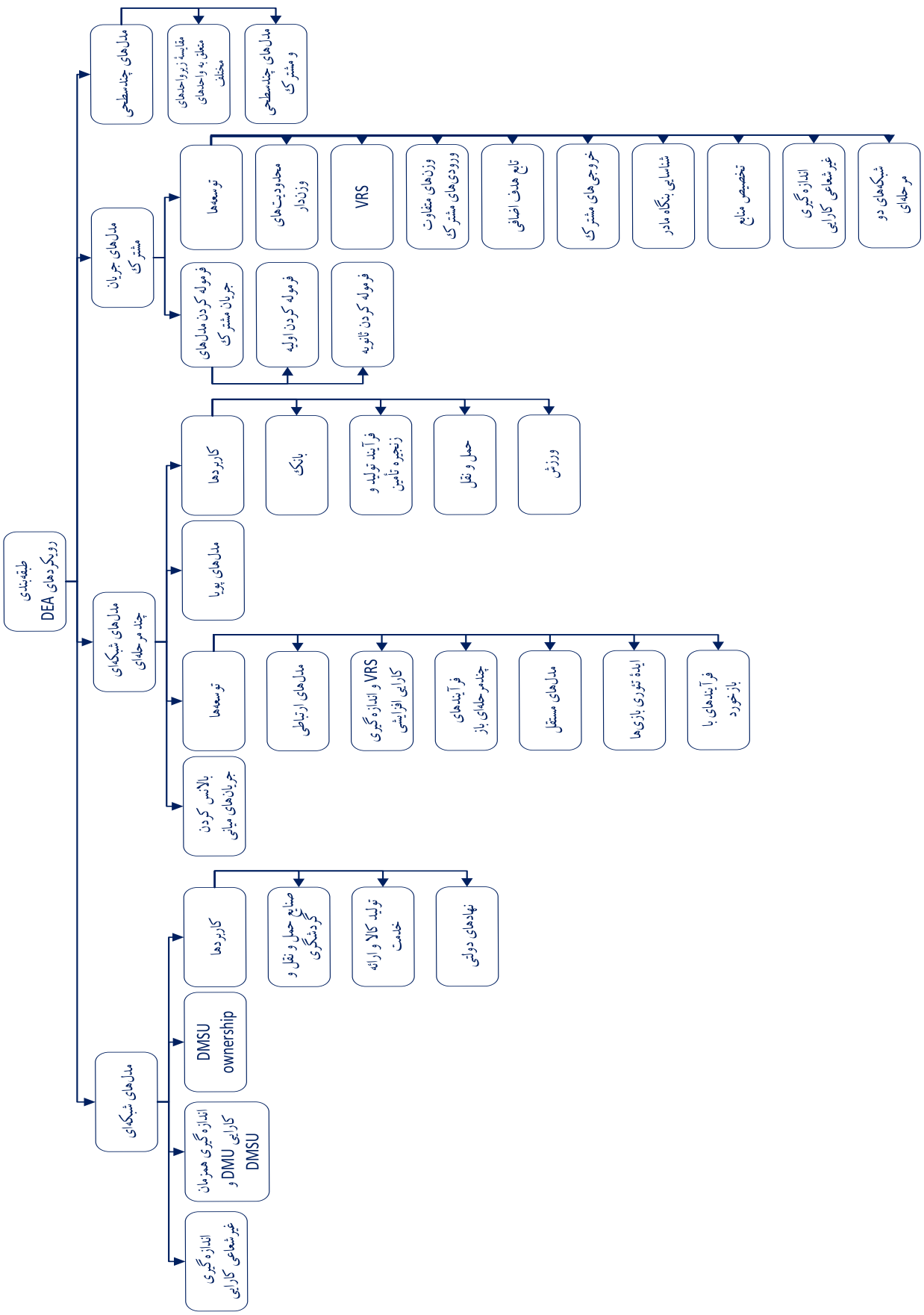
تصمیم‌گیرندگان از کارایی آینده DMU ها، می‌توان اقدامات پیشگیرانه را انجام داد. در نتیجه، ما می‌توان کارایی DMUهای ناکارآمد آینده‌نگر را از قبل بهبود بخشید.

۲-۴- تجزیه و تحلیل پوششی داده‌ها و شبکه عصبی مصنوعی

تکنیک DEA (شکل ۳) یک رویکرد غیر پارامتری است که اغلب برای تعیین کارایی نسبی DMU ها استفاده می‌شود [19]. در سال‌های اخیر، DEA خود را به عنوان یک تکنیک رایج برای ارزیابی عملکرد DMUهای همگن تثبیت کرده است [21]; آگاتیستی و ریکا[22] لیو و همکاران[30] ; علیزاده و عمرانی[31]; قاسمی و همکاران[33])، برای بخشهای عمومی و دیگران برای هتل‌ها [35])، فرودگاه‌ها [27]، بانکداری [27]، راه آهن [28]، از این روش استفاده کرده‌اند. مقالات مروری اخیر بررسی گسترده‌ای از مطالعات DEA و همچنین زمینه‌های بالقوه برای کاربرد آینده ارائه می‌دهند. بسیاری از محققان بسته به نوع ورودی‌ها و خروجی‌ها، ساختارها و مدل‌هایی را برای ارزیابی عملکرد زنجیره تامین طیور ارائه داده‌اند. در بررسی‌های انجام شده مطالعات زیادی برای اندازه‌گیری عملکرد زنجیره تامین طیور انجام شده است، که علیرغم قابلیت‌های نشان داده شده، DEA فاقد قابلیت‌های پیش‌بینی است، که نقطه قوت ANNها است [29].

ANNها کاربردهایی از هوش مصنوعی هستند که فرآیندهای بیولوژیکی نورون‌ها را در مغز انسان شبیه‌سازی می‌کنند. شبکه عصبی مصنوعی به یک سیستم پردازش اطلاعات مورد علاقه و موازی تبدیل شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از بسیاری از نورون‌های مصنوعی جفت شده و ساده، ساختار پردازش اطلاعات یا عملکردهای شبکه‌های عصبی بیولوژیکی را تقلید می‌کنند. مطالعات متعدد اخیر نشان می‌دهد که ANN یک تکنیک قوی است که برای طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله محک زدن زنجیره تامین [۶]، مدیریت پروژه [۳]، بهبود کیفیت [30]، پیش‌بینی تقاضا [31] و فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر [32] بکار رفته است. درتحقیقات قبلی نشان داده که ویژگی‌های مکمل DEA با ادغام ANN را می‌توان در یک مدل یکپارچه امیدوارکننده تعبیه کرد [33]; [34]; [35]). آتاناسوپولوس و کورام [36] اولین کسانی بودند که از ویژگی‌های مربوطه DEA و ANN بهره برداری کردند. آنها امکان استفاده از ANN را برای اندازه‌گیری کارایی DMU بررسی کردند و دریافتند که ANN و DEA تکنیک‌های اندازه‌گیری عملکرد قابل مقایسه و بالقوه مکمل هستند. بعدا، بسیاری از محققان این کار مقدماتی را گسترش دادند و نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه دادند. هان و همکاران [37] از یک رویکرد ANN بهبود یافته استفاده کردند که تحلیل پوششی داده‌ها را برای بهینه‌سازی انرژی و پیش‌بینی صنایع پیچیده پتروشیمی ترکیب می‌کرد. کوون و همکاران [38] یک مدل ترکیبی را برای پیش‌بینی بهترین خروجی‌های عملکرد از برنامه‌های گوشی‌های هوشمند گسترش دادند. آنها از ترکیبی از DEA و ANN برای پیش‌بینی نمرات کارایی از مدل‌های مختلف DEA استفاده کردند. آنها توانایی مدل را در پیش‌بینی خروجی‌های مورد نیاز برای دستیابی به بالاترین سطح عملکرد نشان دادند. علاوه بر این، کوون قابلیت پیش‌بینی شبکه‌های عصبی مصنوعی را در ترکیب با DEA برای مدل‌سازی عملکرد راه آهن بررسی کرد. اخیرا، رضایی و همکاران [39] یک رویکرد یکپارچه پویای فازی C-means، DEA و ANN را برای پیش‌بینی عملکرد بورس اوراق بهادار آنلاین ارائه کردند. همچنین، مطالعات جدید نیز کارایی مدل‌های ترکیبی ANN–DEA را در حوزه زنجیره تأمین سبز تأیید کرده‌اند[۴۰] و [۴۱]. این تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از ANN به‌عنوان ابزار پیش‌بینی‌کننده در کنار DEA می‌تواند دقت ارزیابی کارایی را به‌ویژه در شرایط ناپایدار محیطی افزایش دهد. با وجود این پیاده‌سازی‌های موفق، بررسی ما نشان می‌دهد که هیچ مطالعه‌ای ادغام DEA و ANN را برای پیش‌بینی عملکرد زنجیره تامین سبز طیور اجرا نکرده است.

شبکه‌های پیشخور، پس انتشار که معمولا در این نوع تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرند[42]. برای آموزش شبکه عصبی استفاده می‌شود. شبکه پس انتشار معمولی دارای یک لایه ورودی است که فقط از ورودی‌های شبکه تشکیل شده است. سپس یک لایه پنهان که از تعدادی نورون یا واحدهای پنهان تشکیل شده است که به طور موازی قرار می‌گیرند دنبال می‌شود. خروجی شبکه نیز با جمع وزنی تشکیل می‌شود که از خروجی‌های نورون‌ها در لایه پنهان تشکیل شده است. لایه تشکیل شده لایه خروجی نامیده می‌شود. معمولا تعداد نورون‌های خروجی برابر است تعداد خروجی‌های مسئله تقریب. در این حالت، از تابع فعال‌سازی خطی برای لایه خروجی استفاده می‌شود، زیرا معمولا در مسائل رگرسیون استفاده می‌شود، جایی که ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی و تفسیر اطلاعات مورد نیاز است.



شکل ۳. طبقه‌بندی رویکردهای و مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای [5]

TRAINLM یک تابع آموزش شبکه‌ای است که وزن را به روز می‌کند و مقادیر را بر اساس بهینه‌سازی الگوریتم لونبرگ-مارکوارت[1] پیش‌بینی می‌کند[43]. الگوریتم لونبرگ-مارکوارت (LMA) الگوریتم آموزشی رایج در طبقه‌بندی داده‌ها و همچنین الگوریتمی است که در آزمایش قبلی استفاده شده است[44]. این اغلب سریعترین الگوریتم پس انتشار است، اگرچه نسبت به سایر الگوریتم‌ها به حافظه بیشتری نیاز دارد[45]. تابع عملکرد شبکه‌ای که مورد استفاده قرار می‌گیرد خطای میانگین مربعات[2] است. عملکرد شبکه را با توجه به میانگین خطاهای مربعات اندازه‌گیری می‌کند. میانگین مربعات خطا عملکرد شبکه را با توجه به میانگین خطاهای مربعات اندازه‌گیری می‌کند. این میانگین مربعات تفاوت بین مشاهدات واقعی و مشاهدات پیش‌بینی شده است[46]. مربع کردن خطاها تمایل به وزن زیاد به داده پرت‌های آماری دارد که بر دقت نتایج تأثیر می‌گذارد. trainlm یک تابع آموزش شبکه است که مقادیر وزن و بایاس را مطابق بهینه‌سازی لونبرگ-مارکوارت به روز می‌کند[47]. trainlm اغلب سریعترین الگوریتم پس انتشار در جعبه ابزار است و به عنوان یک الگوریتم نظارت شده انتخاب اول به شدت توصیه می‌شود، اگرچه به حافظه بیشتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر نیاز دارد[48]. شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستم‌های هوشمندی‌اند که براساس خصوصیات نورونهای بیولوژیکی و ارتباطات بین آنها طراحی شده‌اند. هرچند که مدل‌های مصنوعی طراحی شده بسیار ساده‌تر از ساختار بیولوژیکی‌اند، اما قابلیت‌ها و توانمندی‌های آنها بسیار زیاد است؛ به عبارت دیگر شبکه‌های عصبی ساختار منحصر به فردی را برای حل مسائلی که به روش‌های معمول به سختی امکان حل آنهاست ارائه می‌دهند[49].

اگرچه انواع مختلفی از مدل‌های شبکه عصبی توسعه داده شده است اما محبوب‌ترین آنها مدل شبکه عصبی پس انتشار (BP) است. شبکه عصبی پس انتشار شبکه عصبی پیش خور چند لایه می‌باشد که توسط الگوریتم‌های پس انتشار خطا آموزش داده می‌شوند[50]. شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های پیش‌بینی می‌باشند که کاربردهای مفیدی در پیش‌بینی مسائل اجتماعی، اقتصادی، مهندسی، مبادلات خارجی، سهام و غیره دارند. شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای چند ویژگی متمایز می‌باشند که آنها را در زمینه پیش‌بینی، ارزشمند و جذاب می‌نماید. اول اینکه برخلاف روشهای سنتی در شبکه‌های عصبی پیش فرض‌های کمی درباره مدل مسئله تحت بررسی وجود دارد. دوم اینکه شبکه‌های عصبی قابلیت تعمیم‌دهی دارند[51]. بعد از یادگیری داده‌های موردنظر (یک نمونه) شبکه‌های عصبی در اکثر مواقع می‌توانند بخش مشاهده نشده یک جمعیت را حتی اگر داده‌های نمونه شامل اطلاعات ناقص باشند به درستی استنتاج نمایند. سوم اینکه شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند هر تابع پیوسته‌ای را با دقت مورد نظر تقریب بزنند و نهایتاً اینکه شبکه‌های عصبی غیرخطی می‌باشند و این درحالی است که سیستم‌های دنیای واقعی نیز اغلب غیر خطی هستند. [52]

توجه داشته باشید که ارزیابی کارایی توسط مدل‌های قبلی تحلیل پوششی داده‌ها صرفا بر اساس عملکرد گذشته است. این بدان معناست که مدل‌های کلاسیک DEA نمی‌توانند کارایی آینده DMU ها را ارزیابی کنند. از این رو، این مقاله رویکرد جدیدی را برای پیش‌بینی کارایی آینده تامین‌کنندگان سبز پیشنهاد می‌کند. نویسندگان معتقدند که این مقاله سهم قابل توجهی دارد که فراتر از قلمرو مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های موجود است.

به طور خلاصه، مشارکت رویکرد پیشنهادی ما به شرح زیر است:

- شناسایی شاخص‌های تاثیر گذار بر زنجیره تامین سیز صنعت پرورش طیور
- ارائه مدل ریاضی بر پایه تحلیل پوششی داده‌های چند مرحله‌ای جهت تعیین نمره کارایی زنجیره تامین سبز در صنعت طیور
- ارزیابی کارایی زنجیره تامین سبز طیور در دوره‌های گذشته، حال و آینده به طور همزمان
- پیش‌بینی کارایی آینده زنجیره تامین سبز طیور با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و تحلیل پوششی داده‌های چندمرحله‌ای
- اقدامات پیشگیرانه‌ای را برای زنجیره‌های ناکارا با پیش‌بینی کارایی آینده
- انتقال نقش تصمیم‌گیرندگان از نظارت به برنامه‌ریزی آینده منتقل

۳- روش پیشنهادی

برای دستیابی به اهداف این مقاله، مراحل زیر برداشته شده است: ابتدا بر اساس مطالعه کتابخانه‌ای شاخص‌های زنجیره تامین سبز در صنعت طیور گوشتی شناسایی خواهد شد و سپس بر اساس روش دلفی غربالگری شاخص‌ها انجام می‌شود. در مرحله بعد ابتدا با استفاده از تکنیک ANN، ورودی‌ها، خروجی‌ها را برای هر زنجیره تامین سبز پیش‌بینی می‌کنیم. توجه داشته باشید که تحلیل

[1] Levenberg-Marquardt

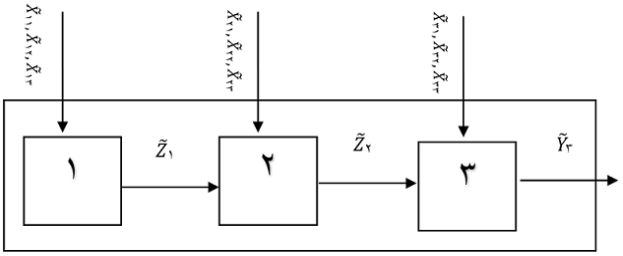
[2] Mean Squared Error

پوششی داده‌های چند مرحله‌ای باید با داده‌های پیش‌بینی شده تغذیه شود تا کارایی تامین‌کنندگان سبز را در دوره‌های مختلف ارزیابی کند. سپس کارایی زنجیره‌های تامین را در دوره‌های مختلف از جمله دوره آینده ارزیابی می‌کنیم.

۴- مدل DEA پژوهش حاضر

مدل DEA شبکه‌ای برای ارزیابی قابلیت زنجیره تأمین سبز نسبت به عامل‌های آن در شکل ۴ مدل زنجیره تأمین سه مرحله‌ای نشان داده شده است. به طور بالقوه، عامل سبزی می‌توانند بر تمام لایه‌های زنجیره تأمین تأثیر گذاشته، و اثر مخرب خود را بر بخشی از فرآیند یا کل زنجیره تأمین بگذارند. از این رو، هر چه اعضاء زنجیره تأمین (به عنوان مثال، تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان یا توزیع‌کنندگان) آسیب پذیری بیشتری به سبز بودن داشته باشند (ورودی‌ها)، قابلیت پایداری عملیاتی این اجزاء کمتر خواهد بود. سطوح پایداری مربوط به هر لایه، به عنوان خروجی هر فرآیند در مدل نشان داده شده است.

از این رو، سطوح پایداری لایه‌های اقتصادی زنجیره تأمین، به عنوان خروجی نشان داده شده است و می‌تواند به عنوان ورودی لایه‌های اجتماعی و یا زیست محیطی در نظر گرفته شود. همان طوری که نشان داده شده است ریسک‌های سبز اقتصادی $(\tilde{X}_{11})$، خارجی $(\tilde{X}_{12})$، شبکه ای$(\tilde{X}_{12})$ به عنوان ورودی و قابلیت سبز تأمین‌کننده به$(\tilde{Z}_1)$ عنوان خروجی واسط فرآیند اقتصادی، بر عملیات تأمین‌کننده تأثیر می‌گذارد. به همین ترتیب، ریسک‌های سبز اجتماعی $(\tilde{X}_{21})$، خارجی $(\tilde{X}_{22})$، شبکه‌ای $(\tilde{X}_{23})$، ورودی به حساب آمده و قابلیت پایداری تولیدکننده$(\tilde{Z}_2)$ به عنوان خروجی واسط فرآیندهای اجتماعی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، ریسک‌های زیست محیطی$(\tilde{X}_{31})$، خارجی$(\tilde{X}_{32})$، شبکه‌ای $(\tilde{X}_{33})$، به عنوان ورودی و قابلیت پایداری توزیع‌کننده $(\tilde{Y}_3)$، به عنوان خروجی فرآیندهای اقتصادی در نظر گرفته شده‌اند. علامت «~» نشان‌دهنده ارزش‌های فازی سطوح ریسک و قابلیت پایداری است. متغیرها به شرح زیر است:



شکل ۴. ساختار زنجیره تامین سبز صنعت طیور

- v_{1i}: وزن انواع ریسک‌های اقتصادی $(i = 1)$، خارجی $(i = 2)$ و شبکه‌ای $(i = 1)$ فرآیندهای اقتصادی در ارزیابی قابلیت پایداری؛
- v_{2i}: وزن انواع ریسک‌های اجتماعی $(i = 1)$، خارجی $(i = 2)$ و شبکه‌ای $(i = 1)$ فرآیندهای اجتماعی در ارزیابی قابلیت پایداری؛
- v_{1i}: وزن انواع ریسک‌های زیست محیطی $(i = 1)$، خارجی $(i = 2)$ و شبکه‌ای $(i = 1)$ فرآیندهای زیست محیطی در ارزیابی قابلیت پایداری؛
- w_1: وزن پایداری تأمین کننده در فرآیندهای اقتصادی در ارزیابی قابلیت پایداری؛
- w_2: وزن پایداری تأمین کننده در فرآیندهای اجتماعی در ارزیابی قابلیت پایداری؛
- u_3: وزن پایداری تأمین کننده در فرآیندهای زیست محیطی در ارزیابی قابلیت پایداری؛

بر اساس کائو و هوانگ[23] کارایی کل سیستم زنجیره تأمین DMUk به صورت زیر فرموله خواهد شد:

$$\tilde{E}_k = max \frac{u_3 \tilde{Y}_3^k}{\sum_{t=1}^{3}\sum_{i=1}^{3} v_{ti}\tilde{X}_{ti}^k}$$

به طوری که

$$\frac{u_3 \tilde{Y}_3^j}{(\sum_{t=1}^{3}\sum_{i=1}^{3} v_{ti}\tilde{X}_{ti}^j)} \leq 0, j = 1,2,\dots,n$$

$$v_{ti}, u_3, \geq \varepsilon, i = 1,2,3;\ t = 1,2,3$$

در مدل حاضر، پارامتر λ بیانگر وزن نسبی شاخص‌های ورودی و خروجی در هر مرحله از مدل DEA است. مقدار λ برای هر شاخص با هدف ایجاد توازن بین اهمیت شاخص‌ها و جلوگیری از تسلط یک شاخص خاص تعیین گردید. در این تحقیق، مقادیر λ بر اساس آزمون چندین مقدار ممکن (از ۰,۱ تا ۱) و با استفاده از تحلیل حساسیت انتخاب شدند، به‌گونه‌ای که منجر به بیشترین پایداری و کمترین انحراف استاندارد در نتایج کارایی گردید. این روش در مطالعات مشابه [46] ، [23] نیز برای تنظیم وزن شاخص‌ها به‌کار رفته است. در مدل فوق، تابع هدف به دنبال بیشینه‌سازی کارایی کلی DMUk بوده و محدودیت‌های مساله نشان‌دهنده این قید هستند که کارایی کلیه واحدهای تصمیم‌گیرنده باید کوچکتر از یک باشد. که همان مدل مضربی کسری CCR می‌باشد. با اعمال تغییر متغیر چارنز - کوپر، مدل خطی به صورت زیر فرموله می‌شود.

$$\tilde{E}_k = max\ u_3 \tilde{Y}_3^k$$

به طوری که

$$\sum_{t=1}^{3}\sum_{i=1}^{3} v_{ti}\tilde{X}_{ti}^{k}=1$$

$$u_3\tilde{Y}_3^j-(\sum_{t=1}^{3}\sum_{i=1}^{3} v_{ti}\tilde{X}_{ti}^{j})\le 0, j=1,2,\dots,n$$

$$1,2,\dots,n$$

$$v_{ti},u_3,\ge\varepsilon, i=1,2,3;\ t=1,2,3$$

با منطقی مشابه، می‌توان قابلیت پایداری هر یک از فرآیندهای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را نیز با توجه به ریسک‌های ورودی و قابلیت پایداری خروجی ارزیابی نمود. فرض کنید $\tilde{E}_k^1$، $\tilde{E}_k^2$، و $\tilde{E}_k^3$ به ترتیب قابلیت پایداری فرآیندهای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی kامین شرکت تولید مواد غذایی تحت ارزیابی باشد.

فرآیندهای اقتصادی را در نظر بگیرید. در این فرآیندها سه دسته ریسک‌های اقتصادی، سازمانی و شبکه‌ای به عنوان ورودی و قابلیت پایداری به عنوان خروجی تعریف شده است. بر این اساس کارایی این بخش از سیستم را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\tilde{E}_k^1=w_1^*\tilde{Z}_1^k\Big/\sum_{i=1}^{3} v_{1i}^*\tilde{X}_{1i}^k$$

به طور مشابه، فرآیندهای سازمانی، تاب آوری فرآیندهای اقتصادی را همراه با مجموعه ریسک‌های اجتماعی، خارجی و شبکه‌ای به عنوان ورودی دریافت و قابلیت پایداری را به عنوان خروجی تولید می‌کنند. با استفاده از نمادهای بخش قبل، قابلیت پایداری فرآیندهای اجتماعی به صورت زیر فرموله می‌گردد.

$$\tilde{E}_k^2=w_2^*\tilde{Z}_2^k\Big/w_1^*\tilde{Z}_1^k+\sum_{i=1}^{3} v_{2i}^*\tilde{X}_{2i}^k$$

قید مشابهی نیز در رابطه با فرآیندهای زیست محیطی قابل طرح است. این فرآیندها پایداری فرآیندهای سازمانی را همراه با مجموعه ریسک‌های اقتصادی، سازمانی و شبکه‌ای به عنوان ورودی دریافت و قابلیت پایداری را به عنوان خروجی تولید می‌کنند. در نتیجه پایداری این فرآیندها نیز به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\tilde{E}_k^3=u_3^*\tilde{Y}_3^k\Big/w_2^*\tilde{Z}_2^k+\sum_{i=1}^{3} v_{3i}^*\tilde{X}_{3i}^k$$

با توجه به قید کوچکتر از یک بودن مقادیر کارایی، روابط فوق را می‌توان به صورت زیر در قالب محدودیت‌های مدل در نظر گرفت.

$$w_1^*\tilde{Z}_1^k\Big/\sum_{i=1}^{3} v_{1i}^*\tilde{X}_{1i}^k\le 1$$

$$w_2^*\tilde{Z}_2^k\Big/w_1^*\tilde{Z}_1^k+\sum_{i=1}^{3} v_{2i}^*\tilde{X}_{2i}^k\le 1$$

$$u_3^*\tilde{Y}_3^k\Big/w_2^*\tilde{Z}_2^k+\sum_{i=1}^{3} v_{3i}^*\tilde{X}_{3i}^k\le 1$$

با خطی‌سازی محدودیت‌های فوق و افزودن آنها به مدل فوق، مدل نهایی سنجش قابلیت پایداری فرآیندهای شرکت تولیدی به صورت زیر فرموله می‌گردد.

$$\tilde{E}_k=max\ u_3\tilde{Y}_3^k$$

به طوری که

$$\sum_{t=1}^{3}\sum_{i=1}^{3} v_{ti}\tilde{X}_{ti}^{k}=1$$

$$u_3\tilde{Y}_3^j-(\sum_{t=1}^{3}\sum_{i=1}^{3} v_{ti}\tilde{X}_{ti}^{j})\le 0, j=1,2,\dots,n$$

$$w_1\tilde{Z}_1^j-\sum_{i=1}^{3} v_{1i}\tilde{X}_{1i}^j\le 0, j=1,2,\dots,n$$

$$w_2\tilde{Z}_2^j-(w_1\tilde{Z}_1^j+\sum_{i=1}^{3} v_{2i}\tilde{X}_{2i}^j)\le 0, j=1,2,\dots,n$$

$$u_3\tilde{Y}_3^0-(w_2\tilde{Z}_2^j+\sum_{i=1}^{3} v_{3i}\tilde{X}_{3i}^j)\le 0, j=1,2,\dots,n$$

$$v_{ti},u_3,w_1,w_2\ge\varepsilon, i=1,2,3;\ t=1,2,3$$

مدل بالا یک مدل برنامه‌ریزی خطی فازی است که حل آن نیاز به توسعه روش‌های خاص دارد. در تحقیق حاضر به منظور حل مدل خطی فازی فوق از رویکرد مبتنی بر برش‌های آلفا استفاده شده است.

۵- نتایج

در این تحقیق پس از بررسی ادبیات پژوهش و مصاحبه‌های تخصصی انجام‌شده مجموعه‌ای از شاخص‌های ورودی و خروجی زنجیره تامین سبز طیور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود شناسایی‌شد که غربال و تائید نهایی شاخص‌ها با روش دلفی فازی انجام شد. هدف ما مطالعه زنجیره‌های تامین سبز طیور در استان تهران بود که پس از بررسی صورت گرفته بر روی زنجیره‌های استان با توجه به اینکه بعضی از زنجیره‌ها بصورت نیمه فعال بودند مثلا یک یا دو حلقه فعال داشتند، ما زنجیره‌هایی را انتخاب کردیم که هر سه حلقه آنها فعال باشد و ترجیحا همه حلقه‌ها در استان تهران باشد بر همین اساس ۹ زنجیره انتخاب شد. که نسبت به جمع‌آوری اطلاعات زنجیره‌های مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های تایید شده اقدام شد.

در تحقیق حاضر با توجه به اینکه هدف ارائه مدلی تحلیلی برای ارزیابی زنجیره تامین سبز صنعت پرورش طیور است، لذا جامعه آماری آن می‌تواند زنجیره تأمین شرکت‌های فعال در صنعت تولید طیور باشد که با سوالات ارائه شده برای مسئله مورد بررسی همخوانی داشته باشد. که پس از بررسی صورت گرفته بر روی زنجیره‌های استان متوجه شدیم بعضی از زنجیره‌ها بصورت نیمه فعال بودند، یک یا دو حلقه فعال داشتند که هدف ما زنجیره‌هایی بودند که هر سه حلقه آنها فعال باشد و ترجیحا همه حلقه‌ها در استان تهران باشد بر همین اساس تعداد ۹ زنجیره انتخاب شد. در فرآیند انتخاب نمونه، تنها زنجیره‌هایی در نظر گرفته شدند که هر سه حلقه (تولید، پرورش و توزیع) آنها فعال بوده است. این معیار باعث شد داده‌های به‌دست‌آمده از نظر پایداری و مقایسه‌پذیری، کیفیت لازم را برای تحلیل DEA و ANN داشته باشند.

پیش از بکارگیری ابزار داده‌کاوی جهت تجزیه و تحلیل داده‌های تحقیق و به‌منظور تبیین اولویت‌های عوامل کلیدی تاثیرگذار بر پذیرش و پیاده‌سازی در نمونه آماری، از آزمون‌های آماری مرتبط بهره گرفته شده است. بدین منظور، نخست جهت اولویت‌بندی این عوامل کلیدی از آزمون آماری فریدمن بهره گرفته شده است. این آزمون، یک آزمون ناپارامتریک است که معادل آنالیز واریانس با اندازه‌های تکراری (درون گروهی) می‌باشد و از آن برای مقایسه میانگین رتبه‌ها در بین K متغیر (گروه) استفاده می‌گردد. نتایج بدست آمده از آزمون فریدمن در این پژوهش به شرح جدول ۲ می‌باشد.

نتایج بدست آمده از آزمون فریدمن مبین آنست که مولفه‌های ورودی ارزش و رتبه بالاتری نسبت به مولفه‌های خروجی دارند و از این رو از روش تحلیل پوششی داده‌های ورودی محور بهره‌گیری خواهد شد.

یکی دیگر از زمینه‌های کلیدی جهت تجزیه و تحلیل داده‌های تحقیق، تعیین همبستگی متقابل مولفه‌ها نسبت به یکدیگر می‌باشد. این امر نمایانگر میزان تاثیرگذاری هر یک از مولفه‌ها بر سایر زمینه‌ها می‌باشد و به‌نوعی تعاملات میان شاخص‌ها را تشریح می‌نماید. بدین منظور از آزمون آماری اسپیرمن بهره گرفته شده است. نتایج بدست آمده از آزمون آماری اسپیرمن بر روی داده‌های تحقیق نمایانگر آنست که قوی‌ترین همبستگی معنادار مابین مولفه‌های ورودی در مدل تحلیل پوششی داده‌ها می‌باشد.

جدول ۱. شاخص‌های ورودی و خروجی

ردیف	شاخص‌های ورودی	شاخص‌های خروجی
۱	وزن جوجه	میزان تولید
۲	ظرفیت واحد	میزان کود
۳	شمار نیروی کار	معکوس تلفات
۴	میزان خوراک	سود حاصل از فروش
۵	هزینه ی دارو	کاهش الایندگی خاک
۶	هزینه‌ی برق	کاهش آلایندگی هوا
۷	هزینه‌ی آب	کاهش آلایندگی آب‌های سطحی
۸	مساحت	کاهش آلایندگی آب‌های زیر سطحی

جدول ۲. رتبه‌بندی زمینه‌های کلیدی از طریق آزمون فریدمن

ردیف	شاخص مورد نظر	Mean Rank
۱	وزن جوجه	۱۶,۷۱
۲	ظرفیت واحد	۱۶,۱۱
۳	نیروی انسانی	۱۵,۸۷
۴	میزان خوراک	۱۵,۸۵
۵	هزینه دارو	۱۵,۶۷
۶	هزینه برق	۱۵,۶۴
۷	هزینه آب	۱۴,۵۶
۸	مساحت	۱۴,۴۹
۹	میزان تولید	۱۴,۲۷
۱۰	میزان کود	۱۴,۱۲
۱۱	معکوس تلفات	۱۴,۰۷
۱۲	سود حاصل از فروش	۱۳,۹۵
۱۳	کاهش آلایندگی خاک	۱۳,۴۳
۱۴	کاهش آلایندگی هوا	۱۳,۳۴
۱۵	کاهش الایندگی آبهای سطحی	۱۳,۲۳
۱۶	کاهش الایندگی آبهای زیر سطحی	۱۲,۹۰

در این پژوهش به‌منظور تلفیق نظرات خبرگان از روش دلفی فازی استفاده گردید. برای تبدیل نظرات زبانی به مقادیر عددی از اعداد فازی مثلثی استفاده شد و فرایند تجمیع دیدگاه‌ها بر اساس میانگین هندسی مقادیر فازی صورت گرفت.

پس از محاسبه مقادیر فازی برای هر شاخص، آستانه توافق (τ) تعیین شد تا مشخص شود کدام شاخص‌ها به‌عنوان شاخص نهایی پذیرفته شوند. مقدار $\tau = 0.7$ به‌صورت تجربی و بر اساس مرور مقالات مشابه (مانند Chen, 2000; Büyüközkan & Çifçi, 2012) انتخاب گردید. این مقدار در اغلب مطالعات دلفی فازی به‌عنوان سطح توافق مناسب بین خبرگان پیشنهاد می‌شود. شاخص‌هایی که مقدار میانگین فازی آنها از τ بیشتر بود، به‌عنوان شاخص‌های تأییدشده نهایی در مدل لحاظ شدند.

۵-۱- مراحل شبکه‌های عصبی مصنوعی

همانطور که اشاره شد در این تحقیق ما قصد داریم با استفاده از تکنیک ANN، ورودی‌ها وخروجی‌های زنجیره تامین را پیش‌بینی می‌کنیم. به منظور طراحی شبکه‌ی عصبی مصنوعی، مراحل زیر انجام می‌شود:

مرحله‌ی اول: جمع‌آوری داده

با توجه به این که شبکه‌ی عصبی مصنوعی مبتنی بر داده می‌باشد، آماده‌سازی داده‌ها یک قدم مهم و در واقع کلید موفقیت در استفاده از شبکه‌ی عصبی است.

اصولاً استفاده از داده‌ها به صورت خام، باعث کاهش سرعت و دقت شبکه‌ی عصبی می‌شود. به منظور جلوگیری از چنین حالتی و همچنین به منظور یکسان کردن ارزش داده‌ها برای شبکه، عمل نرمال‌سازی صورت می‌گیرد. نرمال‌سازی مانع از کوچک شدن بیش از حد وزن‌ها و سبب جلوگیری از اشباع زودهنگام نرون‌ها می‌شود. نرمال‌سازی به روش مین‌مکس که به نام Rescaling (min-max normalization) یکی از روش‌ها برای تغییر بازه عددی مقادیر یک مجموعه به [۱, ۰] یا [۱, ۱-] است. با توجه به مقادیر به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که پس از نرمال‌سازی، بیشینهٔ مجموعه همیشه ۱ و کمینهٔ مجموعه نیز همیشه صفر می‌شود.تابع زیر نشان دهنده تابع نرمال‌سازی مورد استفاده می‌باشد.

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

ورودی‌های شبکه عصبی در سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۶ در صورت جدول ۳ آمده است.

مرحله‌ی دوم: انتخاب سه دسته داده‌ی آموزش، اعتبارسنجی وآزمون برای انواع مدل‌های مورد استفاده

جدول ۳. پارامترهای ساختاری برای طراحی شبکه

Concept	Result
Network type	Feedforward Backpropagation
Epochs (max)	۲۰۰
Training algorithm	Levenberg–Marquardt (trainlm
Performance function	MSE
Transfer function (for hidden layers)	TANSIG
Training function	TRAINLM

به منظور آموزش صحیح شبکه و جلوگیری از مشکلاتی از قبیل اشباع شدن شبکه و وجود وزن‌های بی‌معنی، باید حجم مناسبی از داده‌ها را به مراحل اصلی شبکه اختصاص داد. یک تقسیم‌بندی معمول عبارت است از اختصاص دادن ۲۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی، ۱۰ درصد برای تست و ۷۰ درصد برای آموزش شبکه. البته در مواردی می‌توان به صورت تجربی و با تغییر دادن این نسبت‌ها، نتایج بهتری به دست آورد.

مرحله‌ی سوم: مدل‌سازی و محاسبه اطلاعات با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی

برای ساخت مدل شبکه‌ی عصبی، ابتدا شبکه با استفاده از داده‌های آموزش، آموزش می‌بینند؛ سپس به پیش‌بینی داده‌های آزمون می‌پردازد

مرحله‌ی چهارم: ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی عملکرد شبکه‌ی عصبی مصنوعی از پارامترهای میانگین مربعات خطا (MSE)[1]، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)[2] که از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند، استفاده شد.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Z_0 - Z_p)^2}{n}$$

$$MAE = \frac{\left|\sum_{i=1}^{n}(Z_0 - Z_p)\right|}{n}$$

که در آنها، Z_0 مقادیر پیش‌بینی شده، Z_p مقادیر مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد .با وجود ابعاد بسیار مطلوب شبکه‌های عصبی، ایجاد یک شبکه‌ی خوب برای یک کاربرد خاص بسیار مهم است. ایجاد یک شبکه‌ی مطلوب، انتخاب یک معماری مناسب، تعداد لایه‌ها، تعداد نرون‌ها در هر لایه و ارتباط‌های بین واحدها، انتخاب توابع تبدیل، طراحی الگوریتم آموزش، انتخاب وزن‌های اولیه و به شکل خاص، قانون توقف را در بر می‌گیرد. برای تعیین ساختار مناسب شبکه عصبی، چندین ترکیب از پارامترهای ساختاری شامل تعداد نورون‌های لایه پنهان، تابع فعال‌سازی و الگوریتم آموزش مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، افزایش تعداد نورون‌ها تا حدود ۲۰ موجب بهبود دقت مدل گردید و پس از آن تغییر محسوسی در خطا مشاهده نشد؛ بنابراین، ساختار شبکه با ۷ نورون پنهان به‌عنوان حالت بهینه انتخاب شد .تابع فعال‌سازی LOGSIG به‌دلیل توانایی بالاتر در مدل‌سازی روابط غیرخطی میان

[1] Mean Square Error (MSE)

[2] Mean Absolute Error (MAE)

شاخص‌ها نسبت به توابع دیگر انتخاب شد. الگوریتم آموزش Levenberg–Marquardt (trainlm) به‌سبب نرخ همگرایی بالا و پایداری عددی مناسب در داده‌های کوچک تا متوسط مورد استفاده قرار گرفت. همچنین معیار توقف آموزش بر اساس عدم بهبود خطای مجموعه اعتبارسنجی طی شش تکرار متوالی (early stopping) تعیین شد تا از بروز بیش‌برازش جلوگیری گردد.

۵-۲- نتایج اجرای شبکه عصبی

جدول ۴ پارامترهای ساختاری مدل طراحی شبکه را با استفاده از نرم افزار MATLAB R2024 نشان می‌دهد. ساختار شبکه عصبی در شکل ۵ نشان داده شده است و در شکل ۶ نمودار عملکرد شبکه عصبی نشان داده شده است در این پژوهش تأثیر تعداد نورون‌ها در لایه پنهان، توابع آموزشی و همچنین توزیع مجموعه داده‌ها در حین آموزش و تابع انتقال بر دقت خروجی شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. شبکه با تعداد مختلف نورون‌ها در لایه‌های پنهان توسعه یافتند: ۳، ۷، ۱۰، ۲۰ و ۳۱. عملکرد شبکه‌ها (به دست آمده از نمودار عملکرد) مقایسه شد. در نتیجه، شبکه‌ای با ۱۰ نورون بهترین عملکرد را به دست آورد. شکل ۶ نمودار عملکرد شبکه با ۱۰ نورون در لایه پنهان را نشان می‌دهد که بیانگر همگرایی شبکه است. شکل ۷ نمودار ارزیابی شبکه عصبی پرسپترون را نشان داده است.

جدول ۴. داده‌های ورودی شبکه عصبی

داده‌های سال ۱۳۹۶																
DMU	ورودی								خروجی							
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
1	36	555	2	9	32	1704	122	6933	5	1110	123	5461	5328	416	999	999
2	42	717	2	12	42	2201	158	5600	6	1434	159	7055	6883	538	1291	1291
3	33	900	3	15	52	2763	198	5800	8	1800	200	8856	8640	675	1620	1620
4	33	547	3	9	32	1679	120	5900	5	1094	122	5382	5251	410	985	985
5	34	703	4	12	41	2158	155	6000	6	1406	156	6918	6749	527	1265	1265
6	41	698	4	11	40	2143	154	6150	6	1396	155	6868	6701	524	1256	1256
7	37	553	5	9	32	1698	122	6300	5	1106	123	5442	5309	415	995	995
8	38	719	5	12	42	2207	158	6400	6	1438	160	7075	6902	539	1294	1294
9	35	778	6	13	45	2388	171	6600	7	1556	173	7656	7469	584	1400	1400
داده‌های سال ۱۳۹۷																
DMU	ورودی								خروجی							
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
1	37	762	2	13	44	2339	168	5400	7	1524	169	7498	7315	572	1372	1372
2	39	564	2	9	33	1731	124	5600	5	1128	125	5550	5414	423	1015	1015
3	39	742	3	12	43	2278	163	5800	6	1484	165	7301	7123	557	1336	1336
4	42	714	3	12	41	2192	157	5900	6	1428	159	7026	6854	536	1285	1285
5	39	738	4	12	43	2266	162	6000	6	1476	164	7262	7085	554	1328	1328
6	32	632	4	10	37	1940	139	6150	5	1264	140	6219	6067	474	1138	1138
7	37	600	5	10	35	1842	132	6300	5	1200	133	5904	5760	450	1080	1080
8	40	602	5	10	35	1848	132	6400	5	1204	134	5924	5779	452	1084	1084
9	33	823	6	14	48	2527	181	6600	7	1646	183	8098	7901	617	1481	1481
داده‌های سال ۱۳۹۸																
DMU	ورودی								خروجی							
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
1	40	702	2	12	41	2155	154	5400	6	1404	156	6908	6739	527	1264	1264
2	33	539	2	9	31	1655	119	5600	5	1078	120	5304	5174	404	970	970
3	40	779	3	13	45	2392	171	5800	7	1558	173	7665	7478	584	1402	1402
4	42	713	3	12	41	2189	157	5900	6	1426	158	7016	6845	535	1283	1283
5	33	820	4	13	48	2517	180	6000	7	1640	182	8069	7872	615	1476	1476
6	33	896	4	15	52	2751	197	6150	8	1792	199	8817	8602	672	1613	1613
7	33	747	5	12	43	2293	164	6300	6	1494	166	7350	7171	560	1345	1345
8	34	803	5	13	47	2465	177	6400	7	1606	178	7902	7709	602	1445	1445
9	32	550	6	9	32	1689	121	6600	5	1100	122	5412	5280	413	990	990

داده‌های سال ۱۳۹۹																
DMU	ورودی								خروجی							
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
1	32	788	2	13	46	2419	173	5400	7	1576	175	7754	7565	591	1418	1418
2	40	875	2	14	51	2686	193	5600	8	1750	194	8610	8400	656	1575	1575
3	36	534	3	9	31	1639	117	5800	5	1068	119	5255	5126	401	961	961
4	37	781	3	13	45	2398	172	5900	7	1562	174	7685	7498	586	1406	1406
5	33	792	4	13	46	2431	174	6000	7	1584	176	7793	7603	594	1426	1426
6	37	752	4	12	44	2309	165	6150	7	1504	167	7400	7219	564	1354	1354
7	40	679	5	11	39	2085	149	6300	6	1358	151	6681	6518	509	1222	1222
8	38	888	5	15	52	2726	195	6400	8	1776	197	8738	8525	666	1598	1598
9	32	731	6	12	42	2244	161	6600	6	1462	162	7193	7018	548	1316	1316
داده‌های سال ۱۴۰۰																
DMU	ورودی								خروجی							
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
1	36	548	2	9	32	1682	121	5400	5	1096	122	5392	5261	411	986	986
2	33	748	2	12	43	2296	165	5600	6	1496	166	7360	7181	561	1346	1346
3	41	873	3	14	51	2680	192	5800	8	1746	194	8590	8381	655	1571	1571
4	35	875	3	14	51	2686	193	5900	8	1750	194	8610	8400	656	1575	1575
5	36	718	4	12	42	2204	158	6000	6	1436	160	7065	6893	539	1292	1292
6	42	762	4	13	44	2339	168	6150	7	1524	169	7498	7315	572	1372	1372
7	41	641	5	11	37	1968	141	6300	6	1282	142	6307	6154	481	1154	1154
8	34	719	5	12	42	2207	158	6400	6	1438	160	7075	6902	539	1294	1294
9	37	888	6	15	52	2726	195	6600	8	1776	197	8738	8525	666	1598	1598

انتخاب پارامترهای شبکه عصبی (شامل تعداد نورون‌های لایه پنهان، تابع آموزش و معیار توقف) به‌صورت تجربی و بر اساس آزمون چندین پیکربندی انجام شد. در این پژوهش چند ساختار مختلف با تعداد نورون‌های ۳، ۷، ۱۰، ۲۰ و ۳۱ بررسی گردید و عملکرد شبکه‌ها بر اساس معیار خطای میانگین مربعات (MSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) مقایسه شد. نتایج نشان داد که شبکه با ۱۰ نورون در لایه پنهان و الگوریتم آموزش Levenberg–Marquardt (trainlm)بهترین عملکرد را از نظر دقت و همگرایی دارد. معیار توقف آموزش بر اساس مقدار حداقل خطای MSE در داده‌های اعتبارسنجی تعیین شد، به‌طوری‌که شبکه در مرحله‌ای متوقف می‌شد که از بیش‌برازش (Overfitting) جلوگیری شود. این رویکرد در مطالعات مشابه مانند [18] نیز توصیه شده است. پس از طراحی شبکه عصبی و تایید خروجی‌های آن به منظور پیش‌بینی داده‌ها برای سال‌های آتی به گونه‌ای برنامه‌نویسی شد که داده‌های پیش‌بینی شده برای هر سال به عنوان داده به ورودی‌های شبکه اضافه گرددو فرآیند پیش‌بینی دوباره انجام شود که در جدول ۵ داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی برای ۵ سال را مشاهده می‌کنید.

جدول ۵. روند کارایی زنجیره‌ها

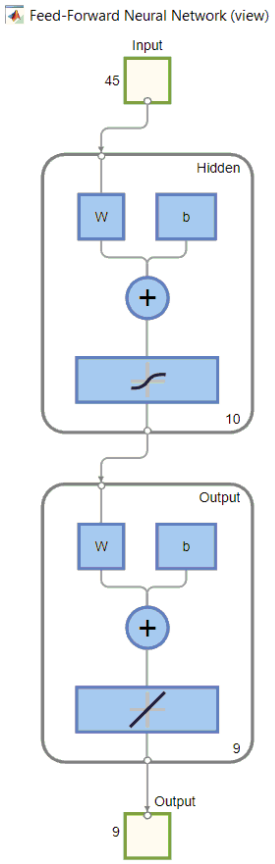
	کارایی واحدها بر اساس داده‌های واقعی					کارایی واحدها بر اساس داده‌های پیش‌بینی شده				
	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۳	۱۴۰۴	۱۴۰۵
۱	۰,۸۳۵	۰,۹۵۱	۰,۹۵۵	۰,۲۷۸	۱,۰۰۰	۰,۸۳۵	۰,۹۵۱	۰,۹۵۵	۰,۲۷۸	۱,۰۰۰
۲	۰,۵۴۷	۰,۹۴۶	۱,۰۰۰	۰,۳۴۵	۰,۹۸۵	۰,۵۴۷	۰,۹۴۶	۱,۰۰۰	۰,۳۴۵	۰,۹۸۵
۳	۱,۰۰۰	۰,۷۱۲	۱,۰۰۰	۰,۲۷۴	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۰,۷۱۲	۱,۰۰۰	۰,۲۷۴	۱,۰۰۰
۴	۰,۵۱۲	۰,۸۷۸	۰,۹۸۵	۱,۰۰۰	۰,۹۵۰	۰,۸۵۷	۰,۸۷۸	۰,۹۹۴	۰,۹۱۲	۱,۰۰۰
۵	۱,۰۰۰	۰,۵۷۴	۰,۹۵۸	۰,۹۳۰	۱,۰۰۰	۰,۸۵۶	۰,۵۷۴	۱,۰۰۰	۰,۹۳۰	۱,۰۰۰
۶	۱,۰۰۰	۰,۸۳۵	۰,۹۲۳	۰,۱۴۷	۱,۰۰۰	۰,۷۵۸	۰,۸۳۵	۱,۰۰۰	۰,۱۴۷	۱,۰۰۰
۷	۱,۰۰۰	۰,۹۶۶	۰,۷۹۹	۰,۹۹۸	۱,۰۰۰	۰,۹۶۸	۰,۹۶۶	۰,۷۹۹	۰,۹۹۸	۱,۰۰۰
۸	۱,۰۰۰	۰,۴۶۸	۱,۰۰۰	۰,۹۴۰	۰,۹۴۰	۰,۸۷۵	۰,۴۶۸	۱,۰۰۰	۰,۹۴۰	۰,۹۴۰
۹	۱,۰۰۰	۰,۸۲۳	۱,۰۰۰	۰,۹۶۵	۰,۹۱۵	۰,۹۶۵	۰,۹۴۶	۰,۹۴۵	۱,۰۰۰	۰,۹۱۴

تحلیل حساسیت مدل شبکه عصبی مصنوعی(ANN)

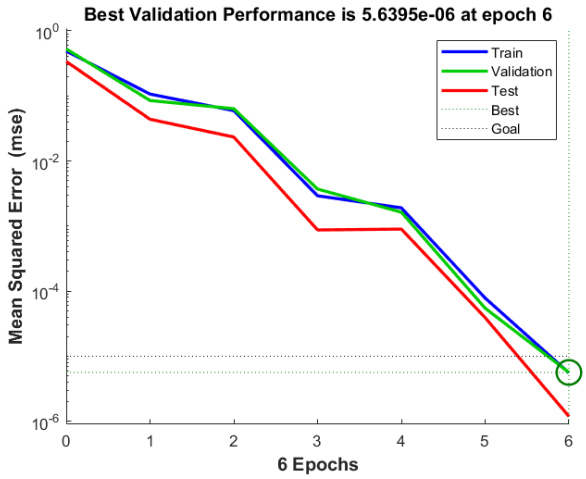
به‌منظور بررسی پایداری و حساسیت مدل شبکه عصبی نسبت به تغییر پارامترهای ساختاری، تحلیل حساسیت بر روی دو عامل کلیدی، یعنی تعداد نورون‌های لایه پنهان و نوع تابع فعال‌سازی انجام شد. در این مرحله، الگوریتم آموزشLevenberg–Marquardt (trainlm)ثابت نگه داشته شد و شبکه با ساختارهای مختلف (۳، ۷، ۱۰، ۲۰ و ۳۱ نورون) و دو تابع فعال‌سازی تان‌سیگ (tansig) و لاگ‌سیگ (logsig) ارزیابی گردید.

نتایج جدول ۵ نشان داد که با افزایش تعداد نورون‌ها تا حدود ۱۰ دقت مدل افزایش می‌یابد، اما پس از آن پدیده بیش‌برازش مشاهده می‌شود. مقایسه توابع فعال‌سازی نشان داد که تابع tansig در ترکیب با ۱۰ نورون در لایه پنهان بهترین عملکرد را از نظر معیارهای MSE، MAE و R^2 دارد.

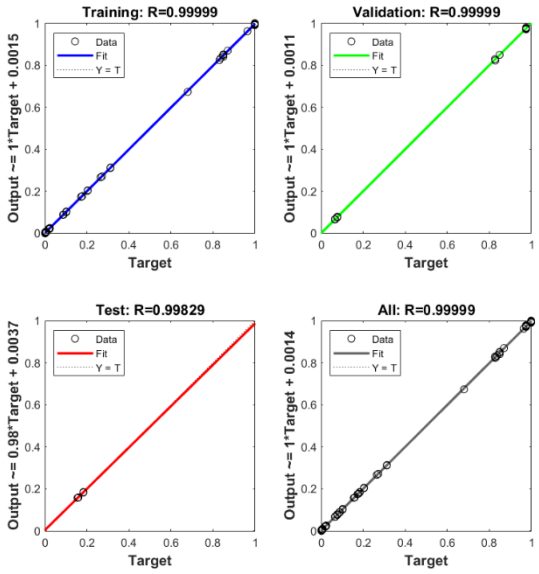
بر این اساس، ساختار نهایی شبکه شامل یک لایه پنهان با ۱۰ نورون، تابع tansig و الگوریتم آموزش trainlm انتخاب شد. مقدار پایین MSE (3.24×10^{-6}) و مقدار بالای ضریب تعیین ($R^2=0.99995$) بیانگر دقت و پایداری بالای مدل در پیش‌بینی داده‌های آینده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل طراحی‌شده از پایداری مناسبی در برابر تغییرات پارامترهای ساختاری برخوردار بوده و قابلیت اطمینان آن برای استفاده در ترکیب با مدل DEA چندمرحله‌ای تأیید می‌شود.



شکل ۵. معماری شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۶. نمودار عملکرد شبکه عصبی



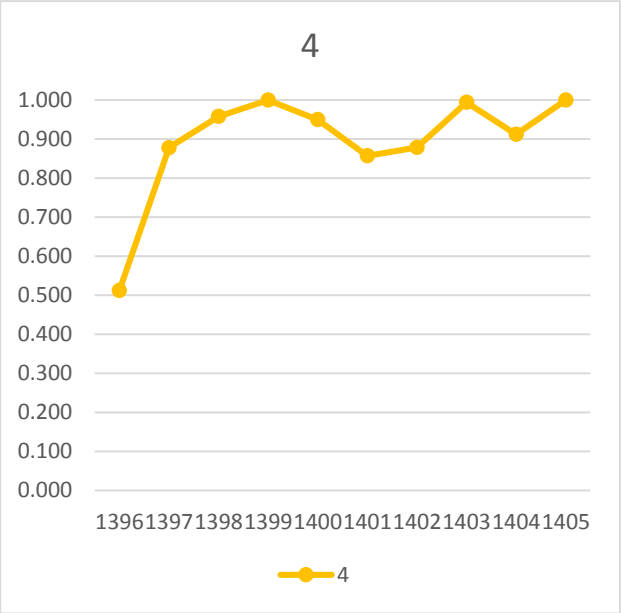
شکل ۷. نمودار ارزیابی شبکه عصبی

۵-۳- نتایج تحلیل پوششی داده‌ها

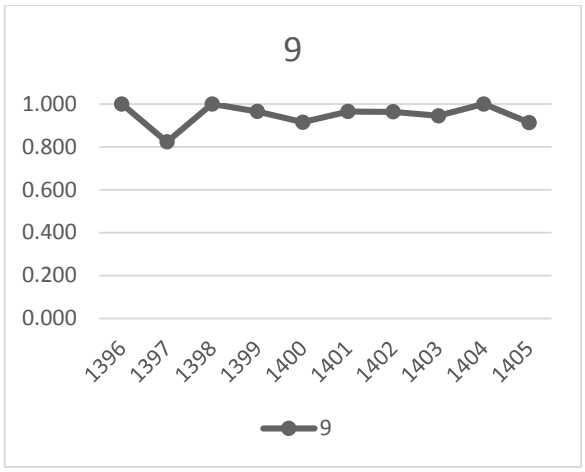
همانطور که اشاره شد رویکردهای مختلفی برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی فازی توسط محققان ارائه شده است. یکی از پر کاربردترین روشها، که بر اساس حاتمی ماربینی، امروزنژاد و توانا [11] که در تحلیل پوششی داده‌های فازی نیز کاربردهای فراوانی دارد، رویکرد مبتنی بر برش‌های آلفا است. در این رویکرد اعداد فازی با برش‌های آلفای خود جایگزین شده و مساله به ازای مقادیر مختلف آلفا حل و تحلیل می‌گردد. بنابر تعریف، برش آلفای یک مجموعه فازی شامل کلیه عناصری از مجموعه مرجع است که عضویت آنها در مجموعه مرجع حداقل به اندازه مقدار α باشد. جدول ۶ نتایج ارزیابی تامین‌کنندگان سبز را در طول ۱۰ سال نشان می‌دهد

که برای ۵ سال اول کارایی براساس داده‌های واقعی و ۵ سال دوم کارایی بر اساس داده‌های خروجی مدل شبکه عصبی که پیش‌بینی شده است محاسبه شده است.

همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، کارایی نسبی زنجیره تامین ۴ روند افزایش داشته که در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد و زنجیره تامین ۹ نیز از ابتدا در یک روند در حال فعالیت می‌باشد که درشکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد.که با مطالعه داده‌های ورودی جدول شماره ۳ مشاهده می‌گردد زنجیره تامین ۴ با کم کردن سطح آلایندگی‌های خاک و آب و کاهش هزینه‌های برق و آب در طی دوره همراه بوده که ادامه این روند تا حدودی در داده‌های پیش‌بینی شده نیز مشاهده می‌گردد. همچنین همانطور که مشاهده می‌گردد در سال ۱۳۹۷ هیچ کدام از تامین‌کنندگان در مرز کارایی نبودند که با مطالعه داده‌ها و بررسی انجام شده مشخص گردید در آن سال در استان تهران آنفولانزای مرغی شیوع و به تبع آن هزینه‌های دارو افزایش داشته و سود حاصل از فروش تقریبا برای کلیه زنجیره‌ها کاهش داشته است.



شکل ۸. شیب روند کارایی زنجیره ۴



شکل ۹. شیب روند کارایی زنجیره ۹

۶- بحث و نتیجه‌گیری پژوهش

یکی از مزیت‌های رقابتی پایدار برای سازمان‌های تولیدی، کاراتر و اثربخش‌تر کردن فعالیت‌های زنجیره تامین است. یکی از قسمت‌های عمده این فعالیت‌ها که می‌تواند موجب صرفه جویی بسیار در هزینه‌ها شود شناسایی و پیش‌بینی کارایی دقیق تامین و تدارکات سازمان است. مدیریت فعالیت‌های لجستیکی، علاوه بر اینکه یک منبع مهم برای خلق مزیت‌های رقابتی محسوب می‌شود، می‌تواند موجبات رضایت مشتریان و پاسخگویی به نیازهای آنان را فراهم آورد. یکپارچه‌سازی طراحی شبکه لجستیک نیز به همین دلیل از اهمیت بالایی برخوردار است . پیش‌بینی کارایی در زنجیره تامین سبز صنعت پرورش طیور به‌عنوان یکی از حوزه‌های پژوهشی جدید مدیریت به‌منظور کمک به شرکت‌ها در به رسمیت شناختن منابع بالقوه و غلبه بر چالش‌های مرتبط با عملیات و استراتژی‌ها، تکامل یافته است. طی سالیان اخیر، مدیریت و به تبع آن سنجش عملکرد زنجیره تأمین، توجه جمع کثیری از مدیران و محققین را در حوزه مدیریت تولید و عملیات به خود معطوف داشته است. به موازات طی روند تکاملی سازمان‌ها از رویکرد منفرد به رویکرد شبکه‌ای و زنجیره تأمین، نظام‌های سنجش کارایی زنجیره تامین نیز دستخوش تحول گردیده و به سمت و سوی سنجش عملکرد شبکه‌ای و زنجیره تامین گام نهادند . این نگرش ریشه در تفکر سیستمی داشته که در آن بهینگی هر نظام تولیدی تنها در گرو کارکرد بهینه یک زیرنظام نبوده و تمامی زیرنظام‌ها می‌بایست در تحقق اهداف از پیش ترسیم شده مجدانه بکوشند.

جدول ۶. داده‌های خروجی شبکه عصبی

DMU	داده‌های ورودی								داده‌های خروجی								
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	O1	O2	O3	O4	O4	O5	O6	O7	O8
1	۳۷	۵۸۸	2	۱۰	۳۴	۱۷۳۶	۱۳۹	6933	۶	۱۱۳۲	۱۲۶	۵۳۹۷	5461	۵۳۰۳	۴۰۷	۹۹۱	۹۸۷
2	۴۱	۷۵۰	2	۱۳	۴۴	۲۲۳۳	۱۷۵	5600	۷	۱۴۵۶	۱۶۲	۶۹۹۱	7055	۶۸۵۸	۵۲۹	۱۲۸۳	۱۲۷۹
3	۳۴	۹۳۳	3	۱۶	۵۴	۲۷۹۵	۲۱۵	5800	۹	۱۸۲۲	۲۰۳	۸۷۹۲	8856	۸۶۱۵	۶۶۶	۱۶۱۲	۱۶۰۸
4	۳۴	۵۸۰	3	۱۰	۳۴	۱۷۱۱	۱۳۷	5900	۶	۱۱۱۶	۱۲۵	۵۳۱۸	5382	۵۲۲۶	۴۰۱	۹۷۷	۹۷۳
5	۳۵	۷۳۶	4	۱۳	۴۳	۲۱۹۰	۱۷۲	6000	۷	۱۴۲۸	۱۵۹	۶۸۵۴	6918	۶۷۲۴	۵۱۸	۱۲۵۷	۱۲۵۳
6	۴۰	۷۳۱	4	۱۲	۴۲	۲۱۷۵	۱۷۱	6150	۷	۱۴۱۸	۱۵۸	۶۸۰۴	6868	۶۶۷۶	۵۱۵	۱۲۴۸	۱۲۴۴
7	۳۸	۵۸۶	5	۱۰	۳۴	۱۷۳۰	۱۳۹	6300	۶	۱۱۲۸	۱۲۶	۵۳۷۸	5442	۵۲۸۴	۴۰۶	۹۸۷	۹۸۳
8	۳۹	۷۵۲	5	۱۳	۴۴	۲۲۳۹	۱۷۵	6400	۷	۱۴۶۰	۱۶۳	۷۰۱۱	7075	۶۸۷۷	۵۳۰	۱۲۸۶	۱۲۸۲
9	۳۶	۸۱۱	6	۱۴	۴۷	۲۴۲۰	۱۸۸	6600	۸	۱۵۷۸	۱۷۶	۷۵۹۲	7656	۷۴۴۴	۵۷۵	۱۳۹۲	۱۳۸۸
10	۳۸	۷۹۵	2	۱۴	۴۶	۲۳۷۱	۱۸۵	5400	۸	۱۵۴۶	۱۷۲	۷۴۳۴	7498	۷۲۹۰	۵۶۳	۱۳۶۴	۱۳۶۰
11	۴۰	۵۹۷	2	۱۰	۳۵	۱۷۶۳	۱۴۱	5600	۶	۱۱۵۰	۱۲۸	۵۴۸۶	5550	۵۳۸۹	۴۱۴	۱۰۰۷	۱۰۰۳
12	۴۰	۷۷۵	3	۱۳	۴۵	۲۳۱۰	۱۸۰	5800	۷	۱۵۰۶	۱۶۸	۷۲۳۷	7301	۷۰۹۸	۵۴۸	۱۳۲۸	۱۳۲۴
13	۴۳	۷۴۷	3	۱۳	۴۳	۲۲۲۴	۱۷۴	5900	۷	۱۴۵۰	۱۶۲	۶۹۶۲	7026	۶۸۲۹	۵۲۷	۱۲۷۷	۱۲۷۳
14	۴۰	۷۷۱	4	۱۳	۴۵	۲۲۹۸	۱۷۹	6000	۷	۱۴۹۸	۱۶۷	۷۱۹۸	7262	۷۰۶۰	۵۴۵	۱۳۲۰	۱۳۱۶
15	۳۳	۶۶۵	4	۱۱	۳۹	۱۹۷۲	۱۵۶	6150	۶	۱۲۸۶	۱۴۳	۶۱۵۵	6219	۶۰۴۲	۴۶۵	۱۱۳۰	۱۱۲۶
16	۳۸	۶۳۳	5	۱۱	۳۷	۱۸۷۴	۱۴۹	6300	۶	۱۲۲۲	۱۳۶	۵۸۴۰	5904	۵۷۳۵	۴۴۱	۱۰۷۲	۱۰۶۸
17	۴۱	۶۳۵	5	۱۱	۳۷	۱۸۸۰	۱۴۹	6400	۶	۱۲۲۶	۱۳۷	۵۸۶۰	5924	۵۷۵۴	۴۴۳	۱۰۷۶	۱۰۷۲
18	۳۴	۸۵۶	6	۱۵	۵۰	۲۵۵۹	۱۹۸	6600	۸	۱۶۶۸	۱۸۶	۸۰۳۴	8098	۷۸۷۶	۶۰۸	۱۴۷۳	۱۴۶۹
19	۴۱	۷۳۵	2	۱۳	۴۳	۲۱۸۷	۱۷۱	5400	۷	۱۴۲۶	۱۵۹	۶۸۴۴	6908	۶۷۱۴	۵۱۸	۱۲۵۶	۱۲۵۲
20	۳۴	۵۷۲	2	۱۰	۳۳	۱۶۸۷	۱۳۶	5600	۶	۱۱۰۰	۱۲۳	۵۲۴۰	5304	۵۱۴۹	۳۹۵	۹۶۲	۹۵۸
21	۴۱	۸۱۲	3	۱۴	۴۷	۲۴۲۴	۱۸۸	5800	۸	۱۵۸۰	۱۷۶	۷۶۰۱	7665	۷۴۵۳	۵۷۵	۱۳۹۴	۱۳۹۰
22	۴۳	۷۴۶	3	۱۳	۴۳	۲۲۲۱	۱۷۴	5900	۷	۱۴۴۸	۱۶۱	۶۹۵۲	7016	۶۸۲۰	۵۲۶	۱۲۷۵	۱۲۷۱
23	۳۴	۸۵۳	4	۱۴	۵۰	۲۵۴۹	۱۹۷	6000	۸	۱۶۶۲	۱۸۵	۸۰۰۵	8069	۷۸۴۷	۶۰۶	۱۴۶۸	۱۴۶۴
24	۳۴	۹۲۹	4	۱۶	۵۴	۲۷۸۳	۲۱۴	6150	۹	۱۸۱۴	۲۰۲	۸۷۵۳	8817	۸۵۷۷	۶۶۳	۱۶۰۵	۱۶۰۱
25	۳۴	۷۸۰	5	۱۳	۴۵	۲۳۲۵	۱۸۱	6300	۷	۱۵۱۶	۱۶۹	۷۲۸۶	7350	۷۱۴۶	۵۵۱	۱۳۳۷	۱۳۳۳
26	۳۵	۸۳۶	5	۱۴	۴۹	۲۴۹۷	۱۹۴	6400	۸	۱۶۲۸	۱۸۱	۷۸۳۸	7902	۷۶۸۴	۵۹۳	۱۴۳۷	۱۴۳۳
27	۳۳	۵۸۳	6	۱۰	۳۴	۱۷۲۱	۱۳۸	6600	۶	۱۱۲۲	۱۲۵	۵۳۴۸	5412	۵۲۵۵	۴۰۴	۹۸۲	۹۷۸
28	۳۳	۸۲۱	2	۱۴	۴۸	۲۴۵۱	۱۹۰	5400	۸	۱۵۹۸	۱۷۸	۷۶۹۰	7754	۷۵۴۰	۵۸۲	۱۴۱۰	۱۴۰۶
29	۴۱	۹۰۸	2	۱۵	۵۳	۲۷۱۸	۲۱۰	5600	۹	۱۷۷۲	۱۹۷	۸۵۴۶	8610	۸۳۷۵	۶۴۷	۱۵۶۷	۱۵۶۳
30	۳۷	۵۶۷	3	۱۰	۳۳	۱۶۷۱	۱۳۴	5800	۶	۱۰۹۰	۱۲۲	۵۱۹۱	5255	۵۱۰۱	۳۹۲	۹۵۳	۹۴۹
31	۳۸	۸۱۴	3	۱۴	۴۷	۲۴۳۰	۱۸۹	5900	۸	۱۵۸۴	۱۷۷	۷۶۲۱	7685	۷۴۷۳	۵۷۷	۱۳۹۸	۱۳۹۴
32	۳۴	۸۲۵	4	۱۴	۴۸	۲۴۶۳	۱۹۱	6000	۸	۱۶۰۶	۱۷۹	۷۷۲۹	7793	۷۵۷۸	۵۸۵	۱۴۱۸	۱۴۱۴
33	۳۸	۷۸۵	4	۱۳	۴۶	۲۳۴۱	۱۸۲	6150	۸	۱۵۲۶	۱۷۰	۷۳۳۶	7400	۷۱۹۴	۵۵۵	۱۳۴۶	۱۳۴۲
34	۴۱	۷۱۲	5	۱۲	۴۱	۲۱۱۷	۱۶۶	6300	۷	۱۳۸۰	۱۵۴	۶۶۱۷	6681	۶۴۹۳	۵۰۰	۱۲۱۴	۱۲۱۰
35	۳۹	۹۲۱	5	۱۶	۵۴	۲۷۵۸	۲۱۲	6400	۹	۱۷۹۸	۲۰۰	۸۶۷۴	8738	۸۵۰۰	۶۵۷	۱۵۹۰	۱۵۸۶
36	۳۳	۷۶۴	6	۱۳	۴۴	۲۲۷۶	۱۷۸	6600	۷	۱۴۸۴	۱۶۵	۷۱۲۹	7193	۶۹۹۳	۵۳۹	۱۳۰۸	۱۳۰۴
37	۳۷	۵۸۱	2	۱۰	۳۴	۱۷۱۴	۱۳۸	5400	۶	۱۱۱۸	۱۲۵	۵۳۲۸	5392	۵۲۳۶	۴۰۲	۹۷۸	۹۷۴
38	۳۴	۷۸۱	2	۱۳	۴۵	۲۳۲۸	۱۸۲	5600	۷	۱۵۱۸	۱۶۹	۷۲۹۶	7360	۷۱۵۶	۵۵۲	۱۳۳۸	۱۳۳۴
39	۴۲	۹۰۶	3	۱۵	۵۳	۲۷۱۲	۲۰۹	5800	۹	۱۷۶۸	۱۹۷	۸۵۲۶	8590	۸۳۵۶	۶۴۶	۱۵۶۳	۱۵۵۹
40	۳۶	۹۰۸	3	۱۵	۵۳	۲۷۱۸	۲۱۰	5900	۹	۱۷۷۲	۱۹۷	۸۵۴۶	8610	۸۳۷۵	۶۴۷	۱۵۶۷	۱۵۶۳
41	۳۷	۷۵۱	4	۱۳	۴۴	۲۲۳۶	۱۷۵	6000	۷	۱۴۵۸	۱۶۳	۷۰۰۱	7065	۶۸۶۸	۵۳۰	۱۲۸۴	۱۲۸۰
42	۴۳	۷۹۵	4	۱۴	۴۶	۲۳۷۱	۱۸۵	6150	۸	۱۵۴۶	۱۷۲	۷۴۳۴	7498	۷۲۹۰	۵۶۳	۱۳۶۴	۱۳۶۰
43	۴۲	۶۷۴	5	۱۲	۳۹	۲۰۰۰	۱۵۸	6300	۷	۱۳۰۴	۱۴۵	۶۲۴۳	6307	۶۱۲۹	۴۷۲	۱۱۴۶	۱۱۴۲
44	۳۵	۷۵۲	5	۱۳	۴۴	۲۲۳۹	۱۷۵	6400	۷	۱۴۶۰	۱۶۳	۷۰۱۱	7075	۶۸۷۷	۵۳۰	۱۲۸۶	۱۲۸۲
45	۳۷	۹۲۱	6	۱۶	۵۴	۲۷۵۸	۲۱۲	6600	۹	۱۷۹۸	۲۰۰	۸۶۷۴	8738	۸۵۰۰	۶۵۷	۱۵۹۰	۱۵۸۶

از این رو مدیریت زنجیره تامین، یکی از اجزاء استراتژی‌های رقابتی برای بهره‌وری و سوددهی سازمانی است. مدیران در بسیاری از صنایع، به ویژه آنهایی که در بخش تولید هستند، سعی در مدیریت بهتر زنجیره تامین و ارزیابی عملکرد آنها دارنددر زنجیره تأمین، ارزیابی کارایی زنجیره یکی از چالش‌های مهم به شمار می‌آید. چارچوبی متمایز برای ارزیابی تأمین‌کنندگان با در نظر گرفتن شاخص‌های موثر با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری از مهمترین ابزارها می‌باشد. از این روی مدیریت برونسپاری کل زنجیره تامین بسیار مشکل بوده و یک وظیفه چالش بر انگیز است. یک سازمان در صورتی از نظر اقتصادی کارا خواهد بود که از نظر فنی و تخصصی کارا باشد. مدیریت زنجیره تامین همه این فعالیت‌ها را طوری هماهنگ می‌کند که مشتریان بتوانند محصولاتی با کیفیت و خدمات قابل اطمینان در حداقل هزینه به دست آورند. از این رو در این پژوهش، پس از مطالعه کتابخانه‌ای و شناسایی شاخص‌های کلیدی در پیش‌بینی کارایی در زنجیره تامین سبز صنعت پرورش طیور، با استفاده از روش دلفی فازی، غربالگری شاخص‌ها انجام شد و از بین ۸ شاخص ورودی و ۸ شاخص خروجی بر اساس نظرات ۷ خبره کلیه شاخص‌ها انتخاب شدند و پس از جمع آوری اطلاعات، اقدام به طراحی مدل پیش‌بینی با شبکه عصبی برای پیش‌بینی ورودی و خروجی‌های زنجیره نمودیم، و سپس کارایی زنجیره بر اساس داده‌های جمع آوری شده و داده‌های پیش‌بینی شده بر اساس مدل تحلیل پوششی دادهای چند مرحله‌ای طراحی شده با روش برش آلفا محاسبه گردید. با توجه به یافته‌های پژوهش نشان داده شد که شاخص‌های شناسایی شده و تایید شده در این پژوهش با پژوهش علی نژاد [4] ، امینی[5] و گوپتا[46] همسو بوده است.

نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که تغییر در ساختار شبکه (تعداد نورون‌ها و نوع تابع فعال‌سازی) تأثیر قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی دارد و انتخاب ساختار بهینه،۱۰ نورون، تابع tansig، الگوریتم trainlm منجر به بیشترین پایداری مدل شد. یکی از چالش‌های اساسی در پیش‌بینی کارایی آینده، وجود عدم قطعیت در داده‌های ورودی و خروجی است که می‌تواند ناشی از نوسانات بازار نهاده‌ها، تغییرات اقلیمی، یا شیوع بیماری‌های طیور باشد. در این پژوهش، بخشی از این عدم قطعیت از طریق **به‌کارگیری رویکرد فازی** در فرآیند شناسایی شاخص‌ها (روش دلفی فازی) و **استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی مبتنی بر برش‌های آلفا** در ارزیابی کارایی لحاظ شده است. بدین ترتیب، مدل پیشنهادی توانایی در نظر گرفتن تغییرپذیری و ابهام در قضاوت خبرگان و داده‌های ورودی را دارد.

۷- پیشنهادات

تحقیقات ما نشان می‌دهد تاکنون انتخاب تامین کنندگان کارا در حیطه تولید طیور گوشتی مطابق با نیاز سبز بودن و جهت برآورده کردن آن بر اساس قضاوت‌های شهودی کارشناسان انجام شده است و کارشناسان بر مبنای قضاوت خود اقدام به مقایسه شرکت‌ها می کردند، پیشنهاد می شود از این به بعد با استفاده از نتایج این پژوهش، ارزیابی کارایی تامین کنندگان در این شرکت و سایر شرکت‌های مشابه، با جمع آوری اطلاعات مورد نیاز مدل‌ها به صورت سیستماتیک و علمی مبتنی بر آزمون Q انجام شود. پیشنهاد می‌شود مدیران اجرایی با ارزیابی متغیرهای مورد بررسی این پژوهش در زنجیره‌های تامین الگو به مقایسه ارقام متغیرها و با ارقام موجود در واحدهای تحت هدایت خود بپردازند سپس بر اساس ساختار موجود و ظرفیت‌های اجرایی دستورالعمل‌های مورد نیاز جهت دستیابی به عملکردی مطلوب را صادر و پیاده‌سازی نمایند.

پس از حصول امتیازات نهایی کارایی در محاسبات پژوهش و تحقیقات میدانی در زنجیره‌های تامین الگو صورت گرفت و مشخص شد این زنجیره‌ها دارای واحدهای تحقیق و توسعه با فعالیت‌های مستمر می‌باشند به مدیران سایر زنجیره‌ها نیز پیشنهاد می‌شود نقش واحدهای R&D را در عملکرد مطلوب زنجیره انکار ناپذیر دانسته و برای ایجاد یا گسترش چنین واحدهایی در ساختار مدیریتی خود کوشا باشند. علاوه بر موارد فوق ویژگی مشترک دیگر در زنجیره‌های الگو خرید بی واسطه نهادها و مواد اولیه از تولیدکنندگان است به طوری که با حذف دلالان و واسطه‌ها هزینه‌ها و قیمت تمام شده محصول کاهش و در پی آن فروش محصول در سطح بازار افزایش یافته است به مدیران اجرایی سایر زنجیره‌های فعال در صنعت مرغداری پیشنهاد می‌شود که با استفاده از رویکرد حذف واسطه‌ها، ثبات اقتصادی زنجیره در سطح بازار وسیع کشور را بیش از پیش محقق سازند. نگاه ویژه به تامین تقاضای داخل کشور و و مدیریت نیاز بازار و در راستای آن مقابله با واردات محصول و به دنبال آن صادرات به کشورهای دیگر خصوصاً کشورهای همسایه باید در دستور کار مدیران در سطح تامین‌کنندگان قرار گیرد بدیهی است که این امر موجب پویایی اقتصادی صنعت مرغداری و افزایش عملکرد زنجیره‌های تامین فعال خواهد بود. با توجه به تحلیل انجام شده و کلیدی بودن مساله انتخاب تامین کنندکان سبز طیور گوشتی پیشنهاد می‌شود که بصورت دوره‌ای ارزیابی کارایی انجام و سیاست‌های مدیریت موجودی طیور و ناخالص سود پیاده‌سازی شود .طی مراحل مختلف این پژوهش به نکات جدیدی پی برده شد و همزمان با پیشرفت این تحقیق ابهامات بیشتری فراروی محقق

ایجاد می‌شد که با توجه به محدودیت‌های موجود بررسی آنها نیازمند پژوهش‌های بیشتری می‌باشد. بنابراین جهت پژوهش محققین آینده که قصد فعالیت در این حوزه را دارند موضوعاتی پیشنهاد می‌شود .برای افزایش دقت و کاهش عدم قطعیت در اولویت‌بندی معیارها و تامین‌کنندگان و تخصیص مقدار سطح بهینه کارایی به هر یک از تامین‌کنندگان، پیشنهاد می‌شود این مدل با مدل‌های شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک ترکیب شود و با نتایج این پژوهش مقایسه شود. شاخص‌های این پژوهش با توجه به قلمرو پژوهش و متناسب با شرکت‌های مورد مطالعه تدوین شده است. پیشنهاد می‌گردد با بررسی سایر شرکت‌های مشابه مدل جامعی مرتبط با سازمانها و شرکت‌های بزرگ مشابه ارائه گردد که کلیه معیارهای شرکت‌های دخیل را فرا گیرد. پیشنهاد می‌گردد شاخص‌ها بر اساس مدل مفهومی یا مدل ساختاری مورد آزمون فرض در شرکت‌های مشابه قرار گرفته تا چارچوب مدیریت تامین شناسایی گردد. پیشنهاد می‌گردد برای تحلیل و مدل‌سازی داده‌های پیشرفته در راستای مدیریت بهتر پیچیدگی عملیات، از تکنیک‌های تحلیل داده و مدل‌سازی پیشرفته شامل موارد زیر استفاده شود:

- ارائه مدل‌های آماری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد تأمین‌کننده و شناسایی ریسک‌ها یا فرصت‌های بالقوه
- ارئه یک رویکرد مدلسازی پویا که می‌تواند با تغییرات در شرایط بازار، رفتار عرضه کننده و سایر عوامل خارجی سازگار شود. این می‌تواند شامل برنامه‌ریزی سناریو و تجزیه و تحلیل حساسیت برای آزمایش استحکام مدل باشد.

پیشنهاد می‌شود از مدل تحلیل خاکستری و یا شبکه‌ای توسعه یافته جهت تحلیل عمکرد استفاده شود. با عنایت به اینکه یکی از محدودیت‌های این پژوهش، فرض قطعی بودن داده‌ها در مدل‌های DEAو ANN است. در واقع، عواملی مانند نوسانات قیمت نهاده‌ها، شیوع بیماری‌های طیور، و تغییرات سیاست‌های اقتصادی می‌توانند بر عملکرد واقعی زنجیره‌های تأمین تأثیرگذار باشند. برای لحاظ نمودن این نوع عدم قطعیت‌ها، استفاده از **روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو** در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود. این روش با تولید هزاران نمونه تصادفی از متغیرهای ورودی، می‌تواند توزیع احتمالی کارایی را به‌صورت عددی (Quantitative) برآورد نماید، بدون آنکه نیاز به تغییر اساسی در ساختار مدل موجود باشد افزودن چنین رویکردی موجب می‌شود تحلیل آینده‌نگر زنجیره تأمین سبز از پویایی و دقت بیشتری برخوردار گردد. در پژوهش‌های آتی می‌توان با توسعه مدل به سمت **رویکردهای تصادفی و سناریومحور** (مانند مدل‌سازی ریسک با شبیه‌سازی مونت‌کارلو یا سناریوهای تغییر قیمت نهاده‌ها و بروز بیماری‌ها)، عدم قطعیت‌های محیطی و ریسک‌های غیرمنتظره را نیز به‌صورت جامع‌تر مدل‌سازی نمود.

۸- منابع

[1] "Theories in sustainable supply chain management: a structured literature review." International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 45 (1-2): 16–42,2015.

[2] Akanmode, E., et al. "Prediction of poultry yield using data mining techniques." Int J Innov Eng Sci Res 2: 16-32, 2018.

[3] Salehi moghadam,S. and Darvish motevalli,M. H. A New Model for the four-level multi-product supply chain optimization based on stochastic demand with probability distribution function. (e231650). *Karafan Journal*, *22*(2), 2025.

[4] Alinezhad, A. and A. Taherinezhad . "Performance Evaluation of Production Chain using Two-Stage DEA Method (Case Study: Iranian Poultry Industry)." new economy and trad 16(3): 105-130, 2021.

[5] Amini, A., et al. "Evaluation of green supply chain performance using network data envelopment analysis." International Journal of Green Economics 13(3-4): 187-201, 2019.

[6] Kheyrati L, Darvish Motevalli M H. Presenting a Mathematical Model for Optimizing the Cold Food Supply Chain During Disasters. Disaster Prev. Manag. Know.; 14 (3) :292-309, 2024.

[7] Amirbeygi, F., et al. "Evaluation of green supply chain performance using balanced scorecard and data envelopment analysis." Journal of Industrial Engineering and Management Studies 9(2): 64-85, 2023.

[8] Anouze, A. L. M. and I. Bou-Hamad. "Data envelopment analysis and data mining to efficiency estimation and evaluation." International Journal of Islamic and Middle Eastern Finance and Management 12(2): 169-190, 2019.

[9] Chen, Y., Cook, W. D., Ning, L., & Zhu, J. "Additive efficiency decomposition in two-stage DEA." European journal of operational research, 196(193), 1170-1176, 2009.

[10] Krakovsky, R., Forgac, R., 2011. Neural network approach to multidimensional data classification via clustering. In: IEEE. 9th International Symposium on Intelli gent Systems and Informatics, pp. 169e174.

[11] Depi. "Structure of Victoria's Chicken Meat Industry." Department of Environment and Primary Industries, Victoria, Australia. Accessed November, 2013.

[12] Emrouznejad, A. and M. Tavana. Performance measurement with fuzzy data envelopment analysis, Springer, 2013.

[13] Ibiwoye, A., Ajibola, E., Sogunro, A.B., Artificial neural network model for predicting insurance insolvency. Int. J. Manag. Bus. Res. 2 (1), 59e68, 2012.

[14] Färe, R., & Whittaker, G. "An intermediate input model of dairy production." Journal of Agricultural Economics, 46, 201–213, 1995.

[15] Geng, R., et al. "The relationship between green supply chain management and performance: A meta-analysis of empirical evidences in Asian emerging economies." International journal of production economics 183: 245-258, 2017.

[16] Gupta, M. K. and P. Chandra. "Effects of similarity/distance metrics on k-means algorithm with respect to its applications in iot and multimedia: a review." Multimedia Tools and Applications 81(26): 37007-37032, 2022.

[17] Melchiorre, C., Matteucci, M., Azzoni, A., Zanchi, A., Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation. Geomorpho 94 (3), 379e400, 2008.

[18] Han, Y.M., Geng, Z.Q. and Zhu, Q.X., "Energy optimization and prediction of complex petrochemical industries using an improved artificial neural network approach integrating data envelopment analysis", Energy Conversion and Management, Vol. 124, pp. 73-83, 2016.

[19] Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E., "Measuring the efficiency of decision-making units", European Journal of Operational Research, Vol. 2 No. 6, pp. 429-444, 1998.

[20] Kwon, H.B., Lee, J. and Roh, J.J., "Best performance modeling using complementary DEA-ANN approach: application to Japanese electronics manufacturing firms", Benchmarking: An International Journal, Vol. 23 No. 3, pp. 704-721, 2016.

[21] Selim, S. and Bursalıoglu, S.A., "Efficiency of higher education in Turkey: a bootstrapped twostage DEA approach 1", International Journal of Statistics and Applications, Vol. 5 No. 2, pp. 56-67, 2015.

[22] Agasisti, T. and Ricca, L., "Comparing the efficiency of Italian public and private universities (2007-2011): an empirical analysis", Italian Economic Journal, Vol. 2 No. 1, pp. 57-89, 2016.

[23] Kao, C., & Hwang, S. N. "Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan." European Journal of Operational Research: 185(181), 418-429, 2008.

[24] Kao, C. "Efficiency decomposition for general multi-stage systems in data envelopment analysis." European Journal of Operational Research 232(1): 117-124, 2014.

[25] Kao, C. "Network data envelopment analysis: A review." European Journal of Operational Research 239(1): 1-16, 2014.

[26] Khashei, M. and M. Bijari. "An artificial neural network (p, d, q) model for timeseries forecasting." Expert Systems with applications 37(1): 479-489, 2010.

[27] Adler, N., Martini, G. and Volta, N., "Measuring the environmental efficiency of the global aviation fleet", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 53, pp. 82-100, 2013.

[28] Kumar, S., & Putnam, V. "Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors." International journal of production economics: 115(112), 305-315, 2018.

[29] Liu, J.S., Lu, L.Y. and Lu, W.M., "Research fronts and prevailing applications in data envelopment analysis", Data Envelopment Analysis, Springer, Boston, MA, pp. 543-574, 2016.

[30] Alizadeh, A. and Omrani, H., "An integrated multi response Taguchi-neural network-robust data envelopment analysis model for CO2 laser cutting", Measurement, Vol. 131, pp. 69-78, 2019.

[31] Li, Y., Chen, Y., Liang, L., & Xie, J. "DEA models for extended two-stage network structures." Omega: 40(45), 611-618, 2012.

[32] Ghasemi, N., Najafi, E., Lotfi, F.H. and Sobhani, F.M., "Assessing the performance of organizations with the hierarchical structure using data envelopment analysis: an efficiency analysis of Farhangian University", Measurement, Vol. 156, 107609, 2002.

[33] Misiunas, N., et al. "DEANN: A healthcare analytic methodology of data envelopment analysis and artificial neural networks for the prediction of organ recipient functional status." Omega 58: 46-54, 2016.

[34] Manasakis, C., Apostolakis, A. and Datseris, G., "Using data envelopment analysis to measure hotel efficiency in Crete", International Journal of Contemporary Hospitality Management, Vol. 25 No. 4, pp. 510-535, 2013.

[35] Nguyen, H.G. Using neutral work in predicting corporate failure. J. Soc. Sci. 1 (4), 199e202, 2005.

[36] Nandy, A. and P. K. Singh. "Farm efficiency estimation using a hybrid approach of machine-learning and data envelopment analysis: Evidence from rural eastern India." Journal of Cleaner Production 267: 122106, 2020.

[37] Bhanot, N. and Singh, H., "Benchmarking the performance indicators of Indian Railway container business using data envelopment analysis", Benchmarking: An International Journal, Vol. 21 No. 1, pp. 101-120, 2014.

[38] Pratap, S., Jauhar, S.K., Paul, S.K. and Zhou, F., "Stochastic optimization approach for green routing and planning in perishable food production", Journal of Cleaner Production, Vol. 333, 130063, 2022.

[39] Carlucci, D., Renna, P. and Schiuma, G., "Evaluating service quality dimensions as antecedents to outpatient satisfaction using back propagation neural network", Health Care Management Science, Vol. 16 No. 1, pp. 37-44, 2013.

[40] Athanassopoulos, A.D. and Curram, S.P., "A comparison of data envelopment analysis and artificial neural networks as tools for assessing the efficiency of decision-making units", Journal of the Operational Research Society, Vol. 47 No. 8, pp. 1000-1016, 1996.

[41] Rezaee, M. J. "Integrating dynamic fuzzy C-means, data envelopment analysis and artificial neural network to online prediction performance of companies in stock exchange." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 489: 78-93, 2018.

[42] Paradi, J.C. and Zhu, H., "A survey on bank branch efficiency and performance research with data envelopment analysis", Omega, Vol. 41 No. 1, pp. 61-79, 2013.

[43] Panapakidis, I.P. and Dagoumas, A.S., "Day-ahead natural gas demand forecasting based on the combination of wavelet transform and ANFIS/genetic algorithm/neural network model", Energy, Vol. 118, pp. 231-245, 2017.

[44] Shabanpour, H., et al. "Forecasting efficiency of green suppliers by dynamic data envelopment analysis and artificial neural networks." Journal of Cleaner Production 142: 1098-1107, 2017.

[45] Shamsuddoha, M. "Integrated supply chain model for sustainable poultry production in Bangladesh: a system dynamics approach."2014.

[46] Tone, K., & Tsutsui, M. "Dynamic DEA: A slacks-based measure approach." Omega: 38(33-34), 145-156, 2010.

[47] Kwon, H.B.Exploring the predictive potential of artificial neural networks in conjunction with DEA in railroad performance modeling. International Journal of Production Economics, 183(A), 159-170, 2017.

[48] Zhang, G. "Forecasting with artificial neural networks: The state of the art." International journal of forecasting 14(1): 35-62, 2018.

[49] Kuo, R.J., Wang, Y.C. and Tien, F.C, "Integration of artificial neural network and MADA methods for green supplier selection", Journal of Cleaner Production, (18)-12. ۱۱۶۱-۱۱۷۰, 2010.

[50] Misiunas, N., Oztekin, A., Chen, Y. and Chandra, K, "DEANN: a healthcare analytic methodology of data envelopment analysis and artificial neural networks for the prediction of organ recipient functional status", Omega, Vol. ۵۸, pp. ۵۴-۴۶, 2016.

[51] Rezaei, J., Tavasszy, L., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2023). A hybrid ANN–DEA model for performance prediction in green supply chains. Journal of Cleaner Production, 414, 137594, 2023.

[52] Han, S., & Lee, J. (2022). Forecasting supply chain efficiency using multi-layer neural networks and DEA integration. Expert Systems with Applications, 202, 117267, 2022.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 149-164

Identifying the Determinants of Blockchain Technology Adoption and Proposing a Hybrid Adoption Model Based on TAM and TOE Using the K-means Clustering Method

Atefeh Farazmand[1], Abouzar Arabsorkhi[2*], Seyed Ahmad Yazdian[3], Abbas Saghaei[4]

[1] PhD candidate, Department of Industrial Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2] Assistant Professor, Department of ICT security, Iran Telecommunications Research Institute, Tehran, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
[4] Professor, Department of Industrial Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 20 May 2025, Revised: 26 January 2026, Accepted: 31 January 2026
Paper type: Research

Abstract

With the rapid development of technology and its increasing integration into users' personal and professional lives, the decision to accept or reject technology remains an open question. Technology acceptance theories seek to explain the reasons underlying an individual's acceptance of information systems. In the field of technology acceptance modeling, numerous studies have been conducted, resulting in the development of various models. This study examines blockchain technology adoption using the Technology Acceptance Model (TAM) and the Technology–Organization–Environment (TOE) framework. After a brief review of the criteria and limitations of these models, a conceptual–exploratory framework based on the clustering of adoption criteria within the TAM and TOE frameworks is proposed. Following a review of the relevant literature, 85 blockchain technology adoption criteria were identified. Through expert evaluation, 53 criteria were selected as the most important blockchain adoption criteria. Subsequently, the selected criteria were classified using the K-means clustering method in SPSS, leading to the categorization of criteria and the presentation of the proposed integrated model. The results indicate that, from the experts' perspective, direct conceptual proximity is not observed exclusively between external factors and the two core TAM constructs of perceived usefulness and perceived ease of use; rather, factors belonging to the technological, organizational, and environmental dimensions of the TAM–TOE framework are also positioned within this conceptual proximity. Furthermore, the results and the examination of the limitations of the TAM and TOE models indicate that these two models are complementary to one another. The findings of this study contribute to the further development of blockchain adoption research and provide guidance for the practices of organizations operating in this field.

Keywords: Technology Adoption, Blockchain, Clustering, Adoption Model, Adoption Factors.

[*] Corresponding Author's email: abouzar_arab@itrc.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۴۹ الی ۱۶۴

شناسایی معیارهای پذیرش فناوری زنجیره بلوکی و ارائه مدل ترکیبی پذیرش فناوری TAM و TOE با استفاده از روش خوشه‌بندی K-means

عاطفه فرازمند [۱]، ابوذر عرب سرخی [۲*]، سید احمد یزدیان [۳]، عباس سقایی [۴]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۲] استادیار، پژوهشکده امنیت، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

[۳] استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۴] استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با توسعه روزافزون فناوری و ادغام آن در زندگی خصوصی و حرفه‌ای کاربران، تصمیم در مورد پذیرش یا رد آن هنوز یک سؤال باز باقی‌مانده است. نظریه‌های پذیرش فناوری به بیان علل پذیرش سیستم اطلاعاتی توسط یک فرد اشاره می‌نماید. در زمینه مدل پذیرش فناوری، تحقیقات متعددی صورت‌گرفته است که به ارائه مدل‌های مختلف می‌پردازد. در این پژوهش به بررسی مدل پذیرش فناوری زنجیره بلوکی با استفاده از مدل TAM و مدل TOE پرداخته می‌شود و پس از مرور اجمالی بر معیارها و محدودیت‌های آنها به ارائه چارچوب مفهومی–اکتشافی مبتنی بر خوشه‌بندی معیارها در چارچوب TAM و TOE پرداخته شده است. همچنین در این پژوهش پس از بررسی ادبیات‌پژوهش ۸۵ معیار پذیرش فناوری زنجیره بلوکی شناسایی و با بررسی خبرگان ۵۳ معیار به‌عنوان مهم‌ترین معیارهای پذیرش فناوری زنجیره بلوکی شناسایی شده و سپس با استفاده از روش خوشه‌بندی k-means در نرم‌افزار SPSS به دسته‌بندی معیارها و ارائه مدل ترکیبی این پژوهش پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که از منظر خبرگان، هم‌جواری مفهومی مستقیم، صرفاً بین عوامل خارجی و دو عامل سودمندی درک شده و درک سهولت استفاده تأثیرگذار مشاهده نگردید، بلکه عواملی که در گروه‌های فناوری، سازمانی و محیطی مدل TAM قرار دارند نیز در این هم‌جواری قرار می‌گیرند، همچنین نتایج و بررسی محدودیت‌های مدل TAM و TOE نشان می‌دهند که این دو مدل تکمیل‌کننده یکدیگر هستند. یافته‌های این پژوهش به توسعه بیشتر پذیرش زنجیره بلوکی کمک می‌نماید و راهنمایی‌هایی برای عملکرد شرکت‌های فعال در این حوزه فراهم می‌آورد.

کلیدواژگان: پذیرش فناوری، زنجیره بلوکی، خوشه بندی، مدل پذیرش، عوامل پذیرش.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: abouzar_arab@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، فناوری زنجیره بلوکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و تحول‌آفرین‌ترین فناوری‌های نوظهور در سطح جهان موردتوجه قرار گرفته است. این فناوری که بر پایه معماری غیرمتمرکز و رمزنگاری پیشرفته بنا شده، به‌عنوان یکی از نوآوری‌های بنیادین قرن بیست ویکم، نقش بسزایی در بازطراحی فرایندهای کسب‌وکار، ارتقای شفافیت و بهبود پایداری سازمانی ایفا می‌کند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که زنجیره بلوکی نه‌تنها در حوزه‌های مالی، بلکه در سایر حوزه‌های کاربردی مانند زنجیره تأمین، انرژی، سلامت و ساخت‌وساز نیز تأثیرگذار بوده است [۱]. بر اساس گزارش‌های جدید، این فناوری می‌تواند با حذف واسطه‌ها و بهینه‌سازی زنجیره ارزش، هزینه‌های عملیاتی را تا حدود ۳۰ درصد کاهش داده و کارایی سیستم‌های داده‌محور را ارتقا دهد [۲]. همچنین، زنجیره بلوکی به‌دلیل قابلیت ردیابی و شفافیت ذاتی خود، زمینه افزایش اعتماد میان ذی‌نفعان را فراهم می‌آورد، که این عامل در محیط‌های رقابتی و مبتنی بر داده اهمیت فزاینده‌ای یافته است [۴،۳].

باوجوداین ظرفیت‌های چشمگیر، پیاده‌سازی زنجیره بلوکی در سطح تجاری هنوز عمدتاً در مرحله مطالعات امکان‌سنجی و نمونه‌سازی اولیه باقی‌مانده است. بسیاری از سازمان‌ها به‌جای استقرار کامل، صرفاً به اجرای پروژه‌های پایلوت و محدود بسنده کرده‌اند [۵]. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تردید سرمایه‌گذاران، نبود تضمین بازگشت سرمایه و عدم قطعیت در مدل‌های اقتصادی از عوامل اصلی در کندی پذیرش این فناوری محسوب می‌شوند [۶]. افزون بر این، چالش‌هایی نظیر موانع فرهنگی، محدودیت‌های قانونی، نبود زیرساخت‌های استاندارد، و مشکلات مقیاس‌پذیری نیز از موانع کلیدی پذیرش گسترده زنجیره بلوکی به شمار می‌روند [۷، ۸]. به‌ویژه در صنایع سنتی، مقاومت سازمانی در برابر تغییر و کمبود نیروی انسانی متخصص از موانعی است که در مطالعات جدید نیز بر آن تأکید شده است[۹].

نکته کلیدی در پذیرش هر فناوری نوین، «اعتماد» است؛ مفهومی که زیربنای تعاملات انسانی است [۱۰]. زنجیره بلوکی با استفاده از دفترکل توزیع‌شده (Distributed Ledger) و سازوکارهای رمزنگاری پیشرفته، امکان ارائه اطلاعات به‌موقع، شفاف و غیرقابل تغییر را فراهم می‌آورد؛ ویژگی‌هایی که می‌توانند اصطکاک‌های بازار همچون عدم تقارن اطلاعات و هزینه‌های مبادله را به میزان قابل توجهی کاهش دهند [۱۱]. افزون بر این، قراردادهای هوشمند (Smart Contracts)با خودکارسازی اجرای توافقات، اعتماد عملیاتی را جایگزین اعتماد نهادی کرده و موجب کاهش خطاهای انسانی، هزینه‌های نظارتی و زمان اجرای فرایندها می‌شوند[۵، ۱۲]. نتایج پژوهش‌های جدید نیز نشان می‌دهد که «اعتماد فناورانه» در کنار «اعتماد سازمانی» دو رکن مکمل در پذیرش فناوری‌های توزیع‌شده محسوب می‌شوند[۱۳].

برای فهم بهتر سازوکارهای پذیرش فناوری‌های نوظهور، پژوهشگران از دهه ۱۹۷۰ تاکنون مدل‌های نظری متعددی را توسعه داده‌اند. از جمله مدل‌های برجسته در این زمینه می‌توان به نظریه عمل منطقی (TRA)، نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده (TPB)، مدل پذیرش فناوری (TAM)، گسترش TAM (ETAM) ، نظریه انتشار نوآوری (DOI)، نظریه یکپارچه پذیرش و استفاده از فناوری (UTAUT)، مدل تناسب فناوری–وظیفه (TTF) و چارچوب فناوری–سازمان–محیط (TOE) اشاره کرد [۱۴-۱۶]. این مدل‌ها با تمرکز بر متغیرهایی چون نگرش، نیت رفتاری، سودمندی درک شده و سهولت استفاده، به درک و پیش‌بینی رفتار کاربران در مواجهه با فناوری‌های نوین کمک می‌کنند.

مدل پذیرش فناوری (TAM) که بر اساس چارچوب TRA توسعه یافت، دو سازه اصلی را معرفی می‌کند [۱۷]:

- سودمندی درک شده(PU)
- سهولت استفاده درک شده(PEOU)

بر اساس مطالعات انجام شده، این دو عامل از مهم‌ترین محرک‌های نگرش نسبت به استفاده از سیستم (A) و در نهایت قصد رفتاری (BI) کاربران برای استفاده از فناوری‌های اطلاعاتی به شمار می‌آیند [۱۸]. با وجود کاربرد گسترده TAM، پژوهش‌های اخیر به محدودیت آن در تبیین عوامل بیرونی، همچون زمینه‌های فرهنگی و سازمانی، اشاره کرده‌اند [۱۹، ۲]. مدل‌های ترکیبی و توسعه‌یافته برای تحلیل جامع‌تر رفتار پذیرش فناوری‌های پیچیده مانند زنجیره بلوکی توصیه شده‌اند [۳].

چارچوب TOE سه زمینه کلیدی را برای پذیرش فناوری در سطح سازمانی موردتوجه قرار می‌دهد [۲۰]:

۱. زمینه فناوری(Technological Context)
۲. زمینه‌سازمانی(Organizational Context)
۳. زمینه محیطی(Environmental Context)

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ترکیب این سه بعد می‌تواند درک جامع‌تری از موانع و محرک‌های پذیرش فناوری در محیط‌های پویا و پیچیده سازمانی ارائه دهد [۲۲،۲۱،۸]. در پژوهش‌های جدید، مدل TOE به‌ویژه در تحلیل پذیرش فناوری‌های زنجیره بلوکی،

به‌عنوان چارچوبی مکمل برای مدل‌های رفتاری مورد استفاده قرار گرفته است[۹].

باتوجه‌به ویژگی‌های منحصربه‌فرد زنجیره بلوکی، از جمله تمرکززدایی، شفافیت و خودکارسازی تراکنش‌ها، انتقال مستقیم یافته‌های مدل‌های کلاسیک پذیرش فناوری به این حوزه ممکن است ناکافی باشد. همچنین، پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر متغیرهای عمومی پذیرش فناوری اطلاعات متمرکز بوده و کمتر به شناسایی معیارهای خاص مرتبط با فناوری زنجیره بلوکی و دسته‌بندی نظام‌مند آن‌ها پرداخته‌اند [۲۳–۲۴]. در نتیجه، نیاز به رویکردی ترکیبی احساس می‌شود که بتواند ابعاد فردی، سازمانی و محیطی را در قالب مدلی جامع برای تبیین رفتار پذیرش زنجیره بلوکی ادغام کند[۱۲].

بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف شناسایی معیارهای کلیدی پذیرش فناوری زنجیره بلوکی و توسعه یک مدل ترکیبی–TAM TOEانجام شده است. در این راستا، ابتدا از طریق مرور سیستماتیک ادبیات، ۸۵ معیار اولیه استخراج شد و سپس با استفاده از نظرات خبرگان، ۵۳ معیار به‌عنوان مهم‌ترین عوامل انتخاب گردید. در ادامه، با بهره‌گیری از روش خوشه‌بندی K-means در نرم‌افزارSPSS ، این معیارها در قالب گروه‌های معنادار سازمان‌دهی شده و مدلی جامع برای تحلیل رفتار پذیرش زنجیره بلوکی پیشنهاد گردید. سؤالاتی که این پژوهش به دنبال پاسخ به آنها است عبارتند از:

۱. مهمترین معیارهای اصلی پذیرش فناوری زنجیره بلوکی کدام‌اند؟
۲. معیارهای پذیرش فناوری زنجیره بلوکی چگونه بر اساس چارچوب‌های TAM و TOE با روش خوشه‌بندی K-means دسته‌بندی می‌شوند؟

۲- ادبیات پژوهش

۲-۱- پذیرش زنجیره بلوکی

فناوری زنجیره بلوکی نخستین‌بار در سال ۲۰۰۸ و در قالب مقاله معروف ساتوشی ناکاموتو با عنوان «یک سیستم پول الکترونیکی همتا به همتا» مطرح شد. هرچند در ابتدا تمرکز این فناوری بر رمزارزها و تراکنش‌های مالی بود، اما به‌سرعت حوزه‌های متنوعی از جمله مدیریت زنجیره تأمین، مراقبت‌های سلامت، آموزش، انرژی، تبلیغات و اینترنت اشیا (IoT) را نیز دربر گرفت. ماهیت بنیادین این فناوری در ثبت و نگهداری غیرقابل‌تغییر اطلاعات از طریق سازوکارهای رمزنگاری و دفتر کل توزیع‌شده است که باعث افزایش اعتماد، شفافیت و کارایی در تعاملات دیجیتال می‌شود [۲۵].

در ساده‌ترین تعریف، زنجیره بلوکی را می‌توان سامانه‌ای دانست که با بهره‌گیری از رمزنگاری و ساختار توزیع‌شده، داده‌ها را به‌گونه‌ای ثبت می‌کند که حذف یا دست‌کاری آن‌ها تقریباً غیرممکن است. در این ساختار، گره‌های مختلف شبکه به‌صورت هم‌زمان داده‌ها را نگهداری و به‌روزرسانی می‌کنند و همین ویژگی باعث می‌شود هیچ نهاد مرکزی بر فرایند ثبت اطلاعات تسلط نداشته باشد. در نتیجه، قابلیت اطمینان داده‌ها افزایش‌یافته و اعتماد میان طرفین تعامل تقویت می‌شود [۲۶].

زنجیره بلوکی در اصل یک دفترکل توزیع‌شده و اشتراکی است که کلیه تراکنش‌ها و رویدادهای دیجیتال را با تأیید اجماع اکثریت اعضا ثبت می‌کند. تفاوت اساسی آن با پایگاه‌های داده سنتی، تمرکززدایی و شفافیت ذاتی است که موجب کاهش هزینه‌های نظارتی، جلوگیری از تقلب و افزایش کارایی فرایندهای سازمانی می‌شود [۲۶]. این ویژگی‌ها در مطالعات جدید نیز به‌عنوان عوامل کلیدی در پذیرش فناوری زنجیره بلوکی در زنجیره تأمین و صنایع تولیدی مورد تأکید قرار گرفته‌اند. برای نمونه، نشان داده شده است که در صنایع زنجیره تأمین چین، کیفیت کلی سیستم و درک سهولت استفاده تأثیر مثبت و معناداری بر درک مفید بودن و سازگاری فناوری داشته و در نهایت بر قصد رفتاری برای پذیرش زنجیره بلوکی اثرگذار است [۲]. در این مطالعه، «اعتماد به فناوری» نقش تعدیل‌کننده‌ای میان متغیرهای کلیدی مدل پذیرش فناوری (TAM)و قصد رفتاری ایفا کرده است.

باوجود گسترش کاربردها، هنوز مرورهای جامع و بین‌رشته‌ای درباره وضعیت پذیرش زنجیره بلوکی محدود است. [۲۷] بیان می‌کند که از منظر نظری و مدیریتی، جایگاه فناوری زنجیره بلوکی در منحنی پذیرش نوآوری همچنان مبهم است، چراکه عوامل متعددی مانند اثرات شبکه‌ای، پیچیدگی فنی، سازگاری و درک مزیت نسبی بر روند پذیرش آن اثرگذارند. این موضوع در مطالعات حوزه ساخت‌وساز نیز مشاهده می‌شود؛ جایی که قراردادهای هوشمند مبتنی بر زنجیره بلوکی می‌توانند تحولی اساسی ایجاد کنند اما پژوهش‌ها هنوز در سطح مفهومی باقی مانده‌اند. تحلیل نظام‌مند ۱۷۴ مقاله در این زمینه نشان داد که درک ناکافی از ترکیب عوامل فنی و مدیریتی، یکی از موانع کلیدی پذیرش در این بخش محسوب می‌شود[۳].

افزون بر این، پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که پذیرش فناوری‌های هم‌خانواده زنجیره بلوکی، مانند هوش مصنوعی و سیستم‌های مالی دیجیتال، نیز با موانع مشابهی روبه‌رو است. برای

مثال، [۸] در بررسی موانع پذیرش هوش مصنوعی در بنگاه‌های کوچک و متوسط تایلند، عواملی مانند کمبود مهارت انسانی، محدودیت مالی و پیچیدگی فنی را به‌عنوان موانع کلیدی شناسایی کرده است. این یافته‌ها از منظر مقایسه‌ای می‌توانند برای درک چالش‌های مشابه در پذیرش زنجیره بلوکی نیز سودمند باشند.

از دیدگاه نظری، چارچوب فناوری–سازمان–محیط (TOE) و نظریه انتشار نوآوری (DOI) نقش مهمی در تبیین عوامل توانمندساز و بازدارنده پذیرش فناوری دارند. در همین راستا، [۹] با به‌کارگیری مدل تلفیقی DOI–TOE در صنعت تأمین مالی زنجیره تأمین مبتنی بر زنجیره بلوکی نشان داد که مزیت نسبی، سازگاری و قابلیت آزمایش‌پذیری مهم‌ترین محرک‌های پذیرش‌اند، درحالی‌که پیچیدگی و هزینه دو مانع اصلی محسوب می‌شوند.

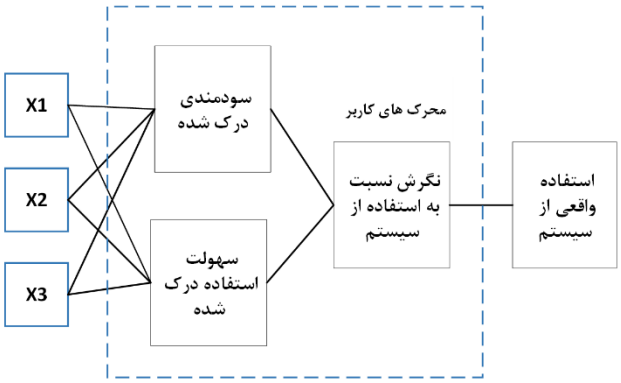
به طور مشابه، [۱۲] با تمرکز بر کتابخانه‌های دانشگاهی در نیجریه، ترکیب مدل‌های TAM و TOE را برای پیش‌بینی احتمال پذیرش زنجیره بلوکی بررسی کرد و نشان داد که کاربردپذیری ادراک‌شده، سیاست‌های حمایتی و امنیت اطلاعات، سه عامل اصلی در شکل‌گیری قصد رفتاری برای استفاده از زنجیره بلوکی هستند. در مقابل، هزینه‌های زیرساخت و ضعف دانش فنی از مهم‌ترین موانع تلقی می‌شوند.

در نهایت، مرور نظام‌مند [۱۳] با استفاده از مدل فازی DEMATEL و چارچوب TOE، هفت مانع بحرانی در مسیر پذیرش زنجیره بلوکی در صنعت ساخت‌وساز را شناسایی کرد. نتایج نشان داد که موانع محیطی مانند «ابهام در سیاست‌گذاری‌ها» و «بلوغ فناوری» بیشترین اثر بازدارنده را دارند، در حالی‌که موانع فنی مانند «امنیت قراردادهای هوشمند» و «قابلیت همکاری بین سیستم‌ها» از ماهیت علّی برخوردارند.

بنابراین، جمع‌بندی ادبیات‌پژوهش نشان می‌دهد که پذیرش زنجیره بلوکی مفهومی چندبُعدی است که از تعامل عوامل فناورانه، سازمانی، محیطی و رفتاری شکل می‌گیرد. به‌ویژه ترکیب مدل‌های TAM و TOEدر پژوهش‌های جدید توانسته است درک جامع‌تری از محرک‌ها، موانع و سازوکارهای رفتاری پذیرش در صنایع مختلف فراهم آورد [۲، ۱۳، ۲۸].

۲-۲- مدل پذیرش فناوری TAM

TAM مدلی است که به طور گسترده برای درک فرایندپذیرش و استفاده از فناوری اطلاعات استفاده می‌شود و دلیل محبوبیت آن این است که این مدل واریانس‌هایی مانند قصد رفتاری (BI) مربوط به تخصیص فناوری اطلاعات و استفاده در طیف وسیعی از تنظیمات را روشن می‌کند. فاکتورهای اصلی مدل برای استفاده از سیستم، سودمندی درک شده (PU) و سهولت استفاده درک شده (PEOU) است[۱۹].



شکل ۱. مدل پذیرش فناوری TAM

این مدل برگرفته از چارچوب تئوری عمل منطقی TRA، در ابتدا توسط [۱۷] برای پرداختن به وضعیت نامطمئن روان‌سنجی از طریق حذف هنجارهای ذهنی ایجاد شد. چارچوب TAM یکی از پراستنادترین چارچوب‌های پذیرش است و سهولت استفاده و سودمندی درک شده و تأثیر نگرش نسبت به استفاده از فناوری را به عنوان عوامل حیاتی به کارگیری چارچوب TAM معرفی می‌نماید.

TAM توسط محققان در سراسر جهان برای درک پذیرش انواع مختلف سیستم‌های اطلاعاتی استفاده شده است. [۲۹] در پژوهشی سعی کرد با استفاده از TAM میزان پذیرش سیستم‌های آموزش الکترونیکی توسط معلمان را ارزیابی کند. ژو و همکاران مدل جدیدی بر اساس TAM به نام مدل پذیرش خرید آنلاین (OSAM) برای مطالعه رفتار خرید آنلاین ارائه کرده است. [۳۰] مدلی را برای پیش بینی پذیرش تجارت الکترونیک با افزودن متغیرهای جدید اعتماد و ریسک درک شده ایجاد کرد. با توجه به مدل توسعه یافته توسط [۳۱] برای درک پذیرش بانکداری آنلاین در فنلاند، سودمندی و اطلاعات درک شده در بانکداری آنلاین نقش بسیار مهمی دارد. [۳۲] مدلی مبتنی بر TAM و TPB برای درک پذیرش سرویس تلفن همراه ایجاد کرده اند که بیان می‌کند که درک مفید بودن، قوی ترین عامل در پذیرش است. [۳۳] از مدل پذیرش فناوری با ریسک امنیتی برای درک پذیرش شناسایی فرکانس رادیویی (RFID) استفاده کرد. [۳۴] این مدل را برای درک پذیرش فناوری زنجیره بلوکی در مدیریت منابع انسانی بکار گرفته‌اند. در نتیجه مدل TAM به طور گسترده ای برای کمک به درک و توضیح رفتار کاربر در یک سیستم اطلاعاتی استفاده می‌شود.

حجم قابل‌توجهی از پژوهش‌های مربوط به مدل پذیرش فناوری (TAM) به‌وضوح نشان‌دهنده محبوبیت TAM در زمینه پذیرش فناوری است. بااین‌حال نمی‌توان از محدودیت‌های این مدل نیز چشم‌پوشی نمود.

۲-۲-۱- محدودیت‌ها و نقد TAM

اگرچه مدل TAM به طور گسترده در تحقیقات متعدد به‌کار گرفته‌شده است؛ اما محدودیت‌هایی را به همراه دارد که آنها را می‌توان در متغیرهای خارجی و تعدیل‌کننده این مدل مشاهده نمود. TAM به رفتارهای آینده نگاه می‌کند و به رفتارهای واقعی نمی‌نگرد. همچنین TAM توانایی محدودی برای شفاف‌سازی، بیان انتظارات و جزئیات دارد چرا که می‌بایست از جنبه‌های مختلف به فناوری نگاه شود[۱۹].

۲-۲-۲- محدودیت در روش مورداستفاده برای آزمایش مدل TAM

بزرگ‌ترین انتقاد به TAM این است که مدل از داده‌های استفاده از خود گزارش‌دهی به‌جای اندازه‌گیری با داده‌های واقعی سیستم استفاده می‌کند. بر اساس مطالعه [۳۵] داده‌های خود اظهاری، انتزاعی و نادرست در اندازه‌گیری استفاده از سیستم هستند. با وجود این، بسیاری از مطالعات هنوز از داده‌های خود اظهاری استفاده می‌کنند. [۳۶] از مدل TAM برای شرکت کنندگان در یک محیط کنترل شده به منظور به‌دست آوردن نتایج آزمون استفاده می‌کند و به همین دلیل، این نتایج آزمون را نمی‌توان به دنیای خارج تعمیم داد زیرا مطالعات دارای اهداف متمایزی مانند کسب نمرات، پاداش و غیره هستند.

۲-۲-۳- متغیر مدل TAM و محدودیت‌های آن

با توجه به مطالعه [۳۷] نگرش یک عامل مهم برای استفاده از سیستم است و TAM نیاز به بررسی آن دارد. در شبیه سازی مدل TAM متغیرهای نگرش همانطور که توسط [۳۶] پیشنهاد شد حذف نشدند، در عوض، دو متغیر نگرش عاطفی و شناختی اضافه شدند. در یک نظرسنجی توسط [۳۷] از شرکت کنندگان خواسته شد تا میزان استفاده خود را از برنامه‌های صفحه گسترده را رتبه‌بندی کنند. نتیجه بررسی نشان می‌دهد که متغیر نگرش، معنای آماری موثری را برای پیش‌بینی استفاده از سیستم به تصویر نمی‌کشد، اما نتایج در مورد نگرش شناختی بسیار معنادار بود.

۲-۲-۴- محدودیت‌های پایه نظری مدلTAM

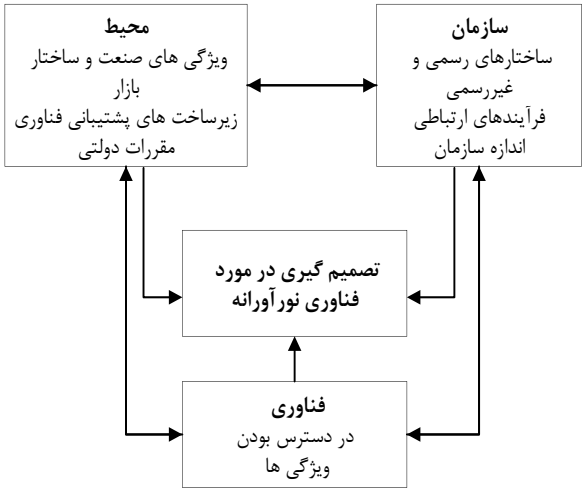
[۳۸] رابطه فرضی ضعیفی در میان ساخت‌های مختلف که در TAM شرح داده شده است، تعریف می‌کنند. آنان رابطه بین استفاده و هدف را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده نمودند که رفتار نمی‌تواند به‌عنوان یک هدف نهایی در نظر گرفته شود، و ادعا می‌کنند که رفتار باید به عنوان راهی برای رسیدن به یک قصد نهایی‌تر تلقی شود. علاوه بر این، آنها توضیح دادند که ممکن است هدف به اندازه کافی در رابطه با استفاده واقعی نباشد، زیرا چارچوب زمانی بین هدف و تخصیص منابع می‌تواند متاثر از عناصر مختلفی باشد که ممکن است بر انتخاب فرد برای پذیرش نوآوری تأثیر بگذارد.

بررسی مطالعات نقش برخی متغیرهای دیگر مانند تأثیرات فناوری، نقش اندازه شرکت در اتخاذ تصمیمات/ خرید فناوری، نوآوری شرکت، سطح آمادگی فناوری شرکت، امنیت، اعتماد، تلاش بازاریابی را نیز نشان می‌دهد. همچنین در ارزیابی پیامدهای استفاده از فناوری بر عملکرد مانند پاسخگویی و عملکرد مالی نیز در نظر گرفته می‌شود [۳۹-۴۱]. TAM تقریباً در هر نظریه پذیرش تحقیقات فناوری اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته است و به دلیل استفاده مکرر از آن، کیفیت TAM می‌تواند در خطر باشد، زیرا این امر می‌تواند منجر به درجه‌بندی در زمینه تحقیقاتی شود[۴۲]. محدودیت دیگری که توسط [۳۵] ذکر شد نشان می‌دهد که تحقیقات تجربی نتایج قابل پیش‌بینی یا واضحی ارائه نمی‌دهد و ثابت می‌کند که مدل TAM باید با سایر مدل‌ها و نظریه‌های پذیرش فناوری اطلاعات ترکیب شود.

۲-۳- بررسی مدل فناوری-سازمان-محیط (T-O-E)

چارچوب T-O-E یک چارچوب محبوب با سه محرک است که بر پذیرش سازمانی با درنظرگرفتن عوامل فناوری، سازمان و محیط تأثیر می‌گذارد [۱۹].

چارچوب T-O-E توسط [۴۳] برای پذیرش سازمانی بر اساس تئوری احتمالی سازمان‌ها توسعه داده شد. این چارچوب پیشنهاد می‌کند که یک سازمان باید با محیط و نیازهای محیطی سازگار باشد و قدرت آن توسط عوامل داخلی و خارجی مانند محیط، اندازه سازمان و استراتژی سازمان تعیین می‌شود [۴۴]. سه عامل تعیین‌کننده کلیدی که بر پذیرش سازمانی تأثیر می‌گذارند عبارتند از: فناوری، سازمان و محیط. هنگام تصمیم‌گیری ضروری است، سه عامل تأثیرگذار توسعه فناوری شرایط سازمانی، پیکربندی مجدد تجاری و سازمانی [۳۸] و محیط صنعت [۴۵] بررسی شود.



شکل ۲. مدل پذیرش TOE [۱۹]

۲-۳-۱- زمینه فناوری در مدل TOE

بر اساس مطالعات [۲۰] و [۴۶]، بعد فناوری در چارچوب پذیرش فناوری شامل مجموعه‌ای از متغیرهایی است که پذیرش نوآوری را در سطوح فردی، سازمانی و صنعتی تحت تأثیر قرار می‌دهند. این متغیرها، به ویژگی‌های ذاتی فناوری مورد نظر اشاره دارند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به قابلیت جذب یا پذیرش سیستم، میزان تطبیق‌پذیری و امکان پیروی از آن، درجه پیچیدگی فناوری، مزایای مستقیم و غیرمستقیم ادراک‌شده توسط کاربران، و همچنین فرآیند نرمال‌سازی یا استانداردسازی فناوری در بستر سازمانی اشاره کرد. این عوامل نقش مهمی در ارزیابی آمادگی و تصمیم‌گیری برای پذیرش و پیاده‌سازی نوآوری‌های فناورانه ایفا می‌کنند.

۲-۳-۲- زمینه‌سازمانی در مدل TOE

بر اساس دیدگاه [۲۱] ابعاد مرتبط با زمینه سازمانی شامل عواملی نظیر اندازه سازمان، دامنه فعالیت‌های آن، و باورها یا الزامات قانونی است. همچنین، به گفته [۱۹]، مؤلفه‌های کلیدی زمینه سازمانی که نقش بسزایی در فرآیند پذیرش فناوری ایفا می‌کنند، عبارتند از: منابع مالی، ساختار سازمانی، میزان چابکی سازمان، ظرفیت نوآوری، توانمندی‌های دانشی، قابلیت‌های عملیاتی، و نحوه استفاده استراتژیک از فناوری. علاوه بر این، عواملی همچون میزان اعتماد سازمانی، منابع فناورانه موجود، حمایت مدیریت ارشد، نگرش سازمان نسبت به نوآوری، کیفیت سرمایه انسانی، انباشت دانش سازمانی، تخصص کارکنان، زیرساخت‌های فناورانه، و آمادگی سازمانی نیز از دیگر متغیرهای اثرگذار در این زمینه محسوب می‌شوند. به طور کلی، ظرفیت مالی و شایستگی فناورانه از جمله مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که نشان‌دهنده آمادگی سازمان برای پذیرش و به‌کارگیری نوآوری‌های فناورانه می‌باشند.

۲-۳-۳- زمینه محیطی در مدل TOE

بر اساس دیدگاه [۲۱] بعد محیطی در چارچوب T-O-E به شرایط بیرونی و محیطی‌ای اشاره دارد که شرکت در آن فعالیت می‌کند و عواملی نظیر مشوق‌های دولتی، سیاست‌ها و مقررات حاکم بر صنعت را در بر می‌گیرد. به‌طور مشخص‌تر، [۱۹] بیان می‌کند که این بُعد شامل متغیرهایی مانند شدت رقابت در بازار، نوع و کیفیت روابط با مشتریان، تأمین‌کنندگان و سایر ذی‌نفعان، و همچنین مراحل مختلف چرخه عمر صنعت می‌شود. در این زمینه، متغیرهای مرتبط با رفتار و نیازهای مشتریان نیز از اهمیت بالایی برخوردارند.

به طور خلاصه، چارچوب T-O-E به‌عنوان یکی از چارچوب‌های جامع و پرکاربرد برای تبیین و پیاده‌سازی پذیرش فناوری اطلاعات در سطح سازمانی مطرح شده است [۴۳ و ۴۷]. در نظر گرفتن هم‌زمان ابعاد فناورانه، سازمانی و محیطی، این چارچوب را به ابزاری مؤثر برای تحلیل و تصمیم‌گیری در زمینه پذیرش، تخصیص و بهره‌برداری از نوآوری‌های فناورانه در سازمان‌ها تبدیل کرده است [۱۹].

۲-۳-۴- محدودیت‌ها و نقد چارچوب T-O-E

سازه‌ها و متغیرهای اصلی در چارچوب T-O-E، ذاتاً انعطاف‌پذیر و متأثر از زمینه‌های مختلف هستند و بسته به نوع فناوری، صنعت یا بافت فرهنگی ـ ملی ممکن است تفاوت‌هایی داشته باشند [۴۸]. بر همین اساس، پژوهشگران متعددی از جمله [۴۹ ، ۲۳] و [۵۰] تلاش کرده‌اند تا با افزودن متغیرهای مکملی مانند عوامل جامعه‌شناختی، متغیرهای شناختی، آمادگی فناورانه، توانایی بهره‌برداری مؤثر از سرمایه‌گذاری‌های فناوری اطلاعات از طریق مهارت‌های حرفه‌ای و تجربه‌های تخصصی، و همچنین قابلیت‌های مدیریتی، چارچوب T-O-E را برای تحلیل دقیق‌تر گسترش دهند.

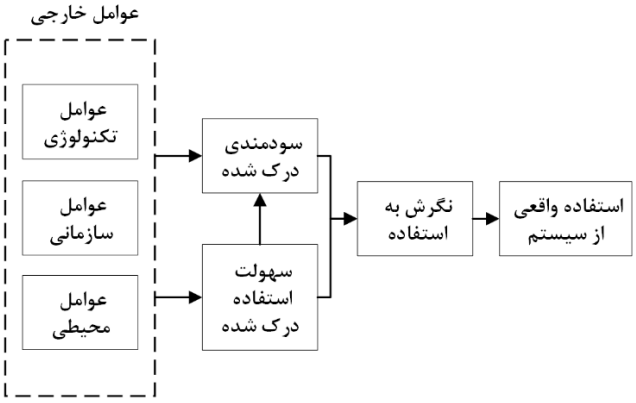
در طول سه دهه گذشته، چارچوب T-O-E در حوزه‌های متنوع فناوری، صنایع مختلف، و زمینه‌های فرهنگی و ملی متعدد به‌کارگرفته‌شده است. این چارچوب توانسته است پذیرش سیستم‌های بی‌سازمانی نظیر تجارت الکترونیک، تبادل الکترونیکی داده‌ها (EDI)، سیستم‌های باز و سیستم‌های سازمانی را به طور اثربخش تبیین کند. در مطالعات تجربی مرتبط با این چارچوب، پژوهشگران همواره با استفاده از ترکیبات متفاوتی از متغیرهای فناورانه، سازمانی و محیطی، تلاش کرده‌اند تا مدل را با مقتضیات خاص هر حوزه تحقیقاتی تطبیق دهند[۱۹].

به‌طورکلی، سه بعد اصلی چارچوب T-O-E تأثیر مستقیمی بر پذیرش فناوری دارند. بااین‌حال، نوع نوآوری موردنظر می‌تواند ترتیب و نقش هر یک از این ابعاد را تغییر دهد. برای مثال، در زمینه پذیرش کسب‌وکار الکترونیکی، یکی از متغیرهای کلیدی در بعد فناورانه «آمادگی فناوری» است. همچنین در بُعد سازمانی، عواملی مانند «اندازه شرکت»، «حوزه فعالیت بین‌المللی» و «منابع مالی» نقش مهمی در تسهیل یا تقویت پذیرش فناوری‌های نوین ایفا می‌کنند [۴۳].

۲-۴- یکپارچه سازی چارچوب TAM و TOE

چارچوب T-O-E (فناوری، سازمان، محیط) بیان می‌دارد که فرایند پذیرش و پیاده‌سازی نوآوری‌های فناورانه تحت‌تأثیر سه دسته از عوامل زمینه‌ای قرار دارد: عوامل فناورانه، ویژگی‌های سازمانی، و شرایط محیطی. زمینه فن آوری نشان‌دهنده فناوری‌های داخلی و خارجی توسط شرکت‌ها است، بافت سازمانی به‌اندازه شرکت، ساختار سازمانی و منابع انسانی اشاره دارد، و بافت محیطی به مؤلفه‌هایی مانند رقابت، شرکا و محیط صنعت می‌نگرد که خارج از کنترل یک شرکت هستند [۵۱].

مدل‌های TAM و T-O-E مکمل یکدیگر هستند؛ چرا که مدل TAM با برخورداری از انعطاف‌پذیری در استفاده از متغیرهای خارجی، قادر است رفتارهای پذیرش فناوری در سطح فردی را تبیین کند، در حالی که مدل T-O-E به شناسایی عوامل فناورانه، سازمانی و محیطی مؤثر بر پذیرش فناوری در سطح سازمانی می‌پردازد. برخی مطالعات پژوهشی، ترکیب مدل‌های TAM و T-O-E را مورد استفاده قرار داده‌اند. به عنوان نمونه [۳۸] با ادغام این دو مدل، پذیرش رایانش ابری را در سطح سازمانی و [۵۲] پذیرش فناوری زنجیره بلوکی در زیرساخت ملی کیفیت (NQI) و [۵۳] پذیرش زنجیره بلوکی در اقتصاد چرخشی را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین در پژوهشی دیگر با هدف توسعه یک چارچوب جامع جهت پذیرش و ادغام فناوری‌های نوظهور در فرآیندهای حسابرسی از یک رویکرد نظری ترکیبی مبتنی بر مدل‌های TAM و TOE بهره‌گیری شده است [۵۴].



شکل ۳. مدل ترکیبی TAM-TOE [۵۱]

۳- روش‌شناسی پژوهش

جامعه آماری این پژوهش شامل کلیه متخصصان حوزه فناوری و کاربران حرفه‌ای فناوری است که علاوه بر آشنایی با مفاهیم مربوط به پذیرش فناوری، در زمینه فناوری زنجیره بلوکی نیز دارای دانش تخصصی و تجربه عملی هستند. باتوجه‌به هدف پژوهش و ویژگی‌های جامعه آماری، از روش نمونه‌گیری هدفمند (Purposeful Sampling) برای انتخاب مشارکت‌کنندگان استفاده شد [۵۵].

در این پژوهش، جهت گردآوری داده‌های کیفی و تخصصی در زمینه شاخص‌های پذیرش فناوری، تیمی متشکل از ۱۵ نفر از خبرگان شامل مدیران و کارشناسان فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT)، پژوهشگران حوزه تحول دیجیتال، و متخصصان فعال در استان تهران تشکیل گردید. برای جمع‌آوری داده‌ها، از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته بهره گرفته شد [۵۶].

در پژوهش‌های کیفی–اکتشافی مبتنی بر قضاوت خبرگان که هدف آن‌ها شناسایی، غربال‌گری و الگویابی مفهومی متغیرهاست، کفایت حجم نمونه نه بر اساس توان آماری، بلکه بر مبنای اشباع مفهومی و هم‌گرایی دیدگاه‌ها سنجیده می‌شود. شواهد روش‌شناختی نشان می‌دهد که اشباع مفهومی معمولاً با دریافت نظرات حدود ۱۲ تا ۱۵ مشارکت‌کننده متخصص حاصل می‌شود و استفاده از ۱۰ تا ۲۰ خبره برای استخراج، پالایش و چارچوب‌سازی مفاهیم در مطالعات خبرگانی کاملاً پذیرفته‌شده است، به‌ویژه زمانی که خبرگان از نظر حوزه تخصصی همگن و دارای تجربه عمیق باشند [۵۷-۵۸، ۵۴].

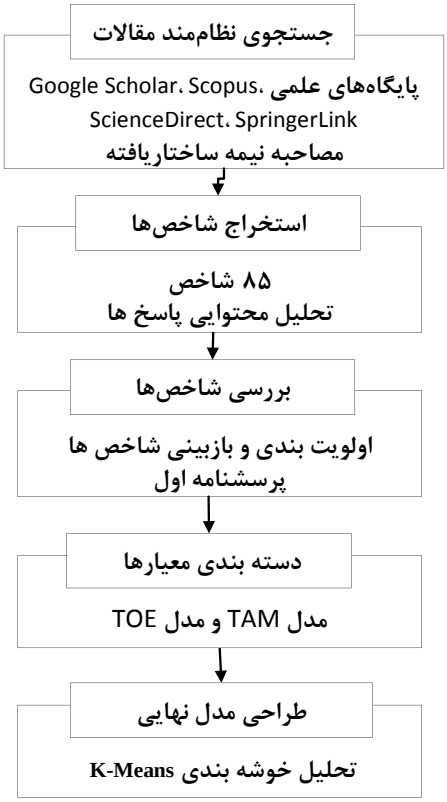
براین‌اساس، به‌کارگیری ۱۵ خبره در پژوهش حاضر، با هدف اعتباربخشی به قضاوت‌های خبرگانی و تأمین کفایت ورودی‌های تحلیل خوشه‌بندی K-means، از منظر روش‌شناسی پژوهش‌های

اکتشافی موجه ارزیابی می‌شود.

در گام نخست، از طریق بررسی منابع علمی و مصاحبه‌های اولیه، ۸۵ معیار اولیه مرتبط با پذیرش فناوری زنجیره بلوکی شناسایی گردید. در جریان مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته، هر یک از معیارها به‌طور جداگانه با مشارکت خبرگان بررسی شده و پاسخ‌ها ثبت گردید. سپس با تحلیل محتوای پاسخ‌ها، واژگان کلیدی استخراج و در قالب جدول توزیع فراوانی کدگذاری شدند.

در ادامه، به‌منظور اولویت‌بندی و دسته‌بندی معیارها، از پرسش‌نامه دومرحله‌ای بهره‌گیری شد. در مرحله نخست، پرسش‌نامه‌ای جهت امتیازدهی به ۸۵ معیار اولیه طراحی و بین خبرگان توزیع گردید. پس از تحلیل نتایج، ۵۳ معیار به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر پذیرش فناوری زنجیره بلوکی انتخاب شدند. در مرحله دوم، پرسشنامه‌ای دیگر برای دسته‌بندی این معیارها بر اساس ابعاد مدل‌های TAM و T-O-E طراحی گردید.

در نهایت، داده‌های حاصل از پرسش‌نامه‌ها با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means تحلیل شدند و مدل نهایی پژوهش بر اساس نتایج خوشه‌بندی و چارچوب نظری تلفیقی TAM و T-O-E ترسیم گردید.



شکل ۴. چارچوب نظری پژوهش

۳-۱- روش خوشه‌بندی K-means

خوشه‌بندی یکی از شاخه‌های داده‌کاوی است و به فرایند تقسیم مجموعه‌ای از داده‌ها (شیءها) به زیردسته‌هایی با مفهوم خوشه گفته می‌شود. یک خوشه، یک سری داده‌های همانند است که مانند یک گروه واحد رفتار می‌کنند. داده‌های خوشه‌بندی‌شده بر پایه اصل بیشترین شباهت میان عضوهای هر دسته و کمترین شباهت میان دسته‌های گوناگون گروه‌بندی می‌شود، یعنی خوشه‌ها به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که شیءهای درون هر خوشه، بیشترین شباهت را با یکدیگر داشته باشد. K-Means به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های خوشه‌بندی، داده‌ها را با حداقل‌سازی واریانس درون خوشه‌ای تقسیم می‌کند و از طریق یک فرایند تکرارشونده بهینه‌سازی، اعضای هر خوشه را به نزدیک‌ترین مرکز تخصیص می‌دهد. این ویژگی موجب می‌شود که الگوریتم در داده‌های بزرگ و پرحجم با هزینه محاسباتی پایین نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر، عملکردی سریع و دقیق داشته باشد [۵۹ ، ۶۰].

روش خوشه‌بندی K-means، داده‌ها را به K گروه مجزا بخش می‌کند. در این الگوریتم باید در آغاز، تعداد K گروه مشخص باشد، سپس خوشه‌بندی انجام شود. الگوریتم K-Means کارایی بالا، سادگی محاسباتی، و قابلیت دسته‌بندی حجم بزرگی از داده‌ها به خوشه‌های مشخص را دارد. این روش در مقایسه با سایر روش‌های خوشه‌بندی، همچون الگوریتم سلسله‌مراتبی، اگرچه از شفافیت و تفسیرپذیری بالایی برخوردار است، بااین‌حال در داده‌های بزرگ کند و پرهزینه عمل می‌کند؛ الگوریتم DBSCAN قابلیت شناسایی خوشه‌های نامنظم و نقاط پرت را دارد، اما به‌شدت وابسته به انتخاب پارامترها است؛ و مدل‌های مخلوط گاوسی (GMM) انعطاف‌پذیری بیشتری در شناسایی خوشه‌های پیچیده ارائه می‌دهند، اما نیازمند محاسبات سنگین‌تری هستند. براین‌اساس، K-Means به‌عنوان گزینه‌ای بهینه برای دسته‌بندی ۵۳ معیار شناسایی‌شده انتخاب گردید، چرا که ضمن حفظ سرعت و سادگی، امکان همسوسازی نتایج با چارچوب نظری مدل ترکیبی TAM-TOE و دستیابی به خوشه‌بندی‌های معنادار و قابل‌اتکا را فراهم می‌کند.

برای تعیین تعداد خوشه‌ها در تحلیل K-Means، معیار تعیین K مبتنی بر ساختار نظری پژوهش انتخاب شد؛ بدین صورت که چارچوب TOE سه بُعد (فناوری، سازمان، محیط) و چارچوب TAM پنج مؤلفه رفتاری (درک سودمندی، درک سهولت استفاده، نگرش، قصد رفتاری و استفاده واقعی) دارد که به‌عنوان خوشه‌های هدف در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین در این پژوهش دو سری خوشه‌بندی جداگانه K=3 و K=5 صورت‌گرفته است.

لازم به توضیح است که تحلیل‌های انجام‌شده ماهیت اکتشافی و طبقه‌بندی مفهومی داشته و خوشه‌بندی معیارها بر اساس شباهت ادراکی خبرگان صورت‌گرفته است؛ بنابراین، مدل نهایی ارائه‌شده، یک چارچوب مفهومی مبتنی بر داده‌های خبرگانی بوده و نباید به‌عنوان مدل علّی آماری تفسیر شود. همچنین الگوریتم K-means در این پژوهش نه برای استنباط آماری، بلکه برای شناسایی الگوی هم‌گرایی قضاوت خبرگان و کاهش پیچیدگی مفهومی به‌کاررفته است.

۴- بحث و بررسی نتایج

این مطالعه TAM و TOE را ادغام می‌کند و مدل TAM-TOE را در طبقه‌بندی معیارهای پذیرش فناوری زنجیره بلوکی مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج مصاحبه نیمه‌ساختاریافته نشان می‌دهد که علاوه بر اینکه خبرگان رابطه درونی قوی میان متغیرهای مدل را همچون ادبیات‌پژوهش تأکید می‌نمایند، بیان می‌نمایند که متغیرها بر تمام عوامل موجود بر مدل TAM مؤثر هستند. نتایج نشان می‌دهد علی‌رغم مدل‌های ترکیبی ارائه شده در مطالعات پیشین این حوزه، متغیرهای خارجی مؤثر بر مدل TAM بر سهولت استفاده درک شده و سودمندی درک شده مؤثر نیستند، و برخی از متغیرها نظیر نگرش و قصد رفتاری استفاده از فناوری در خوشه‌های مرتبط قرار گرفته‌اند. خبرگان بیان داشتند که عوامل خارجی به‌صورت مجزا می‌تواند بر هر یک از متغیرها تأثیر بگذارد و هر عامل خارجی می‌تواند با یک متغیر و یا چند متغیر از مدل مستقیماً در ارتباط باشد.

بنا بر نتایج مطالعات و مصاحبه خبرگان ابتدا پرسش‌نامه عوامل موثر بر پذیرش فناوری شامل ۸۵ معیار طراحی شد و پس از جمع آوری نتایج، ۵۳ معیار به‌عنوان مهمترین معیارهای موثر بر پذیرش فناوری زنجیره بلوکی شناسایی گردید. سپس پرسشنامه دوم که شامل دو بخش، دسته‌بندی معیارها براساس معیارهای فناوری- محیطی- سازمانی و طبقه‌بندی معیارها براساس معیاری که برآن تاثیر می‌گذارند (معیارهای مدل TAM) طراحی و در اختیار متخصصین قرار گرفت. نتایج حاصل از نظرات خبرگان که می‌تواند به عنوان پاسخ به سوال اول پژوهش مبنی بر تعیین معیارهای اصلی پذیرش فناوری زنجیره بلوکی تلقی شود، در جدول ۱ درج شده است و در جدول ۲ نیز عنوان خوشه‌بندی‌های تعیین شده با روش K-means در نرم‌افزار SPSS نشان داده شده است.

جدول ۱. معیارهای موثر بر پذیرش فناوری زنجیره بلوکی

ردیف	معیارها	منبع
۱	پیچیدگی	[38, 44, 46]
۲	حفظ حریم خصوصی	[26, 27]
۳	انتظارات عملکردی پشتیبانی	[26, 40]
۴	آزمایش‌پذیری	[27]
۵	قابلیت مشاهده	[61, 62]
۶	دانش	[19, 21] [25]
۷	شدت رقابت	[19, 51]
۸	کاربری معقول	[26, 40] [21]
۹	سازگاری	[21, 51]
۱۰	فرهنگ	[44]
۱۱	تسهیل وظایف	[26, 40] [21]
۱۲	به‌کارگیری مداوم	[26, 27]
۱۳	تمایل به کاربرد	[14-16]
۱۴	رویه‌های اخلاقی	[14-16]
۱۵	افزایش شفافیت	[23, 24, 26]
۱۶	افشای اطلاعات	[26, 27, 44]
۱۷	منابع انسانی	[19, 51]
۱۸	فشارهای خارجی	[51]
۱۹	افزایش اثربخشی	[5]
۲۰	سهولت کسب مهارت	[40]
۲۱	آموزش آسان	[40, 48, 51]
۲۲	هنجارهای عمومی	[14-16, 61]
۲۳	کاوش داده‌های پیشرفته	[26]
۲۴	تردید برای به‌کارگیری سیستم‌های جدید	[6, 7, 44]
۲۵	بهبود فرایند	[5]
۲۶	دسترسی مداوم	[26, 27]
۲۷	تجربه استفاده مفید و دلپذیر	[5, 61]
۲۸	محدودیت‌های جغرافیایی	[51]
۲۹	اعتماد	[19, 26, 30, 61]
۳۰	سیاست‌های سازمان	[28, 51]
۳۱	سیاست‌های دولت	[21, 51]
۳۲	اندازه سازمان	[21, 44]
۳۳	حمایت مدیریت ارشد	[19, 40, 44]
۳۴	سن سازمان	[19, 51]
۳۵	ساختار سازمان	[19, 51]
۳۶	محدودیت‌های مالی	[19, 43] [25]
۳۷	نفوذ اجتماعی	[14, 16, 61]
۳۸	همکاری	[39]
۳۹	بهبود کیفیت کار	[26, 51]
۴۰	دستیابی به اهداف کار	[4,5]
۴۱	بهبود سرعت اجرای امور	[4, 10, 26]
۴۲	انعطاف‌پذیری	[26, 48]
۴۳	پشتیبانی	[21] [26, 40, 51]
۴۴	امنیت	[26, 27, 61]
۴۵	انطباق با مقررات	[26, 51]
۴۶	تعهد مدیریت	[40, 44]
۴۷	استفاده آسان	[40]
۴۸	آمادگی سازمان	[19, 21]

ردیف	معیارها	منبع
۴۹	تنوع کاربرد	[19]
۵۰	قابلیت اجرای سریع	[19]
۵۱	مدت‌زمان استفاده	[26, 27, 63]
۵۲	عدم قطعیت نظارتی	[26]
۵۳	تعامل‌پذیری	[5, 26]

چنانچه ملاحظه می‌شود در جدول ۳ دسته‌بندی معیارهای پذیرش فناوری زنجیره بلوکی براساس مدل‌های TAM و TOE مورد بررسی قرار گرفته است. در این جداول به ازای کلیه عوامل ۵۳ گانه، دو پارامتر شماره خوشه و فاصله متغیر از مرکز خوشه محاسبه و درج شده است.

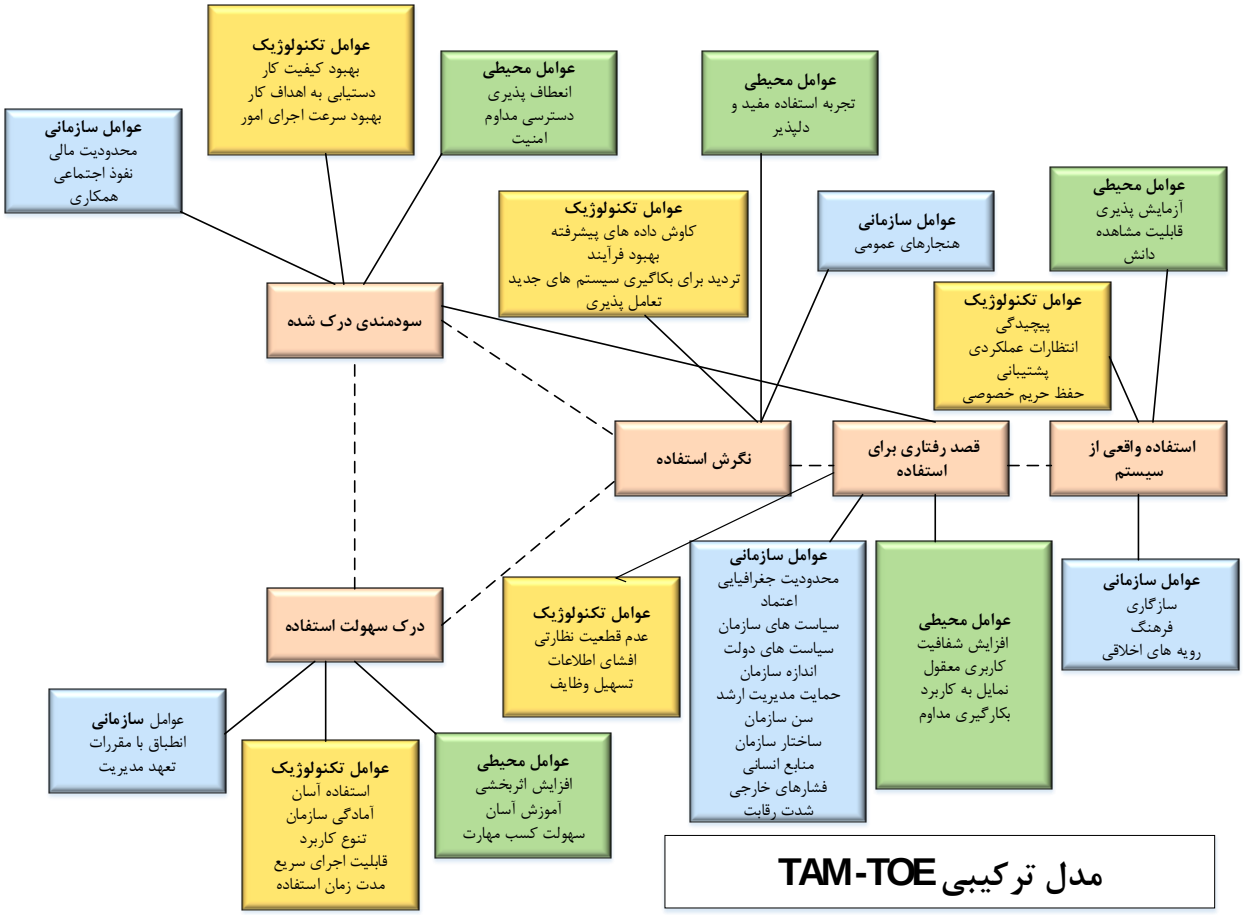
باتوجه‌به نتایج حاصل از پژوهش و دسته‌بندی معیارهای موردمطالعه این پژوهش مدل ترکیبی TAM-TOE به‌صورت شکل ۵ برای پذیرش فناوری پیشنهاد می‌گردد. چنانچه ملاحظه می‌شود در این مدل با استفاده از نتایج بدست آمده در جدول ۳، معیارهای پذیرش فناوری زنجیره بلوکی بر اساس مدل تلفیقی ارائه شده است.

جدول ۲. عنوان خوشه‌بندی‌های بکار گرفته شده

دسته‌بندی بر اساس مدل TAM		دسته‌بندی بر اساس مدل TOE	
۱	سودمندی درک شده	۱	سازمان
۲	درک سهولت استفاده	۲	فناوری
۳	نگرش استفاده	۳	محیط
۴	قصد رفتاری برای استفاده		
۵	استفاده واقعی از سیستم		

جدول ۳. دسته‌بندی معیارهای پذیرش فناوری زنجیره بلوکی براساس مدل‌های TAM و TOE

عضویت متغیرها در خوشه‌بندی K-Means											
دسته‌بندی معیارهای پذیرش فناوری زنجیره بلوکی بر اساس مدل TAM						دسته‌بندی عوامل موثر بر پذیرش فناوری زنجیره بلوکی بر اساس مدل TOE					
شماره متغیر	شماره خوشه	فاصله متغیر از مرکز خوشه	شماره متغیر	شماره خوشه	فاصله متغیر از مرکز خوشه	شماره متغیر	شماره خوشه	فاصله متغیر از مرکز خوشه	شماره متغیر	شماره خوشه	فاصله متغیر از مرکز خوشه
1	4	3.326	28	4	3.628	1	1	1.757	28	2	2.081
2	2	3.466	29	4	3.100	2	3	1.669	29	1	2.426
3	1	2.897	30	1	3.392	3	1	1.444	30	2	1.982
4	4	3.674	31	4	2.972	4	1	1.388	31	2	1.237
5	2	3.689	32	3	3.786	5	3	1.888	32	1	2.647
6	2	3.716	33	2	4.496	6	1	1.735	33	2	2.699
7	1	3.536	34	3	3.416	7	3	2.518	34	1	1.722
8	2	2.100	35	1	2.551	8	3	2.668	35	1	1.722
9	2	3.926	36	4	2.915	9	1	2.515	36	3	1.798
10	4	4.209	37	1	2.820	10	3	2.084	37	3	2.287
11	3	3.786	38	1	3.309	11	3	1.566	38	2	2.174
12	4	4.301	39	1	4.090	12	3	1.702	39	2	2.632
13	4	3.793	40	4	3.027	13	3	1.669	40	2	1.459
14	1	3.852	41	5	3.681	14	3	1.456	41	1	1.813
15	2	3.607	42	5	4.165	15	1	2.084	42	1	1.283
16	2	3.318	43	2	3.770	16	1	1.888	43	2	1.023
17	5	2.748	44	4	2.676	17	2	2.516	44	2	1.766
18	5	4.093	45	5	2.133	18	1	2.459	45	2	1.153
19	5	4.260	46	4	2.718	19	3	3.075	46	1	2.351
20	5	2.598	47	3	3.162	20	3	1.251	47	2	1.153
21	2	2.283	48	3	2.646	21	1	1.734	48	1	1.802
22	4	2.460	49	4	2.147	22	2	1.734	49	2	1.712
23	4	4.916	50	5	3.762	23	2	1.219	50	3	2.213
24	4	3.223	51	3	3.830	24	2	1.267	51	1	2.201
25	4	2.483	52	5	1.775	25	2	1.219	52	2	1.459
26	4	2.818	53	5	1.245	26	2	1.267	53	1	1.951
27	4	2.198				27	2	2.594			



شکل ۵. چارچوب مفهومی دسته‌بندی معیارهای پذیرش زنجیره بلوکی و مدل پذیرش فناوری ترکیبی TAM-TOE

(روابط نمایش‌داده‌شده بیانگر دسته‌بندی مفهومی و هم‌جواری معیارها بوده و نشان‌دهنده روابط علّی آزمون شده نیستند)

در مدل ارائه شده به‌ازای هر یک از بخش‌های مدل TAM سه گروه از عوامل موثر بر استفاده از فناوری زنجیره بلوکی در قالب عوامل سازمانی (با کد رنگ آبی)، عوامل فناورانه (با کد رنگ زرد) و عوامل محیطی (با کد رنگ سبز) وجود دارند.

یافته‌های این پژوهش با بهره‌گیری از مدل ترکیبی TAM-TOE، چارچوبی تلفیقی برای تحلیل‌پذیرش فناوری فراهم می‌آورد که در آن مؤلفه‌های رفتاری مرتبط با مدل پذیرش فناوری (TAM) به‌صورت پویا تحت‌تأثیر ابعاد سازمانی، فنی و محیطی مدل TOE قرار می‌گیرند. این رویکرد تحلیلی چندبعدی، امکان تبیین پویایی‌های پیچیده تصمیم‌گیری کاربران سازمانی را فراهم کرده و ابعاد تسهیل‌گر و بازدارنده مرتبط با هر یک از مؤلفه‌های کلیدی پذیرش فناوری را با دقت قابل‌توجهی شناسایی می‌کند.

در مؤلفه سودمندی درک شده، عوامل فناورانه نظیر بهبود کیفیت کار، افزایش سرعت اجرا و تسهیل تحقق اهداف کاری، به‌عنوان پیشران‌های اصلی اثربخشی فناوری شناسایی شدند. این مؤلفه‌ها با ارائه ارزش افزوده عملیاتی و بهره‌وری، نقش بسزایی در شکل‌گیری ادراک سودمندی ایفا می‌کنند. هم‌زمان، بعد سازمانی از طریق هم‌افزایی بین واحدی و تأثیرگذاری نفوذ اجتماعی، بستری برای تقویت این ادراک فراهم کرده است، اگرچه محدودیت‌های مالی می‌تواند به‌عنوان عاملی بازدارنده در توسعه این ادراک عمل کند. ازسوی‌دیگر، انعطاف‌پذیری سیستم، امنیت اطلاعات و دسترسی‌پذیری بالا در بعد محیطی، زمینه‌ای برای ارتقای اعتماد و پذیرش فراهم کرده‌اند که در نهایت بر درک سودمندی کاربران اثرگذار بوده است.

در مؤلفه درک سهولت استفاده، عناصر فناورانه نظیر استفاده آسان (طراحی کاربرپسند)، تنوع عملکردها، زمان‌بندی اجرای سریع و آمادگی سازمان، نقشی تعیین‌کننده در کاهش موانع ادراکی استفاده از فناوری ایفا می‌کنند. بعد سازمانی نیز با تعهد مدیریت سازمان و هم‌راستایی مقرراتی، شرایط سازمانی مساعدی را برای کاهش مقاومت در برابر تغییر ایجاد می‌کند. در بعد محیطی، وجود فرصت‌های آموزشی، اثربخشی بالا و امکان یادگیری سریع

مهارت‌های لازم به‌عنوان عوامل تسهیل‌کننده تجربه یادگیری و استفاده اولیه از فناوری جدید عمل می‌کنند.

در مؤلفه نگرش به استفاده، نقش ابعاد فناورانه بارزتر است؛ به‌طوری که توانمندی‌های تحلیلی سیستم، ارتقای فرایندهای موجود و تجربیات عملکردی مثبت، نگرش کاربران را نسبت به مفیدبودن و کارآمدی فناوری بهبود می‌دهد. بااین‌حال، تردید نسبت به پذیرش فناوری‌های جدید به‌عنوان یک عامل بازدارنده در این بعد عمل می‌کند. هنجارهای عمومی درون‌سازمانی نیز به‌عنوان سازوکارهای مشروع‌سازی فناوری، نگرش کاربران را با یکدیگر همسو می‌سازد. در بعد محیطی نیز تجربه مفید و دلپذیر استفاده از فناوری، به‌ویژه از طریق یادگیری مشاهده‌ای و مقایسه‌های بین سازمانی، نگرش‌ها را به سمت پذیرش سریع‌تر سوق می‌دهد.

در مؤلفه قصد رفتاری برای استفاده، عوامل سازمانی و نهادی بیشترین تأثیر را نشان می‌دهند. حمایت مدیریت ارشد، ساختار سازمانی منسجم، سیاست‌های تطبیقی و سرمایه انسانی توانمند همگی به‌عنوان پیشران‌های تصمیم به استفاده مطرح هستند. از سوی دیگر، عواملی چون محدودیت‌های جغرافیایی، سیاست‌های سخت‌گیرانه یا سن بالای سازمان ممکن است تمایلات رفتاری را محدود کنند. در بعد فناورانه، تسهیل انجام وظایف و کاهش عدم قطعیت اطلاعاتی به افزایش قصد استفاده کمک می‌کنند، اما نگرانی‌هایی نظیر افشای داده‌ها یا عدم شفافیت نظارتی می‌توانند مانع شکل‌گیری قصد رفتار مؤثر شوند. در بعد محیطی نیز افزایش شفافیت عملکردی، سادگی در کاربرد و تجربه کاربرد مداوم نقش مهمی در تقویت انگیزش رفتاری کاربران ایفا کرده‌اند.

در نهایت، در مؤلفه استفاده واقعی از سیستم، مجموعه‌ای از عوامل هم‌راستا در سه بعد مدل TOE منجر به تثبیت رفتارهای فناورانه شده‌اند. در بعد سازمانی، سازگاری فناوری با فرهنگ و رویه‌های اخلاقی سازمان، زمینه‌ساز نهادینه‌سازی استفاده از سیستم بوده است. بعد فناورانه از طریق برآورده ساختن انتظارات عملکردی، ارائه پشتیبانی فنی مؤثر و رعایت حریم خصوصی کاربران، تداوم استفاده را تقویت می‌بخشد. همچنین در بعد محیطی، آزمایش‌پذیری فناوری، امکان مشاهده نتایج در عمل و دسترسی به دانش فنی، به درونی‌سازی کاربرد سیستم در فعالیت‌های روزمره سازمانی منجر خواهد شد.

لذا مدل TAM-TOE نشان می‌دهد که پذیرش فناوری، تنها یک فرایند فردی یا فنی نیست، بلکه درون ساختی سازمانی - اجتماعی است که تحت‌تأثیر ساختار نهادی، پیچیدگی‌های فناورانه و پویایی‌های محیطی شکل می‌گیرد. این یافته‌ها نه‌تنها در راستای تقویت اعتبار بیرونی مدل‌های نظری پذیرش فناوری قرار دارند، بلکه از منظر سیاست‌گذاری سازمانی، ارائه‌دهنده خطوط راهبردی برای طراحی مداخلات مبتنی بر زمینه هستند.

نتایج این پژوهش یک چارچوب مفهومی اکتشافی ارائه می‌دهد و آزمون آماری روابط علّی به مطالعات آتی با نمونه‌های بزرگ‌تر موکول می‌شود.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مدل پذیرش فناوری (TAM) یکی از نظریه‌های تأثیرگذار در حوزه فناوری اطلاعات محسوب می‌شود که به طور گسترده در مطالعات تجربی مورداستفاده قرار گرفته است. این مدل با تمرکز بر دو مؤلفه اصلی یعنی سودمندی درک شده (PU) و سهولت استفاده درک شده(PEOU) ، سعی در تبیین دلایل رفتاری کاربران برای پذیرش یک سیستم فناوری دارد. باوجود موفقیت گسترده این مدل در کاربردهای متنوع، محدودیت آن در درک عوامل عمیق‌تر و زمینه‌ای مرتبط با پذیرش فناوری، منجر به نیاز به توسعه و ترکیب آن با سایر مدل‌ها شده است.

در همین راستا، چارچوب فناوری - سازمان - محیط (T-O-E) به‌عنوان یک مدل مکمل معرفی شده است که پذیرش فناوری را از سه بعد کلان فناوری، سازمانی، و محیطی بررسی می‌کند. در این مطالعه، با هدف شناسایی و دسته‌بندی عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری زنجیره بلوکی، یک مدل ترکیبی TAM-TOE توسعه داده شد. در این چارچوب، ۵۳ شاخص مؤثر بر پذیرش فناوری شناسایی گردید که از طریق ترکیب این دو مدل در سه حوزه اصلی طبقه‌بندی شدند.

نتایج نشان داد که متغیرهای مدل TAM، به‌ویژه PU و PEOU، تحت‌تأثیر عوامل مختلفی در حوزه‌های فناوری، سازمانی و محیطی قرار دارند. این ترکیب به طور قابل‌توجهی توانست محدودیت‌های مدل TAM را در زمینه تبیین کامل رفتار پذیرش کاهش دهد. ازسوی‌دیگر، ضعف مدل TOE در نادیده‌گرفتن جنبه‌های شناختی و رفتاری کاربران نیز با تلفیق مؤلفه‌های TAM پوشش داده شد.

در زمینه پذیرش فناوری زنجیره بلوکی، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در سطح فناوری تنوع کاربرد فناوری، بهبود کیفیت کار از نمونه عواملی هستند که نقش حیاتی در شکل‌گیری ادراک کاربران ایفا می‌کنند. در سطح سازمانی، عواملی چون حمایت مدیریتی، موقعیت سازمان و فرهنگ پذیرش نوآوری اهمیت دارد. همچنین، عوامل محیطی نظیر دسترسی مداوم، شفافیت، تجربه کاربری دلپذیر نقش کلیدی در تسریع یا کندشدن پذیرش زنجیره

بلوکی دارند.

لازم به ذکر است از بعد کاربرد نتایج پژوهش، مدل ترکیبی TAM-TOE با ادغام مؤلفه‌های رفتاری مرتبط با مدل پذیرش فناوری (TAM) و ابعاد سازمانی، فناورانه و محیطی مدل(TOE)، چارچوبی جامع و چندبعدی برای تحلیل و ارزیابی آمادگی سازمان‌ها در پذیرش فناوری زنجیره بلوکی فراهم می‌آورد. این مدل نه‌تنها امکان شناسایی پیشران‌ها و موانع پذیرش را در سطح فردی و فنی مهیا می‌سازد، بلکه ابعاد سازمانی و محیطی را نیز به‌عنوان عوامل اثرگذار در نظر می‌گیرد و بدین ترتیب تصویری واقع‌بینانه و تصمیم یار برای مدیران ترسیم می‌کند.

به‌عنوان‌مثال از منظر سازمانی، مدل نشان می‌دهد که موفقیت در پذیرش زنجیره بلوکی وابسته به حمایت مدیریت ارشد، سرمایه انسانی توانمند، ساختار سازمانی منسجم و هم‌راستایی مقرراتی است. این عوامل می‌توانند به مدیران در شناسایی نقاط ضعف داخلی همچون کمبود مهارت‌ها یا مقاومت فرهنگی کمک کنند. از بعد فناورانه، سطح کاربرپسندی، امنیت، قابلیت اطمینان و ارزش افزوده عملیاتی به‌عنوان معیارهای کلیدی ارزیابی می‌شوند. در بعد محیطی نیز فشارهای نهادی، رقابت بین سازمانی و فرصت‌های آموزشی نقش تعیین‌کننده‌ای در تسهیل یا بازدارندگی فرایند پذیرش دارند.

بنابراین، سازمان‌ها می‌توانند با استفاده از این مدل نقشه راه پذیرش فناوری را ترسیم کرده، سیاست‌های داخلی همچون آموزش کارکنان و سرمایه‌گذاری فناورانه را هدفمند سازند و هم‌راستایی بیشتری با الزامات قانونی و روندهای بازار برقرار کنند. در نهایت، یافته‌ها نشان می‌دهد که پذیرش پایدار زنجیره بلوکی نیازمند هم‌افزایی میان ابعاد سازمانی، فنی و محیطی است و تمرکز یک‌جانبه بر یک بعد، تنها به پذیرش سطحی و کوتاه‌مدت منجر خواهد شد.

این پژوهش یک مدل مفهومی اکتشافی ارائه می‌کند و اعتبارسنجی آماری روابط علّی میان سازه‌ها نیازمند مطالعات آتی با نمونه‌های بزرگ‌تر و روش‌های مدل‌یابی ساختاری است.

۶- پیشنهادات آتی

مدل پیشنهادی TAM-TOE با ایجاد یک دیدگاه چندبعدی، ابزاری توانمند برای تحلیل جامع‌تر پذیرش زنجیره بلوکی در سطوح مختلف فردی، سازمانی و کلان فراهم می‌کند. بااین‌حال، محدودیت‌های تحقیق از جمله تمرکز جغرافیایی محدود و عدم لحاظ کامل عوامل فرهنگی و روان‌شناختی کاربران باید در نظر گرفته شود؛ لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از نمونه‌گیری وسیع‌تر ملی و بین‌المللی بهره‌گیری شده و متغیرهایی مانند نگرش‌های فرهنگی، سواد دیجیتال، و اعتماد به فناوری به مدل افزوده شود.

همچنین به‌کارگیری رویکردهای ترکیبی کمی و کیفی (Mixed-Methods) می‌تواند به درک عمیق‌تری از فرایندهای ذهنی و زمینه‌ای پذیرش فناوری زنجیره بلوکی کمک کند.

مدل ترکیبی پیشنهادی TAM-TOE به دلیل ماهیت تلفیقی و چندبعدی خود، از ظرفیت بالایی برای توسعه و انطباق با فناوری‌های نوین همچون هوش مصنوعی، متاورس و اینترنت اشیاء برخوردار است؛ چراکه ابعاد سه‌گانه فناوری، سازمان و محیط در مدل TOE به طور پویا امکان دربرگیری ویژگی‌ها و الزامات جدید را فراهم می‌سازند و هم‌زمان، مؤلفه‌های رفتاری مدل TAM می‌توانند نگرش، قصد رفتاری و استفاده واقعی کاربران از فناوری‌های نوظهور را تبیین نمایند. بااین‌حال، ورود فناوری‌های پیشرفته با ویژگی‌های منحصربه‌فرد همچون خودمختاری تصمیم‌گیری در هوش مصنوعی، ماهیت اجتماعی - مجازی متاورس، یا پیوند گسترده میان دستگاه‌ها در اینترنت اشیاء، نیازمند بازنگری در برخی شاخص‌های موجود و افزودن متغیرهای خاص به موضوع است؛ بنابراین علی‌رغم اینکه مدل TAM-TOE اساساً انعطاف‌پذیر و توسعه‌پذیر است، اما برای پوشش کامل پیچیدگی‌های فناوری‌های آینده نیازمند بازتعریف و به‌روزرسانی مستمر شاخص‌ها خواهد بود و پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آتی این مدل در زمینه‌های دیگر نیز بررسی گردد.

مراجع

[1] Taherdoost, H. Blockchain Innovations, Applications, and Future Prospects. *Electronics* 2024, *13*, 422. https://doi.org/10.3390/electronics13020422.

[2] U. Farooq, K. Shahzad, Z. Guan, and A. Rauf, “Unlocking the potential of blockchain technology in China’s supply chain: a survey of industry professionals,” Journal of Entrepreneurship and Public Policy, vol. 13, no. 2, pp. 333–356, 2024. 2

[3] M. Ghaly, E. Elbeltagi, A. Elsmadony, and M. A. Tantawy, “Integration of Blockchain-Enabled smart contracts in construction: SWOT framework and social network analysis,” *Civil Engineering Journal*, vol. 10, no. 5, pp. 1662–1697, 2024. 4

[4] N. Kshetri, "1 Blockchain’s roles in meeting key supply chain management objectives," *International Journal of information management*, vol. 39, pp. 80-89, 2018.

[5] M. Iansiti and K. R. Lakhani, "The truth about blockchain," *Harvard business review*, vol. 95, no. 1, pp. 118-127, 2017.

[6] K. R. Lakhani, & McAfee, A. , "What Every CEO Needs to Know About the Cloud," *Harvard Business Review*, 2011.: https://www.researchgate.net/publication/293431811_What_every_CEO_needs_to_know_about_the_cloud.

[7] M. C. Lacity, "Addressing key challenges to making enterprise blockchain applications a reality," *MIS Q. Executive*, vol. 17, no. 3, p. 3, 2018.

[8] C. Boonmee, J. Mangkalakeeree, and Y. Jeong, “Towards sustainable digital transformation: AI adoption barriers and enablers

(TAM)," *International Journal Of Finance & Managerial Accounting*, vol. 6, no. 22, pp. 155-171, 2021.

[27] J. M. Woodside, F. K. Augustine Jr, and W. Giberson, "Blockchain technology adoption status and strategies," *Journal of International Technology and Information Management*, vol. 26, no. 2, pp. 65-93, 2017.

[28] T. Clohessy and T. Acton, "Investigating the influence of organizational factors on blockchain adoption: An innovation theory perspective," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 119, no. 7, pp. 1457-1491, 2019.

[29] S. ShafeeN, "E-learning Technology Acceptance Model with cultural factors. Liverpool John Moores University: School of Computing and Mathematical Sciences," MSc Dissertation, April, 2011.

[30] P. A. Pavlou, "Consumer acceptance of electronic commerce: Integrating trust and risk with the technology acceptance model," *International journal of electronic commerce*, vol. 7, no. 3, pp. 101-134, 2003.

[31] T. Pikkarainen, K. Pikkarainen, H. Karjaluoto, and S. Pahnila, "Consumer acceptance of online banking: an extension of the technology acceptance model," *Internet research*, vol. 14, no. 3, pp. 224-235, 2004.

[32] M. Ervasti and H. Helaakoski, "Case study of application-based mobile service acceptance and development in Finland," *International Journal of Information Technology and Management*, vol. 9, no. 3, pp. 243-259, 2010.

[33] G. Müller-Seitz, K. Dautzenberg, U. Creusen, and C. Stromereder, "Customer acceptance of RFID technology: Evidence from the German electronic retail sector," *Journal of retailing and consumer services*, vol. 16, no. 1, pp. 31-39, 2009.

[34] V. Kumar, S. Kumar, A. Mewada, and S. Akhtar, "Understanding blockchain technology adoption in human resource management: A technology acceptance model (TAM) approach," in Applications of Blockchain Technology, Chapman and Hall/CRC, 2025, pp. 35–46.

[35] O. Ukoha, H. O. Awa, C. A. Nwuche, I. F. Asiegbu, and E. Cohen, "Analysis of Explanatory and Predictive Architectures and the Relevance in Explaining the Adoption of IT in SMEs," *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge & Management*, vol. 6, 2011.

[36] I. Troshani, C. Jerram, and S. Rao Hill, "Exploring the public sector adoption of HRIS," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 111, no. 3, pp. 470-488, 2011.

[37] H.-d. Yang and Y. Yoo, "It's all about attitude: revisiting the technology acceptance model," *Decision support systems*, vol. 38, no. 1, pp. 19-31, 2004.

[38] K. Zhu, K. L. Kraemer, and S. Xu, "The process of e-business assimilation in organizations: A technology diffusion perspective," *Management Science*, vol. 52, no. 10, pp. 1557-1576, 2006.

[39] L. Raymond, F. Bergeron, and S. Blili, "The assimilation of E-business in manufacturing SMEs: Determinants and effects on growth and internationalization," *Electronic Markets*, vol. 15, no. 2, pp. 106-118, 2005.

[40] N. Schillewaert, M. J. Ahearne, R. T. Frambach, and R. K. Moenaert, "The adoption of information technology in the sales force," *Industrial marketing management*, vol. 34, no. 4, pp. 323-336, 2005.

[41] W.-W. Wu, "Developing an explorative model for SaaS adoption," *Expert systems with applications*, vol. 38, no. 12, pp. 15057-15064, 2011.

[42] M. D. Williams, Y. K. Dwivedi, B. Lal, and A. Schwarz, "Contemporary trends and issues in IT adoption and diffusion research," *Journal of Information Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 1-10, 2009.

among SMEs in Northern Thailand," Sustainable Futures, vol. 10, p. 101169, 2025.

[9] E. Asante Boakye, H. Zhao, B. N. Kwame Ahia, and M. Adu-Damoah, "Modeling the adoption enablers of blockchain technology–based supply chain financing: an integrative dual DOI–TOE analysis," Journal of the International Council for Small Business, pp. 1–22, 2025.

[10] S. Gaehtgens, & Allan, A, "Trust and the evolution of digital business ecosystems," *Gartner Research*, 2017.

[11] F. R. Edwards and F. S. Mishkin, "The decline of traditional banking: Implications for financial stabilityand regulatory policy," ed: National Bureau of Economic Research Cambridge, Mass., USA, 1995.

[12] M. O. Akintunde and H. O. Amuda, "Predictors of adoption of blockchain technology by academic libraries in Nigeria," Library Hi Tech, vol. 43, no. 4–5, pp. 1273–1291, 2025.

[13] H. Wu, W. Zhong, B. Zhong, H. Li, J. Guo, and I. Mehmood, "Barrier identification, analysis and solutions of blockchain adoption in construction: a fuzzy DEMATEL and TOE integrated method," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 32, no. 1, pp. 409–426, 2025.

[14] H. Taherdoost, "A review of technology acceptance and adoption models and theories," *Procedia manufacturing*, vol. 22, pp. 960-967, 2018.

[15] H. Taherdoost, "A critical review of blockchain acceptance models—blockchain technology adoption frameworks and applications," *Computers*, vol. 11, no. 2, p. 24, 2022.

[16] H. Taherdoost and M. Masrom, "An examination of smart card technology acceptance using adoption model," in *Proceedings of the ITI 2009 31st international conference on information technology interfaces*, 2009: IEEE, pp. 329-334.

[17] F. D. Davis, "Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology," *MIS quarterly*, pp. 319-340, 1989.

[18] C. Low, Y. Chen, and M. Wu, "Understanding the determinants of cloud computing adoption," *Industrial management & data systems*, vol. 111, no. 7, pp. 1006-1023, 2011.

[19] J. D. Bryan and T. Zuva, "A review on TAM and TOE framework progression and how these models integrate," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 137-145, 2021.

[20] K. Zhu, K. L. Kraemer, V. Gurbaxani, and S. X. Xu, "Migration to open-standard interorganizational systems: Network effects, switching costs, and path dependency," *MIS quarterly*, pp. 515-539, 2006.

[21] M. Intan Salwani, G. Marthandan, M. Daud Norzaidi, and S. Choy Chong, "E-commerce usage and business performance in the Malaysian tourism sector: empirical analysis," *Information management & computer security*, vol. 17, no. 2, pp. 166-185, 2009.

[22] J. Xu, "Research on application of BIM 5D technology in central grand project," *Procedia engineering*, vol. 174, pp. 600-610, 2017.

[23] H. O. Awa, O. U. Ojiabo, and B. C. Emecheta, "Integrating TAM, TPB and TOE frameworks and expanding their characteristic constructs for e-commerce adoption by SMEs," *Journal of Science & Technology Policy Management*, vol. 6, no. 1, pp. 76-94, 2015.

[24] C. Carnaghan and K. Klassen, "Exploring the determinants of web-based e-business evolution in Canada," 2007.

[25] S. Almekhlafi and N. Al-Shaibany, "The literature review of blockchain adoption," *Asian Journal of Research in Computer Science*, vol. 7, no. 2, pp. 29-50, 2021.

[26] S. A. Borhani, J. Babajani, I. Raeesi Vanani, S. Sheri Anaqiz, and M. Jamaliyanpour, "Adopting blockchain technology to improve financial reporting by using the technology acceptance model

Identification of influencing factors using an integrated TOE-TAM model," Sustainability, vol. 16, no. 24, p. 10817, 2024.

[54] Ntoyanto Ceki, Babalwa & Moloi, Tankiso. (2025). Technology Adoption Framework for Supreme Audit Institutions Within the Hybrid TAM and TOE Model. Journal of Risk and Financial Management. 18. 409.

[55] L. A. Palinkas, S. M. Horwitz, C. A. Green, J. P. Wisdom, N. Duan, and K. Hoagwood, "Purposeful sampling for qualitative data collection and analysis in mixed method implementation research," *Administration and policy in mental health and mental health services research,* vol. 42, pp. 533-544, 2015.

[56] H. Kallio, A. M. Pietilä, M. Johnson, and M. Kangasniemi, "Systematic methodological review: developing a framework for a qualitative semi-structured interview guide," *Journal of advanced nursing,* vol. 72, no. 12, pp. 2954-2965, 2016.

[57] Guest, G., Bunce, A., & Johnson, L. (2006). How Many Interviews Are Enough? An Experiment with Data Saturation and Variability. Field Methods, 18(1), 59–82 .

[58] Creswell, J. W. (2014). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches (4th ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.

[59] S. S. Chawathe, "Clustering blockchain data," Clustering Methods for Big Data Analytics: Techniques, Toolboxes and Applications, pp. 43-72, 2019.

[60] E. U. Oti, M. O. Olusola, F. C. Eze, and S. U. Enogwe, "Comprehensive review of K-Means clustering algorithms," *criterion,* vol. 12, pp. 22-23, 2021.

[61] E. Pantano and L. Di Pietro, "Understanding consumer's acceptance of technology-based innovations in retailing," *Journal of tech*nology management & innovation, vol. 7, no. 4, pp. 1-19, 2012.

[62] M. Yektai, & Ranjbarnoshari, A. , "model for cloud computing adoption in IT outsourcing.," Journal of Future Studies in Management (Management Researches), 2016. [Online]. Available: https://sid.ir/paper/204257/en (Note: Original article in Persian).

[63] C. Lazim, N. D. B. Ismail, and M. Tazilah, "Application of technology acceptance model (TAM) towards online learning during covid-19 pandemic: Accounting students perspective," International Journal of Business, Economics and Law, vol. 24, no. 1, pp. 13-20, 2021.

[43] S. Xu, K. Zhu, and J. Gibbs, "Global technology, local adoption: A Cross-Country investigation of internet adoption by companies in the United States and China," *Electronic markets,* vol. 14, no. 1, pp. 13-24, 2004.

[44] T. S. Teo, S. Lin, and K.-h. Lai, "Adopters and non-adopters of e-procurement in Singapore: An empirical study," *Omega,* vol. 37, no. 5, pp. 972-987, 2009.

[45] I. Arpaci, Y. C. Yardimci, S. Ozkan, and O. Turetken, "Organizational adoption of information technologies: A literature review," *International Journal of ebusiness and egovernment Studies,* vol. 4, no. 2, pp. 37-50, 2012.

[46] M.-J. Pan and W.-Y. Jang, "Determinants of the adoption of enterprise resource planning within the technology-organization-environment framework: Taiwan's communications industry," *Journal of Computer information systems,* vol. 48, no. 3, pp. 94-102, 2008.

[47] Y. Teng, K. C. Shang, H. C. Wang, S. Y. Kuo, and C. S. Lu, "The implementation of blockchain adoption in China's manufacturing industry: the technology organization environment (TOE) method," Humanities and Social Sciences Communications, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2025.

[48] Y.-M. Wang, Y.-S. Wang, and Y.-F. Yang, "Understanding the determinants of RFID adoption in the manufacturing industry," *Technological forecasting and social change,* vol. 77, no. 5, pp. 803-815, 2010.

[49] K.-W. Wen and Y. Chen, "E-business value creation in Small and Medium Enterprises: a US study using the TOE framework," *International Journal of Electronic Business,* vol. 8, no. 1, pp. 80-100, 2010.

[50] T. Oliveira and M. F. Martins, "Literature review of information technology adoption models at firm level," *Electronic journal of information systems evaluation,* vol. 14, no. 1, pp. pp110-121-pp110-121, 2011.

[51] X. Qin, Y. Shi, K. Lyu, and Y. Mo, "Using a TAM-TOE model to explore factors of Building Information Modelling (BIM) adoption in the construction industry," 2020.

[52] A. Legesse, B. Beshah, E. Berhan, and E. Tesfaye, "Exploring the influencing factors of blockchain technology adoption in national quality infrastructure: a Dual-Stage structural equation model and artificial neural network approach using TAM-TOE framework," Cogent Engineering, vol. 11, no. 1, p. 2369220, 2024.

[53] J. Chen, A. Q. Abdul-Hamid, and S. Zailani, "Blockchain adoption for a circular economy in the Chinese automotive industry:

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۶۵ الی ۱۷۷

7-PORT Non-blocking Optical Router Design and Efficient Routing Algorithm in 3D Mesh Optical Network on Chip

Sanaz Asadinia[1]*, Elham Yaghoubi[2], Mostafa Sadeghi[3]

[1]Department of Computer Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Esfahan, Iran

[2]Department of Computer Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

[3]Department of Computer Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Esfahan, Iran

Received: 10 August 2025, Revised: 03 November 2025, Accepted: 10 February 2026
Paper type: Research

Abstract

In recent years, three-dimensional Networks-on-Chip (3D NoCs) have been recognized as an effective solution to overcome the bandwidth limitations of electrical interconnects in multi-core processors. The adoption of optical communication technologies in these networks has significantly enhanced the performance of multi-core architectures. In 3D Optical NoC structures, 4-port and 5-port routers are typically deployed at the network corners, while 6-port and 7-port routers are employed for data transmission across the network. In this paper, we propose a non-blocking 7-port optical router based on microring resonators. The proposed router achieves substantial reductions in power consumption and energy loss by minimizing the number of optical switching elements. Furthermore, a novel routing algorithm is introduced, aiming to determine the optimal data path while reducing energy dissipation and power consumption for 3D Optical NoCs. This algorithm is implemented on the proposed router and dynamically selects the most efficient path between the source and destination processing cores by leveraging the router's architecture and rotational models, ensuring minimal energy and power usage compared to other available paths. The evaluation of energy loss and power consumption parameters has been conducted through simulations on the Omnet++ platform. The obtained results demonstrate that the proposed design significantly improves the performance of 3D Optical NoCs compared to existing architectures.

Keywords: 3D Optical Network-on-Chip (3D ONoC), Optical Router, Microring Resonator, Insertion Loss, Power Consumption.

* Corresponding Author's email: sanazasadinia@iau.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۶۵ الی ۱۷۷

طراحی روتر نوری غیربلاک هفت پورت و ارائه الگوریتم مسیریابی موثر در شبکه بر تراشه نوری سه بعدی

ساناز اسدی‌نیا[۱*]، الهام یعقوبی[۲]، مصطفی صادقی[۳]

[۱] دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد اصفهان، دانشگاه آزاد اصفهان، اصفهان، ایران

[۲] دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد نجف آباد، اصفهان، ایران

[۳] دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد اصفهان ، دانشگاه آزاد اصفهان ، اصفهان ، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

شبکه بر تراشه‌های سه بعدی در سال‌های اخیر، به‌عنوان یک راه حل بهینه برای غلبه بر محدودیت پهنای باند اتصالات الکتریکی در پردازنده‌های چندهسته‌ای مورد توجه محققان قرار گرفته است. استفاده از تکنولوژی ارتباطات نوری در این شبکه‌ها، در معماری‌های چند هسته‌ای افزایش کارایی را بهمراه داشته است. در ساختار شبکه‌های نوری روی تراشه سه بعدی از روترهای ۴ و ۵ پورت در گوشه‌های شبکه نوری و برای انتقال داده‌ها در این نوع شبکه از روترهای ۶ و ۷ پورت استفاده می‌شود. در این مقاله، روتر نوری غیرانسدادی ۷ پورت مبتنی بر ریزحلقه تشدیدگر ارائه شده است. روتر پیشنهادی توانسته است با کاهش تعداد عناصر سوییچینگ نوری، توان مصرفی و اتلاف انرژی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. همچنین در این مقاله یک الگوریتم مسیریابی جدید با هدف یافتن بهترین مسیر با در نظر گرفتن کاهش اتلاف انرژی و توان مصرفی برای شبکه بر تراشه‌های نوری سه بعدی پیشنهاد شده است. این الگوریتم بر روی روتر پیشنهادی اجرا شده است که می‌تواند بهترین مسیر میان هسته‌های پردازشی مبدا و مقصد را با توجه به معماری روتر نوری پیشنهادی و با استفاده از مدل‌های چرخشی به گونه‌ای انتخاب کند که کمترین اتلاف انرژی و توان مصرفی را نسبت به بقیه مسیرها داشته باشد. ارزیابی پارامترهای اتلاف انرژی و توان مصرفی با استفاده از شبیه‌سازی که بر روی بستر نرم‌افزار Omnet++ نصب می‌شود انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان‌دهنده‌ی بهبود کارایی شبکه بر تراشه نوری سه بعدی نسبت به شبکه‌های موجود می‌باشد.

کلیدواژگان: شبکه بر تراشه نوری سه بعدی، مسیریاب نوری، میکروورینگ رزوناتور، اتلاف، توان مصرفی

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول sanazasadinia@iau..ac.ir

۱- مقدمه

با روی کار آمدن کامپیوترهای چندهسته‌ای و ورود مقیاس ترانزیستورها به مقیاس نانومتری، سیستم‌های چند پردازنده‌ای در یک تراشه برای حفظ رشد عملکرد خود ناچار به استفاده از پردازش موازی می‌باشند. شبکه بر تراشه برای ارائه تقاضای پهنای باند بالاتر در پردازنده‌های چند هسته‌ای از موازی‌سازی استفاده می‌کند. موارد ذکر شده با استفاده از اتصالات الکتریکی روی تراشه قابل پیاده‌سازی نمی‌باشد. همچنین بر اساس تحقیقات ITRS، به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های اتصال در تراشه‌های سنتی از شبکه بر تراشه نوری به‌عنوان بهترین جایگزین کاربردی یاد شده است [۱] تا [۳].

امروزه از فناوری نوری به عنوان یک راه حل مناسب و کاربردی برای اتصالات روی تراشه با کارایی بالاتر و با هدف کاهش چالش‌های مختلف پیاده‌سازی استفاده‌می‌شود[۳]. در ادامه نیز برای غلبه بر موانع در مقیاس اتصالات، تکنولوژی‌های سه بعدی به‌عنوان یکی از راه حل‌های کارآمد معرفی و مورد تحقیق قرار گرفته است.

شبکه بر تراشه نوری سه بعدی[1] فنآوری نوظهور و حاصل ترکیب فناوری سه بعدی نوری با شبکه بر تراشه نوری می‌باشد. به طوری که شبکه‌های بر تراشه نوری[2] امکان پیاده‌سازی پهنای باند ارتباطی بسیار بالا و در حد ترابیت در ثانیه[3](Tbps) را به طراحان می‌دهند[۴] تا [۶]. در میان فناوری‌های سه بعدی موجود، TSV[4] کارآمدترین نوع فناوری معرفی شده است. با استفاده از آن امکان مجتمع شدن چندین لایه به همراه اتصالات مستقیم عمودی که از طریق آنها تونل می‌شوند در یک تراشه سه بعدی مبتنی بر TSV وجود خواهد داشت[۵] و [۶].

مزیت شبکه بر تراشه نوری سه بعدی نسبت به شبکه بر تراشه سه بعدی این است که در شبکه‌های نوری بعد از اتصال نوری بسته داده بدون بافر انتقال داده می‌شود که توان مصرفی بی تاثیر از فاصله انتقال می‌شود و مشکل توان مصرفی اتصالات الکتریکی را تا حدود زیادی حل می‌نماید. یکی دیگر از این مزیت‌ها این است که اتصالات نوری می‌تواند داده‌های با طول موج مختلف را به صورت موازی روی یک موجبر منتقل کند که این انتقال با پهنای باند بالا قابل مقایسه با همه اتصالات الکتریکی نمی‌باشد[۴] تا [۹].

بخش اصلی در شبکه بر تراشه‌های نوری ساختار روتر نوری است که تاثیر بسزایی در بازدهی انتقال کل شبکه دارد. علاوه بر این، میکروررینگ رزوناتورها و موجبرهای نوری اجزای مهمی هستند که هم در معماری و هم کمیت عملکرد روتر نوری تاثیرگذار هستند. بنابراین طراحی روتر نوری بسیار مهم است[۳].

در این مقاله، ما یک روتر۷*۷ بمنظور مسیریابی در مش سه بعدی، برمبنای شبکه بر تراشه نوری پیشنهاد می‌کنیم. روتر پیشنهادی بر مبنای میکروررینگ‌های سیلیکون و غیر بلاک می‌باشد. روتر پیشنهادی با استفاده کامل از خصوصیات مسیریابی dimension-order تعداد میکروررینگ‌ها را به حداقل می‌رساند و تعداد موجبرهای متقاطع درون سوییچ را کاهش می‌دهد.

ادامهٔ این مقاله به این شرح است که در بخش دوم به معرفی مفاهیم پایه شامل توپولوژی سه بعدی استفاده شده در این مقاله و اجزا اصلی در شبکه‌های نوری و تشریح مدل‌های چرخشی و نحوه عملکرد آنها پرداخته می‌شود. در ادامه، روتر نوری ۷- پورت که در توپولوژی سه بعدی در شبکه بر تراشه نوری برای کاهش اتلاف انرژی و توان مصرفی ارائه شده‌اند مرور می‌شود. در بخش سوم روتر پیشنهادی جدید را شرح می‌دهیم و همچنین به تشریح الگوریتم مسیریابی پیشنهادی نیز می‌پردازیم. بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی در این قسمت ارائه می‌شود و ارزیابی روش پیشنهادی از طریق مقایسه با نتایج روترهای قبلی بیان می‌شود. بخش پنجم شامل نتیجه‌گیری می‌باشد.

۲- مفاهیم اصلی

امروزه بسیاری از محققان بر استراتژی مسیریابی و تجزیه و تحلیل عملکرد شبکه بر تراشه نوری و انواع توپولوژی‌ها متمرکز هستند، که از میان این مباحث ساختار روتر نوری تاثیر قابل توجهی بر بازدهی انتقال کل شبکه را دارد[۱۰] تا [۱۳].

۲-۱- اجزای سوئیچنگ نوری[5]

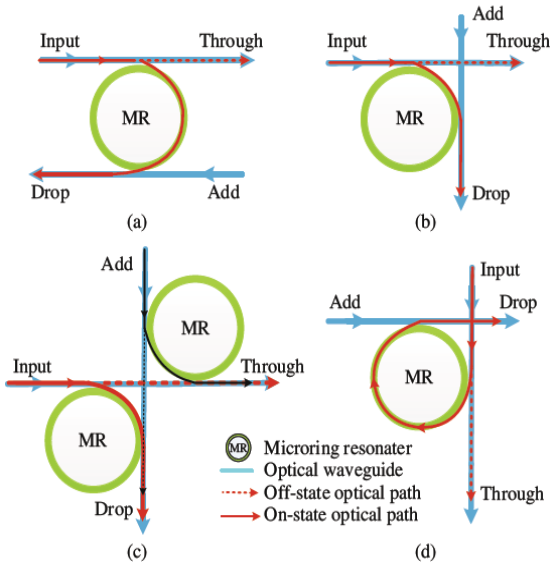
یک OSE از میکروررینگ رزوناتور و موجبر تشکیل شده و به‌عنوان بخش اصلی از روتر نوری معرفی می‌شود.

شکل ۱ حالات مختلف سوئیچ در روترهای نوری را نشان می‌دهد. مطابق این شکل روتر نوری شامل Parallel OSE 2*1، Cross 2*2

[1] 3D Optical Network on Chip
[2] 3D Network on Chip
[3] Terabbits per second
[4] Through Silicon Via
[5] Optical Switching Elements (OSE)

OSE و Cross OSE 2*1 می‌باشد [۱۴] تا [۱۶].

- 1 × 2 parallel switch: برای طراحی و ایجاد این سوییچ نوری از یک میکروورینگ رزوناتور به همراه دو موجبر موازی مطابق شکل 1(a) استفاده شده است. این سوییچ دارای دو حالت است، هنگامی است که طول موج سیگنال با طول موج رزونانس میکروورینگ یکسان است حالت on-state می‌باشد. هنگامی‌که میکروورینگ رزوناتور در حالت on-state است به میکروورینگ متصل شده و به پورت drop منتقل می‌شود. همچنین هنگامی است که طول موج سیگنال با طول موج رزونانس میکروورینگ یکسان نیست حالت off-state می‌باشد. در این حالت، سیگنال نور تزریق شده به پورت ورودی، بطور مستقیم به پورت خروجی منتقل می‌شود[۱۷].
- 2 × 1 cross switch (near): این سوییچ نوری مطابق شکل 1(b) از یک میکروورینگ رزوناتور و دو موجبر متقاطع تشکیل شده و دارای دو حالت on-state و off-state می‌باشد. هنگامی که سیگنال نوری به پورت ورودی تزریق می‌شود و میکروورینگ در حالت off-state باشد سیگنال از طریق موجبرهای متقاطع به پورت through هدایت می‌شود اما اگر میکروورینگ در حالت on-state باشد سیگنال بدون عبور از موجبر متقاطع، مستقیما به پورت drop منتقل می‌گردد. این طراحی امکان کنترل دقیق و کارآمد مسیر سیگنال نوری را فراهم می‌کند و از این رو در کاربردهای مختلف فوتونیک بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد[۱۷].



شکل ۱. حالات مختلف سوئیچ در روترهای نوری[۱۷]

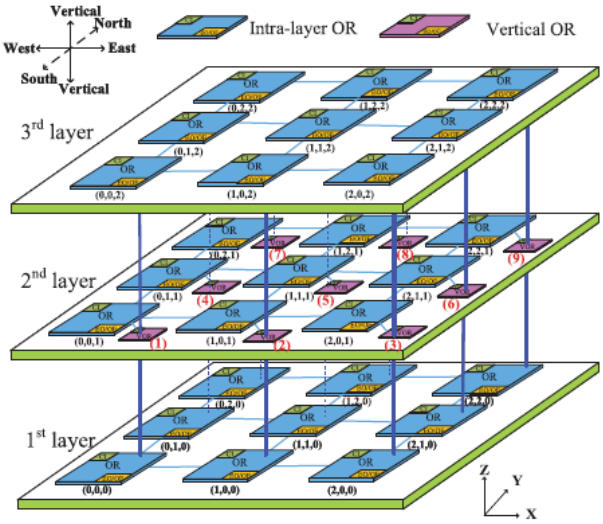
- 2 × 2 cross switch: مطابق شکل ۱(c) این سوییچ نوری از دو میکروورینگ رزوناتور و دو موجبر متقاطع تشکیل شده است که دارای دو حالت on-state و off-state می‌باشد. سیگنال نوری که به پورت ورودی تزریق می‌شود دو میکروورینگ off-state را می‌گذراند و از موجبرهای متقاطع به پورت through می‌رود. در صورتی که میکروورینگ on-state باشد، بدون گذر از موجبر متقاطع به پورت drop هدایت می‌شود. این مکانیسم امکان کنترل دقیق مسیر سیگنال نوری را فراهم می‌کند و عملکرد سوییچ نوری را بهینه می‌سازد[۱۷].
- 1 × 2 cross switch (far): مطابق شکل ۱(d) در طراحی این سوییچ نوری از یک میکروورینگ رزوناتور و دو موجبر نوری متقاطع تشکیل شده است و دارای دو حالت on-state و off-state می‌باشد. با این حال، برای انتقال سیگنال از پورت ورودی به پورت drop، همان‌طور که در شکل ۱(d) نشان داده شده است، سیگنال ابتدا از موجبرهای متقاطع عبور کرده و سپس به میکروورینگ متصل می‌شود. پس از آن، برای بار دوم از موجبرهای متقاطع عبور کرده و در نهایت به پورت drop وارد می‌شود. در این حالت، سیگنال دو بار از موجبرهای متقاطع عبور می‌کند، که این فرآیند باعث ایجاد مسیری پیچیده‌تر اما کنترل شده برای انتقال نور می‌شود[۱۷].

۲-۲- توپولوژی مش سه بعدی

امروزه با استفاده از فناوری Through Silicon Via (TSV) ، امکان توزیع منابع و گره‌های مسیریابی در لایه‌های مختلف فیزیکی یک تراشه فراهم شده است. این پیشرفت امکان ادغام و به‌کارگیری تعداد بیشتری از هسته‌ها را در یک تراشه مهیا می‌کند. به لطف توسعه فناوری TSV، شبکه‌های بر تراشه نوری سه بعدی قادر به برقراری ارتباط عمودی بین چندین لایه هستند، به‌گونه‌ای که هر دو نوع اتصال عمودی و مسطح می‌توانند در یک پکیج مجتمع شوند. توپولوژی شبکه‌های بر تراشه نوری سه بعدی به‌صورت یک شبکه مش سه‌بعدی ۳*۳*۳ در شکل ۲ نشان داده شده است. این ساختار امکان افزایش کارایی و انعطاف‌پذیری در طراحی تراشه‌های پیشرفته را فراهم می‌کند[۱۶].

در توپولوژی مش سه‌بعدی، این ساختار از دو نوع روتر نوری بهره می‌برد:

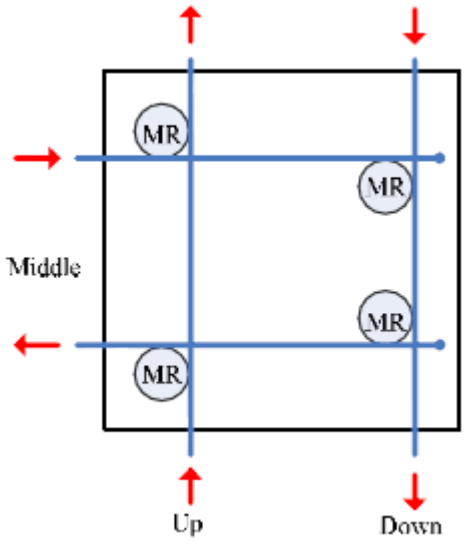
- روتر نوری درون‌لایه‌ای intra-layer
- روتر نوری عمودی vertical



شکل ۲. ساختار توپولوژی مش سه بعدی [۱۶]

هر روتر نوری درون‌لایه‌ای (intra-layer) دارای ۶ پورت است که هر یک از آن‌ها به یک IPcore محلی متصل شده‌اند. برای انتقال داده‌ها به لایه‌های دیگر، لایه‌ی دوم به یک روتر نوری عمودی مجهز است که امکان انتقال داده‌ها را از طریق لینک‌های عمودی به دیگر لایه‌ها فراهم می‌کند. در این ساختار، هر موجبر نوری میان یک جفت از روترهای نوری در توپولوژی دوطرفه قرار گرفته است. این طراحی امکان ارتباط کارآمد و انعطاف‌پذیر بین لایه‌ها و هسته‌های مختلف را در شبکه‌های سه‌بعدی فراهم می‌کند[۱۸].

با توجه به اطلاعات توپولوژی ارائه شده در شکل ۲، روتر نوری لایه داخلی برای تبادل داده‌ها به روترهای نوری ۶ و ۷ پورت نیاز دارد. همچنین، روترهای ۴ و ۵ پورت برای استفاده در گوشه‌ها و لبه‌های شبکه مورد نیاز هستند. در بخش مرکزی توپولوژی، یک روتر ۷ پورت برای انتقال داده‌ها ضروری است. با این حال، هنگامی که تعداد لایه‌های عمودی کمتر از ۳ باشد، تعداد پورت‌های مورد نیاز در روترهای شبکه بر تراشه نوری سه بعدی را می‌توان با افزودن روترهای نوری عمودی کاهش داد. ساختار روتر نوری عمودی که برای انتقال داده‌های بین‌لایه‌ای استفاده می‌شود، مطابق شکل ۳ است. این روتر نوری عمودی دارای سه پورت به نام‌های UP، Down و Middle می‌باشد که امکان ارتباط عمودی بین لایه‌های مختلف را فراهم می‌کند. این طراحی انعطاف‌پذیری لازم برای مدیریت کارآمد داده‌ها در شبکه‌های سه بعدی را ایجاد می‌کند[۱۸].



شکل ۳. ساختار روتر نوری عمودی [۱۸]

در این ساختار، روترهای نوری در لایه داخلی بر اساس آدرس (x, y, z) لیبل‌گذاری می‌شوند که مقادیر آن‌ها در محدوده‌ی $0 \leq x, y, z \leq 2$ قرار دارند و در یک فضای سه‌بعدی سازمان‌دهی شده‌اند. از سوی دیگر، روترهای نوری عمودی با استفاده از k، که در محدوده‌ی $0 \leq k \leq 8$ قرار دارد لیبل‌گذاری می‌شوند. برای انتخاب مسیر در شبکه بر تراشه نوری سه‌بعدی، از ترتیب ابعاد XYZ استفاده می‌شود. به دلیل عدم امکان ذخیره‌سازی داده‌های نوری، در این توپولوژی از اتصالات هیبریدی[۶] استفاده می‌شود.

شبکه مش سه بعدی در شبکه بر تراشه نوری پیشنهاد شده از مدار سوئیچینگ[۷] بهره می‌برد. در این روش، قبل از انتقال داده‌ها، یک مسیر نوری از مبدا به مقصد رزرو می‌شود. برای این منظور، ابتدا یک بسته کنترل در شبکه الکترونیکی ارسال می‌شود تا مسیر را رزرو کند. پس از تنظیم مسیر، داده‌ها در امتداد مسیر نوری رزرو شده منتقل می‌شوند. این روش انتقال نوری با سرعت بالا انجام می‌شود و نیازی به ایجاد بافر در روترهای میانی ندارد، که این امر باعث کاهش تأخیر و افزایش کارایی شبکه می‌شود[۱۶].

۲-۳- الگوریتم‌های مدل چرخشی

در انتقال بسته‌ها، زمانی که همه‌ی بسته‌ها منتظر می‌مانند تا مسیریابی شوند، ممکن است بن‌بست[۸] رخ دهد. در این حالت، چندین بسته منابع مشترکی را رزرو می‌کنند و هر یک منتظر آزاد شدن منابع توسط دیگری می‌مانند. در نتیجه، بسته‌ها به دلیل

[6] optoelectronic
[7] circuit switching
[8] deadlock

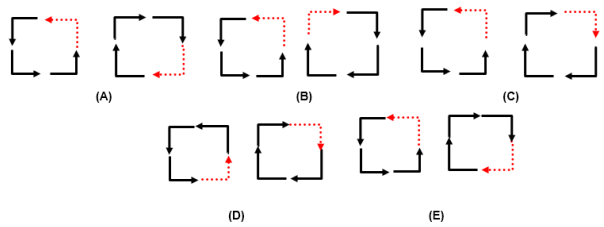
مسدود شدن منابع میانی، نمی‌توانند به مقصد برسند. برای مقابله با این مشکل در شبکه‌هایی که با بن‌بست مواجه هستند، از الگوریتم‌های مدل‌های چرخشی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها با اعمال قوانینی خاص، انعطاف‌پذیری مسیریابی را افزایش داده و از وقوع بن‌بست جلوگیری می‌کنند. این راه‌حل به دلیل سادگی و هزینه‌ی پایین، مورد توجه قرار گرفته است. مسیریابی مدل چرخشی با اجازه‌دادن به برخی چرخش‌ها و حذف یک چرخش از هر چرخه، انعطاف‌پذیری الگوریتم را بهبود می‌بخشد. این ویژگی باعث می‌شود که این روش برای شبکه‌های نوری روی تراشه و ارتباطات نوری با توان بالا بسیار مناسب باشد[۱۹] و[۲۰].

در یک شبکه نوری دو بعدی روی تراشه، یک سیگنال نوری می‌تواند در یکی از چهار جهت شمال، جنوب، شرق و غرب حرکت کند. با تغییر جهت حرکت سیگنال، مدل‌های چرخشی مختلفی مانند West-First، North-Last، Negative-First و Odd-even ایجاد می‌شوند. جهت حرکت در این مدل‌ها می‌تواند در جهت عقربه‌های ساعت ، خلاف جهت عقربه‌های ساعت یا بر اساس ستون‌های زوج و فرد تعیین شود[۲۰].

شکل ۴ محدودیت‌های چرخش را در این الگوریتم‌ها نشان می‌دهد [۲۰]. این محدودیت‌ها بهینه‌سازی مسیرها و جلوگیری از بن‌بست را ممکن می‌سازند و در عین حال، کارایی شبکه را بهبود می‌بخشند.

۲-۴- کارهای مرتبط

روترهای نوری به عنوان یک عنصر مهم بر روی شبکه بر تراشه‌های نوری هستند. در حوزه طراحی روتر ساختارهای مختلفی از روتر نوری بر اساس موجبرهای نوری و میکروررینگ رزوناتور برای شبکه بر تراشه نوری سه بعدی ارائه شده است. میکروررینگ رزوناتور یکی از سوییچ‌های نوری انتخابی با طول موج گسترده در شبکه بر تراشه نوری است. روترهایی از این دسته بسیار مورد توجه محققین بوده است، که در این بخش مهم‌ترین آنها در شبکه روی تراشه نوری سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. روترهای نوری به عنوان یکی از عناصر کلیدی در شبکه روی تراشه نوری نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند. در حوزه طراحی روترها، ساختارهای متنوعی از روترهای نوری مبتنی بر موجبرهای نوری و میکروررینگ‌های رزوناتور برای شبکه بر تراشه نوری سه بعدی ارائه شده است. میکروررینگ رزوناتور به عنوان یکی از سوییچ‌های نوری انتخابی با طول موج ، به‌طور گسترده در شبکه بر تراشه‌های نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع روترها به دلیل کارایی بالا و قابلیت‌های منحصر به فرد، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند[۲۱] تا [۲۲].



A) West-First, B) North-Last, C) Negative-First,
(D) Odd-even (even column), E) Odd-even (odd column)

شکل۴. محدودیت‌های چرخش در الگوریتم مسیریابی[۲۰]

در این بخش، مهم‌ترین و پرکاربردترین روترهای نوری مبتنی بر میکروررینگ رزوناتور که در شبکه بر تراشه نوری سه بعدی استفاده شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. این روترها با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، امکان انتقال داده‌ها با سرعت بالا و تأخیر کم را فراهم می‌کنند و نقش به سزایی در بهبود عملکرد شبکه‌های نوری روی تراشه ایفا می‌نمایند[۲۳].

در سال ۲۰۰۸، A.W. Poon و همکارانش یک روتر نوری crossbar کاملاً متصل و غیربلاک مبتنی بر میکروررینگ رزوناتور ۷×۷ پیشنهاد دادند. این روتر نوری از ۴۹ عدد میکروررینگ رزوناتور و ۶۷ عدد موجبر متقاطع تشکیل شده بود. این طراحی امکان اتصال کامل و بدون انسداد بین پورت‌های ورودی و خروجی را فراهم می‌کرد و به عنوان یک راه‌حل پیشرفته در حوزه شبکه‌های نوری بر تراشه مطرح شد[۵].

در سال ۲۰۰۹، Huaxi Gu و همکارانش با ترکیب ویژگی‌های الگوریتم مسیریابی XYZ ، یک روتر نوری crossbar غیربلاک ۷×۷ جدید ارائه دادند. این طراحی نوآورانه تعداد میکروررینگ‌های مورد نیاز برای شبکه مش سه بعدی در شبکه بر تراشه نوری را به ۳۰ عدد و تعداد موجبرهای متقاطع را به ۴۷ عدد کاهش داد. این بهبود چشمگیر در کاهش منابع مورد نیاز، باعث افزایش کارایی و بهینه‌سازی ساختار روتر نوری شد[۲۴].

هر دو این تحقیقات گام‌های مهمی در جهت توسعه روترهای نوری کارآمد و کم مصرف برای شبکه‌های نوری روی تراشه برداشتند و به پیشرفت فناوری‌های ارتباطی نوری کمک شایانی کردند.

در سال ۲۰۱۳، Yaoyao Ye و همکارانش یک ساختار روتر نوری غیربلاک ۶×۶ و ۷×۷ طراحی کردند که با استفاده از ویژگی‌های dimension-order ، تعداد میکروررینگ‌ها و موجبرهای متقاطع درون سوییچ را کاهش می‌داد. آن‌ها یک طرح بهینه برای مش سه بعدی در شبکه بر تراشه نوری پیشنهاد کردند که در آن طرح

floorplan همه‌ی روترهای نوری در یک لایه‌ی دیوایس نوری اجرا می‌شد[۲۵].

در سال ۲۰۱۶، Kexin Zhu و همکارانش یک ساختار روتر نوری غیربلاک ۷×۷ برای شبکه بر تراشه نوری سه بعدی مطابق با شکل ۵(a) پیشنهاد دادند که Vortex نامیده شد. این روتر تأخیر end-to-end و کارایی توان عملیاتی را در مقایسه با ساختار crossbar سنتی بهبود بخشید. این روتر شامل ۳۶ میکروررینگ رزوناتور و ۵۷ waveguide crossing بود.

در سال ۲۰۱۸، Pengxing Guo و همکارانش یک روتر نوری ۶×۶ غیربلاک مطابق با شکل ۵(b) پیشنهاد دادند. این روتر بطور مؤثر تعداد میکروررینگ‌های مصرف شده و موجبرهای متقاطع را کاهش داد و توانست در بدترین حالت، اتلاف را به حداقل برساند[۱۶].

در سال ۲۰۱۹، M. R. Yahya و همکارانش یک روتر نوری ۶×۶ غیربلاک با نام Honey Comb مطابق با شکل ۵(c) پیشنهاد دادند. در طراحی این روتر از اجزای سوییچینگ OSE 2*2 استفاده شد. در معماری Honey Comb پیشنهادی با هدف کاهش تعداد OSE ها برای به حداقل رساندن اتلاف و توان مصرفی ارائه شد[۲۷].

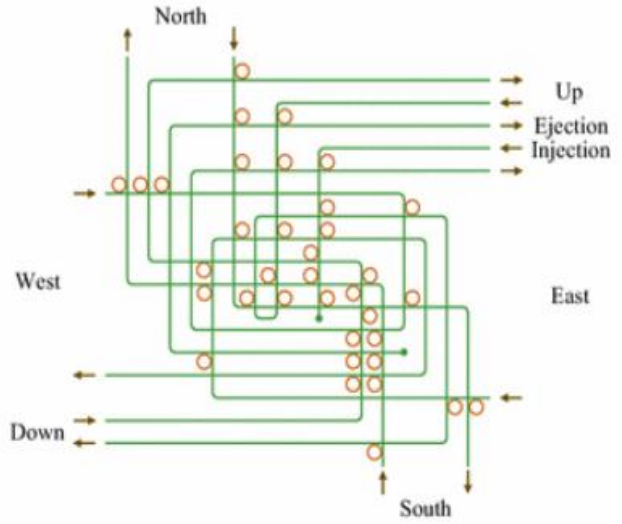
این تحقیقات نشان‌دهنده‌ی پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی روترهای نوری کارآمد و کم مصرف برای شبکه‌های نوری روی تراشه است. هر یک از این طرح‌ها با کاهش منابع مورد نیاز و بهبود عملکرد، گام‌های مهمی در جهت بهینه‌سازی شبکه‌های نوری برداشته‌اند.

در جدول ۱ بطور خلاصه روترهای بررسی شده سه بعدی از لحاظ پارامترهای تعداد سوئیچینگ میکروررینگ رزوناتور و تعداد waveguide crossing و نوع PSE مقایسه می‌شوند.

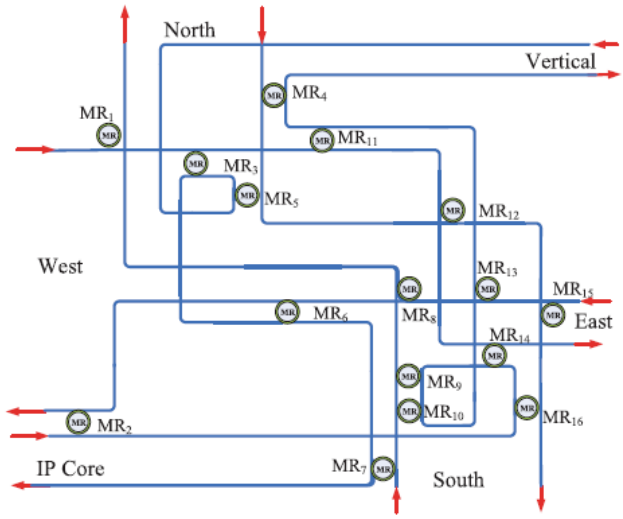
۳- روش پیشنهادی

۳-۱- طراحی روتر نوری جدید

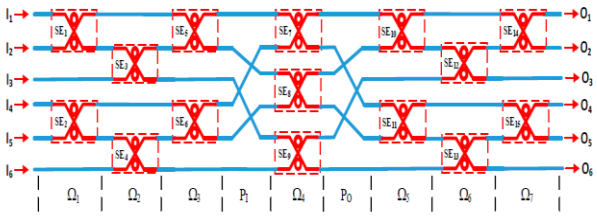
در این بخش، یک روتر ۷ پورت غیربلاک مبتنی بر میکروررینگ رزوناتور برای شبکه‌های مش سه بعدی ارائه شده است. این روتر نوری با پورت‌های North، East، South، West، IPcore، Up و Down ، قابلیت انتقال داده‌های دوطرفه را در شبکه‌های مش پشتیبانی می‌کند. در طراحی این روتر، تنها ۱۸ عدد میکروررینگ از نوع PSE ۱×۲ parallel به کار رفته است که در مقایسه با روترهای نوری ۷ پورت پیشین، کاهش چشمگیری در تعداد میکروررینگ‌های رزوناتور دارد. طرح این روتر نوری غیربلاک ۷ پورت در شکل ۷ نمایش داده شده است.



(a) روتر نوری votex [۱۶]



(b) روتر نوری Pengxing Guo [۱۶]

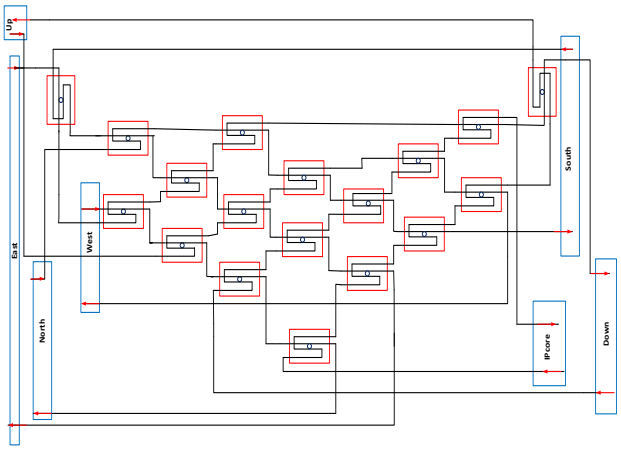


(c) روتر نوری M. R. Yahya [۲۷]

شکل ۵. ساختار روتر نوری

جدول ۱. مقایسه میان روترهای نوری سه بعدی

Router	Type of PSE	Number of microring resonator	Number of waveguide crossing
7*7 Optical Router in [۵]	1*2 cross PSE	49	67
7*7 Optical Router in [۲۴]	1*2 cross PSE	30	47
6*6 Optical Router in [۲۵]	1*2 cross & 1*2 parallel PSE	18	19
7*7 Optical Router in [۲۵]	1*2 cross & 1*2 parallel PSE	26	27
7*7 Optical Router in [۲۶]	1*2 cross PSE	36	57
6*6 Optical Router in [۱۶]	1*2 cross & 1*2 parallel PSE	16	17
6*6 Optical Router in [۲۷]	2*2 PSE	12	9



شکل ۷: ساختار روتر نوری غیربلاک۷ پورت پیشنهادی برای شبکه بر تراشه نوری مش سه بعدی

از آنجا که در طراحی روتر پیشنهادی، تعداد کمتری میکروورینگ رزوناتور استفاده شده و ورودی و خروجی هر پورت در مجاورت یکدیگر قرار دارند، این روتر در مقایسه با روترهای نوری گزارش‌شده، فضای کمتری اشغال می‌کند و از پیچیدگی طراحی کمتری برخوردار است.

مقایسه‌ی عملکرد روتر پیشنهادی با روترهای نوری ذکرشده در بخش ۲-۴، در جدول ۲ به‌طور خلاصه ارائه شده است. این مقایسه نشان‌دهنده‌ی بهبودهای قابل توجه در بهینه‌سازی منابع و کاهش پیچیدگی‌های ساختاری است.

جدول ۲. ویژگی‌های روترهای نوری ۶ و ۷ پورت

Router	Type of PSE	Number of micro-ring resonator	Same of I/O port physical address
6*6 Optical Router in [۱۶]	1*2 PSE	15	Yes
6*6 Optical Router in [۲۷]	2*2 PSE	12	No
7*7 Optical Router in [۲۶]	1*2 PSE	36	Yes
6*6 Optical Router in [۴]	1*2 PSE	12	Yes
7*7 Our proposed Optical Router	1*2 PSE	18	Yes

۳-۲- الگوریتم مسیریابی پیشنهادی

در این بخش، یک الگوریتم مسیریابی جدید ارائه می‌شود که با هدف ارزیابی اتلاف نوری و توان مصرفی در مسیرهای مختلف میان گره‌های مبدا و مقصد در شبکه بر تراشه نوری سه بعدی طراحی شده است. این الگوریتم به‌دنبال انتخاب مسیر بهینه‌ای است که کمترین اتلاف نوری و کمترین توان مصرفی را برای انتقال داده‌های نوری در لایه نوری سه بعدی داشته باشد.

با استفاده از این الگوریتم، می‌توان مسیرهایی را شناسایی کرد که نه‌تنها از نظر انرژی بهینه‌تر هستند، بلکه کمترین میزان تضعیف سیگنال نوری را نیز به همراه دارند. این رویکرد به بهبود کارایی شبکه‌های نوری روی تراشه کمک کرده و باعث کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش طول عمر سیستم می‌شود.

این الگوریتم با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی مانند اتلاف نوری، توان مصرفی و تأخیر انتقال، مسیرهای ممکن را ارزیابی کرده و بهترین گزینه را برای انتقال داده‌ها انتخاب می‌کند. این روش به ویژه در شبکه‌های پیچیده‌ی سه‌بعدی که نیاز به مدیریت کارآمد منابع و انرژی دارند، بسیار مفید و کاربردی است.

این الگوریتم مسیریابی بر روی روتر ۷ پورت پیشنهادی اجرا می‌شود. این الگوریتم یک الگوریتم توزیع‌شده با پیچیدگی کم است که به‌طور ویژه برای شبکه بر تراشه نوری سه بعدی مناسب می‌باشد. در این الگوریتم، از مدل‌های چرخشی و روش سوئیچینگ مداری برای رزرو مسیرها استفاده شده است.

- اگر مبدا و مقصد در یک لایه باشند فرآیند مسیریابی مشابه شبکه بر تراشه نوری دو بعدی عمل می‌کند. داده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های مدل چرخشی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های حرکت داده‌های نوری، به سمت IPcore مقصد هدایت می‌شوند.

- اگر مبدا و مقصد در دو لایه متفاوت باشند ابتدا داده‌ها با استفاده از بعد Z به لایه مقصد منتقل می‌شوند. سپس، برای رسیدن به مقصد نهایی، از الگوریتم‌های مدل چرخشی برای مدیریت محدودیت‌های انتقال داده‌های نوری استفاده می‌شود.

در این روش، همان‌طور که در بخش ۲-۲ بیان شد، ابتدا مسیر با استفاده از روش سوئیچینگ مداری رزرو شده و سپس داده‌های نوری از مبدا به مقصد منتقل می‌شوند.

فاکتورهای کلیدی در این الگوریتم شامل حداقل اتلاف نوری و حداقل توان مصرفی هستند. این فاکتورها باعث می‌شوند که مسیر بهینه از میان چندین مسیر ممکن بین گره مبدا و مقصد انتخاب شود. با ارزیابی میزان اتلاف و توان مصرفی در مسیرهای مختلف، سه حالت بهترین، میانگین و بدترین ایجاد می‌شود که برای هر یک از الگوریتم‌های مدل چرخشی ارزیابی و مقایسه شده‌اند. نتایج این ارزیابی‌ها در بخش۳-۴ ارائه شده است.

جدول ۳ مراحل شبه کد الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. با اجرای این الگوریتم بر روی روتر، مسیر بهینه با کمترین اتلاف نوری و کمترین توان مصرفی بین هر مبدا و مقصد انتخاب می‌شود. به عبارتی، مسیری که از تعداد کمتری عناصر نوری برای عبور سیگنال در بستر ارتباطی نوری استفاده می‌کند، انتخاب می‌شود. این امر منجر به انتخاب مسیر بهینه و بهبود عملکرد کلی شبکه می‌شود.

این الگوریتم با بهینه‌سازی مسیرها، نه‌تنها کارایی شبکه را افزایش می‌دهد، بلکه مصرف انرژی را نیز به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. با اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی روتر مسیر بهینه با کمترین اتلاف و کمترین توان مصرفی بین هر مبدا و مقصد انتخاب می‌شود. بعبارتی دیگر، مسیری که از تعداد کمتری عناصر نوری برای عبور سیگنال در بستر ارتباط نوری قرار دارد انتخاب می‌شود که منجر به انتخاب مسیر بهینه می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی و مقایسه

برای ارزیابی روترهای نوری پیشنهادی، از شبیه‌سازی بر روی بستر نرم‌افزار Omnet++ استفاده کرده‌ایم[۳۱-۲۸]. این شبیه‌ساز ابزاری قدرتمند برای تحلیل و طراحی شبکه‌های نوری مختلف است. Omnet++ محیطی آماده برای طراحی روترهای مبتنی بر میکروررینگ رزوناتور و قرار دادن آن‌ها بر روی انواع توپولوژی‌ها را فراهم می‌کند. در جدول ۴، پارامترهای تنظیم شده برای شبیه‌سازی طرح‌های پیشنهادی ارائه شده است.

جدول۳: الگوریتم مسیریابی پیشنهادی ما

Routing algorithm phases	Pseudo-codes
Phase 1	Determine the source node (x_s, ys, zs) and destination node (x_d, yd, zd)
Phase 2	If ($z_s \neq z_d$) then change source node to (x_s, ys, zd)
Phase 3	Running one of the turning model algorithms on our proposed router
Phase 4	Reserved path between the source and destination nodes in our proposed router with a circuit switching technique
Phase 5	Check current node with the destination node, if (x_s, ys) ≠ (x_d, yd) then repeat phase 3 and phase 4, else path reservation end
Phase 6	Evaluate insertion loss at each path our proposed
Phase 7	Summing insertion loss values in phase 6, will be obtained insertion loss for each path
Phase 8	Evaluate power consumption at each path our proposed
Phase 9	Summing power consumption values in phase 7, will be obtained power consumption for each path
Phase 10	Repeat phase 2 to phase 9 for each other paths
Phase 11	Compare values of phase 10 (the most of insertion loss and power consumption is worst-case path, the least of insertion loss and power consumption is best-case path)
Phase 12	Choose best-case path to transfer optical data and choose turning model for our proposed router

جدول ۴: پارامترهای شبیه‌سازی

Simulation Parameter	Value
Laser power	20 db/m
Detector sensitivity Index	-15
Bandwidth	2.5Gb/s
Message size	1024 bit
Router buffer size	64 bits
Number of wavelength channels	16

شبیه‌سازی برای شبکه‌های سه بعدی با اندازه‌های مختلف N*N*3 انجام شده است. اندازه‌های توپولوژی‌های مورد بررسی شامل 3*3*3، ۳ *۴ *۴، ۳ * ۵ * ۵ و ۳ * ۶ * ۶ می‌باشند.

یکی از عوامل کلیدی در کاهش اتلاف نوری در شبکه‌های نوری روی تراشه، استفاده از روترهای نوری با حداقل تعداد ادوات نوری است. در جدول ۲، مقایسه‌ای میان تعداد ادوات نوری به‌کاررفته در ساختار روتر ۷ پورت پیشنهادی و روترهای موجود انجام شده است.

برای ارزیابی عملکرد روتر پیشنهادی، روترهای ذکرشده در جدول ۲ را تحت شرایط یکسان شبیه‌سازی کرده‌ایم. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به دقت بررسی شده‌اند تا کارایی و بهبودهای ایجاد شده توسط طرح‌های پیشنهادی مشخص شود.

این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که استفاده از روترهای نوری با تعداد کمتر ادوات نوری نه‌تنها اتلاف نوری را کاهش می‌دهد، بلکه توان مصرفی و پیچیدگی ساختاری شبکه را نیز به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. این نتایج گامی مهم در جهت بهینه‌سازی شبکه‌های نوری روی تراشه محسوب می‌شوند. جهت بررسی عملکرد روتر پیشنهادی ، روترهای ذکر شده در جدول ۲ را با شرایط یکسان شبیه‌سازی کرده و به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداختیم.

۴-۱- تحلیل پارامتر اتلاف در روتر توری پیشنهادی

یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی روترهای نوری پیشنهادی، اتلاف است. این پارامتر در توپولوژی مش و ساختارهای روتر نوری به‌دقت تحلیل و بررسی شده است. برای شبیه‌سازی، مقادیر اتلاف مطابق با جدول ۵ و بر اساس داده‌های منتشرشده در منابع معتبر تنظیم شده‌اند.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی، نمودار شکل ۸ عملکرد روترهای نوری ۶ و ۷ پورت پیشنهادی را در توپولوژی مش نشان می‌دهد. روترهای پیشنهادی به‌دلیل استفاده از تعداد کمتر ادوات نوری و بهینه‌سازی ساختار، اتلاف کمتری را تجربه می‌کنند. این کاهش اتلاف منجر به بهبود کارایی شبکه و کاهش تضعیف سیگنال‌های نوری در مسیرهای انتقال داده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که روتر پیشنهادی نه تنها از نظر اتلاف نوری، بلکه از نظر توان مصرفی و پیچیدگی ساختاری نیز عملکرد بهتری دارد.

این تحلیل‌ها تأیید می‌کنند که طراحی‌های پیشنهادی گامی مهم در جهت بهینه‌سازی شبکه‌های نوری روی تراشه هستند و می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی عملکرد کلی شبکه را بهبود بخشند. میزان اتلاف روترهای نوری پیشنهادی با استفاده از فرمول (۱) محاسبه شده است.

جدول ۵: پارامترهایی از اتلاف

Parameters	Value	Ref
waveguide crossing	0.15 db	[۲۱]
waveguide bending	0.005db/90°	[۲۱]
drop into a MRR	0.5 db	[۲۱]
pass by a MRR	0.005 db	[۲۱]

$$\text{IL}\ (R)_{I,J}=\sum IL_{CROSS}+\sum IL_{Bend}+\sum IL_{Drop}+\sum IL_{Pass} \quad (۱)$$

$\text{IL}\ (R)_{I,J}$ اتلاف از پورت i ام به پورت j ام در روتر نوری R می‌باشد.

برای روتر نوری غیربلاک ۷*۷

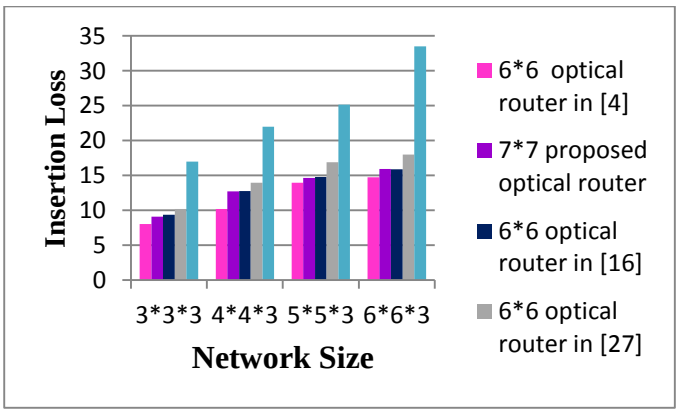
$$i,j \in \{North, East, West, South, Ipcore, Up, Down\}$$

برای روتر عمودی

$$i,j \in \{Up, Middle, Down\}$$

فاکتوری که می‌تواند بر عبور سیگنال نوری تاثیرگذار باشد تعداد میکرورینگ‌های on-state در مسیر است. با توجه به اینکه در روتر نوری پیشنهادی تنها از ۱۸ میکرورینگ رزوناتور بترتیب برای برقراری اتصال هفت پورت استفاده می‌شود و نیازی به تغییر آدرس فیزیکی ورودی و خروجی نمی‌باشد در بالاترین مقیاس مش ۱۲,۹۲ dbاتلاف دارد که پیشرفت چشمگیری نسبت به موارد بررسی شده دیگر دارد. این روتر نسبت به سایر روترهای نوری موجود، در کاهش اتلاف شبکه نوری موجب بهبود عملکرد شبکه می‌شود.

عامل کلیدی که می‌تواند بر عبور سیگنال نوری تأثیرگذار باشد، تعداد میکرورینگ‌های در حالت on-state در مسیر است. در روتر نوری پیشنهادی، تنها از ۱۸ میکرورینگ رزوناتور به‌صورت متوالی برای برقراری اتصال بین هفت پورت استفاده می‌شود. این طراحی نیاز به تغییر آدرس فیزیکی ورودی و خروجی را از بین می‌برد. نتایج نشان می‌دهد که این روتر در بالاترین مقیاس مش، اتلافی معادل ۱۲,۹۲dB دارد که بهبود چشمگیری نسبت به سایر طرح‌های بررسی‌شده نشان می‌دهد. همچنین، این روتر نوری در مقایسه با سایر روترهای نوری موجود، با کاهش اتلاف در شبکه نوری، عملکرد شبکه را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد.



شکل۸: حداکثر اتلاف در سایزهای متفاوت شبکه و روترهای مختلف برای مش در شبکه بر تراشه نوری سه بعدی

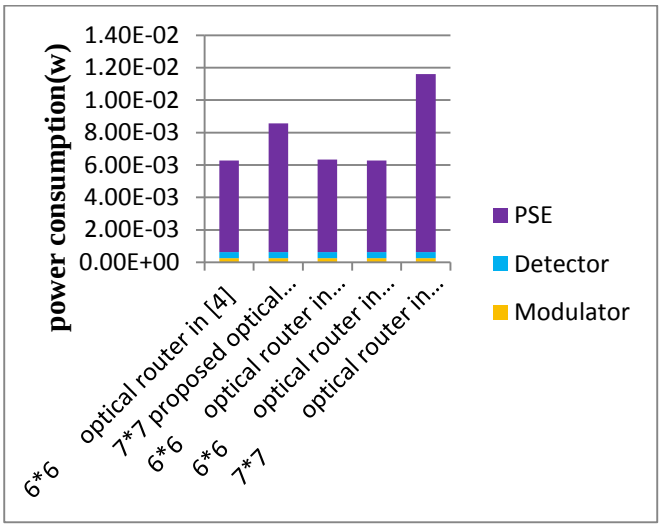
۴-۲- تحلیل پارامتر توان مصرفی در روتر نوری پیشنهادی

پارامتر دیگری که در این مقاله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، پارامتر توان مصرفی است. این پارامتر از دو بخش الکتریکی و نوری تشکیل شده است. اجزای الکتریکی شامل مدار درایوینگ مودلاتور driving circuit modulator و مدار رسیور receiver circuit هستند، در حالی که اجزای نوری شامل مودولاتور ، دیتکتور و روتر نوری optical router می‌باشند. اجزای الکتریکی معمولاً توان مصرفی بالاتری نسبت به اجزای نوری دارند، اما اتلاف توان الکتریکی در همه روترها تقریباً یکسان است[۳]. در مقابل، اتلاف توان نوری به دلیل استفاده از مودولاتورها، دیتکتورها و سایر عناصر مؤثر در اتلاف نوری، در روترهای مختلف متفاوت است. از میان پارامترهای مرتبط با عناصر سوییچینگ نوری،PSE ها بیشترین تأثیر را بر توان مصرفی دارند[۳]. جدول ۶ کلیه پارامترهای مرتبط با توان مصرفی را نشان داده است[۳۵-۳۴].

در محاسبه توان مصرفی، تعداد PSE های on-state در طول مسیر، عامل تعیین‌کننده است. در شش مسیر از روتر ۷ پورت پیشنهادی، نیازی به فعال‌سازی PSE، on- state وجود ندارد و کلیه PSEها در حالت off هستند. در سایر مسیرها، حداکثر دو PSE در طول مسیر انتخابی در حالتon-state قرار می‌گیرند، که این امر به جلوگیری از هدر رفت توان مصرفی کمک می‌کند[۳]. در مقایسه با روتر ذکر شده در [۴,۱۶,۲۶,۲۷]، با در نظر گرفتن مؤلفه PSE، روتر پیشنهادی تقریباً توان مصرفی مشابهی دارد. با این حال، در مقایسه با دو روتر ۷ پورت دیگر، بهبود قابل‌توجهی در توان مصرفی مشاهده می‌شود.

جدول ۶: پارامترهای شبیه‌سازی توان مصرفی

Parameter	Value
Modulator (dynamic energy)	85 fJ/bit
Modulator (static energy)	30µw
Photo detector	50fJ/bit
PSEs (dynamic energy)	375fJ/bit
PSEs (static energy)	400µw
Thermal ring tuning	100µw/ring



شکل ۹: توان مصرفی روتر ۷پورت پیشنهادی در شبکه بر تراشه نوری سه بعدی

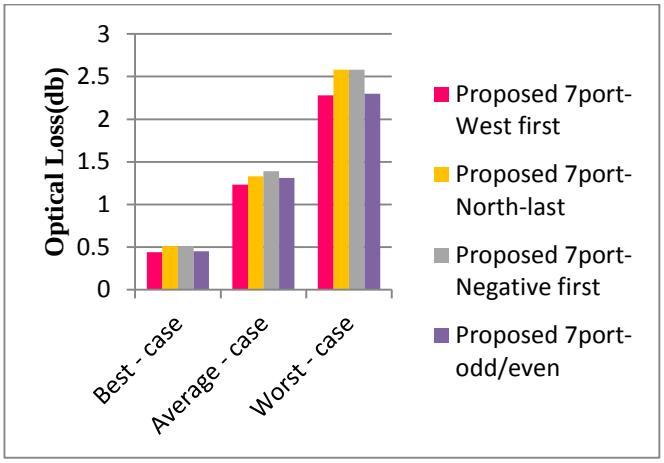
۴-۳- الگوریتم‌های مدل چرخشی

همان‌طور که در بخش ۳,۲ اشاره شد، الگوریتم‌های مسیریابی مبتنی بر مدل‌های چرخشی، از بن‌بست جلوگیری می‌کنند[۳۶-۳۷]. الگوریتم پیشنهادی ما که بر اساس این مدل‌های چرخشی طراحی شده است، بر روی روتر ۷ پورت پیشنهادی پیاده‌سازی شده و پارامترهای اتلاف و توان مصرفی در سه حالت بهترین حالت[۹]، حالت میانگین [۱۰]و بدترین حالت [۱۱]مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

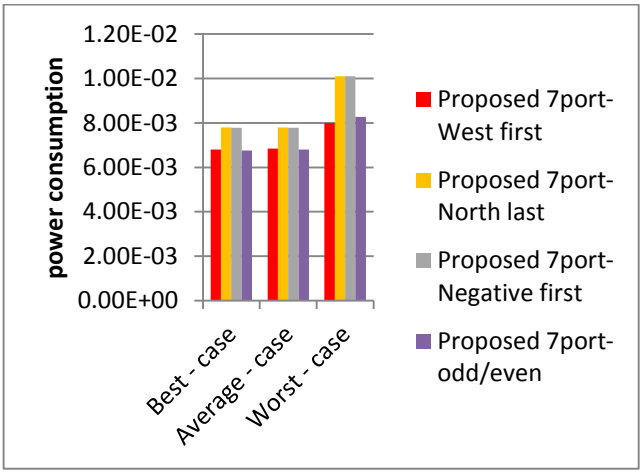
نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی روتر ۷ پورت، برای پارامترهای اتلاف و توان مصرفی، به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که در شبکه‌های مش ، الگوریتم‌های Odd-Even و West-First در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مبتنی بر مدل چرخشی، کمترین میزان اتلاف و توان مصرفی را در هر سه حالت بهترین، میانگین و بدترین حالت دارند.

بنابراین برای استفاده بهینه از روتر پیشنهادی در شبکه بر تراشه نوری، توصیه می‌شود از الگوریتم‌های مسیریابی West-First و Odd-Even در فرآیند رزرو مسیر برای ارسال داده‌های نوری استفاده شود. این الگوریتم‌ها با ایجاد کمترین اتلاف و مصرف توان، کارایی شبکه بر تراشه نوری را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند.

[9] Best Case
[10] Average Case
[11] Worst Case



شکل ۱۰: اتلاف در الگوریتم‌های مدل چرخشی



شکل ۱۱: توان مصرفی در الگوریتم‌های مدل چرخشی

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روتر نوری غیربلاک ۷×۷ پیشنهاد شده است که در مقایسه با روترهای نوری ۷ پورت موجود، از تعداد کمتری میکروورینگ رزوناتور استفاده می‌کند. علاوه بر این، یک الگوریتم مسیریابی جدید نیز ارائه گردیده که بر روی این روتر پیشنهادی اعمال می‌شود. هدف این الگوریتم، یافتن بهترین مسیر میان مبدأ و مقصد با کمترین اتلاف انرژی و توان مصرفی است تا مسیری بهینه با حداقل اتلاف و مصرف انرژی انتخاب شود. شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی شبکه‌های با ابعاد مختلف N*N*3 نشان می‌دهند که روتر نوری پیشنهادی در مقایسه با روترهای نوری ۷ پورت موجود، بهبود قابل‌توجهی در پارامترهای اتلاف انرژی و توان مصرفی ایجاد می‌کند. به‌طور خاص، در شبکه‌ای با ابعاد ۳×۶×۶ ، روتر پیشنهادی کاهش ۵۹٫۶۸٪ در میزان اتلاف انرژی در سطح شبکه بر تراشه نوری را نسبت به روترهای موجود نشان می‌دهد. همچنین، بهبود چشمگیری در مصرف توان نیز مشاهده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که در بررسی سه حالت بهترین حالت (Best Case) ، حالت میانگین (Average Case) و بدترین حالت (Worst Case) در شبکه‌های مش سه بعدی نوری، الگوریتم‌هایWest-First و Odd-Even کمترین اتلاف و توان مصرفی را دارند. در شبکه‌های مش دوبعدی ، الگوریتم Odd-Even به‌عنوان الگوریتمی با کمترین اتلاف و مصرف انرژی بر روی روتر نوری پیشنهادی شناخته شده است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از روتر و الگوریتم پیشنهادی، کارایی شبکه‌های بر تراشه نوری را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

مراجع

[1] L. Weichen, T. Guiyu, L. Mengquan, “Autonomous Temperature Sensing for Optical Network-on-Chip”. Journal of Systems Architecture, January 2020, 101650.

[2] HUSEYúIN T, KAYHAN M, “Scheduling Computation and Communication on a Software-Defined Photonic Network-on-Chip Architecture for High-Performance Real-Time Systems”, Journal of Systems Architecture, October 2018, Pages 54-71.

[3] S. Asadinia, M. Mehrabi, E. Yaghoubi, “Surix: Non‐blocking and low insertion loss micro‐ring resonator‐based optical router for photonic network on chip,” The Journal of Supercomputing, https://doi.org/10.1007/s11227-020-03442-4, 2020.

[4] S. Asadinia, E. Yaghoubi, M. Mehrabi, “3D Mesh ONoC: Design of low Insertion Loss and Non-blocking Optical Router and Efficient Routing Algorithm,” 14th International Conference on Information and Knowledge Technology (IKT), 2023, DOI: 10.1109/IKT62039.2023.10433045.

[5] A.W. Poon, F. Xu, and X. Luo, “Cascaded active silicon micro resonator array cross-connect circuits for WDM networkson-chip,” in Proc. SPIE, vol. 6898, pp. 689812-689812-10, 2008.

[6] Y. Ye et al., “3-D mesh-based optical network-on-chip for multiprocessor system-on-chip,” IEEE Trans. Comput. -Aided Des. Integr. Circuits Syst., vol. 32, no. 4, pp. 584–596, Apr. 2013.

[7] Ben Ahmed A, Ben Abdallah A,” Hybrid silicon-photonic network-on-chip for future generations of high-performance many-core systems, “The Journal of Supercomputing, DOI: 10.1007/s11227-015-1539-0.

[8] A. Reza, Sarbazi-Azad H, A. Khademzadeh, H. Shabani, Niazmand B,” A loss aware scalable topology for photonic on chip interconnection networks, “The Journal of Supercomputing, DOI: 10.1007/s11227-013-1026-4.

[9] Pengxing Guo, Weigang Hou, Lei Guo, Wei Sun, Chuang Liu, Hainan Bao, Luan H. K. Duong, and Weichen Liu,” Fault-Tolerant Routing Mechanism in 3D Optical Network-on-Chip based on Node Reuse,” IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS.

[10] J. Hao, Ting Zh, Yunchou Zh, X. Yuhao, D. Jincheng, Lei Zh, D. Jianfeng, Xin F and Lin Y, "Six- port optical switch for cluster-mesh photonic network-on-chip", Nanophotonics; 7(5): 827–835, 2018: 827–835,2018.

[11] A. Shacham, K. Bergman, and L. P. Carloni, “Photonic networks-on-chip for future generations of chip multiprocessors,” IEEE Trans. Comput., vol. 57, no. 9, pp. 1246–1260, Sep. 2008.

[12] Y. Xie, W. Zhao, W. Xu, Y. Huang, and Z. Zhang, “Performance optimization and evaluation for mesh-based optical networks-on-chip,” IEEE Photon. J., vol. 7, no. 4, Aug. 2015, Art. No. 7801412.

[13] J. H. Lau, "Through-Silicon Vias for 3D Integration," New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012, ISBN-13 978-0071785143.

[14] K. Zhu, H. Gu, Y. Yang, W. Tan, and B. Zhang, "A 3D multilayer optical network on chip based on mesh topology," Photon. Netw. Commun. vol. 2016, no. 3, pp. 293–299, 2016.

[15] J. H. Lee, "Insertion Loss-Aware Routing Analysis and Optimization for a Fat-Tree-Based Optical Network-on-Chip", IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 37. No. 3, pp. 559-572.

[16] P. Guo, W. Hou, L. Guo, Q. Yang, Y. Ge, Liang H," Low Insertion Loss and Non-Blocking Microring-Based Optical Router for 3D Optical Network-on-Chip," IEEE Photonics Journal. DOI:10.1109/JPHOT.2018.2796094.

[17] P. Guo, W. Hou, and L. Guo, "Designs of low insertion loss optical router and reliable routing for 3D optical network on-chip," Sci. China-Inf. Sci., vol. 59, no. 10, 2016, Art. No. 102302.

[18] W. Hou, L. Guo, Q. Cai, and L. Zhu, "3D Torus ONoC: Topology design, router modeling and adaptive routing algorithm," in Proc. IEEE Int. Conf. Opt. Commun. Netw, 2014, pp. 1–4.

[19] S. Asadinia, M. Mehrabi, E. Yaghoubi, "Non-Blocking and Multi Wavelength Optical Router Design based on Mach-zehnder Interferometer in 3-D Optical Network on Chip," Majlesi Journal of Electrical Engineering, 2021, DOI: https://doi.org/10.52547/mjee.15.2.73.

[20] N. Dahir, T. Mak, Al-Dujaily R, Yakovlev A," Highly adaptive and deadlock-free routing for three-dimensional networks-on-chip. "IET Computers & Digital Techniques. 2013, Vol. 7, No. 6, pp. 255-263.

[21] Chiu G.M," The odd-even turn model for adaptive routing. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, "2000, Vol. 11, No. 7, pp. 729-738.

[22] P. Bahrebar, Stroobandt D," The Hamiltonian-based odd–even turn model for maximally adaptive routing in 2D mesh networks-on-chip. "Computers & Electrical Engineering, 2015, Vol. 45, No. pp. 386-401.

[23] A. Shacham, K. Bergman, Carloni L.P," On the Design of a Photonic Network-on-Chip. "First International Symposium on Networks-on-Chip (NOCS'07), 2007, pp. 53-64, 7-9.

[24] Huaxi Gu, Jiang Xu, 2009. "Design of 3D Optical Network on Chip", in Proc. Conf., 2009, IEEE.

[25] Yaoyao Ye, Xiaowen Wu, Mahdi N," 3-D Mesh-Based Optical Network-on-Chip for Multiprocessor System-on-Chip." IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTER-AIDED DESIGN OF INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS, 2013, VOL. 32, NO. 4

[26] Kexin Zhu, Huaxi GU, Yintang Yang, Wei Tan, Bowen Zhang," A 3D multilayer optical network on chip based on mesh topology. "Photon Netw Commun. 2016, DOI 10.1007/s11107-016-0627-2.

[27] Muhammad R.Y, Ning Wu, Gaizhen Yan, A. Tanveer, Jinbao Z and Yuanyuan Z," HoneyComb ROS: A 6 * 6 Non-Blocking Optical Switch with Optimized Reconfiguration for ONoCs. "Electronics 2019, 8, 844; doi:10.3390/electronics8080844.

[28] J. Chan, G. Hendry, A. Biberman, K. Bergman, Carloni L.P," Phoenixsim: a simulator for hysical-layer analysis of chip-scale photonic interconnection networks." 2010, Proceedings of theConference on Design Automation and Test in Europe 691–696.

[29] A. Varga, Hornig R," An overview of the OMNeT++simulation environment. "In: Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems and Workshops, 2008, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), p 60.

[30] Varga A," The OMNeT++discrete event simulation system. "In: Proceedings of the European Simulation Multi conference (ESM'2001), vol S 185. sn, p 65 The OMNeT++discrete event simulation system.

[31] J. Chan, A. Biberman, Lee B.G, Bergmann K," Insertion loss analysis in a photonic interconnection network for on-chip and off-chip communications. "21st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2008, pp. 300-301, 9-13.

[32] R. Ji, L. Yang, L. Zhang, Y. Tian, J. Ding, H. Chen, Y. Lu, P. Zhou, Zhu W," Microring-resonator-based four-port optical router for photonic networks-on-chip." Optics Express. Vol. 19, No. 20, pp. 18945-18955.

[33] Chaudhari B. S, Patil S. S," Optimized designs of low loss non-blocking optical router for ONoC applications." 2019, (IJIT). DOI: 10.1007/s41870-019-00298-7.

[34] J. Chan, G. Hendry, K. Bergman, Carloni L.P," Physical-Layer Modeling and System-Level Design of Chip-Scale Photonic Interconnection Networks." IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2011, vol. 30, no. 10, pp. 1507-1520. DOI:10.1109/TCAD.2011.2157157.

[35] Lee B. G, A. Biberman, D. Po, M. Lipson, Bergman K," All-Optical Comb Switch for Multi wavelength Message Routing in Silicon Photonic Networks." 2008, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 20, no. 10, pp. 767-769.

[36] N Bagheri Renani, E Yaghoubi," A Review of Optical Routers in Photonic Networks-on-Chip," A Literature Survey. J. ADV COMP ENG TECHNOL. 2018, 4(3) pp. 143-154

[37] N.B. Renani, E. Yaghoubi, N Sadehnezhad, et al. "NLR-OP: a high-performance optical router based on North-Last turning model for multicore processors." J Supercomput ,2022, 78, 2442–2476. DOI: 10.1007/s11227-021-03920-3.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 178-188

Presenting a Hybrid Model on Machine Learning and Principal Component Analysis for Action Detection in the Internet of Things

Zahra Shahpar[1*], Mohammadreza Badragheh[2]

[1] Department of Computer Engineering, Zabol Branch, Islamic Azad University, Zabol, Iran
[2] Department of Computer Engineering, Ferdows Branch, Islamic Azad University, Ferdows, Iran

Received: 25 March 2025, Revised: 20 October 2025, Accepted: 10 February 2026
Paper type: Research

Abstract

With the rapid expansion of the Internet of Things and the increase in the number of devices connected to the Internet, the security of Internet of Things systems has become a serious challenge. Due to the easy access to these devices and existing security weaknesses, we are witnessing various attacks and an increasing penetration of these systems. One of the effective tools in dealing with these threats is intrusion detection systems. In this study, a hybrid model for intrusion detection in Internet of Things networks is presented that uses machine learning methods (logistic regression, support vector machine, nearest neighbor, random forest, decision tree, and multilayer neural network) along with principal component analysis (PCA) to reduce data dimensions. The proposed method was implemented and investigated on the UNSW-NB15 dataset. Based on the results obtained; The logistic regression model with a single-class accuracy of 97.84% and a multi-class accuracy of 89.81%, the support vector machine model with a single-class accuracy of 97.85% and a multi-class accuracy of 89.89%, the nearest neighbor model with a single-class accuracy of 98.31% and a multi-class accuracy of 88.55%, the decision tree model with a single-class accuracy of 98.11% and a multi-class accuracy of 85.45%, and the multilayer neural network model with a single-class accuracy of 98.39% and a multi-class accuracy of 89.94% have been able to identify different types of attacks. In particular, the results obtained indicate that the random forest model with a single-class accuracy of 98.63% and a multi-class accuracy of 89.06% has the best performance among the models. Also, the false positive rate was reduced to about 4% and the processing time was less than 1 millisecond. Comparison of the proposed method with other methods showed that the proposed method, with an accuracy of 84% provides significant improvement in accuracy, efficiency, and speed. Overall, the proposed model can be used as an effective and reliable method for detecting attacks in IoT networks, especially in resource-constrained environments.

Keywords: IoT, Intrusion Detection System, Principal Component Analysis (PCA), Machine Learning

[*] Corresponding Author's email: zahrashahpar@iau.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۷۸ الی ۱۸۸

ارائه مدلی ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین و تحلیل مولفه‌های اصلی برای تشخیص حملات در اینترنت اشیا

زهرا شهپر[1*]، محمدرضا بدرقه[2]

[1] گروه مهندسی کامپیوتر، واحد زابل، دانشگاه آزاد اسلامی، زابل، ایران

[2] گروه مهندسی کامپیوتر، واحد فردوس، دانشگاه آزاد اسلامی، فردوس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با گسترش سریع اینترنت اشیا و افزایش تعداد دستگاه‌های متصل به اینترنت، امنیت سیستم‌های اینترنت اشیا به چالشی جدی تبدیل شده است. به دلیل دسترسی ساده به این دستگاه‌ها و ضعف‌های امنیتی موجود، شاهد حملات متنوع و افزایش نفوذ به این سیستم‌ها هستیم. یکی از ابزارهای مؤثر در مقابله با این تهدیدات، سیستم‌های تشخیص نفوذ است. در این پژوهش مدلی ترکیبی برای تشخیص نفوذ در شبکه‌های اینترنت اشیا ارائه می‌شود که از روش‌های یادگیری ماشین (رگرسیون لجستیک، ماشین بردار پشتیبان، نزدیک‌ترین همسایه، جنگل تصادفی، درخت تصمیم و شبکه عصبی چندلایه) در کنار تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای کاهش ابعاد داده‌ها بهره می‌برد. روش پیشنهادی بر روی مجموعه داده UNSW-NB15 پیاده‌سازی و بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده؛ مدل رگرسیون لجستیک با دقت تک کلاسی ۹۷٫۸۴٪ و دقت چند کلاسی ۸۹٫۸۱٪، مدل ماشین بردار پشتیبان با دقت تک کلاسی ۹۷٫۸۵٪ و دقت چند کلاسی ۸۹٫۸۹٪، مدل نزدیک‌ترین همسایه با دقت تک کلاسی ۹۸٫۳۱٪ و دقت چند کلاسی ۸۸٫۵۵٪، مدل درخت تصمیم با دقت تک کلاسی ۹۸٫۱۱٪ و دقت چند کلاسی ۸۵٫۴۵٪ و مدل شبکه عصبی چند لایه با دقت تک کلاسی ۹۸٫۳۹٪ و دقت چند کلاسی ۸۹٫۹۴٪ توانسته اند انواع حملات مختلف را شناسایی کنند. به طور خاص نتایج به دست آمده حاکی از آن است که ، مدل جنگل تصادفی با دقت تک کلاسی ۹۸٫۶۳٪ و دقت چند کلاسی ۸۹٫۰۶٪. بهترین عملکرد را در میان مدل‌ها دارد. همچنین نرخ مثبت کاذب به حدود ۴٪ کاهش یافت و زمان پردازش به کمتر از ۱ میلی ثانیه رسید. مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها از نشان داد که روش پیشنهادی با دقت ٪۸۴، بهبود قابل توجهی در دقت، کارایی و سرعت ارائه می‌دهد. به طور کلی، مدل پیشنهادی می‌تواند به عنوان روشی مؤثر و قابل اعتماد برای تشخیص حملات در شبکه‌های اینترنت اشیا به ویژه در محیط‌های با منابع محدود مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: اینترنت اشیا، سیستم تشخیص نفوذ، تحلیل مؤلفه‌های اصلی(PCA) ، یادگیری ماشین

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: zahrashahpar@iau.ac.ir

۱- مقدمه

اینترنت اشیا[1] شبکه‌ای از دستگاه‌های متصل است که امکان تبادل اطلاعات و تصمیم‌گیری بدون دخالت انسان را فراهم می‌کند. این دستگاه‌ها در حوزه‌هایی مانند خانه‌های هوشمند برای مدیریت خودکار سیستم‌های روشنایی و گرمایشی، مراقبت‌های بهداشتی برای نظارت از راه دور بر سلامت بیماران با استفاده از دستگاه‌های پوشیدنی، و صنعت برای بهبود بهره‌وری کاربرد دارند [۱]. با این حال، محدودیت‌های منابع مانند قدرت پردازش پایین، حافظه محدود، ظرفیت باتری کم و ابعاد فیزیکی کوچک، این دستگاه‌ها را در برابر حملات سایبری آسیب‌پذیر می‌سازد. برای مثال، حملات می‌توانند دسترس‌پذیری سیستم‌ها را مختل کنند، منابع انرژی را مصرف کنند و منجر به خاموشی‌های گسترده شوند. علاوه بر این، مسائل حریم خصوصی و محرمانگی داده‌ها چالش‌های دیگری ایجاد می‌کند، زیرا روش‌های رمزنگاری سنتی برای دستگاه‌هایی با منابع محدود مناسب نیستند و نیاز به رویکردهای متفاوت مانند رمزنگاری سبک وجود دارد [۵-۲]. بات‌نت میرا[2] نمونه‌ای عینی از این حملات است که در سال ۲۰۱۶ هزاران دستگاه متصل به اینترنت اشیاء مانند دوربین‌های نظارتی و روترهای خانگی را با استفاده از رمزهای عبور پیش‌فرض آلوده کرد و از آن‌ها برای اجرای حملات منع سرویس[3] علیه وب‌سایت‌هایی مانند توئیتر[4] استفاده نمود. در نمونه‌ای دیگر، آسیب‌پذیری در پمپ‌های انسولین و ضربان‌سازهای هوشمند امکان کنترل از راه دور و تغییر دوز دارو توسط مهاجم را فراهم کرد، که تهدیدی مستقیم برای جان بیماران محسوب می‌شد [۹-۶]. این گونه از حملات نشان‌دهنده اهمیت و عمق این آسیب‌پذیری‌ها است. سیستم‌های تشخیص نفوذ[5] ابزار مؤثری برای مقابله با این تهدیدات هستند، زیرا با تحلیل مداوم ترافیک شبکه، فعالیت‌های غیرمجاز را شناسایی و از نفوذ جلوگیری می‌کنند. در شبکه‌های اینترنت اشیاء با محدودیت منابع، نیاز به سیستم‌های تشخیص نفوذ بهینه که بدون کاهش سرعت یا مصرف بالای انرژی عمل کنند؛ احساس می‌شود [۱۰-۱۲]. از این رو در این پژوهش مدلی ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین[6] و تحلیل مؤلفه‌های اصلی[7] برای کاهش ابعاد داده‌ها ارائه می‌شود. هدف پژوهش افزایش دقت تشخیص حملات، کاهش نرخ مثبت کاذب برای کاهش هشدارهای نادرست، و کاهش زمان پردازش برای سازگاری با محیط‌های واقعی است. مراحل انجام پژوهش عبارت‌اند از جمع‌آوری داده‌ها، پیش‌پردازش، اعمال PCA برای استخراج ویژگی‌های کلیدی، آموزش و ارزیابی مدل‌ها. برای این منظور از مجموعه داده UNSW-NB15 استفاده شده است.

در ادامه، بخش دوم به پیشینه پژوهش می‌پردازد، بخش سوم روش پیشنهادی را توصیف می‌کند، بخش چهارم نتایج تجربی را ارائه می‌دهد، و بخش پنجم به بحث و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- پیشینه پژوهش

پژوهش‌های متعددی در زمینه تشخیص نفوذ در شبکه‌های اینترنت اشیا انجام شده است. احمد[8] و همکاران [۱۳] با بررسی روش‌های تشخیص ناهنجاری نشان دادند که مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند در شناسایی حملات شبکه عملکرد مناسبی داشته باشند. دیرو[9] و همکاران [۱۴] با به‌کارگیری رویکردهای مبتنی بر یادگیری عمیق توزیع‌شده برای شناسایی حملات در محیط‌های اینترنت اشیا بر روی مجموعه داده‌هایی مانند KDDCUP '99، NSL-KDD و ISCX، توانستند نرخ تشخیص بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک به دست آورند. آن‌ها نشان دادند که یادگیری عمیق می‌تواند به طور مؤثر در تشخیص فعالیت‌های ناهنجار عمل کند، هرچند چالش‌هایی مانند توزیع نامتوازن داده‌ها همچنان وجود دارد.

بابار[10] و همکاران [۱۵] در زمینه امنیت شبکه‌های حسگر بی‌سیم مکانیسم مدیریت کلید و مبتنی بر هش برای خوشه‌بندی پیشنهاد دادند که از پیش‌توزیع کلید تصادفی استفاده می‌کند. این رویکرد با ارزیابی شاخص‌هایی مانند نرخ از دست دادن بسته، مصرف انرژی و تأخیر، امنیت ارتباطات تک‌هاپ و چندهاپ را افزایش می‌دهد، اما محدودیت‌هایی مانند عدم تحرک سرخوشه‌ها دارد.

در حوزه انتخاب و استخراج ویژگی، فتانی[11] و همکاران [۱۶] با استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی و روش‌های بهینه‌سازی رویکردی ترکیبی برای بهبود کارایی سیستم‌های تشخیص نفوذ پیشنهاد کردند.

دیشا[12] و همکاران [۱۷] با توجه به اثربخشی روش‌های یادگیری ماشین، چندین مدل یادگیری ماشین را برای سیستم تشخیص نفوذ اعمال کردند. آن‌ها برای تحلیل عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین

[1] Internet of things (IoT)
[2] Mirai
[3] Distributed Denial of Service (DDoS)
[4] Twitter
[5] Intrusion Detection System (IDS)
[6] Machine learning (ML)
[7] Principal Component Analysis (PCA)
[8] Ahmed
[9] Diro
[10] Babar
[11] Fatani
[12] Disha

مانند درخت تصمیم[1] و شبکه‌های عصبی بازگشتی از مجموعه داده‌های UNSW-NB 15 و Network TON_IoT استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، استفاده از تکنیک انتخاب ویژگی مبتنی بر ناخالصی جینی در جنگل تصادفی وزنی، عملکرد تشخیص نفوذ در داده‌های نامتعادل را بهبود می‌بخشد.

محی‌الدین و همکاران [۱۸] از ضریب همبستگی پیرسون[2] و جنگل جداسازی[3] برای کاهش ابعاد و حذف موارد پرت در مجموعه داده Bot-IoT استفاده کردند. این روش نرخ تشخیص و دقت را ارتقا داده و عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر نشان می‌دهد.

پژوهش‌های جدید نیز تمرکز ویژه‌ای بر بهینه‌سازی مدل‌ها برای محیط‌های کم‌منبع داشته‌اند. به عنوان نمونه، تیواری[4] و همکاران [۱۹] تکنیک تشخیص نفوذ مبتنی بر یادگیری ماشین برای IoT ارائه کردند که توانست با استفاده از تکنیک‌های انتخاب ویژگی و کاهش ابعاد، دقت خوبی را بر روی مجموعه داده WUSTL-IIOT-2021 به دست آورد. آن‌ها نشان دادند ترکیب بهینه‌سازی ازدحام ذرات با PCA و مدل‌های رگرسیون، دقت ٪۱۰۰ را در برخی ترکیب‌ها به دست می‌آورد و دسترسی به منابع را تسریع می‌کند.

پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تشخیص نفوذ به ترتیب زمانی و با ذکر روش مورد استفاده، مزیت کلیدی و با توجه به مجموعه داده‌های مورد استفاده در، جدول ۱ خلاصه شده‌اند. با وجود دستاوردهای حاصل شده در پژوهش‌های پیشین همچنان چالش‌هایی باقی است:

- بسیاری از مدل‌ها نیازمند منابع پردازشی و حافظه بالا هستند و اجرای آن‌ها در دستگاه‌های IoT دشوار است.
- در برخی پژوهش‌ها، نرخ مثبت کاذب همچنان بالاست و دقت مدل‌ها در شناسایی حملات ناشناخته کافی نیست.
- مقایسه مستقیم با مجموعه‌داده‌های جدیدتر مانند UNSW-NB15 کمتر مورد توجه قرار گرفته است

۳- روش پیشنهادی

۳-۱- معماری سیستم تشخیص نفوذ

سیستم‌های تشخیص نفوذ مبتنی بر یادگیری ماشین ابزارهایی مؤثر برای حفاظت از شبکه‌های اینترنت اشیا در برابر حملات سایبری به ویژه در محیط‌هایی با منابع محدود هستند. در معماری پیشنهادی، ابتدا لاگ‌های ترافیکی شامل شامل اطلاعاتی مانند سرآیند بسته‌ها، درخواست‌های سرویس و فعالیت‌های دستگاه از دستگاه‌های IoT جمع‌آوری شده و به سرورهای ذخیره‌سازی توزیع‌شده ارسال می‌شوند تا دو ویژگی مقیاس‌پذیری و دسترسی سریع به داده‌ها تضمین شود. سپس، داده‌ها به موتور تحلیل مبتنی بر یادگیری ماشین که از روش‌های ترکیبی (تحلیل امضا و ناهنجاری) برای شناسایی فعالیت‌های مشکوک استفاده می‌کنند؛ منتقل می‌شوند. در صورت تشخیص نفوذ، سیستم گزارش‌هایی شامل اطلاعات نفوذکننده، زمان و نوع حمله تولید شده را به مدیر شبکه هشدار می‌دهد. دیکشنری نفوذ به‌صورت خودکار با داده‌های جدید به‌روزرسانی می‌شود تا الگوهای نوظهور را شناسایی کند. این معماری با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی ابعاد داده‌ها را کاهش می‌دهد تا فشار بر منابع سخت‌افزاری کم شود [۲۰]. شکل ۱ معماری سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی شامل بخش‌های جمع‌آوری لاگ‌های ترافیکی، موتور تحلیل و دیکشنری نفوذ را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مرور پژوهش‌های پیشین

شماره مرجع	سال	روش	مجموعه داده	مزیت کلید	محدودیت
۱۳	۲۰۱۶	یادگیری عمیق	DARPA KDD	مرور جامع ناهنجاری‌ها	پچیدگی- عدم ارزیابی کمی
۱۵	۲۰۱۶	مدیریت کلید مبتنی بر هش	KDD	کاهش مصرف انرژی و تأخیر	عدم تحرک سرخوشه‌ها
۱۴	۲۰۱۸	یادگیری عمیق توزیع‌شده	KDD'99, NSL-KDD ، ISCX	بهبود تشخیص حملات	توزیع نامتوازن داده‌ها
۱۶	۲۰۲۱	هوش جمعی و روش‌های بهینه‌سازی	CIC2017 , NSL-KDD ، BoT-IoT, KDD99	دقت بالا در F1-score	وابستگی به داده‌ها
۱۷	۲۰۲۲	انتخاب ویژگی با جنگل تصادفی وزنی	UNSW-NB15 Network TON_IoT	عملکرد برتر در داده‌های نامتعادل	تمرکز بر طبقه‌بندی باینری
۱۸	۲۰۲۳	PCC و جنگل جداسازی	Bot-IoT	کاهش هزینه محاسبات	داده‌های نامتعادل
۱۹	۲۰۲۴	PSO با PCA و MARS	WUSTL-IIOT-2021	دقت ٪۱۰۰ در ترکیب‌ها	بار محاسباتی در

[1] Decision tree (DT)

[2] Pearson Correlation Coefficients (PCC)

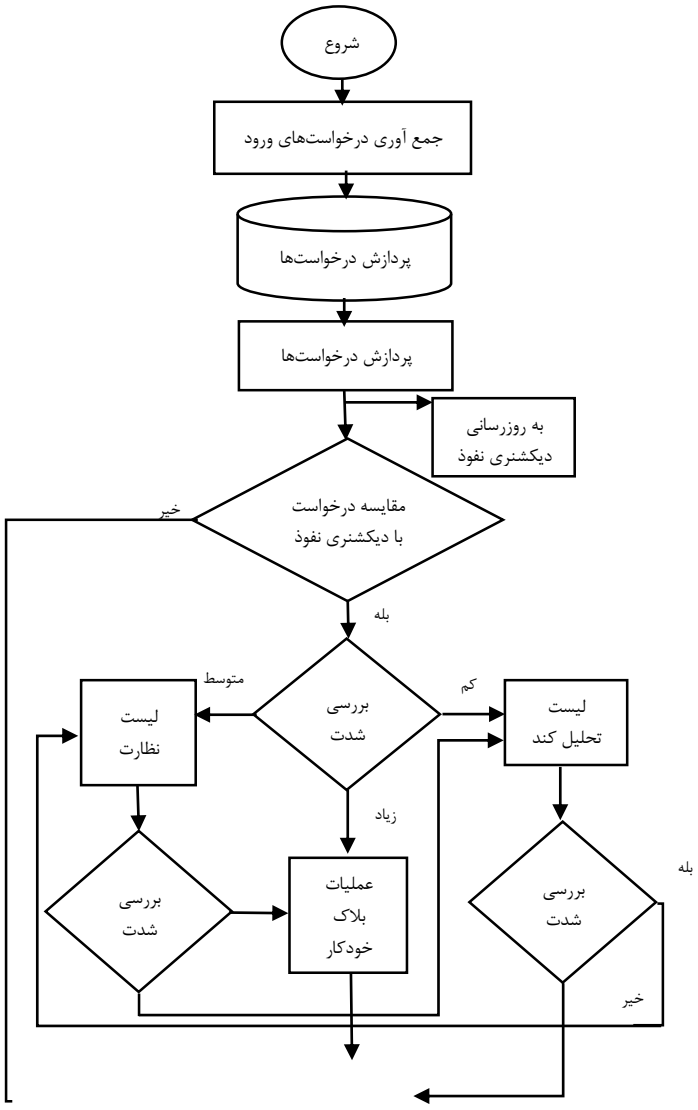
[3] Isolation Forest (IF)

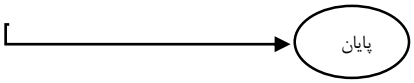
[4] Tiwari

محیط‌های بزرگ					

۳-۲- چارچوب PCA و کاربرد آن در تشخیص نفوذ

تحلیل مولفه‌های اصلی تکنیکی برای کاهش ابعاد داده‌ها و استخراج ویژگی‌های کلیدی است که زمان پردازش را کاهش داده و دقت مدل‌ها را بهبود می‌بخشد. در این روش، داده‌های جمع‌آوری‌شده از شبکه IoT ابتدا استانداردسازی می‌شوند (کسر میانگین و تقسیم بر انحراف معیار). سپس، ماتریس همبستگی برای تحلیل روابط متغیرها محاسبه می‌شود. در ادامه، مقادیر ویژه و بردارهای ویژه استخراج شده و مؤلفه‌های اصلی با بیشترین واریانس انتخاب می‌شوند. این فرآیند داده‌ها را به فضای جدید با ابعاد کمتر تبدیل می‌کند، در حالی که اطلاعات کلیدی حفظ می‌شود. این روش به‌ویژه برای دستگاه‌های IoT با منابع محدود مناسب است، زیرا مصرف انرژی و زمان پردازش را کاهش می‌دهد [۲۱]. شکل ۲ مراحل PCA شامل استانداردسازی، محاسبه مقادیر ویژه و انتخاب مؤلفه‌ها در سیستم تشخیص نفوذ را نشان می‌دهد.

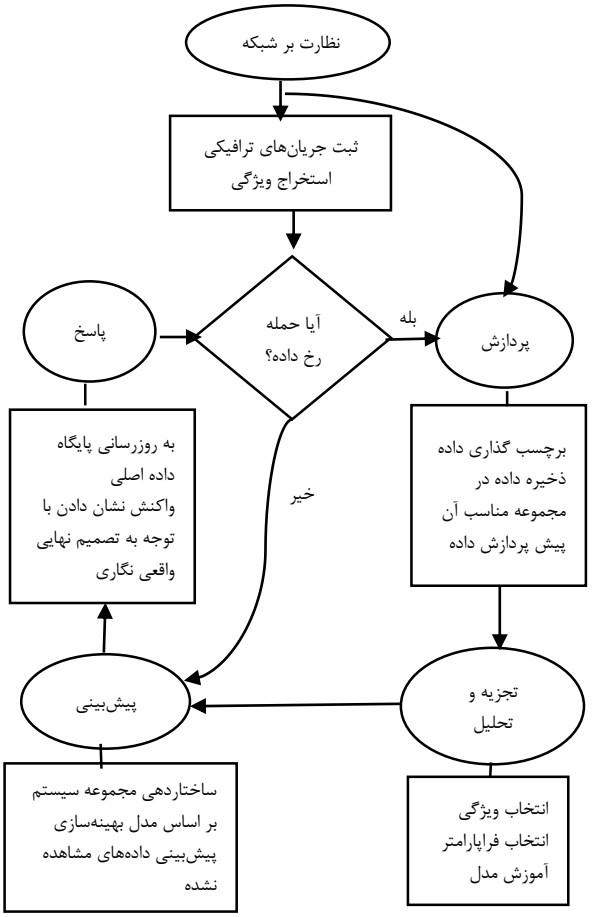




شکل ۱. معماری سیستم تشخیص نفوذ [۲۰]

استفاده از PCA در طراحی سیستم‌های تشخیص نفوذ به مجموعه‌ای از مزایا منجر می‌شود [۲۱]:

- **کاهش زمان پردازش:** با کاهش ابعاد داده و تمرکز بر ویژگی‌های مهم، زمان پردازش به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.
- **بهبود دقت مدل:** با استفاده از داده‌های کمتر و مهم‌تر، مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند دقت بالاتری در شناسایی نفوذها داشته باشند.
- **کاهش مصرف منابع:** سیستم‌های سبک‌تر با نیاز به منابع کمتر می‌توانند به راحتی بر روی دستگاه‌های IoT پیاده‌سازی شوند



شکل ۲. مراحل روش پیشنهادی با استفاده از PCA [۲۱]

۳-۳- مراحل روش پیشنهادی

روش پیشنهادی شامل پنج مرحله زیر است که به طور دقیق و گام

به گام به منظور دستیابی به اهداف پژوهش طراحی شده‌اند.

۳-۳-۱- جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های ترافیکی از شبکه IoT، شامل آدرس‌های IP، پورت‌ها، پروتکل‌ها، تعداد بایت‌های منتقل‌شده و ویژگی‌های جیتر، از مجموعه داده UNSW-NB15 جمع‌آوری می‌شوند. این مجموعه شامل ۲،۵۴۰،۰۴۴ جریان (٪۸۷,۳۵ خوش‌خیم و ٪۱۲,۶۵ حمله) با ۴۹ ویژگی است.

۳-۳-۲- پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌ها نرمال‌سازی شده و نویز حذف می‌شود تا برای تحلیل آماده شوند.

۳-۳-۳- تحلیل مولفه‌های اصلی

داده‌ها و ویژگی‌های کلیدی با حفظ حداکثر واریانس انتخاب می‌شوند تا ابعاد داده‌ها کاهش یابد. در فرآیند آموزش، داده‌های کاهش‌یافته با PCA به نسبت ۷۰:۳۰ به مجموعه‌های آموزش و آزمایش تقسیم شدند. اعتبارسنجی متقاطع ۵-تایی[1] برای جلوگیری از بیش‌برازش و بهینه‌سازی مدل‌ها استفاده می‌شود. تنظیم‌های بهینه برای هر مدل با آزمایش‌های اولیه بر روی مجموعه داده UNSW-NB15 صورت گرفته تا دقت و سرعت پردازش بهینه شوند. این فرآیند امکان شناسایی الگوهای حملات پیچیده مانند DDoS را با حداقل منابع محاسباتی فراهم می‌کند.

۳-۳-۴- آموزش مدل‌های یادگیری ماشین

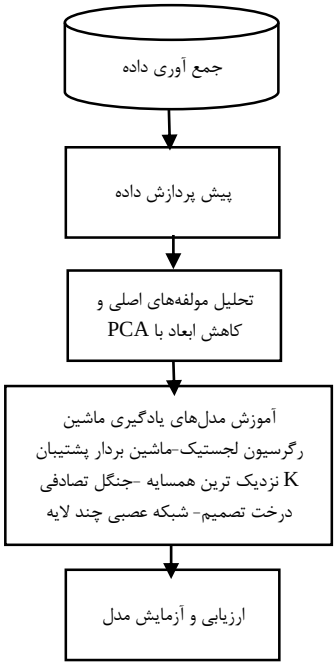
مدل‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون لجستیک[2]، ماشین بردار پشتیبان خطی[3]، K نزدیک‌ترین همسایه[4]، جنگل تصادفی[5]، درخت تصمیم و شبکه عصبی چندلایه[6] بر روی داده‌های کاهش‌یافته آموزش می‌بینند.

- رگرسیون لجستیک: روشی آماری است که برای پیش‌بینی احتمال وقوع یک رویداد دوتایی (مثل بله یا خیر) استفاده می‌شود. این مدل از تابع لجستیک برای تبدیل ورودی‌های خطی به خروجی‌های میان ۰ و ۱ استفاده می‌کند؛ و برای طبقه‌بندی باینری مناسب است [۱۷].
- ماشین بردار پشتیبان خطی: با ایجاد مرز تصمیم، داده‌ها را با حداکثر حاشیه تفکیک می‌کند[۱۷].
- K نزدیک‌ترین همسایه: بر اساس فاصله اقلیدسی، نزدیک‌ترین همسایگان را برای طبقه‌بندی انتخاب می‌کند[۱۷].
- جنگل تصادفی: با ترکیب چندین درخت تصمیم، بیش‌برازش را کاهش داده و دقت بالایی دارد[۱۷].
- درخت تصمیم: داده‌ها را به صورت درختی تقسیم کرده و ویژگی‌های کلیدی را شناسایی می‌کند [۱۷].
- شبکه عصبی چندلایه: با لایه‌های نورونی، الگوهای پیچیده را شناسایی می‌کند[۱۷].

۳-۳-۵- ارزیابی و آزمایش

عملکرد مدل‌ها با معیارهای دقت تک‌کلاسی و چندکلاسی، نرخ مثبت کاذب و زمان پردازش ارزیابی می‌شود.

مراحل روش پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. مراحل روش پیشنهادی

۴- نتایج تجربی روش پیشنهادی

همان طور که در بخش قبل بیان شده برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی پژوهش از مجموعه داده UNSW-NB15 که توسط آزمایشگاه سایبری مرکز امنیت سایبری استرالیا در سال ۲۰۱۵ منتشر شد، استفاده شده است. این مجموعه شامل ۲،۵۴۰،۰۴۴ جریان داده (٪۸۷,۳۵ خوش‌خیم و ٪۱۲,۶۵ حمله) با ۴۹ ویژگی

[1] K(5)-fold cross-validation
[2] Logistic regression
[3] Support vector machines (SVM)
[4] K-Nearest Neighbors (KNN)
[5] Random forest (RF)
[6] Multilayer perceptron (MLP)

مانند آدرس‌های IP، پورت‌ها، پروتکل‌ها، تعداد بایت‌های منتقل شده، Sload، Dload، مقادیر جیتر و اطلاعات حملات است. این ویژگی‌ها امکان تحلیل دقیق ترافیک شبکه را فراهم می‌کنند [۲۳، ۲۲]. هدف این بخش ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری بیان شده در ترکیب با PCA برای دستیابی به اهداف کمی پژوهش شامل افزایش دقت و کاهش نرخ مثبت کاذب و زمان پردازش است.

۴-۱- فرآیند آزمایش

مطابق مراحل بیان شده در روش پیشنهادی داده‌های نرمال‌سازی شده ابتدا با PCA پردازش می‌شوند تا ابعاد کاهش یابد. بدین ترتیب که استانداردسازی داده‌ها (کسر میانگین و تقسیم بر انحراف معیار) انجام شده، سپس ماتریس همبستگی و مقادیر ویژه محاسبه می‌گردد تا مؤلفه‌های اصلی با حداکثر واریانس انتخاب شوند. داده‌ها به دو حالت تک‌کلاسی (یک ویژگی کلیدی) و چندکلاسی (چند ویژگی) تقسیم می‌شوند. مجموعه داده به نسبت ۷۰:۳۰ (آموزش:آزمایش) تقسیم شده و اعتبارسنجی متقاطع ۵-تایی برای بهینه‌سازی مدل‌ها به کار گرفته شد. مدل‌های یادگیری ماشین بر PCA ترکیب می‌شوند. پارامترهای هر یک از مدل‌های یادگیری ماشین بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۲ تنظیم شده است؛ تا تکرارپذیری فرآیند تضمین شود. این تنظیمات بر اساس آزمایش‌های اولیه بهینه‌سازی شده‌اند تا دقت و کارایی در محیط‌های IoT بهبود یابد. در پایان مدل‌ها با معیارهای دقت تک‌کلاسی، دقت چندکلاسی، نرخ مثبت کاذب و زمان پردازش ارزیابی شدند.

۴-۲- نتایج مدل‌های یادگیری ماشین

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی هر یک از مدل‌های یادگیری ماشین ارائه می‌شود.

۴-۲-۱- رگرسیون لجستیک

در این پژوهش از مدل رگرسیون لجستیک برای تشخیص خطا استفاده شده است که تأثیر PCA بر عملکرد رگرسیون لجستیک با مقایسه دقت قبل و بعد از کاهش ابعاد در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای مدل‌های یادگیری به کار گرفته شده در روش پیشنهادی

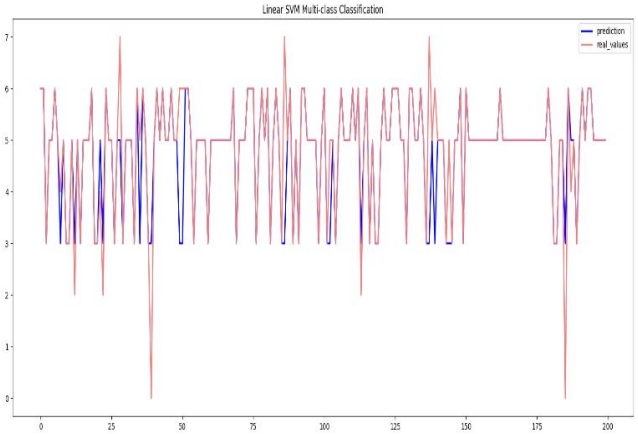
مدل یادگیری ماشین	پارامترها	مقدار
رگرسیون لجستیک	نرخ یادگیری، حداکثر تکرار	۰،۰۱، ۱۰۰۰
SVM خطی	پارامتر منظم‌سازی(C)	۱،۰
KNN	تعداد همسایگان(k)	۵
جنگل تصادفی	تعداد درختان، حداکثر عمق	۱۰۰، ۱۰
درخت تصمیم	حداکثر عمق، معیار تقسیم	۱۰، جینی
شبکه عصبی چندلایه	تعداد لایه‌های مخفی نرخ یادگیری	۲ لایه (۱۰۰ نورون)، ۰،۰۰۱

۴-۲-۲- ماشین بردار پشتیبان خطی

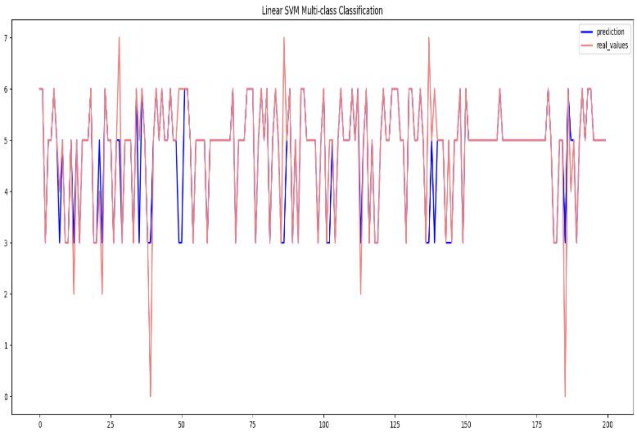
ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که برای تفکیک داده‌ها به دو کلاس مختلف استفاده می‌شود. این مدل با ایجاد یک خط (یا ابرصفحه در ابعاد بالاتر) به نام "مرز تصمیم" کار می‌کند که داده‌ها را به بهترین نحو از یکدیگر جدا می‌کند. هدف SVM حداکثر کردن فاصله بین این مرز و نزدیک‌ترین نقاط داده از هر کلاس است که به آن‌ها "پشتیبان" می‌گویند. شکل ۵ تأثیر PCA بر عملکرد SVM خطی را نشان می‌دهد.

۴-۲-۳- K نزدیک ترین همسایه

این مدل بر اساس نزدیکی داده‌ها به یکدیگر عمل می‌کند و برای طبقه‌بندی یک نمونه جدید، به k نزدیک‌ترین همسایه‌اش نگاه می‌کند. با استفاده از معیارهای فاصله مانند فاصله اقلیدسی، KNN می‌تواند الگوها و انحرافات ناشناخته را شناسایی کند. تأثیر PCA بر KNN در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴. نتایج تشخیص نفوذ قبل و بعد ازاعمال PCA در مدل رگرسیون لجستیک



شکل ۵. نتایج تشخیص نفوذ قبل و بعد ازاعمال PCA در ماشین بردار پشتیبان خطی

۴-۲-۴- جنگل تصادفی

جنگل تصادفی شامل ساخت تعدادی درخت تصمیم به‌صورت تصادفی و ترکیب نتایج آن‌ها است که می‌تواند ویژگی‌های پیچیده داده‌ها را شناسایی کند. RF به‌دلیل قابلیت مدیریت داده‌های بزرگ و کاهش احتمال بیش‌برازش به‌ویژه در کاربردهای امنیت سایبری، به محبوبیت رسیده است. نتایج اعمال این مدل در شکل ۷ نشان داده شده است.

۴-۲-۵- درخت تصمیم

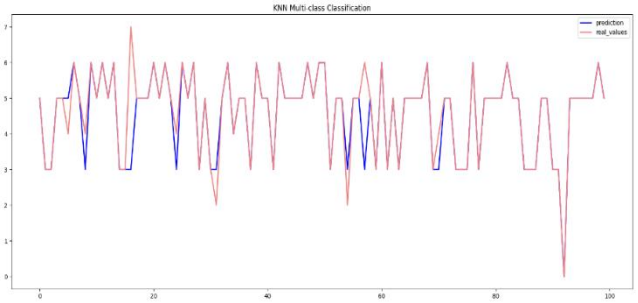
درخت تصمیم با استفاده از تقسیم داده‌ها به صورت درختی، ویژگی‌های مهم را شناسایی کرده و تصمیم‌گیری می‌کند. در فرآیند آموزش، شرایط و ویژگی‌های مختلف به صورت گام‌به‌گام بررسی می‌شوند تا بتوانند انواع مختلف حملات را شناسایی کنند. نتایج حاصل از این مدل در شکل ۸ نشان داده شده است.

۴-۲-۶- شبکه‌ی عصبی چند لایه

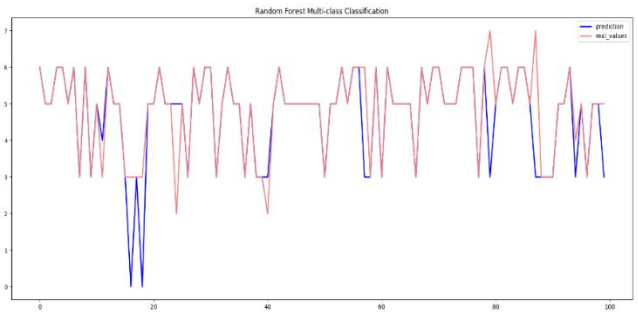
این مدل با استفاده از لایه‌های مختلف نورون‌ها می‌تواند الگوهای پیچیده داده‌ها را شناسایی کند. MLP از ورودی‌های چندگانه استفاده کرده و با اعمال توابع فعال‌ساز، روابط غیرخطی موجود در داده‌ها را بررسی می‌کند. با آموزش مناسب بر روی داده‌های نفوذ و غیرنفوذ، این الگوریتم قادر است به‌طور مؤثر حملات سایبری را شناسایی و تفکیک کند. نتایج تشخیص توسط این الگوریتم قبل و بعد از اجرای روش پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده است.

۴-۲-۷- مقایسه مدل‌های یادگیری ماشین

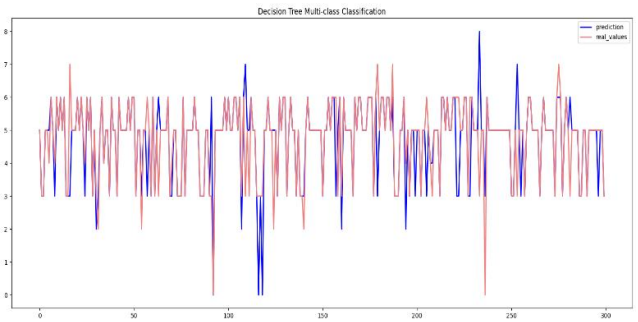
نتایج حاصل از به‌کارگیری شش مدل یادگیری ماشین در ترکیب با PCA در روش پیشنهادی بر حسب معیارهای دقت تک کلاسی، دقت چند کلاسی، نرخ مثبت کادب و زمان پردازش در جدول ۳ ارائه شده است. همان طور که در این جدول بیان شده، مدل رگرسیون لجستیک دقت تک‌کلاسی ۹۷,۸۴٪ و دقت چندکلاسی ۸۹,۸۱٪ را به ثبت رسانده است. مدل SVM خطی با دقت تک‌کلاسی ۹۷,۸۵٪ و دقت چندکلاسی ۸۹,۸۹٪ عملکرد خوبی را از خود نشان داده است. مدل KNN دقت تک‌کلاسی قابل توجهی با ۹۸,۳۱٪ دارد، با این حال دقت چندکلاسی آن کاهش می‌یابد و به ۸۸,۵۵٪ می‌رسد. جنگل تصادفی به عنوان یکی از قدرتمندترین مدل‌های یادگیری ماشین، دقت تک‌کلاسی ۹۸,۶۳٪ و دقت چندکلاسی ۸۹,۰۶٪ را نشان داده است. مدل درخت تصمیم دقت تک‌کلاسی ۹۸,۱۱٪ و دقت چندکلاسی ۸۵,۴۵٪ دارد. MLP به عنوان مدلی از شبکه‌های عصبی، دقت تک‌کلاسی ۹۸,۳۹٪ و دقت چندکلاسی ۸۹,۹۴٪ را به ثبت می‌رساند.



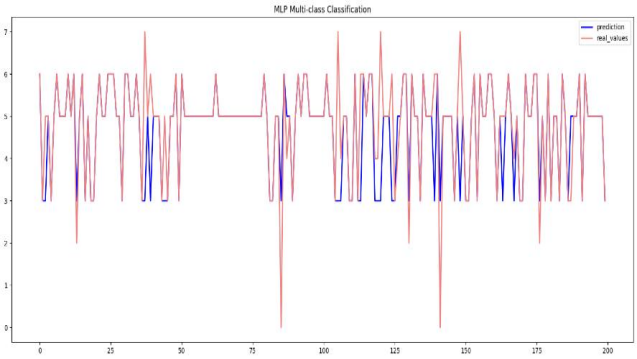
شکل ۶. نتایج تشخیص نفوذ قبل و بعد ازاعمال PCA در K نزدیکترین همسایه



شکل ۷. نتایج تشخیص نفوذ قبل و بعد ازاعمال PCA در جنگل تصادفی



شکل ۸. نتایج تشخیص نفوذ قبل و بعد ازاعمال PCA در درخت تصمیم



شکل ۹. نتایج تشخیص نفوذ قبل و بعد ازاعمال PCA در شبکه‌ی عصبی چند لایه

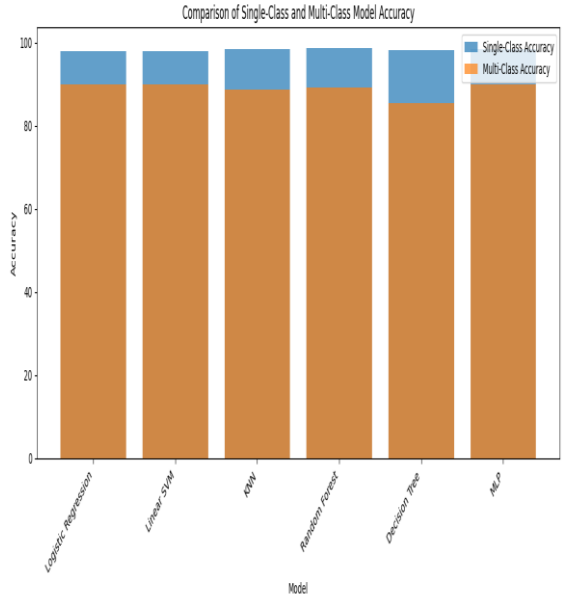
بر اساس نتایج به دست آمده جنگل تصادفی در ترکیب با PCA با دقت تک‌کلاسی ٪۹۸,۶۳ و نرخ مثبت کاذب ٪۳,۲ و زمان پردازش ۰,۶ میلی ثانیه بهترین عملکرد را از نظر دقت و زمان پردازش داشته است. در حالی که درخت تصمیم با دقت چندکلاسی ٪۸۵,۴۵ ضعیف‌ترین عملکرد را در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد. زمان پردازش برای تمام مدل‌ها زیر ۱ میلی‌ثانیه است، که برای محیط‌های IoT با منابع محدود مناسب است. به منظور بررسی اهداف پژوهش می‌توان نتایج حاصل از روش پیشنهادی را بدین صورت ارزیابی کرد:

- **هدف اول(افزایش دقت):** چهار مدل از شش مدل مورد آزمایش به دقت بالاتر از ٪۹۸ دست یافتند. مدل جنگل تصادفی با ٪۹۸,۶۳ بهترین نتیجه را ارائه داد.
- **هدف دوم (کاهش نرخ مثبت کاذب):** همه‌ی مدل‌ها به هدف کاهش نرخ مثبت کاذب به کم‌تر از ٪۵ دست یافته‌اند. مدل‌های جنگل تصادفی و شبکه عصبی چند لایه کم‌ترین نرخ مثبت کاذب را دارند. این موضوع اهمیت به‌کارگیری PCA در کنار مدل مناسب را نشان می‌دهد.
- **هدف سوم (کاهش زمان پردازش):** زمان پردازش تمام مدل‌ها زیر ۱ میلی‌ثانیه است و مدل جنگل تصادفی زمان پردازش متوسط ۰,۶ میلی‌ثانیه را ثبت کرد که پایین‌تر از سایر مدل‌ها و قابل‌اجرا بر روی دستگاه‌های کم‌منبع است.

در پایان این بخش به منظور درک و مقایسه بهتر دقت مدل‌های یادگیری ماشین به کارگرفته شده در ترکیب با PCA نتایج دقت تک کلاسی و چند کلاسی مدل‌ها در نمودار شکل ۱۰ نیز نمایش داده شده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از مدل‌های یادگیری ماشین

مدل یادگیری ماشین	دقت تک‌کلاسی (درصد)	دقت چندکلاسی (درصد)	نرخ مثبت کاذب (درصد)	زمان پردازش (میلی ثانیه)
رگرسیون لجستیک	۹۷,۸۴	۸۹,۸۱	۳,۵	۰,۸
SVM خطی	۹۷,۸۵	۸۹,۸۹	۳,۴	۰,۹
KNN	۹۸,۳۱	۸۸,۵۵	۴,۰	۰,۷
جنگل تصادفی	۹۸,۶۳	۸۹,۰۶	۳,۲	۰,۶
درخت تصمیم	۹۸,۱۱	۸۵,۴۵	۴,۵	۰,۷
شبکه عصبی چندلایه	۹۸,۳۹	۸۹,۹۴	۳,۳	۰,۸



شکل ۱۰. نتایج دقت مدل‌ها تک کلاسی و چند کلاسی

۵- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش مدلی ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین و تحلیل مولفه‌های اصلی برای تشخیص نفوذ در شبکه‌های اینترنت اشیا ارائه شد که با استفاده از مجموعه داده UNSW-NB15 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تجربی پژوهش نشان‌دهنده دستیابی به اهداف کمی مدنظر، شامل دقت کلی ٪۹۸,۶۳، نرخ مثبت کاذب ۳-٪۴ و زمان پردازش کمتر از ۱ میلی‌ثانیه است. در بین مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده مدل جنگل تصادفی بهترین عملکرد را با دقت تک‌کلاسی ٪۹۸,۶۳ و چندکلاسی ٪۸۹,۰۶ نشان داد، که به دلیل توانایی آن در مدیریت داده‌های پیچیده و کاهش بیش‌برازش است. استفاده از PCA ابعاد داده‌ها را کاهش داده و زمان پردازش را به کمتر از ۱ میلی‌ثانیه می‌رساند، که نسبت به روش‌های سنتی مانند SVM با زمان ۵-۱۰ میلی‌ثانیه بهبود قابل‌توجهی دارد. این ویژگی

به‌ویژه برای سیستم‌های اینترنت اشیاء که نیاز به پاسخ سریع دارند، بسیار مهم است و باعث می‌شود مدل پیشنهادی در مقایسه با دیگر روش‌ها عملکرد بهتری داشته باشد. مزایا و محدودیت‌های مدل پیشنهادی در مقایسه با با مدل‌های دیگر در جدول ۴ لیست شده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان این گونه نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی این قابلیت را دارد که بر روی دستگاه‌های با منابع محدود پیاده‌سازی شود. این ویژگی باعث می‌شود که سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستم‌های پیچیده‌تر و سنگین‌تر که نیاز به منابع محاسباتی بیشتری دارند، از مزیت قابل توجهی برخوردار باشد.

جدول ۴. مزایا و محدودیت‌های مدل پیشنهادی

مدل	مزایا	محدودیت
رگرسیون لجستیک	ساده – مناسب برای طبقه‌بندی باینری	دقت چندکلاسی کمتر ٪۸۹,۸۱
SVM خطی	تفکیک قوی با حاشیه بالا	زمان پردازش کمی بالاتر (۰,۹ میلی‌ثانیه)
KNN	دقت تک‌کلاسی بالا ٪۹۸,۳۱	دقت چندکلاسی کمتر ٪۸۸,۵۵
جنگل تصادفی	بالاترین دقت (٪۹۸,۶۳)، نرخ مثبت کاذب پایین ٪۳,۲	نیاز به تنظیم دقیق تعداد درختان
درخت تصمیم	یادگیری سریع	دقت چندکلاسی ضعیف ٪۸۵,۴۵
شبکه عصبی چندلایه	شناسایی الگوهای پیچیده	پیچیدگی محاسباتی بالاتر
روش پیشنهادی (PCA+RF)	دقت بالا، زمان پردازش کم، مناسب برایIoT	نیاز به تنظیم دقیق پارامترها

با توجه به نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از شبکه‌های عصبی عمیق و یادگیری تقویتی استفاده شود تا شبکه ای ایجاد شود که به دقت بالاتر در شناسایی تهدیدات جدید و ناشناخته دست یابد. همچنین، گنجاندن روش‌های تحلیل پیش‌بینی حملات مانند پیش‌بینی زمانی و مدل‌های سری زمانی می‌تواند به شناسایی حملات قبل از وقوع آن‌ها کمک کند. استفاده از داده‌های واقعی از شبکه‌های MANET و اینترنت اشیاء در محیط‌های دنیای واقعی می‌تواند قابلیت‌های سیستم را بهبود بخشد و اعتبار آن را در شرایط عملیاتی افزایش دهد. علاوه بر این، بررسی کارایی مدل در برابر حملات پیچیده مانند حملات DDoS هوشمند و حملات تزریق داده و تطبیق سیستم با شبکه‌های توزیع‌شده برای مقیاس‌پذیری بهتر می‌تواند به پیشرفت‌های عمده‌ای در امنیت شبکه‌های آینده منجر شود.

مراجع

[1] S. Sadhwani, B. Manibalan, R. Muthalagu, and P. Pawar, "A lightweight model for DDoS attack detection using machine learning techniques," Applied Sciences, vol. 13, no. 17, p. 9937, 2023.

[2] T. Zhang, L. Gao, C. He, M. Zhang, B. Krishnamachari, and A. S. Avestimehr, "Federated learning for the internet of things: Applications, challenges, and opportunities," IEEE Internet of Things Magazine, vol. 5, no. 1, pp. 24-29, 2022.

[3] B. B. Zarpelão, R. S. Miani, C. T. Kawakani, and S. C. De Alvarenga, "A survey of intrusion detection in Internet of Things," Journal of Network and Computer Applications, vol. 84, pp. 25-37, 2017.

[4] M. Ahmid and O. Kazar, "A comprehensive review of the internet of things security," Journal of Applied Security Research, vol. 18, no. 3, pp. 289-305, 2023.

[5] N. Dat-Thinh, H. Xuan-Ninh, and L. Kim-Hung, "MidSiot: A multistage intrusion detection system for internet of things," Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2022, no. 1, p. 9173291, 2022.

[6] L. Strous, S. von Solms, and A. Zúquete, "Security and privacy of the Internet of Things," Computers & Security, vol. 102, p. 102148, 2021.

[7] S. Pandey and B. Bhushan, "Recent Lightweight cryptography (LWC) based security advances for resource-constrained IoT networks," Wireless Networks, vol. 30, no. 4, pp. 2987-3026, 2024.

[8] P. Fusco, A. Montefusco, G. P. Rimoli, F. Palmieri, and M. Ficco, "TinyML-Based Intrusion Detection System for Handling Class Imbalance in IoT-Edge Domain Using Siamese Neural Network on MCU," in International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2025: Springer, pp. 389-402.

[9] K. A. Da Costa, J. P. Papa, C. O. Lisboa, R. Munoz, and V. H. C. de Albuquerque, "Internet of Things: A survey on machine learning-based intrusion detection approaches," Computer Networks, vol. 151, pp. 147-157, 2019.

[10] E. Konstantopoulou, G. Athanasiou, and N. Sklavos, "Review and Analysis of FPGA and ASIC Implementations of NIST Lightweight Cryptography Finalists," ACM Computing Surveys, vol. 57, no. 10, pp. 1-35, 2025.

[11] H. Griffioen and C. Doerr, "Examining Mirai's battle over the Internet of Things," in Proceedings of the 2020 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, 2020, pp. 743-756.

[12] M. Kintzlinger and N. Nissim, "Keep an eye on your personal belongings! The security of personal medical devices and their ecosystems," Journal of biomedical informatics, vol. 95, p. 103233, 2019.

[13] M. Ahmed, A. N. Mahmood, and J. Hu, "A survey of network anomaly detection techniques," Journal of Network and Computer Applications, vol. 60, pp. 19-31, 2016.

[14] A. A. Diro and N. Chilamkurti, "Distributed attack detection scheme using deep learning approach for Internet of Things," Future Generation Computer Systems, vol. 82, pp. 761-768, 2018.

[15] S. D. Babar and P. N. Mahalle, "A hash key-based key management mechanism for cluster-based wireless sensor network," Journal of Cyber Security and Mobility, pp. 73-88, 2016.

[16] A. Fatani, A. Dahou, M. A. Al-Qaness, S. Lu, and M. A. Elaziz, "Advanced feature extraction and selection approach using deep learning and Aquila optimizer for IoT intrusion detection system," Sensors, vol. 22, no. 1, p. 140, 2021.

[17] R. A. Disha and S. Waheed, "Performance analysis of machine learning models for intrusion detection system using Gini Impurity-

based Weighted Random Forest (GIWRF) feature selection technique," Cybersecurity, vol. 5, no. 1, p. 1, 2022.

[18] M. Mohy-Eddine, A. Guezzaz, S. Benkirane, and M. Azrour, "An effective intrusion detection approach based on ensemble learning for IIoT edge computing," Journal of Computer Virology and Hacking Techniques, vol. 19, no. 4, pp. 469-481, 2023.

[19] R. S. Tiwari, D. Lakshmi, T. K. Das, A. K. Tripathy, and K.-C. Li, "A lightweight optimized intrusion detection system using machine learning for edge-based IIoT security," Telecommunication Systems, pp. 1-20, 2024.

[20] M. J. Awan et al., "Real-time DDoS attack detection system using big data approach," Sustainability, vol. 13, no. 19, p

[21] W. Elmasry, A. Akbulut, and A. H. Zaim, "A Design of an Integrated Cloud-based Intrusion Detection System with Third Party Cloud Service" Open Computer Science, vol. 11, no. 1, 2021, pp. 365-379. https://doi.org/10.1515/comp-2020-0214.

[22] M. Sarhan, S. Layeghy, N. Moustafa, and M. Portmann, "Netflow datasets for machine learning-based network intrusion detection systems," in Big Data Technologies and Applications: 10th EAI International Conference, BDTA 2020, and 13th EAI International Conference on Wireless Internet, WiCON 2020, Virtual Event, December 11, 2020, Proceedings 10, 2021: Springer, pp. 117-135.

[23] M. S. M. AL-inizi, Y. T. Alzubaidi, S. H. Oleiwi, N. A. A. Zahra, and J. F. Yonan, "Improvement Networks Intrusion Detection System Using Artificial Neural Networks (ANN)," in International Conference On Innovative Computing And Communication, 2024: Springer, pp. 571-587.

ITRC
ICT Research Institute
(Iran Telecommunication Research Center)

Journal of Information and Communication Technology

Iranian Society of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 189-197

Enhancing Edge Computing Efficiency Using Autoencoding

Mahdi Tatar[1], Fateme Nasiri[2*]

[1]Master Student, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran
[2]Assistant Professor, Islamic Azad University, Yadegar-e-Imam Branch, Tehran, Iran

Received: 21 March 2025, Revised: 04 January 2026, Accepted: 10 February 2026
Paper type: Research

Abstract

The rapid expansion of Internet of Things (IoT) devices has led to a significant increase in the volume of generated data, posing substantial challenges for edge computing environments. Traditional cloud-based computing methods struggle to meet the demands of this technology due to limitations related to latency and privacy. To overcome these challenges, researchers have been exploring innovative solutions to optimize data storage and processing in edge computing environments. In this study, a hybrid approach is introduced that simultaneously leverages Autoencoders (AEs) and Multilayer Perceptrons (MLPs) to enhance data processing efficiency in IoT edge computing. By utilizing the advantages of both architectures, this approach provides a robust model for effectively managing large-scale IoT data. The evaluation results of the proposed method indicate that the model outperforms other approaches, achieving the highest accuracy (0.88), precision (0.75), recall (0.70), and F1-score (0.72). These findings suggest that the proposed solution can serve as an efficient approach for optimizing IoT data processing.

Keywords: Internet of Things, Edge Computing, Data Storage, Autoencoders, Multilayer Perceptrons

* Corresponding Author's email: fatemeh_nsr@yahoo.com

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۸۹ الی ۱۹۷

افزایش کارایی محاسبات لبه به کمک رمزگذاری خودکار

مهدی تاتار[۱]، فاطمه نصیری[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه کامپیوتر، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- استادیار، گروه کامپیوتر ، واحد یادگار امام، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱
نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

گسترش سریع دستگاه‌های اینترنت اشیا (IoT) منجر به افزایش چشمگیر حجم داده‌های تولیدی شده است که چالش‌های قابل‌توجهی را برای محیط‌های محاسباتی لبه ایجاد می‌کند. روش‌های سنتی مبتنی بر رایانش ابری به دلیل محدودیت‌های مربوط به تأخیر و حفظ حریم خصوصی، در پاسخگویی به نیازهای این فناوری با مشکلاتی مواجه هستند. به‌منظور غلبه بر این چالش‌ها، پژوهشگران در جستجوی راه‌حل‌های نوآورانه برای بهینه‌سازی ذخیره‌سازی و پردازش داده‌ها در محیط‌های محاسباتی لبه بوده‌اند. در این مطالعه، یک رویکرد ترکیبی معرفی شده است که از رمزگذارهای خودکار (AEs) و پرسپترون‌های چندلایه (MLP) به طور هم‌زمان بهره می‌برد تا کارایی پردازش داده‌ها در محاسبات لبه IoT را بهبود بخشد. این رویکرد با بهره‌گیری از مزایای هر دو معماری، یک مدل قدرتمند برای مدیریت مؤثر داده‌های IoT در مقیاس بزرگ ارائه می‌دهد. نتایج ارزیابی روش پیشنهادی نشان می‌دهد که این مدل با دستیابی به بالاترین دقت (۰,۸۸)، صحت (۰,۷۵)، فراخوانی (۰,۷۰) و امتیاز F1 (۰,۷۲)، در مقایسه با سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کارآمد در بهینه‌سازی پردازش داده‌های IoT مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: اینترنت اشیا، محاسبات لبه، ذخیره‌سازی داده‌ها، رمزگذارهای خودکار، پرسپترون‌های چندلایه.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: fatemeh_nsr@yahoo.com

۱- مقدمه

با گسترش چشمگیر اینترنت اشیا (IoT[1]) و تولید حجم عظیمی از داده‌ها توسط حسگرها، دستگاه‌ها و برنامه‌های کاربردی مرتبط، ضرورت به‌کارگیری روش‌های بهینه برای پردازش و تحلیل داده‌ها بیش‌ازپیش محسوس شده است. در معماری سنتی، داده‌های جمع‌آوری شده عموماً برای پردازش به مراکز داده ابری ارسال می‌شوند؛ رویکردی که با چالش‌هایی نظیر افزایش ترافیک شبکه، مصرف پهنای باند بالا و تأخیر در دسترسی به داده‌ها مواجه است. به همین دلیل، محاسبات لبه‌ای[2] به‌عنوان رویکردی نوظهور مطرح شده است که با انتقال پردازش به نزدیک‌ترین نقطه به منبع داده، علاوه بر کاهش فاصله انتقال و زمان پاسخ‌دهی، از سربارهای غیرضروری در ارسال داده‌های حجیم به مرکز نیز جلوگیری می‌کند. این معماری جدید در حوزه‌هایی مانند خودروهای هوشمند، سازمان‌های صنعتی و کاربردهای حساس به تأخیر، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است و انتظار می‌رود با رشد فناوری‌های آینده همچون شبکه‌های 5G، سهم محاسبات لبه‌ای در اکوسیستم دیجیتال به طرز قابل‌توجهی افزایش یابد. بااین‌حال، یکی از موانع اصلی در توسعه گسترده آن، نیاز به سرمایه‌گذاری و تأمین مالی کافی است که هنوز سازوکار دقیق آن کاملاً روشن نشده است [۱،۲].

از مهم‌ترین بخش‌های محاسبات لبه‌ای می‌توان به مدیریت حافظه پنهان[3] اشاره کرد. در این رویکرد، داده‌های پرکاربرد یا حساس به تأخیر، به‌جای آنکه از فاصله‌های دور در مرکز داده ابری فراخوانی شوند، در نزدیکی محل تولید یا مصرف ذخیره می‌شوند. نتیجه این عمل، کاهش زمان پاسخ‌دهی، بهبود تجربه کاربر، و همچنین صرفه‌جویی در پهنای باند شبکه است. در محیط‌هایی نظیر IoT یا کاربردهای تحلیلی بلادرنگ که به پردازش سریع و آنی اطلاعات نیاز است، ذخیره‌سازی داده‌ها در حاشیه شبکه، راهکاری کلیدی برای دسترس‌پذیری بالاتر و کاهش هزینه‌ها محسوب می‌شود. به‌عنوان نمونه، در خودروهای هوشمند، بهره‌گیری از محاسبات لبه‌ای و حافظه پنهان، انتقال فوری داده‌های حسگرها و پردازش آن در نزدیکی خودرو را امکان‌پذیر می‌کند و در نتیجه، تصمیم‌گیری‌های حیاتی نظیر ترمز خودکار یا تغییر مسیر در لحظه صورت می‌گیرد. بدین ترتیب، احتمال بروز حوادث در اثر تأخیر در ارسال داده‌ها به‌مراتب کاهش می‌یابد. مزیت دیگر این روش در کاهش مصرف منابع سرورهای مرکزی نهفته است؛ چراکه محتوای تکراری یا درخواست‌های مکرر، به‌جای ارسال مداوم داده‌ها از ابر، از حافظه پنهان لبه پاسخ داده می‌شوند [۳،۴].

باوجود مزایای آشکار محاسبات لبه‌ای و روش‌های ذخیره‌سازی محلی، مدیریت مؤثر این داده‌ها باتوجه‌به رشد نمایی اطلاعات در دستگاه‌های IoT، چالشی مهم به شمار می‌رود. یکی از رویکردهای جدید برای فائق آمدن بر این چالش، ترکیب ابزارهای یادگیری عمیق در مدیریت داده‌های لبه است. در این راستا، ادغام رمزگذارهای خودکار (AE[4]) و پرسپترون‌های چندلایه (MLP[5]) به‌عنوان راهکاری نوین مطرح می‌شود. رمزگذارهای خودکار قابلیت برجسته‌سازی الگوها و فشرده‌سازی داده‌ها را دارند و با کاهش ابعاد داده، امکان ذخیره‌سازی و بازیابی سریع‌تر و کارآمدتر را فراهم می‌کنند. ازسوی‌دیگر، MLPها با قدرت بالای خود در طبقه‌بندی و تشخیص الگو، می‌توانند در کنار داده‌های فشرده‌شده، فرایندهای تحلیلی پیشرفته را به شکل بهینه‌تری انجام دهند. این هم‌افزایی منجر به ساخت مدلی ترکیبی می‌شود که ضمن حفظ دقت در شناسایی ویژگی‌ها و الگوهای مهم، می‌تواند داده‌های حجیم را در لبه مدیریت کند و نیاز به ارسال تمام اطلاعات به مراکز ابری را کاهش دهد [۵،۶].

نوآوری این پژوهش در ارائه یک مدل یادگیری عمیق ترکیبی نهفته است که از ترکیب قابلیت‌های رمزگذارهای خودکار و MLPها بهره می‌برد. رمزگذارهای خودکار با استخراج ویژگی‌های کلیدی و کاهش بعد داده‌ها، توان پردازشی و پهنای باند موردنیاز را به طور محسوسی کاهش می‌دهند و زمینه را برای طبقه‌بندی دقیق و سریع داده‌ها توسط MLPها فراهم می‌سازند. این رویکرد ترکیبی، افزون بر کاهش هزینه‌های زیرساختی و مصرف انرژی، امکان تصمیم‌گیری آنی و واکنش بلادرنگ را در محیط‌های لبه‌ای مهیا می‌کند. در نتیجه، نه‌تنها عملکرد بهتری در فشرده‌سازی و ذخیره‌سازی ارائه می‌شود، بلکه دقت بیشتری در تشخیص الگوها و ناهنجاری‌ها نیز به دست می‌آید که در برنامه‌های حساس به خطا و امنیت، امری حیاتی محسوب می‌شود.

بر اساس آنچه گفته شد، هدف اصلی در رایانش لبه‌ای، بهینه‌سازی جریان داده‌ها و کاهش چشمگیر تأخیر در دسترسی و پردازش است. نزدیک‌تر کردن مراکز پردازشی به منبع تولید داده و حذف فاصله‌های طولانی بین کاربر و سرور ابری، کمک می‌کند تا ضمن صرفه‌جویی در مصرف پهنای باند، کیفیت خدمات نیز ارتقا یابد.

[1] Internet of Things
[2] Edge Computing
[3] Cache
[4] Autoencoders
[5] MultiLayer Perceptron

بدین منظور، پژوهش حاضر تلاش دارد تا ضمن ارائه مدل یادگیری عمیق ترکیبی، رویکردی کارآمد برای ذخیره‌سازی و پردازش داده‌ها در لبه IoT ارائه کند و با کاهش زمان پاسخ و افزایش مقیاس‌پذیری، نیازهای روزافزون دنیای دیجیتال را برآورده سازد. در همین راستا، می‌توان کاهش مصرف پهنای باند، بهبود سرعت و دقت در تحلیل داده‌ها، و تسریع فرایند تصمیم‌گیری را به‌عنوان مهم‌ترین اهداف این تحقیق برشمرد. همچنین انتظار می‌رود که ادغام AEها و MLPها منجر به افزایش دقت و دقت در پیش‌بینی روندها و ناهنجاری‌ها در جریان داده‌های IoT شده و آن را به ابزاری ارزشمند برای مدیریت داده‌ها و تصمیم‌گیری موثر تبدیل کند.

۲- پیشینه پژوهش

با گسترش روزافزون دستگاه‌های هوشمند و ورود فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT)، حجم عظیمی از داده‌ها در لبه شبکه تولید می‌شود که پردازش مؤثر آن‌ها به یک چالش اساسی تبدیل شده است. کشورهای پیشرو مانند آمریکا و چین با پژوهش‌های گسترده در زمینه محاسبات لبه و ذخیره‌سازی توزیع‌شده، تلاش کرده‌اند تا کیفیت خدماتی مانند ویدئوهای آنلاین، بازی‌های ابری و رانندگی خودران را بهبود بخشند. در این راستا، مفهوم پردازش لبه به‌عنوان رویکردی برای انتقال ظرفیت‌های محاسباتی و ذخیره‌سازی به نزدیک‌ترین نقطه به کاربران مطرح شده است که موجب کاهش تأخیر و مصرف پهنای باند شبکه می‌شود. ازآنجاکه داده‌های پرتکرار باعث افزایش بار شبکه می‌شوند، راهکارهای کش کردن داده‌های محبوب در سرورهای لبه برای کاهش انتقال مداوم داده‌ها از ابر بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، این حوزه با رشد سریع فناوری موردتوجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است.

در تحقیقات اولیه، تمرکز بر طراحی مکانیزم‌های کش مشترک در سرورهای لبه بوده است. تران و همکاران [۷] چارچوبی ارائه کردند که با استفاده از پخش ویدئو با نرخ بیت تطبیقی، ذخیره ویدئوها را به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مدل‌سازی می‌کند، اما تخمین محبوبیت داده‌ها در آن مشخص نشده است. جورج و همکاران [۸] استراتژی کش ویدئویی مشترکی را بر اساس توزیع محبوبیت ویدئو و احتمال درخواست کاربران ارائه دادند. ژانگ و همکاران [۹] ذخیره‌سازی مشارکتی را با تمرکز بر کاهش تأخیر و خوشه‌بندی سرورها بررسی کردند، در حالی که غرایبه و همکاران [۱۰] الگوریتمی آنلاین برای حداقل‌سازی هزینه‌های ارائه‌دهندگان محتوا پیشنهاد دادند. همچنین، روش PHT [۱۱] تغییرات درخواست‌ها را رصد کرده و با تحلیل تغییر تجمعی، محبوبیت داده‌ها را تخمین می‌زند.

رشد نمایی ترافیک داده‌های موبایل، ناشی از اپلیکیشن‌های نیازمند کیفیت بالا و دستگاه‌های هوشمند، اهمیت ذخیره‌سازی لبه را افزایش داده است [۱۲]. بخش قابل توجهی از ترافیک شبکه ناشی از داده‌های پرتکرار است که تأثیر مستقیمی بر پهنای باند و تأخیر دسترسی دارد [۱۳]. ذخیره‌سازی داده‌های پرتکرار در لبه، علاوه بر کاهش هزینه انتقال، موجب بهبود زمان پاسخگویی می‌شود. در این راستا، سرورهای لبه با ارائه منابع محاسباتی و ذخیره‌سازی به کاربران کمک می‌کنند تا تجربه کاربری بهتری داشته باشند [۱۴]. به عنوان مثال، سیستم Cachier [۱۵] با توزیع ترافیک بین لبه و ابر، تأخیر را به حداقل می‌رساند، در حالی که حلالی و همکاران [۱۷] سیستمی با نام Agar طراحی کرده‌اند که با برنامه‌ریزی پویا، داده‌های پرتکرار را در لبه ذخیره می‌کند.

در ادامه تحقیقات، تمرکز بر راهکارهای مبتنی بر ارائه‌دهندگان خدمات شکل گرفته است. ژوانیو و همکاران [۱۸] مکانیسمی حراجی برای تخصیص فضای کش به کاربران پیشنهاد کردند، در حالی که شی و همکاران [۱۹] الگوریتمی برای افزایش نرخ اصابت کش معرفی کردند. برخی مطالعات مانند کار لیو و همکاران [۲۰] بر طراحی توابع سودمندی که به محبوبیت ویدئوها و تحرک کاربران آگاه هستند، تمرکز داشته‌اند. همچنین، چن و همکاران [۲۱] معماری SDN جدیدی برای شبکه G۵ ارائه دادند که تأخیر کش در سلول‌های کوچک و ماکروسل را تحلیل کرده و رویکرد بهینه ذخیره‌سازی را پیاده‌سازی می‌کند.

چالش اصلی در ذخیره‌سازی لبه از دیدگاه ارائه‌دهندگان خدمات، دستیابی به حداکثر درآمد در عین تضمین تأخیر کم برای کاربران است. در این راستا، پژوهشگران مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌سازی انتخاب داده‌های کش شده در سرورهای لبه ارائه داده‌اند. این مدل‌ها معمولاً تابع هدفی دارند که شامل دو بخش اصلی است: نخست، سود ناشی از پاسخگویی سریع‌تر و دوم، هزینه‌های مرتبط با ذخیره‌سازی و انتقال داده. تخمین صحیح محبوبیت داده‌ها یکی از چالش‌های اساسی این حوزه است، زیرا روند تقاضای کاربران پویا بوده و تحت‌تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. تکنیک‌هایی مانند PHT و نسخه‌های بهبودیافته آن امکان نظارت بر تغییرات درخواست‌ها را فراهم می‌کنند، اما همچنان پژوهش‌های بیشتری در این زمینه موردنیاز است.

یکی از رویکردهای نوظهور برای بهبود سامانه‌های لبه، استفاده از تکنیک‌های یادگیری عمیق است که امکان تحلیل سریع داده‌های عظیم را فراهم می‌کند [۲۲]. با توسعه فناوری IoT و افزایش دستگاه‌های لبه‌ای، نیاز به روش‌های هوشمند برای مدیریت شبکه

بیشتر احساس می‌شود [۲۳]. برخی از مکانیزم‌های ذخیره‌سازی سنتی ممکن است توانایی تطبیق با پویایی داده‌ها را نداشته باشند، لذا ترکیب هماهنگ میان لبه و ابر مطرح شده است [۲۴]. در این رویکرد، داده‌های پرتکرار در نزدیک‌ترین نقطه به کاربران ذخیره می‌شوند که علاوه بر کاهش تأخیر، نسبت بار سرور را نیز بهینه می‌کند. پژوهش‌های اخیر در یادگیری عمیق نشان داده‌اند که این فناوری می‌تواند الگوهای مصرف کاربران را شناسایی کرده و تقاضا را پیش‌بینی کند [۲۵]. این پیشرفت‌ها نقش مهمی در بهبود کیفیت تجربه کاربری و بهره‌وری شبکه ایفا می‌کنند.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی هوش لبه و تشخیص ناهنجاری در شبکه‌های IoT پرداخته‌اند. ژو و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای جامع، مؤلفه‌های اصلی هوش لبه شامل ذخیره‌سازی، آموزش، استنتاج و انتقال پردازش به لبه را بررسی کرده‌اند [۲۶]. همچنین، اولّاح و محمود (۲۰۲۲) یک مدل یادگیری عمیق جدید برای تشخیص ناهنجاری در شبکه‌های IoT ارائه کرده‌اند که ترکیبی از شبکه‌های عصبی بازگشتی (LSTM, BiLSTM, GRU) با شبکه‌های عصبی کانولوشن (CNN) است. مدل‌های پیشنهادی آن‌ها عملکرد بهتری نسبت به روش‌های پیشین داشته‌اند [۲۷]. در این راستا، ابوزیتا و همکاران (۲۰۲۳) یک خودرمزگذار کاهش نویز طراحی کرده‌اند که ویژگی‌های مقاوم را استخراج و دقت تشخیص داده‌های مخرب را بهبود می‌بخشد [۲۸]. همچنین، رفیق و همکاران (۲۰۲۴) بر نیاز به مجموعه داده‌های متنوع، آزمایش‌های بلادرنگ و مقیاس‌پذیری بیشتر سیستم‌ها تأکید کرده‌اند [۲۹]. در نهایت، ونگ و همکاران (۲۰۲۵) یک روش مبتنی بر خودرمزگذار GRU و بهینه‌سازی BO-TPE معرفی کرده‌اند که قابلیت اطمینان در محاسبات مه خودرویی را بهبود می‌بخشد [۳۰].

در مجموع، ذخیره‌سازی لبه با ترکیب روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق و رویکردهای مبتنی بر محاسبات توزیع‌شده می‌تواند به طور قابل‌توجهی کیفیت خدمات دیجیتال را افزایش دهد. علاوه بر این، تحقیقات در حوزه تشخیص ناهنجاری‌های IoT نیز نشان می‌دهد که مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند نقش مهمی در بهبود امنیت و کارایی سیستم‌های شبکه ایفا کنند. آینده این حوزه نیازمند توسعه مدل‌های هوشمندتر و بهینه‌سازی ساختارهای ذخیره‌سازی برای پاسخگویی به رشد مداوم داده‌ها است.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مجموعه داده

برای ارزیابی روش پیشنهادی در یک محیط واقعی، یک مجموعه‌داده باینری طراحی شده است که قابلیت نمایش دستگاه‌های IoT در حالات مختلف، مانند عملکرد عادی و غیرعادی، را دارد. تولید تصادفی داده‌ها موجب می‌شود که در هر اجرا مقادیر اندکی متفاوت باشند و این ویژگی به تقلید از تنوع واقعی در قرائت‌های حسگر کمک می‌کند. این مجموعه‌داده شامل داده‌های مصنوعی IoT است که با بهره‌گیری از توابع تصادفی کتابخانه NumPy تولید شده‌اند. به طور دقیق، مجموعه داده‌ای متشکل از ۱۰۰۰ نمونه (به صورت پیش‌فرض) و ۲۰ ویژگی ایجاد شده است. ویژگی‌های ورودی (X) شامل اعداد اعشاری تصادفی هستند که از طریق تابع np.random.rand تولید شدند، در حالی که متغیر هدف (y) به‌صورت یک برچسب طبقه‌بندی باینری (۰ یا ۱) با استفاده از تابع np.random.randint تعیین شد.

۳-۲- روش‌شناسی

در محیط‌های محاسبات لبه، دستگاه‌های IoT عموماً با محدودیت‌های متعددی از جمله توان پردازشی محدود، فضای ذخیره‌سازی اندک، محدودیت مصرف انرژی و گوناگونی قالب داده روبه‌رو هستند. این مسائل در هنگام پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشینی یا عمیق نمود بیشتری پیدا می‌کنند، چرا که حجم بالای داده‌ها و نیاز به تحلیل بلادرنگ فشار زیادی بر منابع دستگاه‌های لبه وارد می‌سازد. ازاین‌رو، هدف اصلی پژوهش حاضر توسعه رویکردی است که بتواند ضمن کاهش حجم داده‌ها و تسهیل ذخیره‌سازی، پردازش آن‌ها را نیز تسریع کند. بدین منظور، رویکرد پیشنهادی از تلفیق قابلیت فشرده‌سازیِ رمزگذارهای خودکار (Autoencoders) با توانمندی طبقه‌بندی پرسپترون چندلایه (MLP) شکل‌گرفته است تا هم کارایی ذخیره‌سازی داده‌ها و هم قابلیت تشخیص الگو افزایش یابد.

در فاز نخست، داده‌ها از دستگاه‌های لبه یا شبیه‌سازهای IoT گردآوری می‌شوند. این داده‌ها می‌توانند شامل اطلاعات حسی (دمای محیط، رطوبت، داده‌های ویدئویی، صوتی و غیره) یا وقایع امنیتی باشند. برای آماده‌سازی این داده‌های خام جهت استفاده در مدل ترکیبی، چند مرحله پیش‌پردازش ضروری است: حذف نویز و مقادیر پرت، نرمال‌سازی یا مقیاس‌گذاری ویژگی‌ها، و در صورت لزوم استفاده از روش‌های کاهش ابعاد نظیر PCA. با این اقدامات، ورودی مدل از نظر شکل و دامنه مقداری، استاندارد و همگن می‌شود. افزون بر آن، داده‌های باکیفیت و کامل، کمک می‌کنند تا در مرحله آموزش، اتلاف طبقه‌بندی یا بازسازی کمتر باشد و قابلیت تعمیم مدل افزایش یابد.

در مدل پیشنهادی، رمزگذار خودکار وظیفه اصلی کاهش ابعاد و فشرده‌سازی را بر عهده دارد. این شبکه شامل دو بخش رمزگذار و رمزگشا است. رمزگذار داده ورودی x را به یک فضای پنهان با ابعاد پایین‌تر z نگاشت می‌کند و سپس رمزگشا از روی z، سعی می‌کند خروجی بازسازی‌شده را تولید نماید. تابع هزینه رمزگذار خودکار، اتلاف بازسازی زیر است:

$$L = ||y - x||^2 \quad (۱)$$

رمزگذار x را با استفاده از یک شبکه عصبی f(x) ترسیم می‌کند. رمزگشا با استفاده از شبکه عصبی دیگر g(z) z را به y نگاشت می‌کند. روابط ریاضی MLP به این صورت است. اجازه دهید x ورودی، h فعال‌سازی لایه پنهان و y خروجی باشد.

$$h = \sigma (Wx + b) ،y = \sigma (W'h + b') \quad (۲)$$

حرکت روبه‌جلو محاسبه می‌کند. جایی که W ماتریس وزن، b بایاس و σ تابع فعال‌سازی است. MLP یاد می‌گیرد که اتلاف طبقه‌بندی را به حداقل برساند:

$$L = L(y, \hat{y}) \quad (۳)$$

مدل ترکیب رمزگذارهای خودکار + MLP از رمزگذارهای خودکار برای کاهش ابعاد ویژگی و MLP برای طبقه‌بندی استفاده می‌کند:

رمزگذار خودکار داده‌های ورودی با ابعاد بالا را به فضای پنهان با ابعاد پایین‌تر کاهش می‌دهد.

سپس MLP نمایش‌های کدگذاری شده را طبقه‌بندی می‌کند.

رابطه ریاضی رمزگذار خودکار به‌صورت زیر است.

$$\min\theta L_{ae} = E [||y - f(g(z)) ||^2] \quad (۴)$$

MLP به حداقل می‌رساند:

$$\min\theta L_{mlp} = E[L(y, g(f(x)))] \quad (۵)$$

بدین ترتیب، با تلفیق AE و MLP، هم فشرده‌سازی داده‌ها و هم تشخیص الگوی آن‌ها به‌صورت مؤثر در دستگاه‌های لبه انجام می‌شود.

در فلوچارت مدل پیشنهادی ، ابتدا داده‌ها از حسگرها جمع‌آوری و در لبه ذخیره می‌شوند. سپس فرایند فشرده‌سازی و استخراج ویژگی روی داده‌ها اعمال می‌گردد تا حجم آن‌ها کاهش یابد و ویژگی‌های مؤثر شناسایی شوند. در ادامه، آموزش مدل رمزگذارهای خودکار و MLP صورت می‌گیرد تا الگوها و روابط حاکم در داده‌ها فراگرفته شود. گام بعدی، انتخاب رمزگذار خودکارِ مؤثر بر اساس معیارهای عملکرد (مانند کمترین اتلاف بازسازی) و در نهایت ادغام آن با MLP برای انجام طبقه‌بندی یا وظایف پیش‌بینی است. داده‌های فشرده و پردازش‌شده در نهایت در فضای ذخیره‌سازی بهینه در لبه نگه‌داری می‌شوند. برای ارزیابی کارایی، معیارهایی نظیر دقت طبقه‌بندی، سرعت پردازش، کاهش حجم داده، میزان تأخیر پاسخ و مصرف منابع سنجش می‌شوند. همچنین نتایج حاصل با روش‌های جداگانه AE و MLP یا سایر روش‌های پایه مقایسه می‌گردد.

برای پیاده‌سازی عملی چارچوب پیشنهادی، از محیط پایتون (نسخه ۳,۹) و کتابخانه‌هایی مانند NumPy، TensorFlow و PyTorch استفاده شده است. این کتابخانه‌ها امکان ساخت و آموزش شبکه‌های عمیق نظیر رمزگذار خودکار (AE) و پرسپترون چندلایه (MLP) را فراهم می‌کنند. پس از آموزش مدل بر روی داده‌های واقعی یا شبیه‌سازی‌شده، دقت طبقه‌بندی و نسبت فشرده‌سازی بررسی شده و با مدل‌های رقیب مقایسه می‌شود. انتظار می‌رود که روش پیشنهادی، با ترکیب رمزگذارهای خودکار و شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه، علاوه بر کاهش حجم داده‌های ذخیره‌شده در لبه، منجر به پردازش سریع‌تر شود. این ویژگی، در کنار کاهش تبادل داده با سرور ابری، باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش هزینه پهنای باند و بهبود کیفیت خدمات در سامانه‌های IoT خواهد شد.

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود. مهم‌ترین معیارهای ارزیابی شامل دقت (Accuracy)، صحت (Precision)، فراخوانی (Recall) و امتیاز F1 هستند که در ادامه تعریف می‌شوند. دقت (Acc) به‌صورت نسبت تعداد نمونه‌هایی که مدل به‌درستی طبقه‌بندی کرده است (شامل کلاس‌های دارای خطا و فاقد خطا) به کل نمونه‌ها تعریف می‌شود:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (۶)$$

صحت (Precision) نسبت پیش‌بینی‌های مثبت واقعی را از کل پیش‌بینی‌های مثبت مدل نشان می‌دهد:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (۷)$$

فراخوانی (Recall) که با نام حساسیت یا نرخ مثبت واقعی نیز شناخته می‌شود، نشان‌دهنده نسبت پیش‌بینی‌های مثبت واقعی از کل موارد مثبت واقعی است:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۸)$$

امتیاز F1، میانگین هارمونیک دقت و فراخوانی است که به تعادل بین این دو معیار کمک می‌کند. این معیار به‌ویژه زمانی مفید است که توزیع کلاس‌ها نامتعادل باشد:

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (۹)$$

این معیارها به مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های موجود کمک کرده و عملکرد آن را از جنبه‌های مختلف ارزیابی می‌کنند.

۴- نتایج

نتایج به‌دست‌آمده از اجرای روش پیشنهادی نشان‌دهندهٔ عملکرد قابل‌توجه آن در مقایسه با سایر روش‌های مورد بررسی است. معیارهای ارزیابی شامل دقت (Accuracy)، صحت (Precision)، فراخوانی (Recall) و امتیاز F1 بودند که به ترتیب مقادیر ۰,۸۸، ۰,۷۵، ۰,۷۰ و ۰,۷۲ را برای روش پیشنهادی نشان دادند. این مقادیر نشان می‌دهند که روش ارائه‌شده توانسته است در تشخیص صحیح داده‌ها و کاهش خطا عملکرد مطلوبی داشته باشد. برای درک بهتر این نتایج و مقایسه‌ی آن با سایر مدل‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه CNN و شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN)، بررسی جامعی از عملکرد هر مدل انجام شد. مقایسه‌ی این روش‌ها از آن جهت حائز اهمیت است که امکان ارزیابی دقیق‌تر مزایا و محدودیت‌های هر کدام را فراهم می‌کند و به تصمیم‌گیری در انتخاب مدل مناسب کمک می‌نماید.

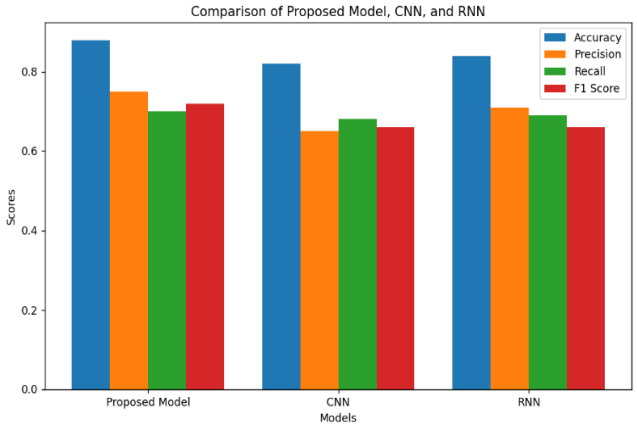
CNN یکی از پرکاربردترین مدل‌های یادگیری عمیق در پردازش تصویر و بینایی کامپیوتری است. این شبکه شامل چندین لایهٔ پردازشی از جمله لایه‌های کانولوشن، لایه‌های ادغام و لایه‌های کاملاً متصل است. این ساختار به شبکهٔ CNN اجازه می‌دهد که ویژگی‌های پیچیدهٔ تصاویر را استخراج و تحلیل کند. نتایج به‌دست‌آمده از اجرای این روش نشان داد که دقت آن ۰,۸۲، صحت ۰,۶۵، فراخوانی ۰,۶۸ و امتیاز F1 برابر با ۰,۶۶ است. این مقادیر نشان می‌دهد که هرچند شبکه‌ی CNN عملکرد مناسبی در پردازش داده‌ها دارد، اما در مقایسه با روش پیشنهادی، نتوانسته است به همان سطح دقت و صحت دست یابد. دلیل این امر را می‌توان در محدودیت‌های ذاتی CNN جستجو کرد که در آن ارتباطات زمانی بین داده‌ها کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

RNN یکی دیگر از مدل‌های یادگیری عمیق است که برای پردازش داده‌های متوالی و سری‌های زمانی طراحی شده است. برخلاف شبکه‌های عصبی معمولی که داده‌ها را به‌صورت مستقل پردازش می‌کنند، RNN قابلیت حفظ اطلاعات پیشین را دارد و از این طریق به بهبود پیش‌بینی‌ها در مسائل دارای وابستگی زمانی کمک می‌کند. اجرای این روش نشان داد که مقدار دقت برابر با ۰,۸۴، صحت ۰,۷۱، فراخوانی ۰,۶۹ و امتیاز F1 نیز ۰,۶۶ است. اگرچه عملکرد RNN نسبت به CNN بهبود یافته است، اما همچنان در مقایسه با روش پیشنهادی، کارایی کمتری از خود نشان داده است. علت این موضوع را می‌توان در مشکلات مربوط به یادگیری طولانی‌مدت RNN مانند محو شدن گرادیان جستجو کرد که ممکن است بر دقت مدل تأثیر بگذارد.

بررسی این نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از نظر تمامی معیارهای ارزیابی عملکرد برتری داشته است. دقت این روش (۰,۸۸) نسبت به RNN (۰,۸۴) و CNN (۰,۸۲) بالاتر است که نشان‌دهنده‌ی توانایی بهتر آن در تشخیص صحیح داده‌ها می‌باشد. همچنین، صحت روش پیشنهادی (۰,۷۵) در مقایسه با RNN (۰,۷۱) و CNN (۰,۶۵) بهبود قابل‌توجهی داشته است که نشان می‌دهد مدل توانسته است در طبقه‌بندی داده‌های مثبت عملکرد بهتری داشته باشد. در مورد فراخوانی، مقدار ۰,۷۰ برای روش پیشنهادی به‌دست‌آمده است که از RNN (۰,۶۹) اندکی بهتر و از CNN (۰,۶۸) بالاتر است. همچنین، امتیاز F1 که تعادل بین صحت و فراخوانی را نمایش می‌دهد، در روش پیشنهادی ۰,۷۲ بوده که نسبت به دو مدل دیگر (۰,۶۶) مقدار بیشتری دارد.

مقایسهٔ عملکرد کلی مدل‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در تمامی معیارهای مورد ارزیابی عملکرد بهتری داشته و به‌عنوان کاراترین مدل در این پژوهش شناخته می‌شود. این برتری به‌ویژه در دقت و صحت مشاهده می‌شود که دو معیار مهم در ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین محسوب می‌شوند. همچنین، در معیارهای فراخوانی و امتیاز F1 نیز روش پیشنهادی توانسته است تعادل مطلوبی را میان کاهش خطای نوع اول (False Positive) و افزایش قابلیت شناسایی نمونه‌های صحیح برقرار کند. ازسوی‌دیگر، روش‌های CNN و RNN هرچند توانسته‌اند نتایج قابل‌قبولی ارائه دهند، اما به دلیل محدودیت‌های ساختاری خود، در مقایسه با روش پیشنهادی عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند.

یکی از دلایل برتری روش پیشنهادی نسبت به CNN و RNN را می‌توان در نحوهٔ ترکیب ویژگی‌های فضایی و زمانی در این مدل جستجو کرد. CNN اگرچه در پردازش ویژگی‌های تصویری عملکرد خوبی دارد، اما قادر به درک روابط متوالی بین داده‌ها نیست. در مقابل، RNN وابستگی زمانی داده‌ها را در نظر می‌گیرد، اما در پردازش ویژگی‌های پیچیدهٔ تصویری ضعف‌هایی دارد. روش پیشنهادی با بهره‌گیری از نقاط قوت هر دو مدل و ترکیب آن‌ها توانسته است عملکرد بالاتری را ارائه دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از یک مدل ترکیبی که بتواند هر دو جنبهٔ فضایی و زمانی داده‌ها را مدیریت کند، می‌تواند به بهبود دقت و صحت طبقه‌بندی داده‌ها منجر شود.



شکل ۱. مقایسه نتایج روش پیشنهادی در مقایسه با CNN و RNN

در نهایت، مقایسهٔ این سه مدل و نتایج حاصل از آن تأیید می‌کند که روش پیشنهادی در مقایسه با CNN و RNN از نظر دقت، صحت، فراخوانی و امتیاز F1 برتری دارد. این موضوع اهمیت استفاده از معماری‌های ترکیبی و پیشرفته‌تر در حوزهٔ یادگیری عمیق را برجسته می‌کند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به محققان و فعالان حوزهٔ یادگیری ماشین کمک کند تا در انتخاب مدل مناسب برای کاربردهای مختلف تصمیم‌گیری بهتری داشته باشند. همچنین، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده، روش پیشنهادی با سایر مدل‌های پیشرفتهٔ یادگیری عمیق نیز مقایسه شود تا میزان کارایی و تعمیم‌پذیری آن در شرایط گوناگون بهتر بررسی گردد.

برای پیاده‌سازی معماری ترکیبی، از یک خود رمزگذار (Autoencoder) سه‌لایه‌ای برای فشرده‌سازی و استخراج نمایش‌های پنهان و از یک پرسپترون چندلایه (MLP) برای طبقه‌بندی استفاده شده است. Encoder شامل لایه‌های Dense با اندازه‌های ۶۴ و ۳۲ و در نهایت لایه کدگذاری می‌باشد. Decoder متقارن با Encoder بوده و بازسازی ورودی را با مینیمم‌سازی میانگین مربعات خطا (MSE) انجام می‌دهد. نمایش پنهان خروجی Encoder، به‌عنوان ورودی MLP قرار می‌گیرد. MLP شامل دو لایه مخفی (۳۲ و ۱۶ نود) و یک نود خروجی با فعال‌سازی Sigmoid برای طبقه‌بندی دودویی است.

آموزش در دو مرحله انجام می‌پذیرد: ابتدا خود رمزگذار به‌صورت غیر نظارتی با هدف کمینه‌سازی خطای بازسازی آموزش داده می‌شود؛ سپس، نمایش‌های کدگذاری‌شده جهت آموزش طبقه‌بند مورداستفاده قرار می‌گیرند. در ادامه برای بهبود عملکرد، کل شبکه با حداقل‌سازی تابع هزینه طبقه‌بندی (Binary Cross-Entropy) یا تابع ترکیبی به‌صورت end-to-end تنظیم دقیق می‌شود. بهینه‌سازی با Adam و نرخ یادگیری اولیه انجام شده و برای جلوگیری از بیش برازش از Dropout، L2-regularization و Early-stopping استفاده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

روش پیشنهادی در این پژوهش، با بهره‌گیری از ترکیب AEs و MLP ها، عملکرد بهتری نسبت به رویکردهای مبتنی بر CNN و RNN ارائه می‌دهد. بر اساس معیارهای ارزیابی، این مدل با دقت ۰,۸۸ از CNN (۰,۸۲) و RNN (۰,۸۴) فراتر رفته و همچنین، صحت بالاتری (۰,۷۵ در مقایسه با ۰,۶۵ برای CNN و ۰,۷۱ برای RNN) دارد که نشان‌دهنده توانایی بالاتر در تشخیص صحیح موارد مثبت است. درحالی‌که میزان فراخوانی روش پیشنهادی (۰,۷۰) کمی بیشتر از RNN (۰,۶۹) است، امتیاز F1 برابر با ۰,۷۲ است که نسبت به CNN (۰,۶۶) و RNN (۰,۶۶) تعادل بهتری میان دقت و یادآوری ایجاد می‌کند. این نتایج نشان می‌دهند که مدل ترکیبی AEs-MLP، علاوه بر کاهش حجم داده‌های پردازش‌شده در لبه شبکه، توانسته است کارایی محاسباتی و دقت تشخیص را بهبود دهد. در نتیجه، این روش می‌تواند به‌عنوان یک راهکار بهینه برای پردازش داده‌های IoT در محیط‌های محاسباتی لبه مورد استفاده قرار گیرد.

در راستای توسعه و بهبود این روش، چندین پیشنهاد تحقیقاتی برای آینده قابل‌بررسی است. افزایش بهره‌وری محاسباتی از طریق بهینه‌سازی مدل ترکیبی AEs-MLP می‌تواند منجر به کاهش مصرف منابع پردازشی و افزایش سرعت تحلیل داده‌ها در دستگاه‌های لبه شود. کاهش تأخیر پردازش یکی دیگر از مسیرهای تحقیقاتی مهم است، چراکه استقرار مدل در نزدیکی منبع داده باعث واکنش سریع‌تر سیستم‌ها و کاهش تأخیر در کاربردهای بلادرنگ می‌شود. بهبود امنیت و حریم خصوصی با استفاده از روش‌هایی مانند یادگیری فدرال نیز می‌تواند اهمیت بالایی داشته باشد، زیرا پردازش داده‌ها در لبه بدون نیاز به ارسال اطلاعات حساس به سرورهای مرکزی، امنیت را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، پیشرفت‌های سخت‌افزاری نظیر توسعه شتاب‌دهنده‌های ویژه هوش مصنوعی (NPU و TPU) امکان اجرای بهینه مدل‌های ترکیبی AEs-MLP را بر روی دستگاه‌های لبه فراهم می‌کند. در نهایت، گسترش کاربردهای عملی در حوزه‌هایی مانند شهرهای هوشمند، سیستم‌های مراقبت سلامت، مدیریت صنعتی، و وسایل نقلیه خودران می‌تواند زمینه‌های جدیدی برای توسعه این روش ایجاد کند. این پیشنهادهای نشان می‌دهند که ادغام رمزگذارهای خودکار و پرسپترون‌های چندلایه می‌تواند به بهبود کارایی محاسبات لبه و مدیریت داده‌های IoT در مقیاس وسیع کمک کند.

مراجع

[1] Veeramachaneni, V. (2025). Edge Computing: Architecture, Applications, and Future Challenges in a Decentralized Era. Recent Trends in Computer Graphics and Multimedia Technology, 7(1), 8-23.

[2] Alnoman, A., Sharma, S. K., Ejaz, W., & Anpalagan, A. (2019). Emerging edge computing technologies for distributed IoT systems. IEEE Network, 33(6), 140-147.

[3] Torabi, H., Khazaei, H., & Litoiu, M. (2024, May). A Learning-Based Caching Mechanism for Edge Content Delivery. In Proceedings of the 15th ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (pp. 236-246).

[4] Malandrino, F., Chiasserini, C. F., & Dell'Aera, G. M. (2021). Edge-powered assisted driving for connected cars. IEEE Transactions on Mobile Computing, 22(2), 874-889.

[5] Adeniyi, O., Sadiq, A. S., Pillai, P., Aljaidi, M., & Kaiwartya, O. (2024). Securing mobile edge computing using hybrid deep learning method. Computers, 13(1), 25.

[6] Bourechak, A., Zedadra, O., Kouahla, M. N., Guerrieri, A., Seridi, H., & Fortino, G. (2023). At the confluence of artificial intelligence and edge computing in iot-based applications: A review and new perspectives. Sensors, 23(3), 1639.

[7] T. Tran and D. Pompili, "Adaptive bitrate video caching and processing in mobile-edge computing networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018.

[8] J. George and S. Sebastian, "Cooperative caching strategy for video streaming in mobile networks," in Emerging Technological Trends (ICETT), International Conference on. IEEE, 2016, pp. 1–7.

[9] S. Zhang, P. He, K. Suto, P. Yang, L. Zhao, and X. Shen, "Cooperative edge caching in user-centric clustered mobile networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 17, no. 8, pp. 1791–1805, 2018.

[10] A. Gharaibeh, A. Khreishah, B. Ji, and M. Ayyash, "A prov- ably efficient online collaborative caching algorithm for multicell-coordinated systems," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 15, no. 8, pp. 1863–1876, 2016.

[11] H. Mouss, D. Mouss, N. Mouss, and L. Sefouhi, "Test of page-hinckley, an approach for fault detection in an agro-alimentary production system," in 2004 5th Asian Control Conference (IEEE Cat. No. 04EX904), vol. 2. IEEE, 2004, pp. 815–818.

[12] A. Maskooki, G. Sabatino, and N. Mitton, "Analysis and performance evaluation of the next generation wireless networks," in Modeling and Simulation of Computer Networks and Systems. Elsevier, 2015, pp. 601–627.

[13] X. Xia, F. Chen, G. Cui, M. Abdelrazek, J. Grundy, H. Jin, and Q. He, "Budgeted data caching based on k-median in mobile edge computing," in 27th IEEE International Conference on Web Services. IEEE, 2020.

[14] W. Shi and S. Dustdar, "The promise of edge computing," Computer, vol. 49, no. 5, pp. 78–81, 2016.

[15] U. Drolia, K. Guo, J. Tan, R. Gandhi, and P. Narasimhan, "Cachier: Edge-caching for recognition applications," in 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE, 2017, pp. 276–286.

[16] E. Zeydan, E. Bastug, M. Bennis, M. A. Kader, I. A. Karatepe, A. S. Er, and M. Debbah, "Big data caching for networking: Moving from cloud to edge," IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 9, pp. 36–42, 2016.

[17] R. Halalai, P. Felber, A.-M. Kermarrec, and F. Ta¨ıani, "Agar: A caching system for erasure-coded data," in 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE, 2017, pp. 23–33.

[18] X. Cao, J. Zhang, and H. V. Poor, "An optimal auction mechanism for mobile edge caching," in 2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE, 2018, pp. 388– 399.

[19] X. Zhang and Q. Zhu, "Collaborative hierarchical caching over 5g edge computing mobile wireless networks," in 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018, pp. 1–6.

[20] W. Liu, Y. Jiang, S. Xu, G. Cao, W. Du, and Y. Cheng, "Mobility-aware video prefetch caching and replacement strategies in mobile-edge computing networks," in 2018 IEEE 24th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). IEEE, 2018, pp. 687–694.

[21] M. Chen, Y. Qian, Y. Hao, Y. Li, and J. Song, "Data-driven computing and caching in 5g networks: Architecture and delay analysis," IEEE Wireless Communications, vol. 25, no. 1, pp. 70–75, 2018.

[22] Xia, Xiaoyu, et al. "Graph-based data caching optimization for edge computing." Future generation computer systems 113 (2020): 228-239.

[23] Liu, Ying, et al. "Data caching optimization in the edge computing environment." IEEE Transactions on Services Computing (2020)

[24] Safavat, Sunitha, Naveen Naik Sapavath, and Danda B. Rawat. "Recent advances in mobile edge computing and content caching." Digital Communications and Networks 6.2 (2020): 189-194.

[25] Wang, Xiaofei, et al. "In-edge ai: Intelligentizing mobile edge computing, caching and communication by federated learning." Ieee Network 33.5 (2019): 156-165.

[26] Xu, D., Li, T., Li, Y., Su, X., Tarkoma, S., Jiang, T., ... & Hui, P. (2021). Edge intelligence: Empowering intelligence to the edge of network. Proceedings of the IEEE, 109(11), 1778-1837.

[27] Ullah, I., & Mahmoud, Q. H. (2022). Design and development of RNN anomaly detection model for IoT networks. IEEE Access, 10, 62722-62750.

[28] Abusitta, A., de Carvalho, G. H., Wahab, O. A., Halabi, T., Fung, B. C., & Al Mamoori, S. (2023). Deep learning-enabled anomaly detection for IoT systems. Internet of Things, 21, 100656.

[29] Rafique, S. H., Abdallah, A., Musa, N. S., & Murugan, T. (2024). Machine learning and deep learning techniques for internet of things network anomaly detection—current research trends. Sensors, 24(6), 1968.

[30] Wang, Y., Qin, G., & Liang, Y. (2025). A reliability anomaly detection method based on enhanced GRU-Autoencoder for Vehicular Fog Computing services. Computers & Security, 150, 104217.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 198-237

A Review of Multimedia Recommender Systems

Saeedeh Momtazi[1*], Zahra Pourbahman[2], Mohammad Reza Azizi[3], Meysam Bagheri[4]

[1] Amirkabir Uiversity of Technology, Tehran, Iran
[2] Shahed University, Tehran, Iran
[3] Amirkabir Uiversity of Technology, Tehran, Iran
[4] Apasay Data System, Tehran, Iran

Received: 28 January 2026, Revised: 11 February 2026, Accepted: 12 February 2026
Paper type: Review

Abstract

The purpose of this study is to comprehensively review multimedia recommender systems with a focus on content-based approaches. The diversity and abundance of data on the web has prompted experts to research and develop recommender systems for automatically predicting the user's favorite content. In the upcoming research, various types of recommender systems were introduced, which are collaborative, content-based, and hybrid. Then, a review of 47 articles centered on content-based recommender systems in the three areas of movie, music, and television program recommendations was undertaken. In addition, the approaches used in recommender systems used in large and famous companies such as Netflix, YouTube, Facebook, Amazon, and TikTok were examined in detail. Due to the importance of the body used in recommender systems, MMTF-14K, MovieLens and Spotify Audio Features datasets were also introduced. According to the conducted research, it is clear that many practical recommender systems in large companies have benefited from the content-based approach for recommendations.

Keywords: Content-based recommender systems, industry recommender systems, datasets for content-based recommender systems

[*] Corresponding Author's email: momtazi@aut.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۹۸ الی ۲۳۷

مطالعه مروری بر سیستم‌های توصیه‌گر حوزه چندرسانه‌ای

سعیده ممتازی[1*]، زهرا پوربهمن[2]، محمدرضا عزیزی[3]، میثم باقری[4]

[1]دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

[2]دانشکده علوم پایه، گروه علوم کامپیوتر، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

[3]دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

[4]شرکت آپاسای داده سیستم، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳

نوع مقاله: مروری

چکیده

پژوهش حاضر یک مقاله مروری محسوب می‌شود که به‌مرور جامعی بر سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای با تمرکز بر رویکردهای مبتنی بر محتوا می‌پردازد. تنوع و کثرت داده‌ها در وب، متخصصان را بر آن داشته است که برای پیش‌بینی خودکار محتوای موردعلاقه کاربر به پژوهش و توسعه سیستم‌های توصیه‌گر بپردازند. در پژوهش پیش رو به معرفی انواع سیستم‌های توصیه‌گر، اعم از پالایش مشارکتی، مبتنی بر محتوا و ترکیبی، پرداخته شده است. سپس ۴۷ مقاله با محوریت سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی بر محتوا در سه بخش توصیه فیلم، موسیقی و برنامه تلویزیونی بررسی گردیده است. به‌علاوه، رویکردهای مورداستفاده در سیستم‌های توصیه‌گر مورداستفاده در شرکت‌های بزرگ و مشهور جهان مانند نتفلیکس، یوتیوب، فیسبوک، آمازون و تیک‌تاک به‌تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت پیکره مورداستفاده در سیستم‌های توصیه‌گر به معرفی مجموعه دادگان MMTF-14K, MovieLens و Spotify Audio Features نیز پرداخته شده است. با توجه به پژوهش انجام‌شده، واضح است که اکنون بسیاری از سیستم‌های توصیه‌گر کاربردی در شرکت‌های بزرگ از رویکرد مبتنی بر محتوا برای توصیه بهره گرفته‌اند.

کلیدواژگان: سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی بر محتوا، سیستم‌های توصیه‌گر در صنعت، پیکره دادگان جهت سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی بر محتوا.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: momtazi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه داده‌های موجود در وب و ارائه‌دهندگان محتوا چندین نوع رسانه مختلف ازجمله متن، صدا، ویدئو و تصاویر را در اختیار کاربران قرار می‌دهند. فراوانی این نوع داده‌ها چنان گسترده است که تنها از طریق سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای[1] قابل‌دسترسی است [۱].

به‌غیراز کثرت تنوع، فایل‌های ویدئویی ازلحاظ صدا، محتوا و ساختار نیز گسترده شده است؛ به‌عنوان‌مثال فیلم‌های تولیدشده توسط کاربر، فیلم‌های تولیدشده توسط موسسات مختلف، کلیپ‌های ویدئویی موسیقی و غیره. پیدا کردن مطالب جدید جالب با استفاده از ابزارهای جستجوی سنتی برای کاربران دشوارتر شده است. درنتیجه، سیستم‌های توصیه‌گر که به‌طور خودکار محتوایی را که ممکن است کاربر دوست داشته باشد پیش‌بینی می‌کنند، در دهه گذشته ظهور و تکامل‌یافته‌اند [۲].

اکثر الگوریتم‌های سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای با استفاده از پالایش مبتنی بر محتوا[2] بر اساس داده‌های متنی، مانند فراداده در تعاملات کاربر، کار می‌کنند. بااین‌حال محتوای یک اثر چندرسانه‌ای را می‌توان به روش‌های متنوع‌تری توصیف کرد. ویژگی‌های برجسته یک فیلم شامل سبک، بازیگران و صحنه‌پردازی است که در محتوای دیداری و شنیداری آن منعکس‌شده است. برای یک قطعه موسیقی، سبک، ریتم، ساز، شعر و همچنین فاکتورهای فرهنگی توصیفات مهمی هستند. هنوز هم ویژگی‌های فراداده بیشترین استفاده را در سیستم‌های توصیه‌گر امروزی دارند [۱].

از سوی دیگر با توجه به ایجاد شبکه‌های تلویزیونی گوناگون مانند شبکه‌های خانگی یا تلویزیون‌های آی‌پی و غیره که نوع خاصی از تلویزیون هستند و خدمات متفاوتی به کاربران ارائه می‌کنند، در این شبکه‌های جدید پخش همگانی برنامه‌ها وجود ندارد و در عوض کاربران مختلف بر اساس سلیقه و زمان آزاد خود برنامه‌هایی را انتخاب و مشاهده می‌کنند. در این سیستم‌ها هر فرد یک پروفایل دارد که اطلاعاتی از خود در آن ذخیره می‌کند. به‌غیراز این اطلاعات صریح اطلاعات دیگری بر اساس فعالیت‌های کاربر بر روی این کانال‌ها استخراج می‌شود و سلیقه و تمایلات او در ارتباط با برنامه‌های تلویزیونی مشخص می‌شود. این پیشنهاد برنامه در حوزه سیستم‌های توصیه‌گر جای می‌گیرد.

با توجه به اهمیت سیستم‌های توصیه‌گر در فضای رسانه‌ای و همچنین ارزش روش‌های مبتنی بر محتوا در این حوزه، در این پژوهش مطالعه مروری جامعی بر روی سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای با تمرکز بر رویکردهای مبتنی بر محتوا ارائه می‌گردد.

در ادامه این مقاله، در بخش ۲، به تعریف ریاضیاتی سیستم‌های توصیه‌گر می‌پردازیم. در بخش ۳، به معرفی انواع سیستم‌های توصیه‌گر خواهیم پرداخت. مروری بر سیستم‌های توصیه‌گر موجود با تمرکز بر اهداف این پژوهش در بخش ۴ ارائه خواهد شد. در بخش ۵، به تبیین سیستم‌های توصیه‌گر مطرح در صنعت بین‌الملل می‌پردازیم. پیکره‌های آموزشی مورداستفاده در این سیستم‌ها در بخش ۶ مطرح می‌شود. بخش‌های ۷ و ۸ به ترتیب بحث و مقایسه و خلاصه و جمع‌بندی مطالب اختصاص خواهد یافت. در بخش آخر، منابع مورداستفاده در تحقیق پیش رو ارائه می‌شود.

۲- تعریف ریاضیاتی سیستم‌های توصیه‌گر

به‌طور کلی، یک سیستم توصیه‌گر با مجموعه‌ای از کاربران و مجموعه‌ای از اقلام سروکار دارد. برای هر جفت (ui, oj)، توصیه‌کننده می‌تواند امتیاز j را محاسبه کند که میزان بهره مورد انتظار کاربر ui در مورد oj (یا سودمندی مورد انتظار قلم oj برای کاربر) را اندازه‌گیری می‌کند. محاسبه امتیاز با استفاده از الگوریتم رتبه‌بندی انجام می‌شود که به‌طورکلی می‌تواند ترکیب مختلفی از ویژگی‌های زیر را در بر بگیرد: [۴]

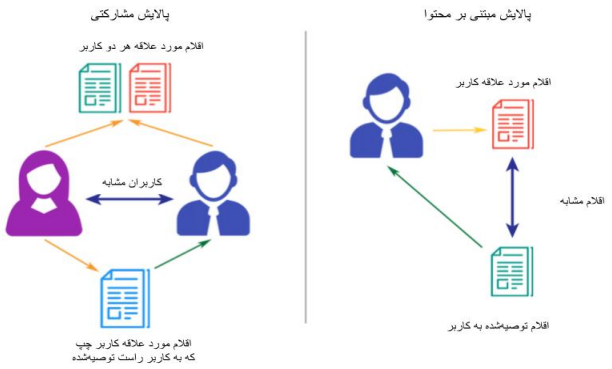
- تنظیمات کاربر و رفتار گذشته
- تنظیمات و رفتار جامعه کاربر
- ویژگی اقلام و چگونگی مطابقت با تنظیمات کاربر
- بازخورد کاربر،
- اطلاعات زمینه و چگونگی تغییر پیشنهادات همراه با محتوا.

۳- مرور انواع سیستم‌های توصیه‌گر: چالش‌ها و افق‌های آینده

به‌طور عمده سه نوع سیستم توصیه‌گر وجود دارد (شکل ۱): پالایش مشارکتی، مبتنی بر محتوا، ترکیبی. در این بخش به توضیح این رویکردها پرداخته می‌شود.

[1] Multimedia Recommender System(MMRS)

[2] Content Based Filtering (CBF)



شکل ۱. دو نوع از سیستم‌های توصیه‌گر؛ مشارکتی و محتوایی. [۱۸]

۳-۱- پالایش مشارکتی

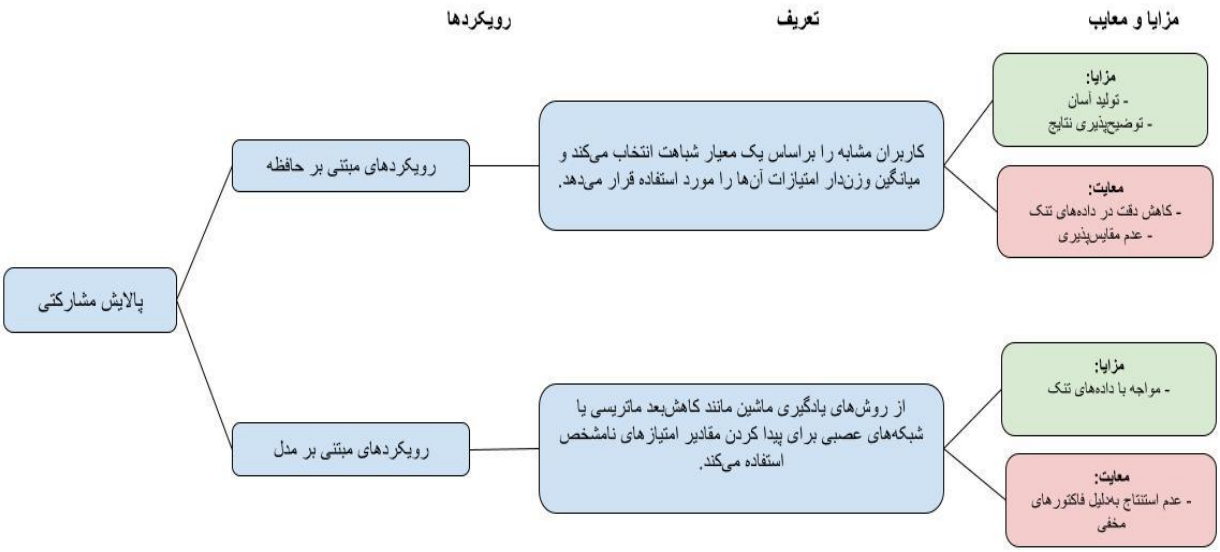
پالایش مشارکتی[1] یکی از متداول‌ترین و موفق‌ترین رویکردها در سیستم‌های توصیه‌گر است. ایده اصلی این روش بر این فرض استوار است که کاربرانی که درگذشته سلیقه مشابهی داشته‌اند، در آینده نیز به احتمال زیاد اقلام مشابهی را خواهند پسندید. سیستم‌های CF با جمع‌آوری و تحلیل رفتار گذشته کاربران (مانند امتیازدهی، خرید، یا مشاهده) الگوهای مشترک را شناسایی کرده و بر اساس این الگوها، توصیه‌های جدیدی برای کاربر فعال تولید می‌کنند.

این رویکرد معمولاً از یک ماتریس کاربر-قلم(ماتریس سودمندی) استفاده می‌کند که در آن سطرها نمایانگر کاربران و ستون‌ها نمایانگر اقلام هستند. درایه‌های این ماتریس نشان‌دهنده تعامل کاربر با قلم است که می‌تواند به‌صورت بازخورد صریح (مانند امتیاز ۱ تا ۵) یا بازخورد ضمنی (مانند تعداد دفعات کلیک، مشاهده یا خرید) باشد. مطابق با شکل ۲ دو رویکرد کلی وجود دارد که عبارت هستند از رویکرد مبتنی بر حافظه و رویکرد مبتنی بر مدل.

رویکرد مبتنی بر حافظه[2]

این رویکرد مستقیماً از کل داده‌های ماتریس کاربر-قلم برای پیش‌بینی استفاده می‌کند. دو زیرشاخه اصلی آن عبارت‌اند از:

- پالایش مشارکتی کاربر-محور :[3] ابتدا کاربران مشابه با کاربر فعال شناسایی می‌شوند و سپس اقلامی که این کاربران مشابه پسندیده‌اند (و کاربر فعال هنوز با آن‌ها تعامل نداشته) به کاربر فعال توصیه می‌شوند.
- پالایش مشارکتی قلم-محور [4]: در این روش، شباهت بین اقلام بر اساس الگوی امتیازدهی کاربران محاسبه می‌شود. سپس، برای کاربر فعال، اقلامی توصیه می‌شوند که بیشترین شباهت را با اقلامی دارند که کاربر قبلاً به آن‌ها امتیاز بالایی داده است (Sarwar et al., ۲۰۰۱). این روش اغلب به دلیل پایداری بیشتر شباهت اقلام نسبت به شباهت کاربران و مقیاس‌پذیری بهتر، ترجیح داده می‌شود.



شکل ۲. انواع رویکردهای پالایش مشارکتی

[1] Collaborative Filtering(CF)
[2] Memory-based CF
[3] User-based CF
[4] Item-based CF

چالش‌های رویکردهای مبتنی بر حافظه:

- پراکندگی داده[1]: ماتریس کاربر-قلم معمولاً بسیار پراکنده است، به این معنی که اکثر کاربران تنها با تعداد کمی از اقلام تعامل داشته‌اند. این امر محاسبه دقیق شباهت را دشوار می‌کند.
- مقیاس‌پذیری[2]: با افزایش تعداد کاربران و اقلام، محاسبات شباهت بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌شود.
- مشکل شروع سرد[3]: برای کاربران جدید (new users) یا اقلام جدید (new items) که هیچ تعاملی ثبت نکرده‌اند، تولید توصیه دشوار است.
- کاربران خاکستری (Gray Sheep): کاربرانی باسلیقه منحصربه‌فرد، به‌سختی در گروه‌های مشابه قرار می‌گیرند و توصیه‌های دقیقی دریافت نمی‌کنند.

رویکرد مبتنی بر مدل[4]

در این رویکرد، یک مدل از داده‌های موجود آموزش داده می‌شود تا بتواند امتیازات کاربران به اقلام را پیش‌بینی کند. برخی از تکنیک‌های برجسته عبارت‌اند از (شکل ۳):

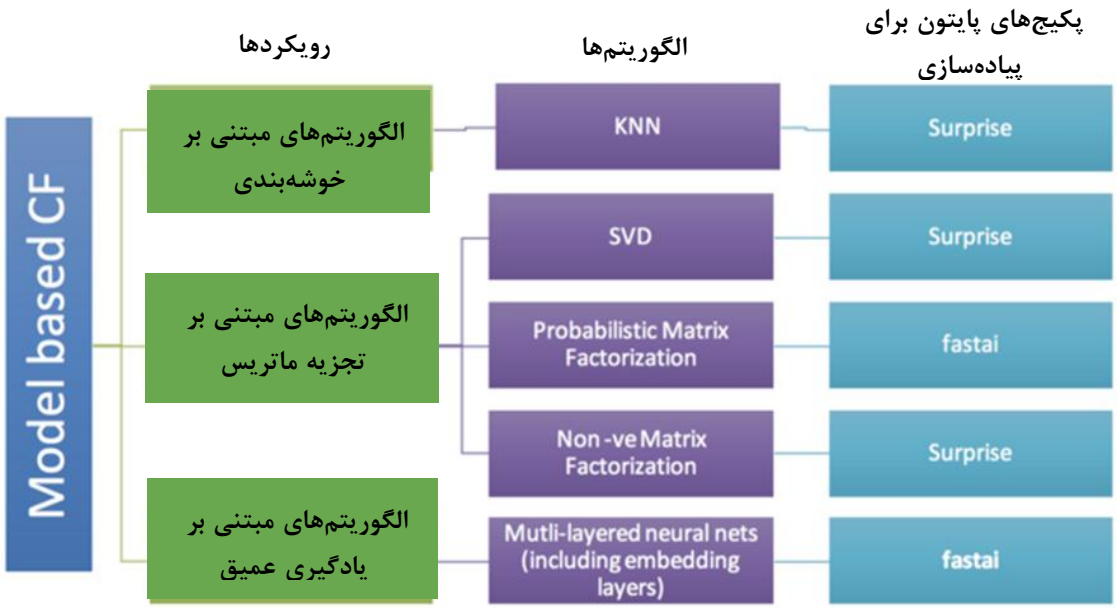
- فاکتورگیری ماتریس[5]: تجزیه ماتریس کاربر-قلم به دو ماتریس با ابعاد کوچک‌تر (مانند SVD[6]، SGD[7]، ALS[8])
- خوشه‌بندی[9]: دسته‌بندی کاربران یا اقلام بر اساس شباهت‌هایشان.
- یادگیری عمیق[10]: استفاده از مدل‌هایی مانند پالایش مشارکتی مشارکتی عصبی برای یادگیری نمایش‌های پیچیده از تعاملات کاربر-قلم.

چالش‌های رویکردهای مبتنی بر مدل:

- هزینه ساخت مدل: مدل‌های پیچیده مانند یادگیری عمیق ازنظر محاسباتی پرهزینه هستند.
- تفسیرپذیری کمتر: برخی مدل‌ها مانند جعبه سیاه عمل می‌کنند.

۳-۲- سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی بر محتوا

سیستم‌های مبتنی بر محتوا بر اساس ویژگی‌های اقلام و پروفایل علایق کاربر عمل می‌کنند. ایده اصلی این است که اگر کاربری درگذشته از اقلامی با ویژگی‌های خاص خوشش آمده، در آینده نیز اقلامی با ویژگی‌های مشابه را خواهد پسندید.



شکل ۳. انواع رویکردها در روش مبتنی بر مدل

[1] Data Sparsity
[2] Scalability
[3] Cold Start
[4] Model-based CF
[5] Matrix Factorization(MF)
[6] Singular Value Decomposition
[7] Stochastic Gradient Descent
[8] Alternating Least Squares
[9] Clustering
[10] Deep Learning

در این رویکرد، برای هر قلم یک پروفایل (نمایه) شامل ویژگی‌های توصیفی آن (مانند سبک، کارگردان، بازیگران برای فیلم؛ یا کلمات کلیدی، نویسنده، موضوع برای مقالات) ایجاد می‌شود. به‌طور مشابه، یک پروفایل برای کاربر ساخته می‌شود که علایق او را بر اساس ویژگی‌های اقلامی که قبلاً با آن‌ها تعامل مثبت داشته (مثلاً امتیاز بالا داده) نشان می‌دهد. سپس، سیستم اقلامی را توصیه می‌کند که پروفایل آن‌ها بیشترین شباهت را با پروفایل کاربر داشته باشد. این شباهت معمولاً با استفاده از معیارهایی مانند شباهت کسینوسی بین بردارهای ویژگی محاسبه می‌شود.

مزایای سیستم‌های مبتنی بر محتوا:

- عدم نیاز به داده‌های سایر کاربران: این سیستم‌ها برای تولید توصیه برای یک کاربر خاص، تنها به داده‌های خود آن کاربر نیاز دارند.
- شفافیت و تفسیرپذیری: توصیه‌ها قابل توضیح هستند، زیرا می‌توان مشخص کرد که یک قلم بر اساس کدام ویژگی‌هایش توصیه شده است.
- مقابله با مشکل شروع سرد برای اقلام جدید: تا زمانی که ویژگی‌های یک قلم جدید مشخص باشد، می‌توان آن را به کاربران علاقه‌مند توصیه کرد، حتی اگر هیچ کاربری هنوز با آن تعامل نداشته باشد.

چالش‌های سیستم‌های مبتنی بر محتوا:

- مهندسی ویژگی[1]: استخراج و نمایش مناسب ویژگی‌های اقلام می‌تواند دشوار و زمان‌بر باشد، به‌خصوص برای اقلامی با محتوای چندرسانه‌ای یا پیچیده. کیفیت توصیه‌ها به‌شدت به کیفیت این ویژگی‌ها وابسته است.
- بیش‌تخصصی شدن[2] و عدم تنوع[3]: این سیستم‌ها تمایل دارند اقلامی را توصیه کنند که بسیار شبیه به اقلامی هستند که کاربر قبلاً دیده یا پسندیده است. این امر کشف اقلامی جدید و متنوع را محدود می‌کند.
- مشکل شروع سرد برای کاربران جدید: تا زمانی که کاربر با تعدادی قلم تعامل نکند تا پروفایل علایق او شکل بگیرد، سیستم قادر به ارائه توصیه‌های دقیق نخواهد بود.

۳-۳- سیستم‌های توصیه‌گر ترکیبی[4]

سیستم‌های ترکیبی باهدف بهره‌گیری از مزایای رویکردهای مختلف (عمدتاً پالایش مشارکتی و مبتنی بر محتوا) و پوشش دادن معایب آن‌ها ایجاد می‌شوند. ترکیب این رویکردها می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام شود:

- وزن‌دهی[5]: نتایج حاصل از چندین سیستم توصیه‌گر با هم ترکیب‌شده و امتیاز نهایی بر اساس وزن‌های تخصیص داده شده به هر سیستم محاسبه می‌شود.
- تعویض[6]: بسته به شرایط خاص (مانند در دسترس بودن داده‌ها یا وضعیت کاربر)، سیستم بین رویکردهای مختلف جابجا می‌شود.
- ترکیب ویژگی‌ها[7]: ویژگی‌های حاصل از یک رویکرد به‌عنوان ورودی برای رویکرد دیگر استفاده می‌شود. برای مثال، ویژگی‌های محتوایی می‌توانند برای بهبود ماتریس کاربر-قلم در پالایش مشارکتی استفاده شوند.
- آبشاری[8]: ابتدا یک رویکرد برای تولید مجموعه‌ای از کاندیداها استفاده می‌شود و سپس رویکرد دیگری برای پالایش و رتبه‌بندی نهایی این کاندیداها به کار می‌رود.
- فرا سطح[9]: خروجی یک سیستم توصیه‌گر به‌عنوان ورودی برای سیستم دیگر استفاده می‌شود. مدل یاد گرفته‌شده توسط یک تکنیک، به‌عنوان ورودی برای تکنیک دیگر استفاده می‌شود.

نتفلیکس نمونه بارزی از یک سیستم توصیه‌گر ترکیبی موفق است. آن‌ها از ترکیبی از پالایش مشارکتی (مقایسه عادات تماشا و جستجوی کاربران مشابه) و پالایش‌های مبتنی بر محتوا (توصیه فیلم‌هایی با ویژگی‌های مشترک با فیلم‌هایی که کاربر امتیاز بالایی به آن‌ها داده) به همراه الگوریتم‌های پیچیده یادگیری ماشین برای ارائه توصیه‌های شخصی‌سازی شده بهره می‌برند. سیستم‌های پیشرفته مانند نتفلیکس از رویکردهای ترکیبی پیچیده‌ای بهره می‌برند که اغلب شامل چندین مدل و تکنیک است.

۳-۴- چالش‌های کلیدی و افق‌های تحقیقاتی آینده

علیرغم پیشرفت‌های قابل‌توجه، سیستم‌های توصیه‌گر همچنان با چالش‌های متعددی روبرو هستند و زمینه‌های تحقیقاتی گسترده‌ای برای بهبود آن‌ها وجود دارد:

[1] Feature Engineering
[2] Overspecialization
[3] Limited Serendipity
[4] Hybrid Recommender Systems
[5] Weighted
[6] Switching
[7] Feature Combination
[8] Cascade
[9] Meta-level

چالش‌های موجود و نیازمند توجه بیشتر

- دقت در مقابل تنوع و سرندیپیتی[1]: اکثر سیستم‌ها بر بهینه‌سازی دقت تمرکز دارند، اما توصیه‌های بسیار دقیق ممکن است منجر به یکنواختی و عدم کشف اقلام جدید و غیرمنتظره شود. ایجاد تعادل بین این معیارها یک چالش مهم است.
- تفسیرپذیری و شفافیت[2]: کاربران اغلب می‌خواهند بدانند چرا یک قلم خاص به آن‌ها توصیه شده است. افزایش تفسیرپذیری می‌تواند اعتماد کاربر را جلب کرده و به او در تصمیم‌گیری کمک کند. این موضوع به‌ویژه در سیستم‌های مبتنی بر مدل‌های پیچیده مانند یادگیری عمیق اهمیت دارد.
- حریم خصوصی[3]: سیستم‌های توصیه‌گر برای عملکرد خود به داده‌های شخصی کاربران نیاز دارند. جمع‌آوری و استفاده از این داده‌ها نگرانی‌هایی را در مورد حریم خصوصی ایجاد می‌کند. توسعه تکنیک‌هایی برای توصیه‌گری با حفظ حریم خصوصی (مانند یادگیری فدرال یا استفاده از نویز تفاضلی) ضروری است.
- انصاف و جلوگیری از سوگیری[4]: الگوریتم‌های توصیه‌گر ممکن است سوگیری‌های موجود در داده‌ها را بازتولید یا تقویت کنند، که منجر به توصیه‌های ناعادلانه برای گروه‌های خاصی از کاربران یا دیده نشدن برخی اقلام می‌شود. تحقیق در زمینه شناسایی و کاهش این سوگیری‌ها اهمیت فزاینده‌ای یافته است.
- حملات مخرب[5]: افراد یا ربات‌ها ممکن است با وارد کردن پروفایل‌های جعلی یا امتیازات ساختگی، سعی در دست‌کاری سیستم و ترویج یا تخریب اقلامی خاص داشته باشند. توسعه روش‌های مقاوم در برابر این حملات ضروری است.
- ارزیابی[6]: ارزیابی اثربخشی سیستم‌های توصیه‌گر پیچیده است. معیارهای سنتی آفلاین (مانند RMSE یا Precision@K) ممکن است به‌طور کامل تجربه کاربری واقعی یا اهداف تجاری بلندمدت را منعکس نکنند. نیاز به معیارهای جامع‌تر و تست‌های A/B آنلاین دقیق‌تر احساس می‌شود.

افق‌های تحقیقاتی آینده

- سیستم‌های توصیه‌گر آگاه از زمینه[7]: در نظر گرفتن زمینه (مانند زمان، مکان، وضعیت احساسی کاربر، همراهان کاربر) می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کیفیت توصیه‌ها را بهبود بخشد.
- سیستم‌های توصیه‌گر مکالمه‌ای[8]: این سیستم‌ها از طریق یک رابط مکالمه‌ای (مانند چت‌بات) با کاربر تعامل می‌کنند تا نیازها و ترجیحات او را بهتر درک کرده و توصیه‌های پویاتری ارائه دهند.
- یادگیری تقویتی برای توصیه‌گرها[9]: استفاده از یادگیری تقویتی می‌تواند به سیستم‌ها کمک کند تا توالی‌هایی از توصیه‌ها را بهینه کنند که منجر به حداکثر شدن پاداش بلندمدت (مانند تعامل یا رضایت کاربر) شود.
- توصیه‌گرهای بین دامنه‌ای[10]: انتقال دانش از یک دامنه (مثلاً فیلم) به دامنه دیگر (مثلاً کتاب) می‌تواند به حل مشکل پراکندگی داده و شروع سرد کمک کند
- توصیه‌گرهای گروهی[11]: توسعه سیستم‌هایی که بتوانند توصیه‌های مناسبی برای گروهی از کاربران با سلایق مختلف ارائه دهند (مثلاً برای یک خانواده که می‌خواهند با هم فیلم ببینند) یک حوزه تحقیقاتی فعال است.
- تکنیک‌های پیشرفته یادگیری عمیق: کاوش بیشتر در معماری‌های جدید یادگیری عمیق، مانند شبکه‌های عصبی گرافی (GNNs) برای مدل‌سازی روابط پیچیده بین کاربران و اقلام، و یا مدل‌های مبتنی بر ترنسفورمر برای درک توالی‌های رفتار کاربر، پتانسیل بالایی برای بهبود سیستم‌های توصیه‌گر دارد.

۴- پیشینه تحقیق در سیستم‌های توصیه‌گر

در راستای مرور ادبیات سیستم‌های توصیه‌گر، جمع‌آوری اطلاعات بر اساس جستجوی کلیدواژه‌های مرتبط با سیستم‌های توصیه‌گر در حوزه فیلم، موسیقی و برنامه تلویزیونی انجام پذیرفته است. جمع‌آوری مقالات از طریق موتور جستجوی Google scholar و یا مراجع ذکرشده در مقالات مروری صورت گرفته است. درمجموع ۱۵ مقاله مروری مدنظر قرارگرفته است. تعداد مقالات جمع‌آوری‌شده از طریق جستجوی وب و مراجع مقالات مروری منجر به بررسی ۱۷۴ مقاله گردیده است که این مقالات پس از بررسی اولیه در دسته‌بندی سه‌گانه رویکردهای توصیه‌گر به شرح زیر تقسیم‌بندی شده‌اند:

[1] Accuracy vs. Diversity and Serendipity
[2] Explainability and Transparency
[3] Privacy
[4] Fairness and Bias
[5] Shilling Attacks
[6] Evaluation
[7] Context-Aware Recommender Systems(CARS)
[8] Conversational Recommender Systems
[9] Reinforcement Learning for RS
[10] Cross-Domain Recommendation
[11] Group Recommender Systems

- رویکرد مبتنی بر محتوا: ۳۶ مقاله
- رویکرد پالایش مشارکتی: ۱۰۱ مقاله
- رویکرد ترکیبی: ۳۷ مقاله

با توجه به به محوریت روش‌های مبتنی بر محتوا در پژوهش حاضر، از میان مقالات فوق مطالعه دقیق‌تر مقالاتی که بر روش‌های مبتنی بر محتوا تمرکز داشتند و تعدادی از مقالات ترکیبی مرتبط مدنظر قرارگرفته است و از این تعداد مقالات ۴۷ مقاله بررسی و توضیحات تفضیلی آن در این مقاله ارائه می‌گردد. بر اساس حوزه کاربردی سیستم‌ها مقالات در سه بخش توصیه فیلم، موسیقی، برنامه تلویزیونی و چندرسانه‌ای ارائه شده‌اند.

۴-۱- سیستم‌های توصیه‌گر حوزه فیلم

سیستم‌های مبتنی بر روش‌های سنتی مبتنی بر محتوا

این سیستم‌ها از ویژگی‌های توصیفی فیلم‌ها مانند سبک، بازیگران، کارگردان، و کلیدواژه‌ها برای ساخت پروفایل کاربر و مقایسه آن با فیلم‌های موجود استفاده می‌کنند. معیارهای شباهت مانند فاصله کسینوسی برای پیشنهاد فیلم‌های مشابه به کار می‌روند.

در مقاله ارائه‌شده توسط Pradeep و همکاران [۷] یک رویکرد متداول برای توصیه مبتنی بر محتوا ارائه شده است و نوآوری آن در ارائه یک ابزار با رابط کاربری تحت وب است.

ویژگی‌های استفاده شده در این مقاله بازیگران، کلیدواژه، عوامل سازنده فیلم، و سبک‌های فیلم می‌باشد. بر اساس ۴ ویژگی ذکرشده و با استفاده از معیار فاصله کسینوسی، ۱۰ مورد از شبیه‌ترین فیلم‌ها به پروفایل کاربر یافت شده و به او نشان داده می‌شود.

در مقاله ارائه‌شده توسط Singh و همکاران [۸] با استفاده از ویژگی «محبوبیت فیلم» و « سبک » یک توصیه‌گر مبتنی بر محتوا با استفاده از K نزدیک‌ترین همسایه و فاصله کسینوسی ارائه شده است.

در مقاله ارائه‌شده توسط Almeida و همکاران [۹] بیان‌شده است که سیستم‌های توصیه‌گر، اگر فقط دقت در نظر گرفته شود، ممکن است باعث تولید توصیه‌های بایاس‌شده شود. برای رفع این مشکل، یک الگوریتم تکاملی چندهدفه ارائه شده است. سه هدف دقت، تنوع و تازگی توصیه‌ها در این الگوریتم لحاظ شده است.

در مقاله ارائه‌شده توسط Meel و همکاران [۱۰]، فرض شده است که به ازای هر فیلم، هر کاربر ممکن است با توجه به حسی که نسبت به فیلم داشته است، تعدادی tag به آن نسبت داده باشد. این tag ها می‌توانند یک عبارت یا یک کلمه باشند. فهرست تگ‌هایی که کاربران مختلف به یک فیلم داده‌اند در کنار هم قرار می‌گیرد.

سبک فیلم نیز در کنار این تگ‌ها قرار می‌گیرد و درنهایت به ازای هر فیلم یک فهرست از تگ‌ها وجود خواهد داشت. از word2vec برای به دست آوردن یک بازنمایی برای هر یک از تگ‌ها استفاده می‌شود. سپس بازنمایی هر فیلم با جمع وزن‌دار بردار word2vec هر برچسب متناسب با وزن tf-idf آن برچسب به دست می‌آید. در ادامه از SVD استفاده می‌شود.

ویژگی‌هایی که در مقاله ارائه‌شده توسط Singla و همکاران [۱۱] از فیلم استخراج‌شده است، عبارت‌اند از داستان فیلم، امتیازهای فیلم، کشورهای سازنده و سال ساخت. راه‌حل ابتدایی ارائه‌شده در این مقاله این است که با استفاده از Doc2Vec، از هر داستان فیلم یک بردار ۱۲۸ بعدی ساخته شود. مقایسه این بردارها با پروفایل کاربر، با معیار فاصله کسینوسی انجام می‌شود.

این روش دو مشکل دارد. مشکل اول این است که کیفیت فیلم‌ها را در نظر نمی‌گیرد. یعنی ممکن است فیلمی که صرفاً ازنظر داستان به پروفایل یک کاربر شبیه است ولی امتیاز بسیار کمی دارد را نیز به کاربر پیشنهاد کند. مشکل دوم این است که اگر سبک فیلم در نظر گرفته نشود، ممکن است یک فیلم که به طنز از روی فیلمی دیگر و با همان داستان ساخته شده است نیز به کاربر پیشنهاد شود. برای مثال فیلم ۳۰۰ فیلمی حادثه‌ای است و فیلم «اسپارتان‌ها را ملاقات کنید» فیلمی خنده‌دار است که با داستان فیلم ۳۰۰ ولی به طنز ساخته شده است. روش فعلی صرفاً به خاطر شبیه بودن داستان این دو فیلم، آن دو را مشابه در نظر می‌گیرد. برای رفع مشکل اول، فهرست پیشنهادهایی که صرفاً با شبیه بودن داستان به‌دست‌آمده، با امتیاز فیلم، مکان و سال ساخت پالایه می‌شود و پیشنهادهایی مناسب انتخاب می‌شود. برای رفع مشکل دوم، سبک هر فیلم به‌عنوان کلیدواژه در نظر گرفته می‌شود. هر فیلم می‌تواند تا حداکثر سه سبک داشته باشد. به دلیل این‌که بعضی از کلیدواژه سبک‌ها، مثل عاشقانه، در فیلم‌های زیادی موجود است و برخی مثل آهنگین در فیلم‌های بسیار کمی وجود دارد، مقدار TF-IDF هر یک از این کلیدواژه‌ها را به‌عنوان وزن آن در نظر می‌گیریم. دو ویژگی جدید، به بردار ۱۲۸ بعدی ابتدایی اضافه می‌شود و یک بردار واحد به ازای هر فیلم تهیه می‌شود. این بردار با استفاده از معیار فاصله کسینوسی با پروفایل‌های کاربران مقایسه خواهد شد.

سیستم‌های جدید مبتنی بر زمینه

این سیستم‌ها علاوه بر ویژگی‌های محتوایی و تعاملات کاربر،

اطلاعات زمینه‌ای مانند زمان، مکان، و وضعیت احساسی کاربر را نیز در نظر می‌گیرند. برای مثال، از مدل‌های مارکوف برای پیش‌بینی ترجیحات کاربر در بازه‌های زمانی مختلف استفاده می‌کنند.

مقاله ارائه‌شده توسط Yin و همکاران [۱۳] بر روی مدل کردن علایق کاربر با استفاده از شبکه‌های اجتماعی تأکید دارد. مدلی که در این مقاله ارائه شده است، کاربر را بر اساس دو ویژگی سلیقه شخصی کاربر و اطلاعات زمینه‌ای زمانی یا تأثیری که در زمان‌های مختلف کاربر از بقیه جامعه می‌گیرد، مدل می‌کند. این مدل، مدل آمیخته آگاه از زمینه زمانی نام دارد. علاوه بر این مدل پایه، از آن‌جایی که سلیقه شخصی کاربر نیز در طول زمان متغیر است، برای مدل کردن این رفتار کاربر، مدل TCAM پویا ارائه شده است. در این مقاله، بر اساس دو مدل ارائه شده، برای کاربر پروفایل ساخته شده و یک سیستم توصیه‌گر آگاه از زمینه زمانی ارائه شده است.

در مقاله ارائه‌شده توسط Elashmawi و همکاران [۸۱] جهت توصیه فیلم، ۴ مرحله طی می‌شود: در مرحله نخست، به استخراج فریم‌ها و قطعات صدا و افزایش کیفیت و کاهش نویز در آن‌ها می‌پردازند. در مرحله دوم، با استفاده از تکنیک‌های مختلف نظیر تشخیص اشیا، تشخیص چهره، دسته‌بندی صحنه و تشخیص صدا به استخراج ویژگی‌ها از فریم‌ها و قطعات صدا می‌پردازند. در مرحله سوم، شباهت ویدئوها بر مبنای ویژگی‌های استخراج‌شده با بکارگیری معیارهایی نظیر شباهت کسینوسی، فاصله اقلیدسی و جنبش زمانی پویا را محاسبه می‌کند. در مرحله آخر، سیستم بر اساس میزان مشابهت ویدئوی موردعلاقه کاربر با ویدئوهای موجود در پایگاه داده خود را بر اساس بر ویژگی‌های استخراج‌شده از اشیا موجود، چهره‌ها، صحنه‌ها، صداها و کلمات موجود در آن، را به کاربر پیشنهاد می‌کند.

در مقاله ارائه‌شده توسط Markapudi و همکاران [۸۲] از یک شبکه عصبی چند لایه رو به جلو و روش نمونه‌گیری مونت کارلو جهت پیشنهاد ویدئو به کاربر استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا با استفاده از پالایه کاهش نویز گاوسی تطبیقی حرکتی کیفیت و وضوح فریم‌های ویدئو بهبود داده می‌شود. سپس ویدئو به تعدادی قطعه، که هر قطعه از تعدادی فریم تشکیل شده است، تقسیم شده و ویژگی‌های زمانی و مکانی هر قطعه استخراج می‌شود. ازجمله ویژگی‌های زمانی، میانگین حرکات اشیا و ازجمله ویژگی‌های مکانی، رنگ موجود در هر فریم است. در مرحله بعد، ویژگی‌های استخراج‌شده از هر ویدئو در قالب بردار بازنمایی می‌شوند که محتوای هر ویدئو را تفسیر می‌کند. سپس مدل شبکه عصبی چندلایه روبه جلو بر روی بردار ویژگی‌های حاصل از ویدئو آموزش داده می‌شود تا بدین‌وسیله مجموعه‌ای از خروجی‌ها، که مشخص‌کننده ویدئوی پیشنهادی است، تولید شود. سپس از روش نمونه‌گیری مونت کارلو برای تخمین عدم قطعیت پیش‌بینی انجام‌شده استفاده می‌شود تا بدین وسیله مرتبط‌ترین ویدئوها به کاربر پیشنهاد گردد.

ازجمله مزایای این روش عدم نیاز به داده‌های سایر کاربران (حل مشکل شروع سرد برای اقلام جدید) و تفسیرپذیری بالا بر اساس ویژگی‌های مشخصی ارائه‌شده می‌باشد. ازجمله معایب این روش بیش‌تخصصی شدن (Overspecialization) و عدم تنوع در پیشنهادها و وابستگی شدید به کیفیت فراداده‌های فیلم‌ها می‌باشد.

سیستم‌های ترکیبی (محتوا + پالایش مشارکتی)

این سیستم‌ها از ترکیب روش‌های مبتنی بر محتوا و پالایش مشارکتی استفاده می‌کنند. برای مثال، برخی از آن‌ها ابتدا از پالایش مشارکتی برای پیش‌بینی امتیاز کاربران استفاده کرده و سپس با استفاده از ویژگی‌های محتوایی، پروفایل کاربر را بهبود می‌بخشند.

در مقاله ارائه‌شده توسط Liang و همکاران [۵] بر روی دو مشکل اساسی پالایش مشارکتی، تنک بودن ماتریس کاربر-قلم و شروع سرد، تأکید شده است. ابتدا برای ایجاد پروفایل کاربر از کلیدواژه‌های مرتبط با هر فیلم به‌عنوان ویژگی استفاده شده است. سپس در بخش پالایش مشارکتی از الگوریتم‌های تخمین توزیع جهت یادگیری ترجیحات کاربران بر اساس پروفایل‌هایشان استفاده شده است. مدل توصیه‌گر این مقاله یک مدل دوگانه است که بخش مبتنی بر محتوا، با استفاده از پروفایل ساخته‌شده می‌تواند موسیقی‌های جدید به کاربر پیشنهاد بدهد و بخش پالایش مشارکتی با استفاده از این پروفایل، به جای استفاده مستقیم از ماتریس کاربر-قلم، می‌تواند کاربران مشابه با یکدیگر را بیابد.

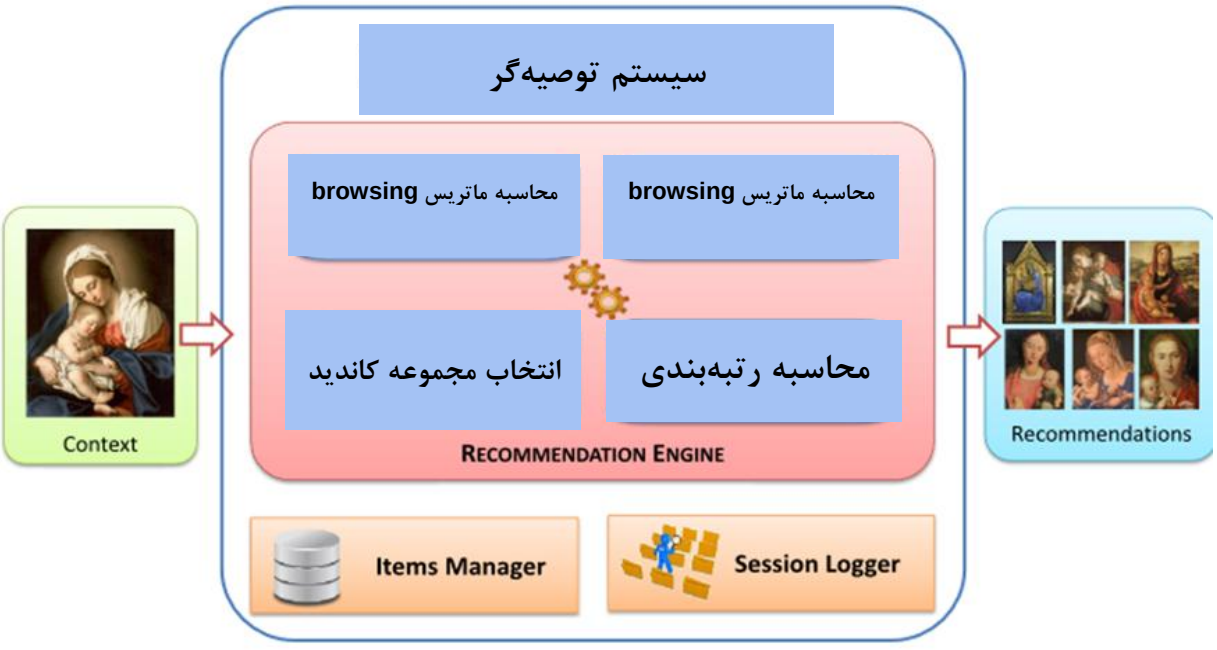
در سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی بر محتوای سنتی، پروفایل کاربر بر اساس سابقه فیلم‌هایی که کاربر تماشا کرده است ساخته‌شده و فیلم‌هایی که کاربر ندیده است و مشابه با پروفایل او هستند به او پیشنهاد می‌شود. مقاله ارائه‌شده توسط Chen و همکاران [۶] به این مشکل اشاره می‌کند که تعداد فیلم‌هایی که کاربر مشاهده کرده است، نسبت به تمام فیلم‌های موجود، بسیار کم است. به همین دلیل در این مقاله ابتدا با استفاده از روش پالایش مشارکتی، امتیازی که ممکن است کاربر به فیلم‌هایی که ندیده است بدهد، پیش‌بینی می‌شود. با استفاده از این امتیازها، دو فهرست برای هر کاربر تهیه می‌شود. فهرست فیلم‌هایی که پیش‌بینی می‌شود کاربر بیشترین امتیاز را به آن‌ها بدهد و فهرست فیلم‌هایی که پیش‌بینی می‌شود کاربر کمترین امتیاز را به آن‌ها بدهد. با استفاده از فهرست اول،

پروفایل مثبت کاربر و با استفاده از فهرست دوم پروفایل منفی کاربر ساخته می‌شود. درنهایت با استفاده از روش مبتنی بر محتوا، فیلم‌هایی به کاربر پیشنهاد می‌شود که بیشترین شباهت به پروفایل مثبت کاربر و کمترین شباهت به پروفایل منفی کاربر را داشته باشد.

در مقاله ارائه‌شده توسط Sottocornola و همکاران [۱۲]، سیستم توصیه‌گری ارائه‌شده است که از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول این سیستم، یک توصیه‌گر پالایش مشارکتی مبتنی بر الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه و مبتنی بر کاربر است که بر اساس این‌که کاربران پیش از این چه فیلم‌هایی را دوست داشته و چه فیلم‌هایی را دوست نداشته‌اند، احتمال این‌که کاربر فیلم جدیدی را دوست داشته باشد را بیان می‌کند. بخش دوم، یک سیستم توصیه‌گر مبتنی بر محتوا است که داستان هر فیلم را با استفاده از doc2vec به فضای برداری متراکم می‌برد و سپس با استفاده از جنگل تصادفی، میزان احتمال علاقه کاربر به فیلم مورد نظر را به دست می‌آورد. در بخش آخر، یک شبکه عصبی پیش‌خور وجود دارد که به‌عنوان ورودی، میزان احتمال علاقه کاربر تولیدشده توسط بخش پالایش مشارکتی، دقت مدل پالایش مشارکتی، میزان علاقه کاربر تولیدشده توسط بخش مبتنی بر محتوا و دقت مدل مبتنی بر محتوا را دریافت کرده و مقدار احتمال نهایی علاقه کاربر به فیلم جدید ارائه‌شده را به دست می‌آورد.

در مقاله ارائه‌شده توسط Albanese و همکاران [۱۴] یک رویکرد جدید برای حل مسئله پیشنهاد قلم در سیستم‌های جستجوی چندرسانه‌ای ارائه‌شده است. در این رویکرد باهدف محاسبه یک رتبه‌بندی سراسری از همه اقلام موجود در یک مجموعه داده، از روشی مانند نحوه کار موتور جستجوی گوگل استفاده می‌کند و سپس با استفاده از امتیازات سراسری محاسبه شده کاندیداها را رتبه‌بندی می‌کند. برای مشاه معماری می‌توانید به شکل ۴ مراجعه کنید.

در نظریه انتخاب اجتماعی، مجموعه‌ای از رأی‌دهندگان برای رتبه‌بندی مجموعه‌ای از گزینه‌ها فراخوانی می‌شوند و رتبه‌بندی‌های فردی به‌صورت یک رتبه‌بندی سراسری یکپارچه‌سازی می‌شوند. در فرمول‌بندی ما، مجموعه رأی‌دهندگان و مجموعه گزینه‌ها هر دو با مجموعه اقلام موجود در داده‌ها منطبق هستند. ما ابتدا آنچه را که به معنای انتخاب در دامنه جستجو است را تعریف می‌کنیم و سپس مکانیزمی را برای جمع آوری انتخاب‌های افراد در یک رتبه‌بندی سراسری تعریف می‌کنیم. نتیجه این کار یک قالب کلی برای محاسبه پیشنهادات سفارشی با ترکیب ویژگی‌های ذاتی اقلامی چندرسانه‌ای، رفتار گذشته کاربران و رفتار کلی کل جامعه کاربران است. توصیه‌ها با استفاده از الگوریتم رتبه‌بندی اهمیت که شبیه استراتژی معروف PageRank است رتبه‌بندی می‌شوند.



شکل ۴. معماری سیستم پیشنهادی آلبانی و همکاران [۱۴]

رویکرد مقاله یک استراتژی ترکیبی دارد که دو استراتژی محتوایی و مشارکتی را همزمان استفاده می‌کند. این برنامه از سوابق سیستم استفاده می‌کند تا به‌طور ضمنی اطلاعات مربوط به تک‌تک کاربران و جامعه کاربران را به‌طورکلی به‌دست آورد و به‌عنوان رتبه‌بندی یکنواخت از آن استفاده کند. این رویکرد مشابه با روش‌های پالایش تصادفی در پالایش مشارکتی، اطلاعات فعالیت‌های گذشته را بصورت یک گراف جهت‌دار تولید می‌کند و بر اساس این گراف مناسب‌ترین اقلام را برای پیشنهاد انتخاب می‌کند.

شباهت این الگوریتم با روش‌های استخراج مبتنی بر قاعده بدین صورت است که برای محاسبه اهمیت هر قلم از روابط انتقالی بین اقلام استفاده می‌کند. مشابه با روش‌های بازیابی اطلاعات و پالایش، به‌خصوصیات اقلامی که کاربر در حال حاضر مشاهده می‌کند، اهمیت زیادی می‌دهد تا بتواند به‌طور موثر سودمندی موارد دیگر را محاسبه کند. سرانجام، رویکرد پیشنهادی از دانش پیشینی در مورد فراداده و روابط آن‌ها استفاده می‌کند و هر دو نوع اطلاعات سطح پایین (ویژگی‌ها) و سطح بالا (فراداده) را در نظر می‌گیرد، به‌طوری‌که هر دو سطح اطلاعات برای تعیین سودمندی یک قلم در فرآیند توصیه لحاظ شوند.

معماری کلی سیستم در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس این معماری اجزای اصلی زیر در این مدل قابل تفکیک هستند:

- مدیریت اقلام[1] - یک مخزن داده که اقلامی را که باید با توضیحات مرتبط پیشنهاد شوند ذخیره می‌کند.
- ابزار لاگ زیربخش‌ها[2] - بخشی مختص ضبط و ذخیره اطلاعات مربوط به هر زیربخش اقلام که اطلاعات مربوط به اقلام بازدید شده را نگهداری می‌کند.
- موتور توصیه[3] - مولفه اصلی سیستم است که بر اساس اطلاعات مربوط به شباهت اقلام و تاریخچه مرورگر کاربران جامعه، به‌صورت پویا مجموعه‌ای از اقلام را پیشنهاد می‌کند. اقلام خروجی بر اساس کاهش میزان سودمندی مرتب شده‌اند. این مولفه به‌طور خاص شامل زیرمجموعه‌های زیر است:
  - بخش محاسبه ماتریس مرورگر که داده‌های جمع‌آوری‌شده مرورگر را به دو نوع ماتریس تبدیل می‌کند: یک ماتریس سراسری که رفتار کلی کاربران را در نظر می‌گیرد و یک ماتریس محلی که رفتار یک کاربر را در نظر می‌گیرد.
  - بخش محاسبه ماتریس شباهت که شباهت بین هر جفت از اقلام را محاسبه می‌کند و نتایج را در یک ماتریس ذخیره می‌کند.
  - بخش انتخاب مجموعه کاندیداها که زیر مجموعه اقلامی را که با نیازهای کاربر منطبق‌ترند را محاسبه می‌کند.
  - بخش رتبه‌بندی که کاندیداهای منتخب را برای توصیه رتبه‌بندی می‌کند.

ازجمله مزایای این روش کاهش مشکل شروع سرد برای کاربران و اقلام جدید و بهبود دقت توصیه‌ها با ترکیب سیگنال‌های مختلف می‌باشد. ازجمله معایب این روش پیچیدگی محاسباتی بالاتر نسبت به روش‌های خالص و نیاز به داده‌های تاریخی تعامل کاربران می‌باشد.

در پژوهش انجام شده توسط Rajasekar و همکاران [۱۵] تلاش کرده است تا نقاط ضعف هر دو روش را پوشش داده و دقت پیشنهادات را ارتقا بخشد. از ویژگی‌های برجسته این سیستم، بهره‌گیری از منابع داده‌ای متنوع نظیر متادیتای فیلم‌ها و تاریخچه تماشای کاربران، در کنار ایجاد یک محیط تعاملی برای دریافت بازخوردهای مستمر است که منجر به پالایش مداوم الگوریتم و بهبود تجربه جمعی کاربران در کشف آثار سینمایی می‌گردد.

۴-۲- سیستم‌های توصیه‌گر حوزه موسیقی

سیستم‌های مبتنی بر روش‌های سنتی مبتنی بر محتوا

این سیستم‌ها از ویژگی‌های استخراج‌شده از فایل‌های صوتی مانند MFCC، گام، ریتم، و انرژی برای توصیه موسیقی استفاده می‌کنند. برخی از روش‌ها از یادگیری عمیق برای تحلیل خودکار این ویژگی‌ها بهره می‌برند.

در مقاله ارایه شده توسط Shashaani [۱۶]، با هدف افزایش اعتماد و رضایت کاربران، بر مقوله شفافیت و تبیین‌پذیری در سیستم‌های توصیه‌گر موسیقی تمرکز دارد. با بررسی شکاف‌های موجود در ارائه توضیحات قانع‌کننده به کاربر، این تحقیق تلاش می‌کند راهکارهایی برای ایجاد توصیه‌های تعاملی‌تر و قابل‌اعتمادتر ارائه دهد تا از این طریق، تجربه کاربری در مواجهه با محتوای جدید بهبود یابد.

در مقاله ارائه‌شده توسط Ord و همکاران [۱۷] بیان‌شده است که اکثر سیستم‌های توصیه‌گر مرتبط با موسیقی، از روش پالایش مشارکتی استفاده می‌کنند ولی یکی از اصلی‌ترین مشکلات این روش، شروع سرد است. این امر باعث می‌شود که وقتی داده‌ای در

[1] Items Manager
[2] Session Logger
[3] Recommendation Engine

ابتدای کار وجود ندارد، پیشنهاد دادن موسیقی سخت است و به همین دلیل موسیقی‌های تازه یا موسیقی‌هایی که خیلی معروف نیستند، معمولا در این سیستم‌ها پیشنهاد نمی‌شوند. در این مقاله یک latent factor model برای توصیه معرفی شده است. هنگامی که اطلاعاتی از استفاده کاربران و موسیقی‌ها وجود نداشته باشد، سیگنال‌های صوتی موجود در محتوای موسیقی استخراج می‌شود. برای پردازش سیگنال‌های صوتی در این مقاله روش بازنمایی ساده و سنتی bag-of-words و روش پیشرفته‌تر شبکه‌های عصبی کانولوشنی استفاده شده است و مورد مقایسه قرارگرفته است. دیتاست مورداستفاده، Million Song Dataset بوده است.

در مقاله ارائه‌شده توسط Liu و همکاران [۱۹] روشی برای مقایسه فاصله (عکس شباهت) محتوای قطعه‌های موسیقی مختلف، بر اساس سلیقه کاربر پیشنهاد می‌دهد. این روش بر اساس الگوریتم تصادفی، الگوریتم تکاملی و برنامه‌نویسی تکاملی است. در این مقاله دو دسته ویژگی از هر موسیقی استخراج می‌شود. فرآیند استخراج ویژگی‌های دسته اول به این صورت است که ابتدا برای بخش ملودی اصلی هر موسیقی، یک فایل MIDI به‌صورت دستی تهیه می‌شود. با استفاده از این فایل ویژگی‌هایی مرتبط با صوت موسیقی استخراج می‌شود. میانگین گام (فرکانس پایه)، آنتروپی گام، چگالی گام، مدت زمان متوسط، آنتروپی مدت زمان، آنتروپی فاصله گام نمونه‌هایی از این ویژگی‌ها هستند. همچنین از شکل موج سیگنال موسیقی نیز ویژگی MFCC و فرمنت استخراج می‌شوند.

در مقاله ارائه‌شده توسط Bogdanov و همکاران [۲۰] از صوت هر یک موسیقی‌های یک مجموعه موسیقی که کاربر به آن‌ها علاقه داشته است، ویژگی‌های سطح بالایی استخراج می‌شود. سپس با استفاده از این ویژگی‌ها برای کاربر یک نمایه[1] تعریف می‌شود و کار توصیه با استفاده از آن انجام می‌شود. با توجه به اطلاعات استخراج‌شده از محتوای صوتی شباهت بین پروفایل کاربر و موسیقی‌ها بر اساس مدل‌های معنایی انجام می‌گیرد.

ازجمله مزایای این روش‌ها عدم نیاز به داده‌های تعاملی کاربران (حل مشکل شروع سرد) و قابلیت توصیه موسیقی‌های جدید بر اساس محتوای صوتی می‌باشد. ازجمله معایب این روش‌ها وابستگی به کیفیت استخراج ویژگی‌های صوتی و عدم توجه به سلیقه‌های فردی کاربران در برخی روش‌هاست.

در مقاله ارائه‌شده توسط Wang و همکاران [۲۱] یک مدل احتمالاتی ارائه داده شده است که با ترکیب اطلاعات جمع‌آوری‌شده توسط تلفن همراه کاربر و اطلاعات مرتبط با محتوای موسیقی، به کاربر موسیقی پیشنهاد می‌دهد. در سیستم ارائه‌شده، کاربر می‌تواند به‌صورت دستی فعالیتی که در حال انجام است را انتخاب کند یا اجازه دهد که موبایلش با اطلاعاتی که جمع‌آوری کرده است، مثل اطلاعات مرتبط با شتاب یا نویز محیطی، فعالیت او را به دست آورد. این فعالیت‌ها شامل کار کردن، درس خواندن، دویدن، خواب، پیاده‌روی و خرید کردن است. برای طبقه‌بندی فعالیت فعلی کاربر با استفاده از اطلاعات سنسورها، ۶ طبقه‌بندی درخت تصمیم، رگرسیون لاجیستیک، بیز ساده، ماشین بردار پشتیبان و k نزدیک‌ترین همسایگی با هم مقایسه شده‌اند و درنهایت طبقه‌بندی بیز ساده انتخاب شده است. پس از مشخص شدن فعالیت کاربر، باید برای این فعالیت به او موسیقی پیشنهاد شود. با انجام تحقیقی، نشان داده شده است که کاربران زیادی نسبت به این‌که یک موسیقی برای چه فعالیتی مناسب است، اتفاق نظر دارند. درنتیجه از مجموعه دادگان Grooveshark - که به ازای هر فعالیت حدود ۳۰۰۰ موسیقی دارد - استفاده شده است. برای شخصی‌سازی شدن پیشنهادهایی که به هر کاربر داده می‌شود، از بازخوردهای مثبت کاربر (گوشی دادن کامل به موسیقی یا like کردن آن) و بازخوردهای منفی (رد کردن موسیقی پس از گذشت چند ثانیه از شروع موسیقی) استفاده شده است.

سیستم‌های جدید مبتنی بر محتوا

این سیستم‌ها از مدل‌های پویا مانند یادگیری تقویتی یا مارکوف برای تطبیق توصیه‌ها با تغییر سلیقه کاربران در طول زمان استفاده می‌کنند. به‌علاوه، در این سیستم‌ها از شبکه‌های عصبی برای پردازش مستقیم سیگنال‌های صوتی یا ترکیب آن با داده‌های متنی (مانند متن آهنگ) استفاده می‌کنند.

در مقاله ارائه شده توسط Chiliguano و همکاران [۲۳] با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنی، یک بازنمایی سطح بالا از یک قسمت از فایل صوتی موسیقی ساخته می‌شود. این بازنمایی نمایانگر این است که موسیقی مورد نظر با چه احتمالی مربوط به چه سبکی است. برای به دست آوردن رفتار کاربر در گوشی دادن به موسیقی، از الگوریتم‌های تخمین توزیع استفاده می‌شود. با استفاده اطلاعات کاربر و اطلاعات موسیقی، توصیه موسیقی انجام می‌شود.

در مقاله ارائه شده توسط Chou و همکاران [۲۴]، موضوع پیشنهاد موسیقی بعدی به کاربر، بر اساس آخرین موسیقی که کاربر گوش کرده است، مطرح است. در این پژوهش بر روی حل مسئله شروع

[1] Profile

سرد تأکید شده است. برای حل این مسئله، الگوریتمی مبتنی بر تجزیه ماتریس ارائه شده است که از اطلاعات سیگنال صوتی موسیقی استفاده کرده است. با در دست داشتن دنباله موسیقی‌هایی که کاربر گوش کرده است، می‌توان یک ماتریس انتقال ایجاد کرد که در آن احتمال انتقال از هر موسیقی به موسیقی دیگر برای یک کاربر خاص به دست آورده می‌شود. محاسبه این احتمال با شمارش جفت موسیقی‌هایی که کاربر آن‌ها را در کنار هم پخش کرده است انجام می‌شود.

در این پژوهش از ویژگی MFCC به‌عنوان ویژگی سیگنال صوتی موسیقی استفاده شده است.

مقاله ارائه شده توسط Turrin و همکاران [۲۵] بر روی مساله توصیه یک فهرست پخش از موسیقی‌ها تمرکز دارد. نکته مهم در فهرست پخش این است که ترتیب موسیقی‌های موجود در فهرست پخش اهمیتی ندارد. معمولا در مسائل توصیه موسیقی یا فهرست پخش موسیقی، به دست آوردن اطلاعات زمینه سخت است. این مقاله به جای به دست آوردن این چنین اطلاعاتی برای تعیین سلیقه کاربر، از موسیقی‌ای که کاربر در حال حاضر در حال گوش دادن است استفاده می‌کند. در صورتی که کاربر در حال گوش دادن به سبک خاصی از موسیقی باشد، می‌توان سبک این موسیقی را به‌عنوان علاقه کوتاه‌مدت کاربر در نظر گرفت. دو الگوریتم پایه ارائه شده است. در الگوریتم اول، بهترین موسیقی‌های هنرمندی که کاربر در حال گوش دادن به یکی از موسیقی‌های او است به‌صورت فهرست به او معرفی می‌شود. در الگوریتم دوم، بهترین موسیقی هنرمند فعلی و هنرمندانی که مشابه هنرمند فعلی هستند، به‌صورت فهرست پخش ارائه می‌شود. برای یافتن هنرمندان مشابه، از معیار شباهت کسینوسی بر روی ماتریس هنرمند-نشست استفاده می‌شود. هر نشست شامل فهرست تمام موسیقی‌هایی است که یک کاربر در حین استفاده از نرم‌افزار به آن‌ها گوش داده است.

الگوریتم ارائه شده در این مقاله، عمل اکتشاف، جستجو جهت پیدا کردن موسیقی جدید توسط کاربر، را در نظر نمی‌گیرد. در این الگوریتم در صورتی که یک کاربر نشست‌هایی از گوش دادن به موسیقی داشته باشد که تا حدی مشابه با یک‌دیگر باشند، به آن یک فهرست پخش ضمنی گفته می‌شود. شباهت دو نشست با هم توسط معیار شباهت جاکارد کوچک شده محاسبه می‌شود. پس از به دست آوردن فهرست‌های پخش، ماتریسی دو بعدی ساخته می‌شود که یک بعد آن موسیقی‌ها و یک بعد آن فهرست پخش‌های ضمنی است. هنگامی که نشست جدیدی از یک کاربر جدید وارد سیستم می‌شود، برداری با اندازه تعداد کل موسیقی‌ها برای او ساخته می‌شود که در صورتی که کاربر به یک موسیقی در این نشست گوش داده باشد، خانه مربوط به آن موسیقی در این بردار برابر با ۱ خواهد بود. با ضرب این بردار در ماتریس تهیه شده در قسمت قبل، امتیاز تشابه هر یک از فهرست پخش‌های ضمنی به نشست فعلی به دست می‌آید. با ترکیب فهرست‌پخش‌های ضمنی‌ای که بیشترین امتیاز را دریافت کرده‌اند، فهرست پخش مرتبط با نشست فعلی به دست می‌آید.

در مقاله ارائه شده توسط Vasile و همکاران [۲۶] یک روش جدید برای محاسبه شباهت بین اقلام با در نظر گرفتن فراداده (metadata) موجود ارائه شده‌است. برای محاسبه تعبیه‌های سطح پایین اقلام، از تعامل‌های گذشته کاربر با اقلام و ویژگی‌های اقلام استفاده می‌شود. تعبیه اقلام ایده‌ای است که از مدل skip-gram در تعبیه کلمات الهام گرفته شده است و سعی دارد بر اساس دنباله انتخاب اقلام توسط هر کاربر یک تعبیه برای هر قلم ارائه دهد. ایده این مقاله مانند ایده product2vec هست که آن هم از تعبیه کلمات الهام گرفته است. همچنین اطلاعات فراداده قلم به‌عنوان اطلاعات جانبی به بهبود مدل کمک می‌کند.

یکی از مسائل مهم در سیستم‌های توصیه‌گر، در نظر گرفتن همزمان رعایت سلیقه کاربر و معرفی اقلام جدید به کاربر است. به معرفی اقلامی که دقیقا مشابه سلیقه کاربر است استخراج[1] و به معرفی قلم جدید به کاربر اکتشاف[2] می‌گوییم. در مقاله ارائه شده توسط Wang و همکاران [۲۷]، مساله انتخاب میزان مناسب اکتشاف و استخراج به‌صورت مساله راهزن چند-دسته[3] - که یک مساله کلاسیک در یادگیری تقویتی است - مدل شده است. برای یادگیری سلیقه کاربر، از یک مدل بیزین استفاده شده است که محتوای موسیقی و جدید بودن اقلام پیشنهادی را در نظر می‌گیرد.

در مساله راهزن چند دسته، مجموعه محدود و با اندازه ثابتی از منابع داریم و هدف ما این است که این منابع را به گونه‌ای تخصیص دهیم که امتیاز دریافتی بیشینه شود. در این مساله، ویژگی‌های انتخاب منابع، در زمان تخصیص، تا حدی شناخته شده است. مساله سیستم توصیه‌گر به این صورت مدل می‌شود که موسیقی‌ها، همان دست[4] است و و امتیازی که کاربر کاربر می‌دهد، payoff است. ویژگی‌هایی که از صوت موسیقی در این پژوهش مورداستفاده قرارگرفته‌است عبارت‌اند از: نرخ عبور از صفر (Zero Crossing

[1] Exploitation
[2] Exploration
[3] Multi-armed bandit
[4] Arm

(Rate، Centroid، Rolloff، Flux، MFCC، کروما (Chroma) و SFC و SFM.

در مقاله ارائه شده توسط Rao و همکاران [۲۸]، یک مدل مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشنی طراحی‌شده است که در ورودی، اسپکتروگرام موسیقی را می‌گیرد. در ادامه چندین لایه کانولوشنی وجود دارد و در لایه یکی مانده به آخر، یک لایه تماما متصل با ۱۰۰ نورون و در لایه آخر، یک لایه softmax با ۲۰ هزار نورون. هدف این شبکه این است که با گرفتن اسپکتروگرام یک موسیقی، ۵۰۰۰ نفری که بیشتر از همه کاربران دیگر به این موسیقی گوش داده‌اند را پیش‌بینی کند. پس از آموزش این شبکه، وقتی یک موسیقی جدید به‌عنوان ورودی به شبکه داده شود، خروجی لایه یکی مانده به آخر آن به‌عنوان بردار ویژگی آن موسیقی استفاده می‌شود.

در مقاله ارائه شده توسط Hosseinzadeh و همکاران [۲۹] این چالش مطرح شده است که در سیستم‌های توصیه‌گر معمولا ترجیح عمومی کاربر را به‌عنوان پروفایل او در نظر می‌گیرند و اهمیت زیادی برای وضعیت فعلی کاربر قائل نیستند. در این پژوهش یک مدل مخفی مارکوف سلسله‌مراتبی برای کشف تغییر سلیقه کاربر ارائه شده است. در صورتی که بازخورد کاربر بر روی دنباله‌ای از اقلام موجود باشد، می‌توان کاربر را یک پروسه مخفی مارکوف سلسله‌مراتبی در نظر گرفت و زمینه یا شرایط فعلی کاربر را، متغیر مخفی این مدل در نظر گرفت.

به ازای هر کاربر، این مدل بیشینه درست‌نمایی دنباله انتقال‌ها بین حالت‌های زمینه‌ای مختلف را به دست می‌آورد و توزیع احتمال زمینه بعدی بر اساس عمل بعدی کاربر را پیش‌بینی می‌کند. حالت کاربر در این مقاله می‌تواند استراحت، رانندگی، ورزش و غیره باشد.

در مقاله ارائه شده توسط Jannach و همکاران [۳۰] این چالش مطرح شده است که موسیقی‌هایی که به کاربر پیشنهاد می‌شود، نباید صرفاً باسلیقه عمومی کاربر تطابق داشته باشد، بلکه باید با موسیقی‌هایی که کاربر به تازگی گوش کرده نیز متناسب باشد. روش ارائه شده در این مقاله برای حل این مشکل، به دو مرحله تقسیم می‌شود. در مرحله اول، هدف این است که یک فهرست از موسیقی‌های پیشنهادی برای کاربر ساخته شود. برای این کار، تکرار حضور هر دو موسیقی در کنار هم و در یک فهرست بخش عمومی یکسان بررسی می‌شود. در این مرحله از الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه، برای پیدا کردن فهرست موسیقی‌ای که موسیقی فعلی بیشترین شباهت به آن را دارد، استفاده خواهد شد. روش این بخش، مشابه با پالایش مشارکتی است. در بخش دوم، هدف این است که با به دست آوردن تم هر فهرست پخش، موسیقی‌هایی به کاربر پیشنهاد شود که به فهرست پخش فعلی او (موسیقی‌هایی که به تازگی پخش کرده است) نزدیک باشد. برای این کار با روش‌های مختلف می‌توان یک امتیاز میزان شباهت موسیقی به فهرست پخش فعلی به دست آورد. یک روش استفاده از تگ‌هایی است که در شبکه اجتماعی Last.fm به موسیقی‌ها انتساب داده شده است. برای این‌که تاثیر تگ‌هایی با ارزش معنایی کم، مثلاً برچسب «دوست داشتم» کم شود، از ضریب TF-IDF به‌عنوان وزن هر برچسب استفاده شده است. روش دیگر، استفاده از ویژگی‌های از صوت مانند گام و بلندی استفاده خواهد شد. در ادامه، از تمام فهرست پخش‌هایی که کاربر در طول زمان ساخته است، میانگین گرفته می‌شود تا یک پروفایل برای کاربر به دست آید. از جمع وزن‌دار امتیازهای به‌دست‌آمده، امتیاز نهایی میزان علاقه کاربر به موسیقی جدید به دست می‌آید. وزن‌ها، هایپر پارامترهای مساله هستند.

در مقاله ارائه شده توسط Vall و همکاران [۳۱]، مساله گسترش یک فهرست پخش موسیقی، با موسیقی‌های جدید، مطرح شده است. برای حل این مساله می‌توان از رویکرد پالایش مشارکتی استفاده کرد ولی استفاده از این رویکرد دو چالش دارد. چالش اول این است که فقط به فهرست پخش‌هایی می‌توان موسیقی اضافه کرد که در زمان آموزش، این فهرست‌ها در نظر گرفته شده باشند. چالش دیگر این است که این رویکرد به‌طورکلی نسبت به موسیقی‌هایی که در فهرست پخش‌های زیادی حضور نداشته‌اند، ضعیف عمل می‌کند. برای حل این دو مشکل، در این پژوهش رویکردی مبتنی بر محتوا ارائه شده است که احتمال تعلق هر موسیقی به هر فهرست پخش را محاسبه می‌کند. ویژگی‌هایی که در این پژوهش استفاده می‌شود، شامل ویژگی‌های مرتبط با فایل صوتی مثل بردار-i (که در ابتدا در مسئله تشخیص گوینده استفاده شده است)، اطلاعات word2vec استخراج‌شده از تگ‌های مربوط به هر موسیقی در شبکه‌های اجتماعی و اطلاعات پالایشی مرتبط با تعداد دفعات پخش موسیقی توسط هر کاربر است.

یک شبکه عصبی تعریف شده است که ورودی آن، تمام موسیقی‌های یک فهرست پخش و یک موسیقی جدید است. هدف این شبکه عصبی این است که مشخص کند آیا موسیقی جدید مرتبط با این فهرست پخش هست یا نه. به ازای هر یک از ورودی‌های شبکه، اطلاعات تجمیع شده از ویژگی‌های آن موسیقی به شبکه داده می‌شود. معماری شبکه در شکل زیر مشاهده می‌شود. شبکه شامل دو بخش است که در بخش ابتدایی، ویژگی‌های انتزاعی‌تری از موسیقی‌های فهرست پخش به‌دست‌آمده و با هم میانگین گرفته می‌شود. این ویژگی‌ها از موسیقی هدف نیز استخراج می‌شود.

درنهایت با استفاده از ویژگی‌های استخراج‌شده، دسته‌بندی دو کلاسه مورد نظر انجام خواهد شد. در شکل ۵، DE لایه Dense است. RE به معنای Relu است. BN برابر با Batch Normalization و DR برابر با Dropout است.

مقاله ارائه شده توسط Vall و همکاران [۳۲] ازنظر ویژگی‌های استفاده شده مشابه با مقاله Vall و همکاران [۳۱] است. تنها تفاوت موجود این است که در این مقاله، یک موسیقی به‌عنوان ورودی به شبکه عصبی داده می‌شود و در خروجی به تعداد فهرست پخش‌ها، نورون موجود است و فهرست پخش‌هایی که موسیقی فعلی احتمالا می‌تواند به آن‌ها تعلق داشته باشد، فعال می‌شوند. معماری شبکه عصبی این مقاله از سه لایه مخفی و ۱۰۰ نورون به ازای هر لایه مخفی تشکیل شده است. تابع فعال‌سازی استفاده شده، تانژانت هایپربولیک است. در لایه‌های شبکه از Batch Normalization و Dropout نیز استفاده شده است.

در مقاله ارائه شده توسط Gharahighehi و همکاران [۳۳] برای حل تعارض شخصی‌سازی تنوع در مقابل دقت در سیستم‌های توصیه‌گر روش جدیدی پیشنهاد شده است. یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در مورد سیستم‌های توصیه‌کننده پدیده حباب پالایه است. درحالی‌که سیستم‌های توصیه‌گر سعی در شخصی‌سازی اطلاعات دارند، آن‌ها حباب پالایه را در اطراف کاربران تنگ‌تر می‌کنند و آن‌ها را از محتوای گسترده محروم می‌کنند. برای غلبه بر این مشکل، می‌توان فهرست توصیه‌های شخصی را متنوع کرد. یک فهرست متنوع معمولاً محتوای گسترده‌تری را به کاربر ارائه می‌دهد. سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی بر نشست انواع توصیه‌هایی هستند که در آن‌ها فقط نشست فعلی کاربر را مورد توجه قرار می‌دهند و بنابراین، با توجه به موارد موجود در نشست فعلی آن‌ها باید قلم بعدی را توصیه کنند. درحالی‌که متنوع‌سازی در دیگر سیستم‌های توصیه‌گر مرسوم به خوبی مورد توجه واقع شده است، اما در سیستم توصیه‌گر مبتنی بر نشست کمتر مورد توجه قرارگرفته است. تنوع و دقت معمولاً همبستگی منفی دارند، یعنی با بهبود یکی دیگر کاهش می‌یابد. در این مقاله افزایش تنوع و دقت بر اساس روش استخراج قاعده و روش نزدیک‌ترین همسایه مبتنی بر نشست ارائه شده است. سرانجام یک رویکرد تعادل عملکرد را پیشنهاد می‌دهند که هم تنوع و هم دقت این سیستم‌ها را بهبود می‌بخشد.

	X_p^1 (D)	...	$X_p^{T_p}$ (D)	x_s (D)
f :	**DE₁** + RE (512)	...	**DE₁** + RE (512)	**DE₁** + RE (512)
	BN₁ + DR (512)	...	**BN₁** + DR (512)	**BN₁** + DR (512)
	DE₂ + RE (512)	...	**DE₂** + RE (512)	**DE₂** + RE (512)
	BN₂ + DR (512)	...	**BN₂** + DR (512)	**BN₂** + DR (512)
	Average (512)			
	Concatenate (1024)			
g :	DE_3 + RE (512)			
	BN_3 + DR (512)			
	DE_4 + RE (512)			
	BN_4 + DR (512)			
	DE_5 + RE (1)			
	Loss			

شکل ۵ . معماری شبکه ارائه شده توسط وال و همکاران

در مقاله ارائه شده توسط Ali و همکاران [۸۵] از مجموعه دادگان موجود در Kaggle شامل اطلاعات حدود ۱۶۰۰۰ آهنگ از Spotify و Genius استفاده کرده است. در این پژوهش، از API های Spotify و Genius جهت استخراج ویژگی‌های موسیقی و آوازها استفاده شده است. ازجمله ویژگی‌های موسیقی هر آهنگ، میزان انرژی، بلندی، محاوره‌ای بودن و آکوستیک بودن آن است. ازجمله ویژگی‌های آواز فرکانس کلمات، فرکانس کلمات بدون تکرار، مثبت بودن یا نبودن احساس و نوع تاپیک مربوطه در آن می‌باشد. در ادامه، یک شبکه سیامس آموزش داده می‌شود. این شبکه از تابع خطای سه‌تایی به منظور مقایسه، آهنگ موردعلاقه کاربر با آهنگی دیگر که موردعلاقه کاربر بوده و آهنگ دیگری که موردعلاقه کاربر نیست، استفاده می‌شود. سپس در فرآیند آموزش فاصله آهنگ هدف با آهنگ موردعلاقه کاربر حداقل و از آهنگ دیگر حداکثر گردد. به این ترتیب، آهنگ‌های مشابه با آهنگ موردعلاقه کاربر بیشترین امتیاز و سایر آهنگ‌ها کمترین امتیازها را به خود اختصاص می‌دهند. به‌علاوه، این شبکه از دو زیرشبکه چندلایه رو به جلو تشکیل می‌شود. دو زیرشبکه ویژگی‌های مربوط به موسیقی و آواز آهنگ را به‌عنوان ورودی دریافت می‌کنند و یک بردار ویژگی به‌عنوان خروجی تولید می‌کند. بردارهای ویژگی ورودی و خروجی به هم متصل شده و به‌عنوان ورودی به یک شبکه چندلایه رو به جلو در نظر گرفته می‌شود و میزان شباهت ویدئوها را تعیین می‌کند. درنهایت بر اساس امتیاز محاسبه شده برای آهنگ‌های مختلف و با در نظر گرفتن حد آستانه، آهنگ‌هایی با امتیاز بیشتر از حد آستانه به‌عنوان شبیه‌ترین آهنگ‌ها به سلیقه کاربر، به کاربر پیشنهاد می‌شود.

در مقاله ارائه شده توسط Burch و همکاران [۸۶] سیستمی طراحی شد که از ۳ جز اصلی تشکیل شده است که دو جز آن برای پیشنهاد آهنگ‌های مشابه به علاقه کاربر و جز دیگر برای تعیین احساسات و

عواطف موجود در آهنگ برای ایجاد فضای متناسب با احساسات تشخیص داده شده بر روی ویدئو استفاده شده است. در جز نخست از الگوریتم خوشه‌بندی جهت گروه‌بندی آوازها بر مبنای ویژگی‌های آهنگ‌ها استفاده می‌شود. به این ترتیب برای هر کاربر مجموعه آهنگ‌های مشابه تعیین می‌شود. درجز دوم از یک الگوریتم تطبیق الگوی سریع جهت تطبیق سیگنال شبیه‌ترین آهنگ‌ها به آهنگ موردعلاقه کاربر در هر گروه مورداستفاده قرار می‌گیرد. در جز سوم، از یک شبکه عصبی پیچشی جهت تعیین عواطف و احساسات موجود در هر آهنگ نظیر شادی و اندوه استفاده می‌شود. ورودی شبکه از طریق بازنمایی به روش طیف مل آهنگ مانند یک تصویر در نظر گرفته می‌شود به این ترتیب که محور عمودی زمان و محور افقی فرکانس و شدت رنگ خواهد بود. احساسات و عواطف استخراج‌شده در فرآیند پس پردازش در محیط موتور Unreal۵ برای ایجاد فضای متناسب با حس موجود در آهنگ مورداستفاده قرار می‌گیرد.

ازجمله مزایای این روش‌ها انعطاف‌پذیری در یادگیری ترجیحات پویای کاربر، قابلیت تعادل بین اکتشاف (Exploration) و بهره‌برداری (Exploitation)، استخراج خودکار ویژگی‌های پیچیده از موسیقی و قابلیت ترکیب اطلاعات چندرسانه‌ای (صوت، متن، احساس) می‌باشد. ازجمله معایب این روش نیاز به داده‌های رفتاری زیاد برای آموزش مدل، پیچیدگی در پیاده‌سازی و تنظیم پارامترها، نیاز به منابع محاسباتی بالا و تفسیرپذیری پایین به دلیل ماهیت مدل‌های عمیق می‌باشد.

سیستم‌های ترکیبی (محتوا + پالایش مشارکتی)

این سیستم‌ها از ترکیب روش‌های مبتنی بر محتوا (ویژگی‌های صوتی) و پالایش مشارکتی استفاده می‌کنند. برخی نیز از اطلاعات زمینه‌ای مانند فعالیت کاربر (ورزش، مطالعه و ...) برای بهبود توصیه‌ها بهره می‌برند.

سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی محتوای سنتی معمولا ابتدا یک سری ویژگی از صوت موسیقی استخراج می‌کنند (مانند MFCC) و سپس با استفاده از این ویژگی‌ها، پیشنهادهای مربوط به هر کاربر را به دست می‌آورند. به دلیل این‌که ویژگی‌های اولیه استخراج‌شده، برای مسئله توصیه موسیقی طراحی نشده‌اند، معمولا عملکرد این روش‌ها چندان خوب نیست. در مقاله ارائه شده توسط Wang و همکاران [۱۸] با ترکیب شبکه‌های باور عمیق و مدل‌های گرافیکی احتمالی، دو مرحله ذکرشده در بالا با هم ترکیب‌شده‌اند و به‌صورت همزمان استخراج ویژگی از صوت موسیقی و توصیه موسیقی انجام می‌شود. در ادامه این مقاله، این روش با روش پالایش مشارکتی ترکیب‌شده است و نتایجی بهتر از روش‌هایی صرفاً مبتنی بر پالایش مشارکتی و روش‌های مبتنی بر ویژگی سنتی ارائه داده است.

در مقاله ارائه شده توسط Barragáns-Martínez و همکاران [۲۲] سیستم توصیه‌گری ارائه شده است که ترکیبی از رویکردهای مبتنی بر محتوا و پالایش مشارکتی است.سیستم ارائه شده این امکان را مهیا می‌کند که کاربران با نسبت دادن تگ‌هایی به اقلام مختلف، هر قلم را توصیف کنند. با استفاده از تگ‌ها، برای کاربران و برای اقلام، ابر کاربر و ابر قلم ایجاد می‌شود. ابر برچسب قلم از فهرست تگ‌هایی ساخته می‌شود که به یک قلم نسبت داده شده است. ابر تگ‌های کاربر از تگ‌هایی که کاربر هنوز به هیچ قلمی نداده است ساخته می‌شود. اهمیت هر برچسب نسبت داده شده به هر قلم، متناسب با تعداد دفعاتی است که توسط کاربران به آن نسبت داده شده است. پیشنهاد مبتنی بر محتوا به این صورت است که با مقایسه ابر تگ‌های اقلام با ابر تگ‌های یک کاربر، بهترین قلم به یک کاربر به دست می‌آید و به او پیشنهاد می‌شود. نوع دیگر پیشنهاد، استفاده از روش پالایش مشارکتی است. برای این کار در این سیستم با جمع وزن‌دار تگ‌های کاربرانی که به یک قلم علاقه نشان داده‌اند، ابر برچسب یک کاربر نوعی که این قلم برای او مناسب است به دست می‌آید. با مقایسه این ابر تگ‌ها با ابر برچسب کاربران مختلف، کاربر مناسب یک قلم پیدا می‌شود. در واقع این یک روش پالایش مشارکتی مبتنی بر کاربر است چون درنهایت با مقایسه کاربران با هم، پیشنهاد انجام می‌شود. این سیستم توانسته است coverage و diversity را بهبود ببخشد.

ازجمله مزایای این روش کاهش مشکل شروع سرد با استفاده از ویژگی‌های محتوایی و افزایش دقت با ترکیب سیگنال‌های مختلف می‌باشد. ازجمله معایب این روش پیچیدگی محاسباتی بالاتر و نیاز به مهندسی ویژگی‌های دقیق است.

۴-۳- سیستم‌های توصیه‌گر حوزه تلویزیون

سیستم‌های مبتنی بر روش‌های سنتی مبتنی بر محتوا

این روش‌ها از ویژگی‌های محتوایی مانند سبک، بازیگران، شبکه پخش‌کننده و ... برای پیشنهاد برنامه‌ها استفاده می‌کنند.

در رابطه با تماشای تلویزیون این چالش وجود دارد که افراد معمولا شبکه موردعلاقه خود را تماشا می‌کنند و ممکن است حتی اگر برنامه‌ای متناسب با علاقه آن‌ها در شبکه‌ای دیگر پخش شود، متوجه آن نشوند. برای رفع این مشکل، در مقاله ارائه شده توسط

Engelbert و همکاران [۳۴] سیستم توصیه‌گری مبتنی بر طبقه‌بندی بیزین بر اساس بازخورد صریح کاربر و این‌که کاربر درگذشته چه برنامه‌هایی را مشاهده کرده است، ارائه شده است. با استفاده از این سیستم توصیه‌گر، برنامه‌هایی که ممکن است کاربر به آن‌ها علاقه داشته باشد ضبط می‌شود و کاربر می‌تواند بعدا به آن‌ها دسترسی پیدا کند. ویژگی‌هایی که در این سیستم استفاده می‌شود عبارت‌اند از شبکه تلویزیونی که برنامه از آن پخش‌شده است، عنوان برنامه، زیرنویس برنامه، دسته برنامه (مثلاً فیلم، مسابقه تلویزیونی یا ...)، سبک، بازیگران، توضیحات و سال ساخت.

در این پژوهش دو نوع پروفایل برای هر کاربر تعریف می‌شود. در ابتدا که کاربر در سیستم ثبت‌نام می‌کند، توسط پنل کاربری خود، علایق خود (مثلاً سبک موردعلاقه، بازیگر یا کارگردان موردعلاقه) را وارد می‌کند و پروفایل ثابت خود را تکمیل می‌کند. این پروفایل در طول زمان ثابت می‌ماند و تغییری نمی‌کند. سابقه تماشای برنامه‌های مختلف توسط کاربر به‌عنوان بازخورد ضمنی در نظر گرفته می‌شود و با توجه به رفتار کاربر، هر برنامه تماشا شده در یکی از دو دسته «موردعلاقه» یا «عدم علاقه» قرار می‌گیرد. با استفاده از این بازخوردها، پروفایل پویای کاربر تهیه می‌شود. کاربر این امکان را دارد که به هر برنامه به‌صورت صریح بازخورد دهد و پروفایل خود را دقیق‌تر کند. هدف این سیستم این است که در شروع کار که اطلاعات زیادی از برنامه‌های تماشا شده توسط کاربر وجود ندارد، از پروفایل ثابت کاربر استفاده شود و به تدریج، سیستم توصیه‌گر به سراغ استفاده از پروفایل پویای کاربر برود. دسته‌بندی یک برنامه جدید در دو دسته «موردعلاقه» یا «عدم علاقه» با استفاده از طبقه‌بندی بیزین و بر اساس ویژگی‌های استخراج‌شده از هر برنامه تلویزیونی و با استفاده از هر دو پروفایل یک کاربر انجام می‌شود.

ازجمله مزایای این روش‌ها عدم نیاز به داده‌های تاریخی کاربران دیگر (حل مشکل شروع سرد) و شفافیت در توصیه‌ها (قابل تفسیر بودن معیارهای پیشنهاد) می‌باشد. ازجمله معایب این روش‌ها محدودیت در کشف سلیقه‌های پیچیده کاربران و وابستگی به کیفیت متادیتای برنامه است.

سیستم‌های جدید مبتنی بر محتوا

این روش‌ها از ویژگی‌های زمینه‌ای (زمان، مکان، احساس کاربر) و تکنیک‌های هوش مصنوعی (شبکه‌های عصبی، مدل‌های گرافی) برای شخصی‌سازی عمیق‌تر استفاده می‌کنند.

مقاله ارائه شده توسط Quan و همکاران [۳۵] این موضوع را هدف گرفته است که معمولا مشاهده تلویزیون به‌صورت گروهی انجام می‌شود. برای توصیه برنامه به گروهی از کاربران، ابتدا با استفاده از شبکه‌های بیزین، و بر اساس سابقه برنامه‌هایی که هر کاربر تماشا کرده است، سبک و برنامه‌هایی که هر کاربر ترجیح می‌دهد به دست می‌آید و سپس با استفاده از پروسه سلسله‌مراتبی آنالیزی[1] سلیقه گروهی افراد به دست می‌آید. تأکید این پژوهش بر روی توصیه برنامه به گروهی از کاربران است و تنها بخش فردی این روش، آموزش یک شبکه بیزین با استفاده از اعمال برآورد درست‌نمایی بیشینه بر روی سابقه تماشای کاربر، برای به دست آوردن سلیقه آن کاربر است.

مقاله ارائه شده توسط Oh و همکاران [۳۶] بر روی یک چالش مهم در توصیه برنامه تلویزیون تمرکز کرده است. چالش مطرح شده این است که تماشای تلویزیون به‌صورت گروهی اتفاق می‌افتد و درنتیجه اطلاعاتی که از تاریخچه رفتار کاربران در دسترس است مربوط به یک کاربر خاص نیست بلکه افراد مختلف یک خانواده را شامل می‌شود. برای حل این چالش، در این مقاله یک روش ساخت پروفایل وابسته به زمان پیشنهاد شده است. این روش با تجزیه و تحلیل گزارش ساعت بر اساس زمان روز، پروفایل ایجاد می‌کند. ایده اصلی این است که معمولا بینندگان برنامه که اعضای مختلف یک خانواده هستند با توجه به زمان روز تغییر می‌کند. به‌عنوان‌مثال، تماشای برنامه تلویزیونی در نیمه شب به احتمال زیاد توسط والدین انجام می‌شود زیرا کودکان معمولاً زود می‌خوابند. در مقابل، تاریخچه تماشای تلویزیون در حدود ساعت ۴ تا ۵ عصر غالبا مربوط به کودکان است زیرا والدین در آن زمان معمولاً در محل کار خود هستند. بنابراین، برای تشخیص هر اولویت باید گزارش ساعت را بر اساس زمان روز تجزیه و تحلیل کرد. در همین راستا در این مقاله پس از تقسیم ساعات زمانی روز برای ساخت پروفایل مجزا برای هر کاربر از یک الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی استفاده کرده است.

هدف مقاله ارائه شده توسط Turrin و همکاران [۳۷]، پیشنهاد برنامه تلویزیونی به‌صورت شخصی‌سازی شده در هر زمان به هر کاربر است. از آن‌جایی که کاربران مختلف در بازه‌های زمانی خاص ممکن است علاقه‌مندی‌های متفاوتی داشته باشند. در این پژوهش، سه مفهوم «بهترین شبکه»، «بهترین شبکه برای هر کاربر» و «بهترین شبکه برای هر کاربر و هر بخش زمانی» به ترتیب معادل با شبکه‌ای که بیشترین زمان تماشا را داشته باشد، شبکه‌ای که بیشترین زمان تماشا برای یک کاربر خاص را داشته باشد و شبکه‌ای که بیشترین زمان تماشا برای یک کاربر خاص و در یک بخش زمانی خاص را

[1] Analytic Hierarchy Process (AHP)

داشته باشد تعریف شده است. چالشی که در این مقاله مطرح شده است این است که ممکن است بر اساس سابقه تماشای کاربر، این طور برداشت شود که یک کاربر در بازه زمانی ۱۰ تا ۱۱ صبح، به برنامه کودک در شبکه دیزنی علاقه‌مند است ولی در ساعت ۱۱ تا ۱۲ صبح به برنامه کودک در شبکه دیزنی علاقه‌مند نیست. دلیل این موضوع می‌تواند کم بودن سابقه تماشای کاربر در بازه زمانی دوم باشد. برای رفع این مشکل، سابقه‌های تماشای کاربر در هر بخش زمانی با بخش‌های زمانی اطرافش ترکیب می‌شود. به این کار هموارسازی گفته می‌شود. ویژگی‌های استفاده شده در این مقاله، سبک برنامه (مثلاً برنامه کودکان)، زیر سبک (مثلاً کارتون)، شبکه (مثلاً دیزنی) و فهرست بخش‌های زمانی‌ای که کاربر در آن‌ها این برنامه را تماشا کرده است، می‌باشد.

در مقاله ارائه شده توسط da Silva و همکاران [۳۸] از دو دسته ویژگی‌های زمینه‌ای (تاریخ و زمان و مکان ساخت برنامه تلویزیونی و مکان کاربر) و ویژگی‌های صریح که مستقیماً از کاربر گرفته می‌شود (زبان، جنسیت، سن و شغل) و ویژگی‌هایی که مانند سبک که به‌صورت اتوماتیک در برنامه‌های تلویزیونی استخراج می‌شود، استفاده می‌شود. در این پژوهش برای به دست آوردن سبک کلاس‌ها، چندین روش یادگیری ماشین، مانند طبقه‌بندی درخت تصمیم، طبقه‌بندی بیزین ساده، شبکه عصبی پرسپترونی و استدلال مبتنی بر مورداستفاده شده است.

مقاله ارائه شده توسط Zibriczky و همکاران [۳۹] به‌طور خاص بر روی تلویزیون‌های خطی (تلویزیون‌های عادی که برنامه‌ها را به‌صورت از پیش برنامه‌ریزی شده برای همه کاربران نمایش می‌دهند) در مقابل VODها (مانند نتفلیکس) تمرکز دارد. به دلیل این‌که در تلویزیون‌های خطی، بازخورد صریح (امتیازدهی) از کاربر نداریم، نمی‌توان از روش‌های رایج پالایش مشارکتی برای این نوع تلویزیون استفاده کرد و درنتیجه باید با استفاده از بازخوردهای ضمنی و احتمالا نویزی، توصیه انجام شود. از چالش‌های دیگر تلویزیون خطی می‌توان به این اشاره کرد که معمولا بخش زیادی از برنامه‌های تلویزیون خطی جدید هستند و مشکل شروع سرد برای این برنامه‌ها وجود دارد. در این پژوهش از log نحوه تعامل کاربر با تلویزیون به‌عنوان بازخورد ضمنی استفاده می‌شود. رفتارهایی ازجمله عوض کردن بسیار سریع کانال‌ها یا تماشای هر برنامه برای مدت کوتاهی، نویز محسوب می‌شود که در مرحله اول این نویز باید حذف شود. در روش مبتنی بر محتوا، از ویژگی‌های عنوان، سبک، کانال پخش‌کننده، دسته[1] و رده‌بندی سنی استفاده می‌شود. برای مقایسه کاربر با برنامه‌های تلویزیونی، از معیار شباهت کسینوسی استفاده شده است. در روش پالایش مشارکتی، از IALS۱ استفاده شده است. این روش، روشی مبتنی بر تجزیه ماتریس برای مجموعه داده با بازخورد صریح یا ضمنی است. در روش ترکیبی، از ترکیب دو روش بالا و اطلاعات metadata استفاده شده است. برای حل مشکل شروع سرد، پیشنهاد شده است که برنامه‌ها بر اساس معیاری با هم تجمیع شوند. تجمیع بر اساس کانال پخش کننده برنامه صورت گرفته است. یعنی در واقع مساله به پیش‌بینی کانال موردعلاقه کاربر از بین کانال‌های تلویزیون تبدیل می‌شود. دلیل تجمیع بر روی کانال‌ها این است که معمولا کاربرها به برنامه خاصی در کانال خاصی علاقه‌مند هستند و در یک بازه زمانی آن را مشاهده می‌کنند و سپس به سراغ برنامه بعدی موردعلاقه خود در کانال بعد می‌روند. با این تعاریف، دو روش برای پیشنهاد کانال در هر بازه زمانی پیشنهاد شده است که یکی از آن‌ها iTALS است که بر اساس بازخورد ضمنی کار می‌کند. روش پیشنهادی دیگر، در نظر گرفتن طول زمان مشاهده کاربر از هر کانال و استفاده از آن در سیستم توصیه‌گر است.

در مقاله ارائه شده توسط Song و همکاران [۴۰]، چهار نوع ویژگی‌های زمینه معرفی شده است.

ویژگی‌های زمینه کاربر: به دو نوع ثابت و پویا تقسیم می‌شود. ویژگی‌های ثابت شامل نمایه کاربر (نام کاربری، نام، سن و جنسیت کاربر) ترجیح ثابت کاربر (زبان زیرنویس و زبان صدایی که کاربر ترجیح می‌دهد، نوع محتوای موردعلاقه، بازیگر موردعلاقه و کارگردان موردعلاقه) است. این اطلاعات به‌صورت مستقیم از کاربر دریافت می‌شود. ویژگی‌های پویا شامل اطلاعاتی است که به‌صورت دائم در حال تغییر است، مثلاً موقعیت جغرافیایی کاربر، agendaی کاربر و احساس کاربر. بعضی تغییر رفتارهای کاربر، مثلاً تماشای مسابقات المپیک توسط کاربری که برنامه ورزشی نگاه نمی‌کند نیز جزو ویژگی‌های پویا محسوب می‌شود:

- ویژگی‌های زمینه‌ای مرتبط با دستگاه کاربر: اندازه صفحه، میزان حافظه، امکانات ارتباطی مثل G۴ یا وای‌فای و وضعیت دستگاه (روشن، خاموش و سطح باتری).
- ویژگی‌های زمینه‌ای شبکه: نوع دسترسی به شبکه، پهنای باند، کیفیت سرویس اینترنت (میزان تاخیر و میزان از دست رفتن پاکت‌ها).
- ویژگی‌های زمینه‌ای سرویس: اطلاعات عمومی در رابطه با یک ویدئو مثل عنوان، کلیدواژه، کارگردان، بازیگر، توضیحات و

[1] Category

زبان اثر. همچنین اطلاعات تخصصی تر مثل فرمت فایل (MPEG2 یا MPEG4 یا AVC)، رزولوشن و کمترین نرخ بیت موردنیاز برای تماشای این فایل.

برای توصیه به کاربر، از ساختار سیستم توصیه‌گر لایه‌ای (در واقع یک شبکه‌عصبی پرسپترون چند لایه) استفاده شده است. لایه ابتدایی این ساختار، لایه ویژگی‌ها است و هر گره[1] یکی از ویژگی‌های زمینه‌ای است. بعد از این لایه یک لایه با دو نورون وجود دارد و در لایه آخر یک نورون وجود دارد که میزان احتمال این‌که ویدئوی فعلی برای این کاربر پیشنهاد شود را مشخص می‌کند.

مقاله ارائه شده توسط Chaudhry و همکاران [۴۱] به‌طور خاص بر حل مساله پیشنهاد برنامه به کاربر در تلویزیون‌هایی که به‌صورت همگانی پخش می‌شوند[2] تأکید دارد. این مقاله رابطه بین هر کاربر و برنامه‌های تلویزیونی را ناهمگون در نظر می‌گیرد و به استخراج روابط ناهمگون بین کاربر مدنظر و برنامه‌های تلویزیونی، با استفاده از بازخورد ضمنی، می‌پردازد.

روش دیگر ارائه شده برای توصیه یک برنامه جدید، یک روش هیبرید است که در آن از روی گراف موجود، ماتریس‌های کاربر-توئیت (این‌که چه کاربری چه توئیتی را نوشته است)، توئیت-آدرس (این‌که یک هر توئیت به چه صفحه‌ای از DBPedia اشاره دارد)، آدرس-آدرس (ارتباط معنایی بین لینک‌های DBPedia) وآدرس-برنامه (این‌که هر برنامه توسط چه صفحه‌ای از DBPedia توضیح داده شده است) ساخته شده و پس از ضرب ماتریسی تمام این ماترس‌ها، ماتریس کاربر-برنامه به دست می‌آید. برای محاسبه ماتریس آدرس-آدرس از روش ارائه شده در مقاله [۴۳] زیر استفاده شده است که روش مبتنی بر محتوا است.

هدف مقاله ارائه شده توسط Yuan و همکاران [۴۴]، ارائه یک سیستم توصیه‌گر برای IPTV مورداستفاده در پردیس دانشگاه لنکستر است. در مساله بررسی شده، سبک، شبکه پخش کننده برنامه و نام برنامه درمجموعه داده آموزشی جمع‌آوری‌شده موجود است. برای انتخاب ویژگی مناسب، برای هر یک از ویژگی‌ها، آنتروپی نرمال‌شده محاسبه شده است و درنهایت بهترین گزینه، یعنی نام برنامه، انتخاب شده است. برای انتخاب ویژگی‌های زمینه‌ای نیز با تحلیلی مشابه تحلیل بالا، از بخشی از زمان روز که برنامه در آن پخش می‌شود و زنده بودن پخش برنامه یا این‌که برنامه به‌صورت ویدئوی همیشه در دسترس استفاده شده است و روزی از هفته که برنامه در آن روز پخش‌شده است، کنار گذاشته شده است. برای ساختن پروفایل کاربر، می‌توان از تخصیص نهان دیریکله استفاده کرد. برای این‌که بتوان ویژگی‌های زمینه‌ای را نیز دخیل کرد، مدل توسعه یافته شده‌ای به نام تخصیص نهان دیریکله آگاه از زمینه ارائه شده است. همچنین جهت جلوگیری از همگرایی به اکسترمم محلی توسط الگوریتم بیشینه‌سازی امید ریاضی، از نمونه‌برداری گیبز استفاده شده است.

پاسخ به سوال کلیدی «برای تماشای بعدی ویدئویی توصیه می‌شود؟» مدت‌ها است که در مرکز تحقیقات سیستم‌های توصیه‌گر قرار دارد. بااین‌حال، بهره‌برداری کافی از سرنخ‌های پنهان شده در توالی اقدامات تاریخچه جستجوی کاربر، به منظور آشکار کردن اهداف کوتاه مدت کاربران، اخیراً مورد توجه واقع شده است. در مقاله ارائه شده توسط Symeonidis و همکاران [۴۵]، بر اساس یک سناریوی کاربردی در دنیای واقعی، یک ماتریس احتمال انتقال مبتنی بر مارکوف ساخته می‌شود تا ترجیحات کوتاه مدت افراد به‌طور موثر نشان داده شود. بر اساس آزمایشات در این مقاله نشان داده شد در نظر گرفتن توالی جستجوها در تاریخچه جستجوی کاربر برای بهبود اثربخشی پیشنهادها کمک می‌کند، زیرا گرفتن ترجیحات کوتاه مدت کاربران در ارتباط با اقلام با طول عمر کوتاه مانند برنامه‌های تلویزیونی بسیار مهم است (اخبار، برنامه‌های تلویزیونی، و غیره.).

Dudekula و همکاران [۸۷] بر اساس تاریخچه برنامه‌های مشاهده شده توسط کاربر و تشخیص چهره به پیشنهاد برنامه‌های مرتبط می‌پردازند. در مرحله نخست، تصویر کاربر توسط بخش دوربین تلویزیون هوشمند گرفته می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی پیچشی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این شبکه بر اساس پیکره تصاویر چهره افراد مشهور و پیکره تصاویر برچسب خورده آموزش داده می‌شود. در مرحله دوم، ویژگی‌های تصویر کاربر به‌وسیله شبکه عصبی پیچشی استخراج می‌شود و با پروفایل کاربر در پیکره دادگان تطبیق داده می‌شود. در مرحله سوم، بر مبنای تاریخچه کاربر، روش‌های پالایش مبتنی بر محتوا با پالایش مبتنی بر همکاری ترکیب می‌شود. در پالایش مبتنی بر محتوا، از متادیتاهایی نظیر سبک، بازیگران و کارگردان جهت پیشنهاد برنامه‌های مشابه با برنامه‌های موردعلاقه کاربر استفاده می‌کند. در پالایش مبتنی بر مشارکت، از بازخوردهای دریافتی توسط کاربران مشابه با کاربر هدف و میزان رای مثبت به هر برنامه استفاده می‌شود. درنهایت، با استفاده از ترکیبی از فیلترینگ‌های انجام‌شده به کاربر هدف برنامه‌های مناسب پیشنهاد می‌گردد.

[1] Node

[2] broadcast

ازجمله مزایای این روش‌ها در نظر گرفتن شرایط لحظه‌ای کاربر (مثلاً زمان روز) و انعطاف‌پذیری بیشتر با داده‌های ناهمگون (مانند توئیت‌ها) است. ازجمله معایب این روش‌ها پیچیدگی محاسباتی و نیاز به داده‌های غنی و مشکل در تفسیرپذیری نتایج می‌باشد.

سیستم‌های ترکیبی (محتوا + پالایش مشارکتی)

این روش‌ها هم از محتوای برنامه‌ها و هم از رفتار کاربران مشابه برای توصیه استفاده می‌کنند.

در مقاله ارائه شده توسط Barraza-Urbina و همکاران [۴۲]، به طراحی یک سیستم توصیه‌گر برای یک شبکه تلویزیونی که امکان مشاهده مجدد برنامه را به کاربران می‌دهد پرداخته‌است. سه چالش اصلی در این مساله وجود دارد که آن را از سیستم‌های توصیه‌گر سنتی متفاوت می‌کند. مساله اول این است سیستم مورد نظر، امکان امتیازدهی کاربران را فراهم نکرده است. مساله دوم این است که که هیچ سابقه تماشای برنامه‌ای توسط کاربران ذخیره نشده است و مساله سوم این است که برنامه‌های جدید تلویزیون به‌مرور زمان به این سیستم اضافه می‌شوند و برنامه‌های قدیمی از سیستم حذف می‌شوند. بنابراین، هدف این پژوهش ارائه سیستم توصیه‌گری برای توصیه برنامه تلویزیونی به کاربر ناشناس و صرفاً بر اساس نشست فعلی کاربر و اطلاعات مرتبط با توئیتر کاربر مورد نظر است. با در نظر گرفتن فعالیت کاربران در توئیتر، یک مدل داده گرافی ناهمگون ارائه شده است. در این مدل گره «کاربر»ها مربوط به کاربرهایی است که توئیت مرتبطی در رابطه با یکی از برنامه‌های تلویزیونی شبکه مورد نظر نوشته‌اند. هر کاربر به توئیتی که نوشته است متصل است و هر توئیت می‌تواند شامل یک پیوست یا یک لینک باشد. همچنین احساس مرتبط با هر توئیت توسط یک الگوریتم آماده استخراج‌شده و در گره مربوط به هر توئیت ثبت می‌شود. گره‌های مرتبط با اپیزود و برنامه نیز موجود است که هر گره اپیزود به یک گره برنامه متصل است و هر گره توئیت می‌تواند به یک اپیزود یا یک برنامه متصل باشد. ارتباط بین توئیت‌ها و برنامه‌ها با استفاده از هشتگ‌های به‌کاررفته در هر توئیت به دست می‌آید. ارتباط بین اپیزودها و برنامه‌ها، با استفاده از تاریخ و ساعت نوشته شدن توئیت به دست می‌آید. جهت کامل‌تر کردن اطلاعات گراف، هر برنامه به یک گره از آدرس صفحه مربوط به آن برنامه در DBpedia و آدرس صفحه IMDB متصل خواهد شد.

اولین روشی که برای توصیه برنامه جدید به کاربر پیشنهاد شده است، استفاده از پالایش مشارکتی است. با استفاده از گراف تهیه شده، می‌توان ماتریس کاربر-توئیت و هچنین ماتریس توئیت-برنامه را طبق لینک‌های بین گره‌ها به دست آورد. در مقاله بیان‌شده است که در حال تحقیق برای تعریف امتیازی برای این یال‌ها هستند و احتمالا در آینده از امتیاز احساس توئیت‌های کاربر استفاده خواهد شد. در حال حاضر لینک‌ها را می‌توان باینری در نظر گرفت. با ضرب دو ماتریس کاربر-توئیت و توئیت-برنامه، ماتریس کاربر-برنامه به دست می‌آید و با روش سنتی پالایش مشارکتی، توصیه برنامه جدید انجام می‌شود.

با توجه به اینکه مقاله ارائه شده توسط Barragáns-Martínez و همکاران [۲۲] در هر دو دامنه موزیک و برنامه تلویزیونی ارائه شده است توضیحات آن در بخش Music ارائه شده است.

ازجمله مزایای این روش‌ها کاهش مشکل شروع سرد با ترکیب دو روش و بهبود دقت با استفاده از همکاری بین کاربران می‌باشد. ازجمله معایب این روش‌ها نیاز به داده‌های تاریخی کاربران (مشکل در محیط‌های با داده‌های کم) و پیچیدگی در یکپارچه‌سازی دو روش می‌باشد.

۴-۴- سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای

سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای برای کمک به کاربران در انتخاب محتوای چندرسانه‌ای مناسب طراحی‌شده‌اند و با ترکیب الگوریتم‌های توصیه‌گر و ویژگی‌های چندرسانه‌ای، پیشنهادات شخصی‌سازی شده ارائه می‌دهند. این سیستم‌ها با چالش‌هایی مانند پردازش داده‌های پیچیده چندرسانه‌ای، شکاف معنایی[1]، و نیاز به مقیاس‌پذیری در مواجهه با حجم زیاد داده‌ها روبه‌رو هستند. در این سیستم‌ها نیز از روش‌های مختلفی مانند پالایش مشارکتی، پالایش مبتنی بر محتوا، و سیستم‌های ترکیبی برای ارائه توصیه‌ها استفاده می‌شود. این سیستم‌ها در حوزه‌های مختلفی مانند موزه‌های مجازی، شبکه‌های اجتماعی، آموزش الکترونیکی، و سرگرمی (مثل موسیقی و فیلم) به کار می‌روند. با رشد داده‌های چندرسانه‌ای، نیاز به سیستم‌های توصیه‌گر هوشمند و کارآمد بیشتر شده است و تحقیقات آینده بر ترکیب فناوری‌های جدید مانند اینترنت اشیا و داده‌های حجیم[2] متمرکز خواهد بود[۹۲].

در مقاله‌ای که توسط دلجو و همکاران [۹۳] رائه شده است، با بررسی بیش از ۱۵ سال تحقیقات، سیستم‌ها را بر اساس نوع رسانه، تکنیک‌های استخراج ویژگی‌ها، و الگوریتم‌های توصیه دسته‌بندی کرده‌اند. در این پژوهش با تأکید بر اهمیت ویژگی‌های بصری و

[1] Semantic Gap

[2] Big Data

شنیداری در مدلسازی ترجیحات کاربران موردبررسی قرار می‌گیرد و از محتوای چندرسانه‌ای (صوتی، تصویری، متنی) برای پیشنهاد اقلام رسانه‌ای (مانند موسیقی، فیلم) و غیررسانه‌ای (مانند پوشاک، غذا) استفاده می‌کنند.

در مقاله ارائه شده توسط دلجو و همکاران [۹۴] به بررسی تحقیقات پیشرفته در سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای می‌پردازد. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر روش‌هایی است که محتوای چندرسانه‌ای را به‌عنوان اطلاعات جانبی در مدل‌های توصیه‌گر ادغام می‌کنند. این ویژگی‌ها برای توصیه اقلام رسانه‌ای یا غیررسانه‌ای (مانند تصاویر لباس) به کار می‌روند. به‌علاوه، به تشریح رویکردهای پردازش محتوا و الگوریتم‌های نوین MMRS (ترکیبی، عصبی، مبتنی بر گراف) می‌پردازد. ازجمله کاربردهای MMRS استفاده به‌عنوان سیستم‌های توصیه‌گر در حوزه‌هایی چون غذا، مد، موسیقی و ویدیو می‌باشد.

جیانگ و همکاران [۹۴]، یک سیستم توصیه‌گر چندوجهی جدید معرفی می‌کند که از مدل‌های انتشار گراف برای بهبود یادگیری نمایندگی کاربران با آگاهی از چندوجهی استفاده می‌کند. این روش با ترکیب یک مدل انتشار گراف چندوجهی و یادگیری تضاد بین وجهی، همترازی بهتری بین ویژگی‌های چندوجهی و مدل‌سازی تعاملات کاربر- قلم ایجاد می‌کند. DiffMM از قابلیت‌های تولیدی مدل‌های انتشار برای ایجاد یک گراف کاربر- قلم آگاه از وجهی استفاده می‌کند و از طریق مکانیسم تزریق سیگنال وجهی، اطلاعات چندوجهی را در فرآیند انتشار ادغام می‌کند. این روش همچنین از یادگیری خودنظارتی برای غلبه بر پراکندگی داده‌ها استفاده میکند و تفسیرپذیری توصیه‌ها را بهبود میبخشد. نتایج نشان میدهد که DiffMM در سناریوهای توصیه چندوجهی، به‌ویژه در داده‌های پراکنده، مؤثرتر است.

مالیتستا و همکاران [۹۶]، به معرفی یک چارچوب رسمی برای سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای با استفاده از یادگیری عمیق چندوجهی می‌پردازد و سه سوال کلیدی «کدام داده‌های چندوجهی»، «چگونگی پردازش ویژگی‌ها» و «زمان ادغام وجه‌ها» را بررسی می‌کند. نویسندگان با مرور جامع ادبیات موجود، الگوهای تکرارشونده در سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای را شناسایی و آن‌ها را در یک طرح نظری یکپارچه سازماندهی می‌کنند. این پژوهش یک چارچوب چندمرحله‌ای شامل داده‌های ورودی چندوجهی، پردازش ویژگی‌ها، نمایش چندوجهی، و ادغام ویژگی‌ها ارائه می‌دهد و آن را بر روی چندین مدل پیشرفته اعتبارسنجی می‌کند. نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که سیستم‌های چندوجهی مانند LATTICE و FREEDOM در معیارهای دقت عملکرد بهتری دارند، اما در معیارهای فراتر از دقت مانند تنوع و نوآوری، روش‌های کلاسیک بهتر عمل می‌کنند. چالش‌های فنی مانند عدم وجود داده‌های چندوجهی کامل، استفاده از استخراج‌کننده‌های ازپیش‌آموخته، و انتخاب راهبردهای نمایش و ادغام به‌عنوان مسائل باز مطرح شده‌اند.

۵- سیستم‌های توصیه‌گر مطرح در صنعت بین‌الملل

۵-۱- سیستم توصیه‌گر نتفلیکس

نتفلیکس از یک سیستم رتبه‌بندی مبتنی بر جدول دوبعدی استفاده می‌کند، جایی که رتبه‌بندی اتفاق می‌افتد:

- درون هر ردیف (قوی‌ترین توصیه‌ها در سمت چپ)
- در میان ردیف‌ها (قوی‌ترین توصیه‌ها در بالا)

نتفلیکس برای سیستم توصیه‌گرخود از بحث شخصی‌سازی اطلاعات استفاده می‌کند. برای این منظور مثلاً در فهرست برنامه‌های پیشنهادی نتفلیکس تصاویری از برنامه مورد نظر که به هر کاربر نمایش داده می‌شود بر اساس تمایلات او خصوصی‌سازی می‌شوند. [۴۶]

روش‌های یادگیری ماشین زیر برای شخصی‌سازی اکانت‌ها در نتفلیکس استفاده می‌شود:

- یادگیری عمیق
- یادگیری تقویتی

در شکل ۶ هر سطر یک موضوع خاص را نشان می‌دهد (به‌عنوان مثال Top 10، Trending، Horror و غیره)، و معمولاً با استفاده از یک الگوریتم تولید می‌شود. صفحه اصلی هر کاربر، بسته به دستگاهی که از آن استفاده می‌کند، تقریباً از ۴۰ ردیف شامل حداکثر ۷۵ قلم تشکیل شده است. برای رتبه‌بندی سطری و ستونی از الگوریتم‌های مختلفی استفاده شده است. در ادامه به بررسی این الگوریتم‌های رتبه‌بندی می‌پردازیم.

شکل ۶. نمونه‌ای از اطلاعات محتوایی کاربران [7]

الگوریتم‌های رتبه‌بندی

مهم‌ترین رویکردهای مختلف رتبه‌بندی را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

- رتبه‌بندی ویدئویی شخصی(PVR): این روش یک الگوریتم چندمنظوره است که معمولاً کاتالوگ برنامه‌ها را با معیارهای خاصی پالایه می‌کند (به‌عنوان‌مثال برنامه‌های تلویزیونی خشونت آمیز، برنامه‌های تلویزیونی آمریکایی، عاشقانه و غیره)، همچنین از ویژگی‌های جانبی دیگری ازجمله ویژگی‌های شخصی کاربر و محبوبیت برنامه‌ها هم استفاده می‌کند.
- رتبه‌بندی ویدئویی n-برترین: مشابه PVR عمل می‌کند با این تفاوت که PVR فقط به راس رتبه‌بندی نگاه می‌کند ولی این روش کل کاتالوگ را بررسی می‌کند. با استفاده از معیارهایی که به راس رتبه‌بندی کاتالوگ نگاه می‌کنند و با روش مناسب بهینه‌سازی می‌شود.
- ترندهای پیشگو: این الگوریتم رویدادهای زمانی که بر اساس استنتاج نتفلیکس پیشگوهای قوی هستند را شناسایی می‌کند. این رویدادهای کوتاه مدت می‌توانند در حد چند دقیقه در چند روز باشند. این رویدادها / ترندها به‌طور معمول عبارت‌اند از:

۱. رویدادهایی که روند فصلی دارند و تکرار می‌شوند (به‌عنوان‌مثال روز ولنتاین منجر به افزایش میزان جذب فیلم‌های عاشقانه می‌شود)
۲. رویدادهای کوتاه مدت (به‌عنوان‌مثال ویروس کرونا یا سایر بلایا، که منجر به علاقه کوتاه مدت به مستندهای مربوط به آن‌ها می‌شود)

- رتبه‌بندی مشاهده پیوسته: این الگوریتم مواردی را که کاربر برای مشاهده انتخاب کرده ولی تا انتهای برنامه تماشا نکرده و مشاهده آن را به اتمام نرسانده است بررسی می‌کند، به‌طور معمول:

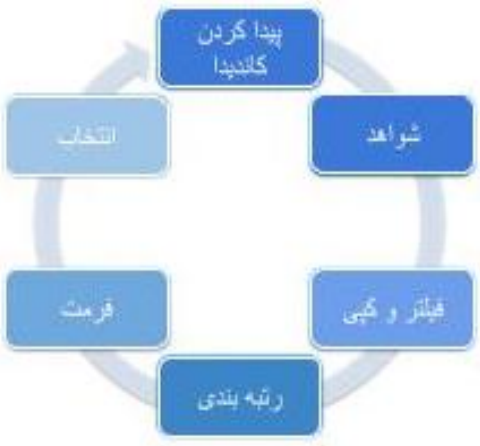
۱. محتوای اپیزودیک (به‌عنوان‌مثال مجموعه‌های نمایشی)
۲. محتوای غیر اپیزودیک که در بازه‌های گسسته قابل پیگیری هستند (به‌عنوان‌مثال فیلم‌هایی که نیمه تمام هستند، یا مجموعه‌های تلویزیونی که هر قسمت آن یک اپیزود مستقل است مانند آینه سیاه)

این الگوریتم احتمال ادامه مشاهده توسط کاربر (مشاهده پیوسته) را محاسبه می‌کند. این الگوریتم شامل سیگنال‌های آگاه از زمینه (به‌عنوان‌مثال زمان سپری شده از زمان مشاهده، نقطه رهاشدن مشاهده، دستگاه کاربر که برای تماشا استفاده شده و غیره) است.

در این الگوریتم از شبکه‌های RNN برای پیش بینی دنباله‌های حساس به زمان استفاده شده است. نتفلیکس می‌تواند از برنامه‌های مشاهده شده درگذشته یک کاربر خاص در کنار اطلاعات محتوایی استفاده کند و از این برای پیش‌بینی اینکه برنامه انتخابی بعدی این کاربر چه خواهد بود استفاده کند. به‌طور خاص، استفاده از زمان پیوسته همراه با محتوای زمان گسسته به‌عنوان ورودی بهترین عملکرد را دارد.

- رتبه‌بندی شباهت ویدئو-ویدئو (چون تماشا کردی) (BYW): این الگوریتم اساساً شبیه الگوریتم پالایش محتوایی است. بر اساس اقلامی مشاهده شده کاربر، الگوریتم سایر موارد مشابه را شناسایی می‌کند (با استفاده از ماتریس شباهت قلم- قلم) و مشابه‌ترین موارد را برمی‌گرداند. در میان الگوریتم‌های دیگر، این یکی شخصی نیست زیرا هیچ ویژگی جانبی دیگری استفاده نمی‌شود. بااین‌حال، شخصی‌سازی به این معناست که نمایش اقلام مشابه با برنامه خاص در فهرست مشاهده شده‌های کاربر، انتخابی مناسبی بر اساس سلیقه کاربر است.

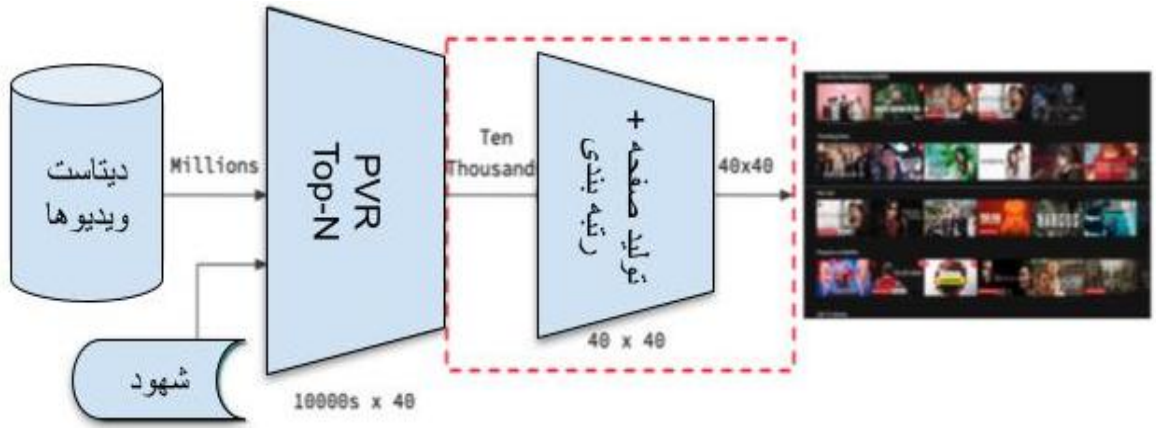
هر پنج الگوریتمی که در بالا بیان شد برای تولید سطرها در جدول پیشنهاد برنامه به کاربر از یک روال تکراری استفاده می‌کند. این روال در شکل ۷ مشاهده می‌شود. به‌عنوان‌مثال، اگر PVR سبک عاشقانه را پیشنهاد دهد، نامزدهایی را پیدا می‌کند که متناسب با این سبک باشند، و یک ردیف از برنامه‌های متناسب با این سبک (به‌عنوان‌مثال فیلم‌های عاشقانه که کاربر قبلاً تماشا کرده است) ارائه می‌دهد. این الگوریتم انتخاب شواهد در هر الگوریتم رتبه‌بندی دیگر که در بالا ذکرشده است نیز استفاده شده است. شکل ۸ تصویر گردش کار مدل نتفلیکس را نمایش می‌دهد.



شکل ۷. روال تکراری پیشنهاد برنامه به کاربر

ساخت صفحه کاربر

بعد از تولید سطرهای پیشنهادی برای اکانت یک کاربر خاص، که گاهی به ۱۰۰۰ سطر می‌رسد، مرحله بعد تولید پیشنهاد نهایی از میان سطرهای ساخته شده است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود ابتدا بر اساس سابقه کاربر یک فهرست n-بهترین از سبک‌های موردعلاقه کاربر بر اساس اکانت او استخراج می‌شود. این سبک‌ها که هر کدام یک سطر از جدول پیشنهادات را می‌سازند ممکن است بیش از ۱۰۰۰ سطر باشند که لازم است مختصرسازی شوند در غیراینصورت برای کاربر ایجاد ابهام و سردرگمی می‌کنند. برای این منظور برنامه‌های پیشنهاد شده باید رتبه‌بندی شوند تا درنهایت یک جدول محدود از پیشنهادها برای کاربر باقی بماند. الگوریتم‌های رتبه‌بندی مورداستفاده در ادامه معرفی شده‌اند.



شکل ۸. روال کامل توصیه‌گر نتفلیکس

شکل ۹. ساختار سیستم توصیه‌گر در نتفلیکس

- روش مبتنی بر الگو (در شروع)

نتفلیکس از یک روش مبتنی بر الگو برای حل این مشکل تولید صفحه استفاده کرده است. برای حل این مسئله نه تنها به دقت، بلکه به‌طور همزمان تنوع، قابلیت دسترسی و ثبات نیز باید مورد توجه واقع شود. ملاحظات دیگری شامل قابلیت‌های سخت افزاری (از چه دستگاهی استفاده می‌شود) و اینکه کدام ردیف‌ها/ستون‌ها در نگاه اول و هنگام پیمایش قابل مشاهده هستند، مورد توجه قرار می‌گیرند.

مدل نتفلیکس تلاش می‌کند آنچه را که کاربر می‌خواهد تماشا کند را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند، اما این نکته را لحاظ می‌کند که وی ممکن است بخواهد فیلم‌هایی را که نیمه کاره رها کرده را انتخاب کند. در عین حال می‌خواهد با ارائه اقلامی تازه تنوع برنامه‌ها در کاتالوگ خود را برجسته کند. سرانجام فاکتور ثبات در پیشنهادات ضروری است تا زمانیکه کاربر برای مدتی با نتفلیکس تعامل داشته باشند و به روش‌های مورداستفاده در پیمایش صفحه و باقی ویژگی‌ها عادت کنند.

بر اساس تمام الزامات بیان‌شده فوق، می‌توان دریافت که چرا یک روش مبتنی بر الگو می‌تواند برای شروع کاملاً خوب کار کند. چرا که می‌توان معیارهای ثابت معینی را که باید مرتباً برآورده شوند به‌صورت قانون لحاظ کرد. با این وجود استفاده مدام از روش‌های مبتنی بر الگو ممکن است اکانت کاربران را به سمت بهینه‌های محلی هدایت کند بجای اینکه تجربه خوشایندی برای اعضا ایجاد نماید.

- رویکرد ردیف محور: رویکرد مبتنی بر ردیف برای امتیازدهی به هر ردیف و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس آن نمرات از رویکردهای توصیه شده یا یادگیری برای رتبه‌بندی موجود استفاده می‌کند. این روش می‌تواند نسبتاً سریع باشد اما فاقد تنوع است. ممکن است نتیجه نهایی برای یک کاربر صفحه‌ای پر از ردیف‌های مختلف باشد که به‌طورکلی با علاقه وی مطابقت دارد، اما ممکن است ازنظر شباهت بسیار نزدیک به هم بوده و فاقد تنوع لازم باشند.
- رویکرد مرحله‌ای: بهبود رویکرد افزایش ردیف استفاده از رویکرد مرحله‌ای است که در آن هر ردیف مانند روش فوق امتیازدهی می‌شود. با این تفاوت که ردیف‌ها به ترتیب از ابتدا انتخاب و جایگذاری می‌شوند و هر زمان که ردیف جدیدی انتخاب می‌شود، شباهت آن با ردیف‌های قبلی محاسبه می‌شوند تا رابطه آن با ردیف‌های قبلی و همچنین موارد پیدا شده در صفحه مشخص شود. این یک رویه ساده مرحله‌ای حریصانه است. این روش را می‌توان با استفاده از رویکرد K-سطر پیشرو بهبود بخشید. در این رویکرد برای انتخاب ردیف بعدی، محاسبه امتیازدهی برای k ردیف بعدی انجام می‌شود و سپس بهترین ردیف انتخاب می‌شود، این روش ساده وضعیت را بهبود می‌بخشد. بااین‌حال هیچ یک از این رویکردها بهینه سراسری را به‌دست نمی‌آورد.
- رویکرد یادگیری ماشین: رویکردی که نتفلیکس در یادگیری ماشینی استفاده می‌کند آموزش یک مدل بر اساس تاریخچه رفتار هر اکانت است. در این روش اطلاعاتی مثل اینکه کاربر چه برنامه‌هایی را برای دیدن انتخاب کرده و نحوه تعامل او با اقلام پیشنهادی به چه صورت بوده از تاریخچه اکانت استخراج و استفاده می‌شود.

ویژگی‌ها و راه‌های بسیار دیگری وجود دارد که می‌تواند یک ردیف خاص را در صفحه اصلی برای کاربر انتخاب کند. این می‌تواند به سادگی استفاده از همه متا داده‌های قلم (به‌عنوان یک بردار تعبیه) و تجمیع آن‌ها باشد. صرف نظر از اینکه از چه ویژگی‌هایی برای چینش اقلام در صفحه استفاده می‌شود، هدف اصلی ایجاد یک صفحه فرضی از انتخاب‌های نهایی برای کاربر است تا بدین وسیله با دریافت انتخاب‌های واقعی کاربر (بعد از اینکه قلمی را انتخاب و مشاهده کرد) به رویکرد الگوریتم امتیازدهی شود. امتیازدهی با استفاده از معیارهای مشابه Precision@k و Recall@k انجام می‌شود

۵-۲- سیستم توصیه‌گر یوتیوب

یوتیوب بزرگترین بستر جهانی برای ایجاد، انتشار و کشف محتوای ویدئویی است. یوتیوب دارای بیش از یک میلیارد کاربر فعال است که این آمار در حال رشد است. در ادامه به رویکرد یادگیری عمیق که اخیراً در سیستم توصیه‌گر ویدئویی یوتیوب استفاده شده است، می‌پردازیم. این مطالب در مقاله [۴۷] منتشرشده است.

چالش‌هایی که پیشنهاد فیلم در یوتیوب با آن مواجه است به قرار زیر است:

- مقیاس: بسیاری از الگوریتم‌های توصیه‌گرموجود در مقیاس‌های کوچک به خوبی کار می‌کنند، اما همان الگوریتم‌ها در مواجهه با مقیاس گسترده یوتیوب با مشکل برخورد می‌کنند.
- تازگی: یوتیوب دارای یک مجموعه بسیار پویا است و در هر ثانیه تعداد زیادی فیلم جدید بارگذاری می‌شود. لذا سیستم توصیه‌گر در فرایند تصمیم‌گیری این موارد جدید را لحاظ کند. ایجاد تعادل بین ویدئوهای تازه بارگذاری شده و قدیمی‌تر

اهمیت بسیار دارد.

- نویز: پیش‌بینی رفتار کاربر در یوتیوب با استفاده از تاریخچه رفتارهای او به دلیل کمبود و تنوع عوامل خارجی غیرقابل مشاهده بسیار دشوار است. ما به ندرت رضایت واقعی کاربر را به‌دست می‌آوریم و در عوض سیگنال بازخوردهای ضمنی او را مدل می‌کنیم. علاوه بر این، فراداده‌های مرتبط با محتوا بدون وجودشناسی کاملاً مشخص ساختار ضعیفی ارائه می‌دهند.

الگوریتم‌هایی که برای سیستم توصیه‌گردر یوتیوب انتخاب می‌شوند لازم است که نسبت به این ویژگی خاص در داده‌های آموزشی مقاومت بسیار داشته باشند.

ساختار کلی سیستم توصیه‌گر یوتیوب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این سیستم از دو شبکه عصبی تشکیل شده است. یکی برای تولید کاندیداها و دیگری برای رتبه‌بندی. شبکه تولید کاندیداها رویدادها را از تاریخچه فعالیت یوتیوب کاربر به‌عنوان ورودی گرفته و بر اساس این اطلاعات زیرمجموعه‌های کوچک (در حد صد ویدئو) را از پیکره بزرگ ویدئوها استخراج می‌کند. شبکه کاندیداهای تولیدشده شخصی‌سازی گسترده را فقط از طریق پالایش مشارکتی فراهم می‌کند. شباهت بین کاربران بر اساس ویژگی‌های درشت محاسبه می‌شود؛ ویژگی‌هایی مانند شناسه ویدئوهای مشاهده شده و عبارت‌های جستجو شده کاربر. ارائه فهرست چند «بهترین» پیشنهاد به ویژگی‌های ریزتری نیاز دارد تا اهمیت‌های نسبی بین کاندیداها با فراخوانی بالا شناسایی شود. شبکه رتبه‌بندی با اختصاص یک امتیاز به هر فیلم بر اساس یک تابع هدف مورد نظر، که با استفاده از مجموعه‌ای غنی از ویژگی‌ها برای توصیف فیلم و کاربر، این کار را انجام می‌دهد. ویدئوهای دارای بالاترین امتیاز، به ترتیب امتیاز آن‌ها به کاربر ارائه می‌شوند.

معماری مدل

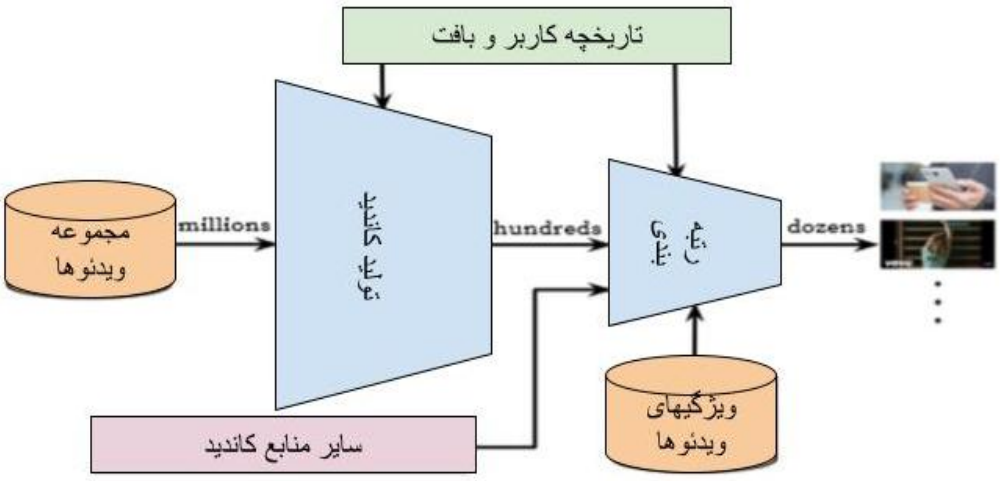
طبق شکل ۱۱ با استفاده از مدل زبانی کیسه کلمات[۴۷] یک بردار تعبیه با ابعاد بالا برای هر ویدئو یاد گرفته می‌شود و این بردارهای تعبیه به‌عنوان ورودی به یک شبکه عصبی تغذیه‌ای روبه جلو داده می‌شود. تاریخچه ویدئوهای تماشا شده کاربر با یک دنباله طول متغیر از شناسه ویدئوها نشان داده می‌شود. سپس این بردار به یک بردار تعبیه در فضای چگال نگاشته می‌شود. این شبکه به ورودی‌های متراکم با اندازه ثابت نیاز دارد لذا با استفاده از روش میانگین‌گیری بردارهای ورودی به یک بردار تبدیل می‌شوند. در لایه اول بردارهای تعبیه مشترک در ارتباط با پارامترهای دیگر آموزش داده می‌شوند. ویژگی‌ها به یک لایه اول متصل می‌شوند و به دنبال آن چندین لایه کاملاً متصل از نوع ReLU است.

در این مدل برای بررسی جدید یا قدیمی بودن ویدئوها یکی از ویژگی‌ها سن در نظر گرفته شده است و مقدار آن برابر با مدت زمانی است که از بارگذاری ویدئو بر روی یوتیوب می‌گذرد. شکل ۱۱ معماری شبکه را نشان می‌دهد.

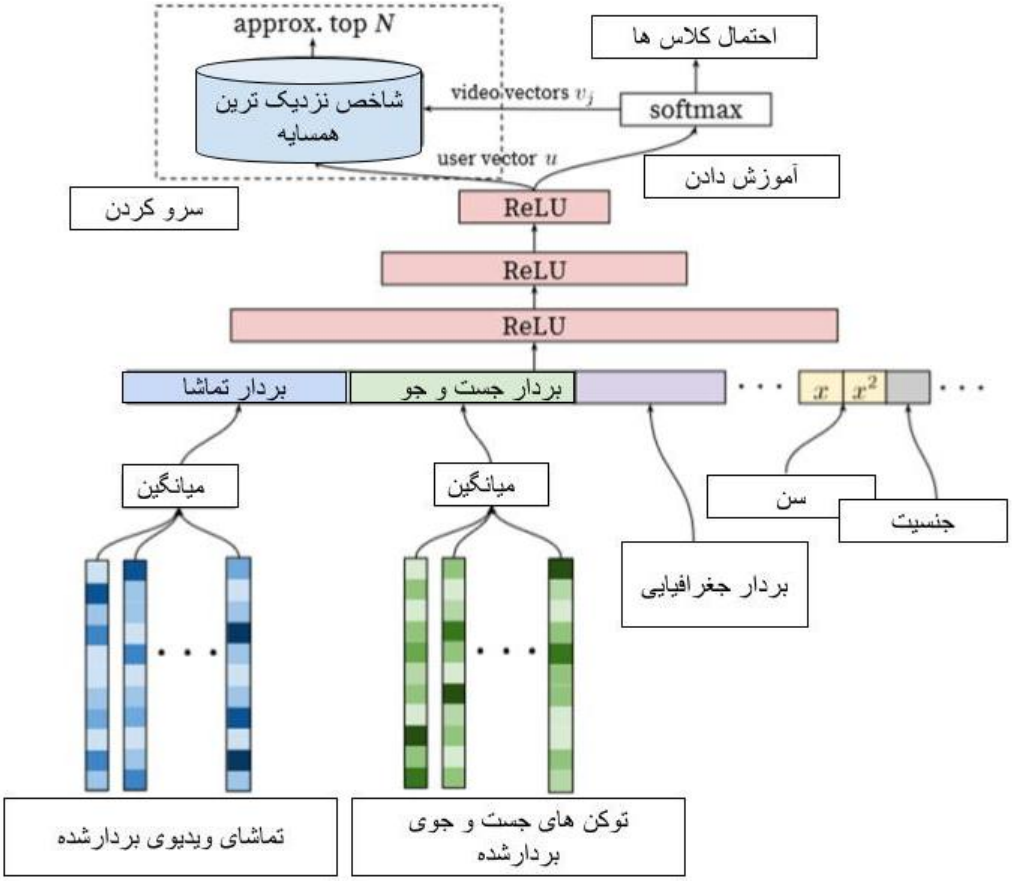
رتبه‌بندی

رتبه‌بندی در این روش بر اساس فاکتور اثر تدوین شده است. فاکتور اثر به معنای میزان اثرگذاری توصیه پیشنهاد شده به کاربر است که به میزان این پیشنهاد از طرف کاربر پذیرفته شده است. در مرحله رتبه‌بندی، به ویژگی‌های بیشتری در ارتباط با توصیف ویدئو و ارتباط کاربر با ویدئو دسترسی داریم، زیرا به دلیل اینکه یک مرحله کاندیداهای مناسب برای کاربر تولیدشده‌اند، در این مرحله تنها چند صد فیلم به جای میلیون‌ها قلم مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

.



شکل ۱۰. ساختار سیستم توصیه‌گر در یوتیوب



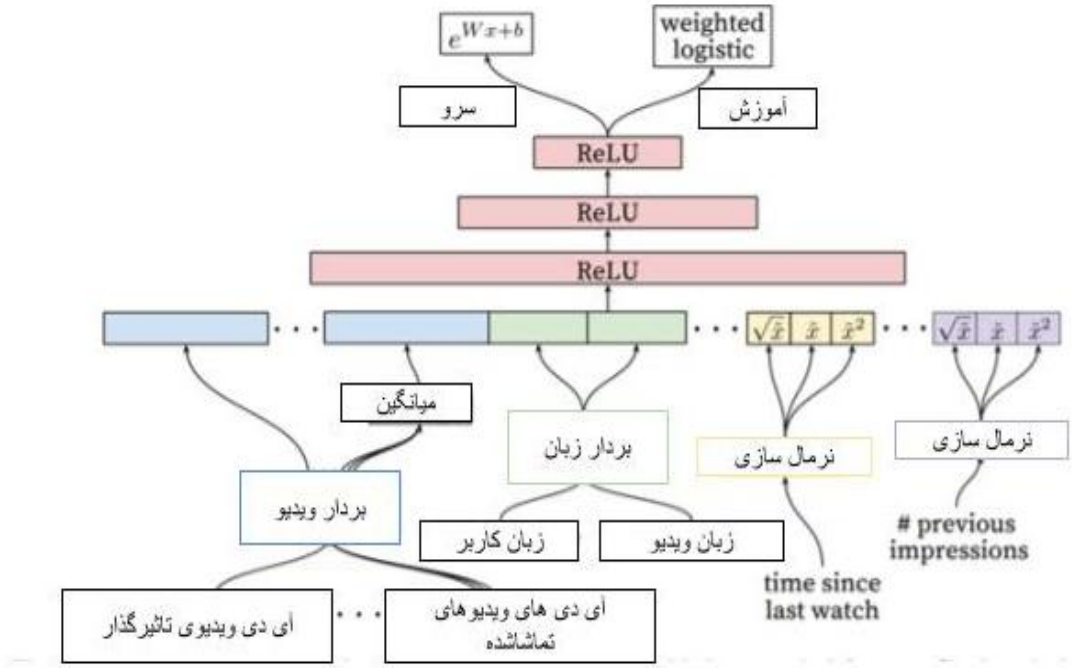
شکل ۱۱. معماری شبکه عمیق تولید کاندیداها درمدل توصیه‌گر یوتیوب [45]

برای رتبه‌بندی از یک شبکه عصبی عمیق با معماری مشابه شبکه استفاده شده برای تولید کاندیداها استفاده می‌کنیم تا با استفاده از رگرسیون لجستیک به هر نمایش فیلم نمره مستقلی اختصاص دهیم (شکل ۱۲). سپس فهرست فیلم‌ها بر اساس این امتیاز مرتب شده و به صفحه کاربری کاربر منتقل می‌شود. رتبه‌بندی با استفاده از روش نرخ کلیک اغلب باعث تبلیغ فیلم‌هایی می‌شود که ظاهر فریبنده‌ای دارد و اغلب کاربران به‌طور کامل آن را تماشا نمی‌کنند ("clickbait") در حالی که زمان صرف شده برای تماشای یک ویدئو تعاملات بهتری از کاربر را ضبط می‌کند .

مهندسی ویژگی

از صدها ویژگی در مدل‌های رتبه‌بندی استفاده شده است. علی رغم ویژگی یادگیری عمیق برای حذف مهندسی دستی ویژگی‌ها، ماهیت داده‌های خام در این مسئله به‌گونه‌ای است که به راحتی امکان ورود مستقیم به شبکه‌های عصبی پیش‌رو را فراهم نمی‌کند.

مشاهده می‌کنیم که مهم‌ترین سیگنال‌ها آنهایی هستند که تعامل قبلی کاربر با یک قلم و سایر موارد مشابه را توصیف می‌کنند و با تجربه دیگران در رتبه‌بندی تبلیغات مطابقت دارند. به‌عنوان نمونه، سابقه گذشته کاربر با کانالی که ویدئو را در حال امتیازگذاری بارگذاری کرده در نظر بگیرید - کاربر چند فیلم از این کانال تماشا کرده است؟ آخرین باری که کاربر ویدئویی با این موضوع تماشا کرده چه زمانی بوده است؟ این ویژگی‌های مداوم که اقدامات گذشته کاربر را در موارد مرتبط توصیف می‌کند، بسیار مهم هستند زیرا به خوبی قابل تعمیم به موارد متفاوت هستند. همچنین انتشار اطلاعات و روش انتخاب کاندیداهای تولیدشده برای رتبه‌بندی بسیار مهم است که این انتقال اطلاعات می‌تواند در بردار ویژگی‌ها لحاظ شود. به‌عنوان‌مثال اینکه یک ویدئوی کاندیدا توسط چه منابع اطلاعاتی معرفی شده است و یا اینکه با چه امتیازاتی این ویدئو کاندیدا شده است. این اطلاعات از مرحله تولید کاندید به مرحله رتبه‌بندی قابل انتقال است.



شکل ۱۲. معماری شبکه رتبه‌بندی در یوتیوب [45]

بردارهای تعبیه ویژگی‌های طبقه‌بندی شده

مشابه کاندیداهای پیشنهادی، از بردار تعبیه برای ترسیم ویژگی‌های طبقه‌ای تنک هم استفاده می‌شود تا در یک نمایش چگال به‌عنوان ورودی برای شبکه‌های عصبی مناسب باشند. در [۴۸] یک پیاده‌سازی از مدل پیشنهادی یوتیوب ارائه شده است.

۵-۳- سیستم توصیه‌گر آمازون

در مقاله‌ای تحت عنوان «راز سیستم توصیه‌گر آمازون برای فروش آنلاین بیشتر» به بررسی روش‌هایی که در سیستم توصیه‌گر آمازون استفاده می‌شود پرداخته شده است [۴۹].

«با توجه به موفقیت آمازون، می‌توان ادعا کرد که سیستم توصیه‌گر به‌خوبی کار می‌کند. این شرکت از رشد فروش ۲۹ درصدی در ۱۲ ماهه دوم مالی خود به ۱۲,۸۳ میلیارد دلار خبر داد، در حالی که در مدت مشابه سال گذشته ۹,۹ میلیارد دلار بود. بدون شک بسیاری از این رشد مربوط به روش‌های پیشنهادی است که آمازون در هر بخش از فرآیند خرید اعمالی کرده است ... »

آن‌ها میلیاردها داده استفاده می‌کنند تا بسیاری موارد مختلف را آزمایش کنند تا به‌سرعت بفهمند چه عواملی موثرند. طی سال‌های گذشته دو نحوه ارسال پیشنهاد در آمازون را شاهد هستیم: از طریق ایمیل و از طریق سایت. به‌علاوه مشخص است که توصیه‌های آمازون از طریق ایمیل بهتر از توصیه‌های درون سایت عمل می‌کند.

آمازون همچنین پیشنهادهایی را از طریق ایمیل به کاربران ارائه می‌دهد. در واقع، نرخ تبدیل و کارایی اینگونه ایمیل‌ها «بسیار زیاد» است، به‌طور قابل‌توجهی مؤثرتر از توصیه‌های روی سایت است.

انواع روش‌های پیشنهادی

۱) توصیه‌های موجود در سایت

در ادامه برخی از روش‌های توصیه کالا بر روی سایت آمازون بیان‌شده است. [۴۹]

- «برای شما توصیه می‌شود، توماس»- با کلیک بر روی پیوند «توصیه‌های شما» کاربران به صفحه‌ای پر از محصولات پیشنهادی منتقل می‌شوند که فقط برای آن‌ها توصیه می‌شوند. آمازون طیف وسیعی از محصولات را از دسته‌های مختلف که مرور کرده‌اند، یا محصولاتی که احتمالاً روی آن‌ها کلیک کرده‌اند با جزئیات بیشتری درباره آن‌ها ارائه می‌دهد.
- «معمولا با هم خریده شده‌اند»- این پیشنهادات یک هدف اصلی دارد: افزایش متوسط ارزش سفارش. توصیه‌های «اغلب با هم خریداری شده» با ارائه پیشنهاد محصول بر اساس موارد موجود در سبد خریدار، آن‌ها را ترغیب به خرید زیر کالاهای دیگری می‌کنند.
- «موارد بازدید شده اخیر و پیشنهاد ویژه شما» - آمازون به محصولی که آن را جستجو کرده‌اند نگاه می‌کند و محصولات بسیار مشابه با اشکال، اندازه‌ها و مارک‌های مختلف را برای

کمک به کاربر در یافتن قلمی بسیار مشابه با محصولی که قبلاً به آن علاقه نشان داده‌اید، توصیه می‌کند. آن‌ها مارک‌ها، رنگ‌ها، اشکال و اندازه‌های مختلف را پرتاب می‌کنند با این امید که محصولی را در مقابل شما قرار دهند که در برابر آن مقاومت نکنید.

- تاریخچه جستجوی شما - اگر کاربران قبلاً به محصولی نگاه کرده‌اند، به این معنی است که آن‌ها کمی به آن علاقه‌مند هستید و آمازون آن را می‌داند، بنابراین اگر می‌خواهید سریع برگردید و چیزی را خریداری کنید که قبلاً به آن علاقه داشتید، سابقه مرور شما را به شما نشان می‌دهد.

۲) توصیه‌های خارج از سایت

در اینجا نمونه‌هایی از توصیه‌هایی است که آمازون برای ارسال آن‌ها از طریق ایمیل انجام داده است:

- «بهترین فروش مدل Canon در این هفته»- اولین ایمیل طیف وسیعی از مدل‌های پرفروش از دسته کالایی است که بازدید کرده‌اند. از آنجا که فقط مدل‌های Canon در این ایمیل به نمایش گذاشته شده‌اند، می‌توان مطمئن بود که کاربر مربوطه یکبار در حال جستجوی آن مارک دوربین در سایت بوده است و یا حتی دوربین Canon را به سبد خرید خود اضافه کند.
- «قاب دوربین بخرید» - این ایمیل پیشنهادی حاوی مواردی است که اغلب با هم خریداری می‌شوند. با این هدف که کاربر بخواهد یک دوربین خریداری کند و لوازم جانبی آن را نیز خریداری کند. بدین صورت ارزش سفارش و میزان درآمد حاصل از هر مشتری افزایش می‌یابد.

ساختار مدل

در اصل سیستم توصیه‌گر غول خرده فروشی بر اساس تعدادی از عناصر ساده بنا شده است: [۵۰]

- آنچه کاربر درگذشته خریده است،
- چه کالاهایی را در سبد خرید مجازی خود دارد،
- چه کالاهایی را رتبه‌بندی کرده و دوست داشته است،
- سایر مشتریان چه مواردی را مشاهده و خریداری کرده‌اند.

آمازون این روش خود را «پالایش اشتراکی قلم- قلم» می‌نامد و از این الگوریتم برای شخصی‌سازی شدید تجربه جستجو برای اطمینان از بازگشت مجدد مشتری برای خرید استفاده می‌کند.

مقاله [۵۱] در سال ۲۰۰۳ در ارتباط با سیستم توصیه‌گر آمازون منتشرشده است. بر اساس این مقاله برای حل مسئله توصیه سه روش رایج وجود دارد:

- پالایش مشترک مشارکتی،
- مدل‌های خوشه‌ای،
- روش‌های مبتنی بر جستجو.

الگوریتم مدل پیشنهادی آمازون یک پالایش مشارکتی قلم- قلم است. بر خلاف پالایش مشترک مشارکتی، محاسبه آنلاین الگوریتم به‌طور مستقل از تعداد مشتری و تعداد اقلام موجود در فهرست محصولات مورد قیاس قرار می‌گیرد. الگوریتم آمازون پیشنهاداتی را در زمان واقعی و در مقیاس مجموعه‌های گسترده داده تولید می‌کند و توصیه‌هایی با کیفیت بالا پیشنهاد می‌کند.

بیشتر الگوریتم‌های پیشنهادی با یافتن مجموعه‌ای از مشتریانی شروع می‌شوند که اقلام خریداری شده آن‌ها و امتیازدهی و رتبه‌بندی اقلام در فهرست خریدشان با کاربر مورد نظر ما مطابقت داشته باشد. دو نسخه متداول از این الگوریتم‌ها پالایش مشارکتی و مدل‌های خوشه‌ای هستند. الگوریتم‌های دیگر - ازجمله روش‌های مبتنی بر جستجو و پالایش مشارکتی قلم- قلم‌که در مدل آمازون استفاده می‌شود - بر یافتن اقلام مشابه بجای مشتریان مشابه تمرکز می‌کنند. الگوریتم تلاش می‌کند برای هر یک از اقلام خریداری شده و رتبه‌بندی شده کاربر، موارد مشابه را پیدا کند. سپس موارد مشابه را جمع کرده و به او پیشنهاد می‌کند.

۵-۴- سیستم توصیه‌گر فیسبوک

شبکه‌های اجتماعی آنلاین بخشی از زندگی روزمره ما شده است و یکی از سایت‌های محبوب آنلاین شبکه‌های اجتماعی در اینترنت فیسبوک است، جایی که کاربران با دوستان خود ارتباط برقرار می‌کنند، به گروه‌ها می‌پیوندند، گروه‌ها را ایجاد می‌کنند، گروه‌ها را بازی می‌کنند، و در سراسر جهان دوست می‌یابند. همچنین، تعداد زیادی از گروه‌ها برای علل و عقاید مختلف ایجاد می‌شوند. با وجود این گستردگی در گروه‌ها کاربران را برای انتخاب یک گروه مناسب برای عضویت دچار مشکل می‌کند. برای حل این مشکل، باتاراژاو و همکاران [۵۲] سیستم توصیه‌گر گروهی[1] با استفاده از ترکیبی از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی و درخت تصمیم را معرفی کرده‌اند. با استفاده از این ابزار گروه‌های شبکه اجتماعی فیسبوک را می‌توان بر اساس مشخصات اعضا شناسایی کرد[۵۲].

[1] GRS

شکل ۱۳ معماری ساده‌ای از سیستم توصیه‌گر گروهی (GRS) فیسبوک را نشان می‌دهد. این مدل شامل سه جز اصلی زیر است:

- استخراج ویژگی‌های نمایه کاربر
- موتور طبقه‌بندی
- توصیه نهایی

مجموعه دادگان- برای این پژوهش با استفاده از یک api به حساب‌های دانشجویی که در آن تنظیمات حریم خصوصی برای دسترسی به شبکه دوستان آن‌ها مجاز بود (تنظیم پیش فرض)، دسترسی پیدا کرده‌اند. برای این منظور از شبکه اجتماعی دانشگاه شمال تگزاس[1] در فیسبوک استفاده شده است. در طی این جستجو، امکان دسترسی به حساب‌های ۱۵۸۰ کاربر وجود داشته است. از این حساب‌ها اطلاعات زیر جمع‌آوری‌شده:

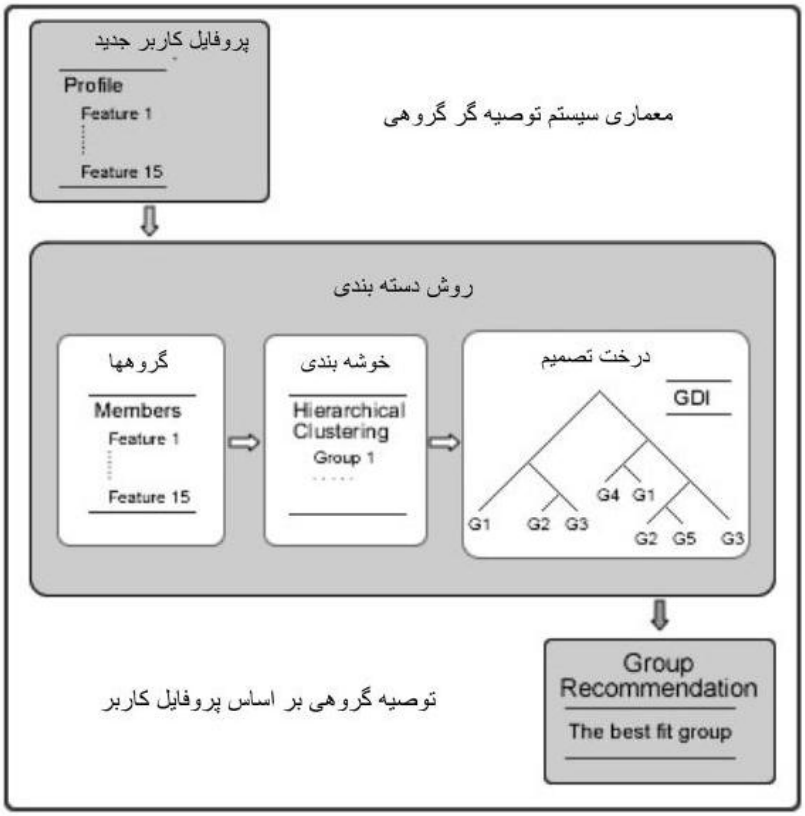
- اطلاعات نمایه کاربران،
- ارتباطات دوستانه و گروه‌هایی که عضو به آن‌ها بودند.

اولین گام در سیستم توصیه‌گر گروهی تجزیه و تحلیل و شناسایی ویژگی‌هایی است که تمایلات کاربر را ازنظر علاقه، ارتباط اجتماعی، اطلاعات اساسی مانند سن، جنس، تعداد دیوارها، تعداد یادداشت‌ها و بسیاری از موارد مشابه تفکیک می‌کند.

یکی از تکنیک‌های متداول برای یافتن شباهت بین گره‌ها در فضای چند بعدی، تجزیه و تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی است. برای استنتاج تشابه بین اعضا در این مدل، از فاصله اقلیدسی استفاده شده است.

ضریب خوشه‌بندی

هر گروه دارای یک ویژگی منحصر به فرد است، که آن را از دیگران متمایز می‌کند، بااین‌حال برخی از اعضای یک گروه ممکن است مشخصات مختلفی داشته باشند. با افزایش این اختلافات تا حدی این اعضا به‌عنوان «نویز» اجتناب‌ناپذیر برای خوشه‌بندی ظاهر می‌شوند. برای شناسایی و کاهش این نویزها یک گروه را توسط اعضای اصلی آن مشخص می‌کنند. منظور از اعضای اصلی آنهایی هستند که داخلی‌ترین قسمت گروه را ایجاد می‌کنند. برای این منظور مفهوم ضریب خوشه مطرح می‌شود.



شکل ۱۳. معماری سیستم توصیه‌گر گروهی فیسبوک

[1] UNT

این ضرایب بر اساس فرمول زیر بیان می‌شود:

$$C = \frac{N_{R_i}}{R_i},$$

در این فرمول N_k تعداد نرمال شده اعضا در فاصله k از مرکز است و R_i فاصله اقلیدسی نرمال شده از مرکز عضو i است و بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$R_i = \frac{r_i}{\max_j(r_j)},$$

r_i فاصله از مرکز عضو i است.

درخت تصمیم

ماهیت سیستم توصیه‌گر گروهی (GRS) مبتنی بر طبقه‌بندی است. GRS بر اساس ویژگی‌های نمایه کاربر، مناسب‌ترین گروه‌ها را برای کاربر پیدا می‌کند. یک راه‌حل متداول برای مسئله طبقه‌بندی، الگوریتم درخت تصمیم مبتنی بر تقسیم‌بندی بازگشتی باینری است. چندین روش تقسیم در این الگوریتم وجود دارد: جینی، توئینگ و انحراف . در طی آزمایشات برای یافتن نتیجه بهتر، هر یک از قوانین تقسیم در GRS ادغام شده است. بااین‌حال هیچ پیشرفت قابل‌توجهی در دقت مشاهده نشد، به این معنی که درخت نهایی به قاعده تقسیم برای ساخت درخت بستگی ندارد. هدف اصلی این الگوریتم‌های تقسیم، یافتن بهترین تقسیم داده‌ها با حداکثر همگنی در هر طرف است. در هر تکرار بازگشتی داده‌ها تصفیه می‌شوند تا زمانی که الگوریتم به گره‌های نهایی(کلاس‌ها) برسد.

پیاده‌سازی سیستم توصیه‌گر فیسبوک

یک نمونه سیستم توصیه‌گر پیشرفته مبتنی بر یادگیری عمیق با استفاده از سیستم منبع باز PyTorch و Caffe۲ پیاده‌سازی شده است. DLRM[۵۱] با ترکیب اصول مربوط به هر دو روش پالایش مشارکتی و رویکردهای مبتنی بر تجزیه و تحلیل، مدل پیشرفته‌ای ارائه و نتایج پیشرفته‌ای را ارائه دهد. DLRM[۵۱] مدلی است که در گروه تحقیقاتی فیسبوک طراحی‌شده است.

۵-۵- سیستم توصیه‌گر اینستاگرام

بیش از نیمی از جامعه اینستاگرام هر ماه برای کشف عکس‌ها، فیلم‌ها و داستان‌های جدید مرتبط با علایق خود از ابزار جستجو در اینستاگرام استفاده می‌کنند. پیشنهاد مرتبط‌ترین مطالب از بین میلیاردها گزینه در زمان واقعی چالش‌های یادگیری ماشین متعددی به همراه دارد که برای حل آن‌ها به راه‌حل‌های جدید مهندسی نیاز است [۵۲].

IGQL - زبان اختصاصی توصیه‌گر اینستاگرام

پژوهشگران در تیم تحقیقاتی فیسبوک مجموعه‌ای از زبان‌های جستجوی سفارشی شامل تکنیک‌های سبک‌سازی مدل و ابزارهایی که امکان آزمایش با سرعت بالا را ایجاد می‌کنند برای جستجوی بهتر ایجاد کرده‌اند تا با این چالش‌ها مقابله کنند. این سیستم‌ها ضمن افزایش کارایی توسعه‌دهنده، از مقیاس‌های بزرگ جستجو در اینستا پشتیبانی می‌کنند. درمجموع، این راه‌حل‌ها را می‌توان به‌عنوان یک سیستم هوش‌مصنوعی مبتنی بر یک قیف رتبه‌بندی ۳ بخشی بسیار کارآمد توصیف کرد که ۶۵ میلیارد ویژگی را استخراج می‌کند و هر ثانیه ۹۰ میلیون پیش بینی مدل را انجام می‌دهد. زبان طراحی‌شده IGQL نام دارد [۵۴].

ضرورت ساخت یک موتور توصیه‌گر در شبکه‌ای مثل اینستاگرام که روزانه حجم وسیعی فایل شامل تعداد زیادی عکس و فیلم در آن بارگذاری می‌شود، تولید ابزارهای اساسی است که سه نیاز مهم زیر در این فضا را برآورده کنند:

- توانایی انجام آزمایش‌های سریع در مقیاس وسیع اینستاگرام را داشته باشد،
- نیاز است که امکان دستیابی به سیگنال‌های اطلاعاتی قوی‌تری در مورد کاربران را ایجاد کند،
- ازنظر محاسباتی برای اطمینان از کیفیت بالا و پیشنهاد توصیه‌های جدید روشی کارآمد باشد.

ساخت الگوریتم‌ها و تکنیک‌های توصیه بهینه یک زمینه تحقیقاتی است و روند انتخاب سیستم مناسب می‌تواند بسته به هدف بسیار متفاوت باشد. به‌عنوان‌مثال، در حالی که یک الگوریتم ممکن است منافع طولانی مدت را به‌طور موثر در نظر بگیرد، دیگری ممکن است در پیشنهاد توصیه‌ها بر اساس محتواهای اخیر عملکرد بهتری داشته باشد. تیم مهندسی اینستاگرام به روشی نیاز دارد که هم ایده‌های جدید را به‌طور کارآمد امتحان کند و هم ایده‌های امیدوار کننده را به راحتی و بدون نگرانی بیش از حد درباره منابع محاسباتی مانند پردازنده و حافظه موردنیاز به کار گیرد. IGQL یک فرازبان خاص دامنه سفارشی است که سطح انتزاعی مناسب را فراهم می‌کند و همه الگوریتم‌ها را در یک مکان جمع می‌کند.

بردار تعبیه حساب کاربری برای رتبه‌بندی شخصی

کاربران اینستاگرام معمولا میلیاردها قطعه فیلم با کیفیت بالا را که دارای مجوز واجد شرایط برای کاوش هستند، در اینستاگرام به

اشتراک می‌گذارند. یکی از چالش‌های جستجو در این فضا ارائه یک طبقه‌بندی قابل تغییر به‌صورت یک کاتالوگ واضح و در حال تحول برای طیف گسترده‌ای از سلایق مختلف است که از موضوعات مربوط به خوشنویسی عربی تا مدل قطارها تا انواع جلبک‌ها قابل تغییر هستند. درنتیجه مدل‌های مبتنی بر محتوا در جستجو در فضایی با چنین تنوعی که ناشی از ماهیت مبتنی بر علاقه کاربر است، با مشکل مواجه می‌شود.

ig2vec - بردار تعبیه کاربران

از آنجا که اینستاگرام تعداد زیادی حساب کاربری متمرکز بر اساس موضوعات خاص دارد، یک خط لوله بازیابی ایجاد شده است که به‌جای تمرکز رسانه محور، کاربر محور بوده و با اطلاعات مربوط به سطح حساب کار می‌کند. با ساختن بردارهای تعبیه حساب‌ها، شناسایی اینکه کدام حساب‌ها ازنظر موضوعی مشابه یکدیگر هستند، با کارایی بیشتری انجام می‌گبرد. بردار تعبیه حساب‌های کاربری با استفاده از ig2vec، یک مدل بردار تعبیه مشابه word2vec ساخته می‌شوند. به‌طور معمول، چارچوب بردار تعبیه word2vec نمایشی از یک کلمه را بر اساس محتوایی که (در جملات مجموعه آموزش) در آن‌ها ظاهر شده می‌آموزد. ig2vec شناسه‌های حساب کاربرانی که کاربری خاص با آن‌ها ارتباط برقرار می‌کند به‌عنوان دنباله‌ای از کلمات در یک جمله تلقی می‌کند.

۵-۶- سیستم توصیه‌گر تیک‌تاک

تیک‌تاک یک پلتفرم رسانه اجتماعی است که به کاربران اجازه می‌دهد که ویدئوهای کوتاه را با سایر کاربران به اشتراک گذارند. این پلتفرم قادر است بر اساس سلایق و علایق کاربران به ارائه پیشنهادات متعددی به کاربران می‌پردازند. سیستم توصیه‌گر بلادرنگ به کار گرفته شده در تیک‌تاک Monolith است. این سیستم در واقع یک مدل یادگیری عمیق است که بر اساس اعمال قبلی کاربر به پیش‌بینی تمایلات کاربر می‌پردازد. این مدل از یک جدول بازنمایی بدون برخورد جهت ذخیره‌سازی و بروزرسانی بازنمایی کاربران و ویدئوها استفاده می‌کند. در این جدول از تابع هش و پالایه بلوم استفاده و تضمین می‌کند که هر کاربر و هر ویدئو تنها یکبار بازنمایی و ذخیره گردد. به‌علاوه، برای بروزرسانی پارامترهای مدل بر اساس بازخوردهای دریافتی از کاربران از طریق زمان تماشای ویدئو، علاقه‌مندی و کامنت‌های کاربران از آموزش برخط استفاده می‌کند[۸۷].

معماری سیستم توصیه‌گر تیک‌تاک

معماری مدل پیشنهادی از ۳ جز اصلی تشکیل شده است: (۱) سیستم خدمت‌رسانی آنلاین شامل متعادل‌کننده بار، لایه کش و لایه مدل است. متعادل‌کننده بار درخواست‌ها را بر روی لایه کش که وظیفه ذخیره و نگهداری بازنمایی کاربران و ویدئوها و پارامترهای مدل را دارد، توزیع می‌کند. لایه کش درخواست‌ها را به سمت لایه مدل که وظیفه امتیازدهی به ویدئوهای کاندید و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس امتیازات محاسبه شده دارد، هدایت می‌کند. (۲) سیستم آموزش برخط، مسئولیت بروزرسانی مدل بر اساس بازخوردهای دریافتی از کاربران را دارد و شامل جمع‌آوری دادگان، پردازش دادگان و تنظیم پارامترها می‌باشد. در بخش جمع‌آوری دادگان، بازخورد کاربران جمع آوری و به بخش پردازش دادگان ارسال می‌شود. در بخش پردازش دادگان، به پیش‌پردازش دادگان و محاسبه گرادیان برای تنظیم پارامترهای مدل می‌پردازد. گرادیان‌های محاسبه شده به بخش تنظیم دادگان جهت بروزرسانی مدل سپرده می‌شود. (۳) سیستم آموزش آفلاین، مسئولیت آموزش مدل از پایه یا تنظیم بهینه مدل به‌صورت دوره‌ای را بر عهده دارد. در این سیستم انبار دادگان بازخورد کاربران، تاریخچه استفاده و ویژگی ویدئوها را در خود ذخیره می‌کند. خط لوله به کار گرفته شده در این سیستم، به استخراج دادگان و ویژگی‌ها می‌پردازد. دادگان استخراج‌شده جهت آموزش مدل خوشه‌بندی توزیع‌شده، مورداستفاده قرار می‌گیرند و خروجی حاصل به سیستم خدمت‌رسانی آنلاین ارسال می‌شود.

بررسی کیفیت سیستم توصیه‌گر تیک‌تاک

در پژوهش ارائه شده توسط Boeker و Urman [۸۸] پیشنهادات ارائه شده توسط سیستم توصیه‌گر ارائه شده در تیک‌تاک بر اساس علایق کاربر شخصی‌سازی می‌شود و شامل مراحل زیر است:

- اعتبارسنجی حساب کاربری

در این مرحله، ۱۵۹ کاربر واقعی از ۲۱ کشور مختلف در جهان، جهت اعتبارسنجی حساب کاربری تیک‌تاک دعوت شدند. از شرکت‌کنندگان در این بررسی کاربرد و میزان رضایت از سرویس‌های تیم‌تاک مورد سوال قرار گرفت. به‌علاوه، از شرکت کنندگان خواسته شد که در حساب‌های کاربری ایجاد شده توسط پژوهشگران این پژوهش به محتواهای پیشنهاد شده توسط تیک‌تاک امتیاز دهند

- تحلیل داده

در این مرحله به تحلیل دادگان جمع‌آوری‌شده از ۱۵۹ حساب

کاربری تیک‌تاک، که در بخش قبل توضیح داده شد، پرداخته می‌شود. به این ترتیب که ابتدا به منظور انجام تحلیل توصیفی از آمارهای توصیفی جهت خلاصه‌سازی دادگان جهت تعیین میزان رضایت کاربران از سرویس تیک‌تاک استفاده می‌شود. به‌علاوه، از رویکردهای مصورسازی جهت بیان الگوهای رفتاری کاربران و موارد مورد توجه کاربران در بازه‌های زمانی مختلف بر اساس رخداد اتفاقات مهم در جهان استفاده می‌شود. از سوی دیگر، به تحلیل استنباطی دادگان از طریق بررسی پاسخ سوالات موردبررسی در این پژوهش می‌پردازد. به‌علاوه، تحلیل احساسات، هیجانات و عقاید موجود نسبت به محتواهای پیشنهادی در حساب کاربری شرکت‌کنندگان نیز انجام می‌شود. از سوی دیگر، تحلیل فاکتورهای شخصی‌سازی شده در ارائه پیشنهاد و محتوای پیشنهاد شده نیز انجام می‌شود.

۵-۷- سایر سیستم‌های تجاری موجود

در ارتباط با سیستم‌های توصیه‌گر ابزارهای زیادی طراحی‌شده است که به ارائه خدمات می‌پردازند. از این ابزارهای تجاری به دلیل ماهیت اطلاعات زیادی منتشر نشده است. در مورد مدل و ساختار پیاده‌سازی اطلاعاتی در دست نیست. در ادامه به بیان معرفی ارائه شده از این ابزارها پرداخته شده است.

واندرکیوب [۵۵] - پلتفرم واندرکیوب راه‌حل ایده‌آل برای مدیریت یکپارچه پخش تلویزیونی است. کل مراحل پخش همگانی، از زمانبندی برنامه‌ریزی برنامه تا پخش، را گام به گام پوشش می‌دهد. استراتژی‌های برنامه‌ریزی برنامه، ازنظر تولید روزانه، در قلب برنامه‌ریزی تلویزیون هستند. واندرکیوب به شما امکان می‌دهد فقط با چند حرکت سریع و آسان از طریق نرم‌افزارهای یکپارچه مختلف از برنامه‌ریزی سالانه به پخش روزانه بروید. تدوین فهرست پخش و برنامه‌ریزی برنامه به لطف اتوماسیون پردازش‌ها و دسترسی به بایگانی‌های کاملا دیجیتالی به روندی روان و فوری تبدیل شده‌اند. هر برنامه نرم‌افزاری با مجموعه‌ای از توابع همراه است که به‌طور خاص قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و دوام سیستم در هر شرایطی را تضمین می‌کند. قابلیت‌های زیر برای ابزار زمانبندی در این پلتفرم قرار دارد:

- زمانبندی برنامه‌ها
- ایجاد، مشاهده و ویرایش برنامه‌ریزی
- مدیریت اطلاعات برنامه‌ها
- چاپ زمانبندی برنامه‌ها
- ارسال نامه الکترونیکی برنامه زمانبندی به فهرست پستی قابل تنظیم
- انتشار خودکار زمانبندی برنامه‌ها در وب
- مدیریت وقفه‌های تبلیغاتی

بر اساس مقاله [۵۶] فهرستی از برترین سیستم‌های تجاری ارائه شده است. در ادامه برخی از این موارد ذکرشده است.

- Optimizely [۵۷] - یکی از پیشروترین پلتفرم‌ها در حوزه توصیه‌گرها در جهان است، برای تیم‌های بازاریابی و تیم محصول امکان آزمایش، یادگیری و استقرار تجربیات دیجیتال را فراهم می‌کند.
- einstain [۵۸] - بنیانگذار Salesforce.com مارک بنیوف سهم خود را در ایجاد انقلابی در صنعت نرم‌افزار با ارائه «اولین هوش مصنوعی جامع جهانی برای CRM» انجام داده است. برای افرادی که از قبل مشتری Salesforce هستند، توصیه‌های انیشتین می‌تواند به راحتی در سیستم توصیه‌گر ادغام شود.
- Clarifai [۵۷] - مت زیلر (Matt Zeiler) بنیانگذار و مدیر عامل شرکت Clarifai یک متخصص هوش مصنوعی با دکترای تخصصی در یادگیری ماشین از NYU است. شرکت Clarifai از زمان کسب پنج مقام برتر در حوزه طبقه‌بندی تصاویر در مسابقات ImageNet ۲۰۱۳، قابلیت‌های برتر سیستم خود در مسئله تشخیص تصویر را ثابت کرده است. از دیگر محصولات موفق این شرکت سیستم توصیه‌گر است که به شرکت‌ها در حوزه تجارت الکترونیکی قابلیت ارائه پیشنهاد کالاهای مشابه به‌عنوان محصولات پیشنهادی را می‌دهد.
- Jinni [۶۰] - این ابزار به‌صورت رایگان در دسترس است و این امکان را فراهم می‌آورد که یک فیلم را انتخاب کنید و فیلم‌های مشابه با آن فیلم را ببینید. همچنین با استفاده از این وبسایت می‌توانید در بین فیلم‌ها بر اساس حالت، داستان، سبک، سال ساخت یا مخاطب (مثلاً مناسب برای کودکان) جستجو کنید و فیلم‌های جدیدی پیدا کنید. در صورتی که در این سایت، حساب بسازید، با لایک یا دیسلایک کردن فیلم‌ها می‌توانید پیشنهادات آینده را برای خود شخصی‌سازی کنید. این ابزار شامل فیلم‌های سینمایی، فیلم کوتاه و سریال‌های تلویزیونی است. همچنین امکان اتصال جینی به نتفلیکس برای اضافه کردن راحت‌تر فیلم‌ها به فهرست تماشا نیز وجود دارد.
- Rotten Tomatoes [۶۱] - این سایت، یک ابزار پیشرفته امتیازدهی به فیلم‌ها است. در کنار امتیازدهی و رده‌بندی فیلم‌ها، در این سایت می‌توانید بهترین فیلم‌های موجود برای کرایه کردن یا خرید را بررسی کنید، اخبار و نقدهای نوشته

شده در مورد فیلم‌ها را مطالعه کنید، تریلر فیلم‌ها را مشاهده کنید و حتی در صفحه فیلم‌ها، نظر بگذارید تا کاربران دیگر ازنظر شما استفاده کنند. هدف این سایت این نیست که به شما فیلم‌های مشابه یک فیلم را پیشنهاد دهد، بلکه هدفش این است که به شما اطلاعات کافی در مورد فیلم‌های مختلف بدهد تا بتوانید آگاهانه برای انتخاب یک فیلم را برای تماشا انتخاب کنید.

- Movie Lens [۶۲] - این سایت یک سرویس پشنهاددهنده فیلم است که توسط گروه تحقیقاتی لنز در دانشگاه مینسودا تهیه شده است. با استفاده از این سرویس می‌توانید همزمان که با استفاده از دیتابیس بزرگ این ابزار، پیشنهادهایی در مورد فیلم‌ها می‌گیرید، با تیم توسعه‌دهنده این ابزار کمک کنید تا الگوریتم‌هایی را تست کنند و توسعه دهند. یکی از ابزارک‌های این سایت، تنظیم‌کننده فیلم نام دارد. با استفاده از این ابزارک می‌توانید به دنبال فیلم‌هایی بگردید که مثلاً شبیه به Pulp Fiction است ولی میزان حادثه‌ای بودن فیلم بیشتر است.
- Criticker [۶۳] - این سایت از الگوریتمی با نام نشان‌دهنده امتیاز احتمال برای پیشنهاد دادن فیلم به شما استفاده می‌کند. نحوه کار این الگوریتم به این صورت است که از میانگین سلیقه ۱۰۰۰ کاربر که سلیقه آن‌ها بیشتری شباهت به شما را دارد برای پیشنهاد فیلم به شما استفاده می‌کنند. این ۱۰۰۰ کاربر از بین میلیون‌ها کاربر این سایت انتخاب می‌شود. در این سایت، در حین بررسی فیلم‌های مختلف، امتیازی در کنار هر فیلم نمایش داده می‌شود که این امتیاز، درصد احتمال این است که شما آن را فیلم را دوست داشته باشید. می‌توانید بر روی این درصد احتمال کلیک کنید تا از نحوه محاسبه آن و حتی رتبه‌بندی کاربرانی که در محاسبه این درصد احتمال دخیل بوده است مطلع شوید.
- Best similar [۶۴] - این سایت هر فیلم را با ۸ موضوع مشخص می‌کند و این امکان را دارد که بعد از انتخاب یک فیلم، بتوانید فیلم‌هایی را در هر یک از ۸ موضوع مرتبط با فیلمی که انتخاب کرده‌اید پیشنهاد بگیرید یا این به‌طورکلی فیلم‌های مشابه دیگری را پیدا کنید که بیشترین اشتراک موضوع با فیلم انتخابی شما را داشته باشند.
- Peach [۶۵] - این ابزار در ابتدا خود را سیستم توصیه‌گری برای پخش عمومی معرفی کرده است اما با بررسی دقیق‌تر مستندات آن، مشخص است که هدف این ابزار توصیه فیلم به کاربران به‌صورت شخصی است و پلتفرم هدف آن، سایت‌هایی مانند نماوا یا فیلیمو است.

این ابزار بخش وسیعی از نیازهای یک سازمان جهت ساخت یک سیستم توصیه‌گر را پوشش می‌دهد.

- دو نرم‌افزار موبایل برای دو سیستم‌عامل اندروید و iOS تهیه شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان اطلاعاتی از فیلم‌هایی که کاربران تماشا می‌کنند جمع‌آوری کرد و آن‌ها را به سرور فرستاد.
- شامل وبسایت‌های آماده‌ای برای ثبت‌نام و ورود کاربر و همچنین داشبوردی برای مدیریت کاربران توسط مدیر سایت است.
- ابزاری به نام Peach Lab تهیه شده است که مشابه با Jupyter Lab است. با استفاده از آن می‌توان با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از کاربران، الگوریتم‌های تهیه شده توسط Peach و همچنین ابزارهای پایتون از پیش نصب شده، سیستم توصیه‌گری آموزش داد. چهار الگوریتم در این بخش موجود است که می‌توان به‌صورت مستقیم از آن‌ها استفاده کرد یا با توجه به نیازهای موجود، تغییراتی در آن‌ها ایجاد کرد. این الگوریتم‌ها عبارت‌اند از الگوریتم مبتنی بر محتوا، الگوریتم پالایش مشارکتی با استفاده از تجزیه ماتریس، الگوریتمی برای توصیه اقلام باهدف بالا بردن تنوع و الگوریتمی برای پیشنهاد موارد trend شده.
- در کنار الگوریتم‌های موجود، مجموعه قوانینی متنوعی نیز تعریف شده است. برای مثال می‌توان تعدادی از برنامه‌ها را در فهرست سیاه قرار داد تا هیچ وقت انتخاب نشوند یا می‌توان برای برنامه‌ها طول عمر تعریف کرد تا پس از اتمام این زمان، دیگر برنامه‌ها انتخاب نشوند.

کدهای بخش‌های اصلی این ابزار موجود نیست و فقط کدهایی از نرم‌افزارهای اندروید و iOS آن موجود است. اطلاعات قیمت‌گذاری و این‌که آیا امکان خرید آن وجود دارد نیز موجود نیست. به نظر می‌رسد که peach در فازهای ابتدایی توسعه است و هنوز به‌صورت رسمی ارائه نشده است.

۶- پیکره‌های آموزشی سیستم توصیه‌گر

با توجه به اینکه اکثریت (بر اساس دانش ما تا این لحظه) مدل‌های مطالعه شده با ناظر بودند، مدل‌های مطرح‌شده برای حل مسئله سیستم توصیه‌گر با استفاده از روش‌های با ناظر آموزش داده می‌شوند. عنصر اصلی در مدل‌های با ناظر در اختیار داشتن داده‌های آموزشی کافی و مناسب است. برای این منظور تلاش‌هایی برای تولید و ساخت پیکره‌های آموزشی انجام‌شده است.

جدول ۱. ژانر در پیکره متن‌باز MMTF14k

#	Genre	#pos	#neg	skewness
1	Action	1,766	11,857	6.71
2	Adventure	1,202	12,421	10.33
3	Animation	482	13,141	27.26
4	Children	592	13,031	22.01
5	Comedy	4,139	9,484	2.29
6	Crime	1,473	12,150	8.25
7	Documentary	1209	12414	10.27
8	Drama	6,592	7,031	1.07
9	Fantasy	737	12,886	17.48
10	Film-Noir	151	13,472	89.22
11	Horror	1,453	12,170	8.38
12	Musical	509	13,114	25.76
13	Mystery	754	12,869	17.07
14	Romance	2,003	11,620	5.80
15	Sci-Fi	938	12,685	13.52
16	Thriller	2,233	11,390	5.10
17	War	543	13,080	24.09
18	Western	323	13,300	41.18
Avg.		**1,505.5**	**12,118**	**18.65**

در مقاله [۲] یک پیکره آموزشی ساخته و منتشرشده است. در این مقاله، مجموعه داده MMTF-14K پیشنهاد و منتشرشده است. این دادگان برای استفاده در ساخت سیستم توصیه‌گر فیلم با استفاده از آخرین پیشرفت در نمایش محتوای دیداری و شنیداری طراحی‌شده است. این مجموعه داده به‌صورت عمومی در دسترس است و شامل ۱۳،۶۲۳ پیش‌پرده فیلم از نوع هالیوود است که توسط ۱۳۸،۴۹۲ کاربر با تقریب ۱۲،۵ میلیون رتبه تولیدشده است. مجموعه داده MMTF-14K اولین مجموعه داده در مقیاس بزرگ در جامعه سیستم‌های توصیه‌گر است که انواع توصیفات مبتنی بر محتوا را دارد. جدول ۱ مجموعه سبک‌ها و آمار آن‌ها در پیکره را نمایش می‌دهد [۵۰].

مجموعه داده MovieLens یکی دیگر از مجموعه‌های آموزشی قابل‌دسترس برای سیستم‌های توصیه‌گر MovieLens است. این مجموعه داده شامل نظرات مختلف کاربران در ارتباط با ۱۷۰۰ فیلم است. تعداد کاربران به کار گرفته‌شده برای ساخت این دادگان ۱۰۰۰ کاربر بوده است و در کل ۱۰۰۰۰۰ رتبه‌بندی از دیدگاه‌های مختلف برای مجموعه فیلم‌ها تولیدشده است [۶۲].

پیکره دادگان Spotify Audio Features، شامل آهنگ‌های سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ از سرویس معروف Spotify است. ویژگی‌های صوتی نظیر میزان بلندی، سرعت پخش و انرژی برای ۱۳۰ هزار آهنگ به‌وسیله Spotify Web API استخراج و شامل ۲۰۱۷ ردیف و ۱۷ ستون است. میزان بلندی، سرعت و انرژی آهنگ‌ها به ترتیب به‌صورت میانگین ۷،۰۳- دسی‌بل، ۱۲۱،۶ ضربه در هر دقیقه و ۰،۶۸(در بازه ۰ تا ۱) است [۹۰].

در پیکره دادگان معرفی‌شده در [۸۹]، مجموعه آهنگ‌ها و متون آن‌ها بین سال‌های ۱۹۵۰تا ۲۰۱۹ با استفاده از ترکیب Echo Nest API و بسته پایتون Spotify استخراج شد. حجم این پیکره حدود ۲۶،۴ مگابایت و شامل ۲۰۱۷ ردیف و ۱۷ ستون است.

۷- بحث و مقایسه

در جدول ۲ مقاله‌های سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی بر محتوا در حوزه فیلم، موسیقی و تلویزیون، که در بخش ۴ توضیحات کامل آن‌ها ارائه‌شده، بررسی‌شده‌اند. در ادامه توضیحات بیشتری در تکمیل بررسی هر یک از این مقالات بیان خواهد شد.

جدول۲. مقاله‌های سیستم‌های توصیه‌گر مبتنی بر محتوا

ردیف	مقاله	الگوریتم	سال چاپ	حوزه	مجموعه داده	اطلاعات جانبی
۱	Liang و همکاران [۷]	ترکیبی	۲۰۱۴	فیلم	MovieLens	کلیدواژه
۲	Chen و همکاران [۸]	ترکیبی	۲۰۲۱	فیلم		
۳	Pradeep و همکاران [۹]	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۰	فیلم		کلیدواژه
۴	Singh و همکاران [۱۰]	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۰	فیلم	بدون دیتاست	
۵	Almeida و همکاران [۱۱]	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۰	فیلم	MovieLens, IMDB	ایجاد تنوع در توصیه‌ها
۶	Meel و همکاران [۱۲]	ترکیبی	۲۰۲۱	فیلم	MovieLens	تگ
۷	Singla و همکاران [۱۳]	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۰	فیلم	IMDB	متن داستان فیلم
۸	Sottocornola و همکاران [۱۴]	ترکیبی	۲۰۱۷	فیلم	MovieLens	متن داستان فیلم
۹	Yin و همکاران [۱۵]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۵	فیلم	Digg, MovieLens Douban Movie, Delicious	شبکه‌های اجتماعی
۱۰	Albanese و همکاران [۱۶]	ترکیبی	۲۰۱۳	فیلم	MovieLens	
۱۱	Elashmawi و همکاران [۸۳]	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۲	فیلم	YouTube-8M	ویدئوهای یوتیوب
۱۲	Rajasekar و همکاران [۱۵]	ترکیبی	۲۰۲۵	فیلم	بدون دیتاست	
۱۳	Markapudi و همکاران [۸۴]	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۳	فیلم	UGC	ویدئوهای پویانمایی، سخنرانی، موزیک ویدئو و ویدئوهای ورزشی

ردیف	مقاله	الگوریتم	سال چاپ	حوزه	مجموعه داده	اطلاعات جانبی
۱۴	Ord و همکاران [۱۷]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۳	موسیقی	The Million Song Dataset	محتوای صوتی موسیقی
۱۵	Wang و همکاران [۱۸]	مبتنی بر محتوا ترکیبی	۲۰۱۴	موسیقی	The Echo Nest Taste Profile Subset	محتوای صوتی موسیقی
۱۶	Liu و همکاران [۱۹]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۳	موسیقی	Custom -- 560 MP3+MIDI	محتوای صوتی موسیقی
۱۷	Bogdanov و همکاران [۲۰]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۳	موسیقی		محتوای صوتی موسیقی
۱۸	Wang و همکاران [۲۱]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۲	موسیقی	CAL500, Grooveshark	آگاه از زمینه
۱۹	Barragáns-Martínez و همکاران [۲۲]	مبتنی بر محتوا پالایش مشارکتی	۲۰۱۰	موسیقی		تگ
۲۰	Chiliguano و همکاران [۲۳]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۶	موسیقی	The Million Song Dataset	محتوای صوتی موسیقی
۲۱	Chou و همکاران [۲۴]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۶	موسیقی	Custom - A real-world dataset	محتوای صوتی موسیقی
۲۲	Turrin و همکاران [۲۵]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۵	موسیقی	30Music	تاریخچه کوتاه‌مدت کاربر
۲۳	Vasile و همکاران [۲۶]	ترکیبی	۲۰۱۶	موسیقی	30Music	تعبیه اقلام
۲۴	Wang و همکاران [۲۷]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۴	موسیقی	Custom - 400 Songs	محتوای صوتی موسیقی
۲۵	Rao و همکاران [۲۸]	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۱	موسیقی		محتوای صوتی موسیقی
۲۶	Hosseinzadeh و همکاران [۲۹]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۵	موسیقی	Last.fm	آگاه از دنباله
۲۷	Jannach و همکاران [۳۰]	ترکیبی	۲۰۱۵	موسیقی	Last.fm, AotM, 8tracks	آگاه از دنباله
۲۸	Vall و همکاران [۳۱]	ترکیبی	۲۰۱۸	موسیقی	The Million Song Dataset, AotM, 8track	تگ
۲۹	Vall و همکاران [۳۲]	ترکیبی	۲۰۱۷	موسیقی	The Million Song Dataset, AtoM	محتوای صوتی موسیقی
۳۰	Gharahighehi و همکاران [۳۳]		۲۰۲۱	موسیقی	30music, Last.fm, Nowplaying	مبتنی نشست
۳۱	Ali و همکاران [۸۵]	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۳	موسیقی	Kaggle (Spotify, Genius)	آهنگ‌های سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷
۳۲	Burch و همکاران [۸۶]	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۳	موسیقی	top five playlists for each of the four moods using Spotify's API	دیتا برای کاربرد خاص خود که پیش‌بینی مود کاربران هست جمع‌آوری شده
۳۳	Shashaani	مبتنی بر محتوا	۲۰۲۴	موسیقی		
۳۴	Engelbert و همکاران [۳۴]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۱	تلویزیون	Custom - Simulation	
۳۵	Quan و همکاران [۳۵]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۴	تلویزیون	Custom - Survey from 20 people for 1 month	رفتارهای گروهی کاربران
۳۶	Oh و همکاران [۳۶]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۲	تلویزیون		رفتارهای گروهی کاربران
۳۷	Turrin و همکاران [۳۷]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۴	تلویزیون	Custom - 13664 users, 217 channels, 4 months	علاقه‌مندی کاربر به یک شبکه تلویزیونی
۳۸	daSilva و همکاران [۳۸]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۲	تلویزیون	Custom	
۳۹	Zibriczky و همکاران [۳۹]	مبتنی بر محتوا پالایش مشارکتی ترکیبی	۲۰۱۲	تلویزیون	SaskTel	
۴۰	Song و همکاران [۴۰]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۲	تلویزیون		
۴۱	Chaudhry و همکاران [۴۱]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۵	تلویزیون		
۴۲	Barraza-Urbina و همکاران [۴۲]	ترکیبی	۲۰۱۵	تلویزیون	Twitter Data	اطلاعات شبکه‌های اجتماعی
۴۳	Yuan و همکاران [۴۴]	مبتنی بر محتوا	۲۰۱۵	تلویزیون	Custom - Campus IPTV, 1 year	
۴۴	Symeonidis و همکاران [۴۵]		۲۰۲۰	تلویزیون		آگاه از دنباله
۴۵	Dudekula ، و همکاران [۸۷]	ترکیبی	۲۰۲۳	تلویزیون	CelebFaces Attribute Dataset, Labeled Faces in the Wild-People	تلویزیون‌های هوشمند

دسته‌ای از مقاله‌ها، از رویکردهای پایه مبتنی بر محتوا استفاده کرده‌اند. وجود مقالاتی بر مبنای رویکردهای پایه مبتنی بر محتوا بر ارزشمند بودن این رویکردها صحه می‌گذارد و نشان می‌دهد اگرچه رویکردهای پایه عمر طولانی‌ای دارند همچنان کاربردی هستند و هنوز به تاریخ انقضا نرسیده‌اند. درنتیجه این رویکردها و ویژگی‌های استفاده شده در آن‌ها می‌تواند در پروژه‌های پژوهشی و صنعتی کاربردی باشد.

به‌عنوان‌مثال در مقاله [۹] از فهرست بازیگران، کلیدواژه، عوامل

سازنده فیلم و سبک‌های فیلم استفاده شده است. مقاله [۱۰] از ویژگی‌های محبوبیت فیلم و سبک فیلم استفاده کرده است. در مقاله [۱۳] از ویژگی‌های داستان فیلم، امتیازهای فیلم، کشور سازنده فیلم و سال ساخت استفاده شده است. در مقاله [۳۲]، از ویژگی‌هایی ازجمله شبکه تلویزیونی که برنامه از آن پخش‌شده است، عنوان برنامه، زیرنویس برنامه، دسته برنامه (مثلاً فیلم، مسابقه تلویزیونی یا ...)، سبک، بازیگران، توضیحات و سال ساخت استفاده شده است. در مقاله [۳۸] از ویژگی‌های زمینه‌ای (تاریخ و زمان و مکان ساخت برنامه تلویزیونی و مکان کاربر)، ویژگی‌های صریح که مستقیماً از کاربر گرفته می‌شود (زبان، جنسیت، سن و شغل) و ویژگی‌هایی که به‌طور خودکار استخراج می‌شوند (مانند سبک) استفاده شده است. در مقاله [۳۹] از ویژگی‌های عنوان، سبک، کانال پخش‌کننده، دسته (category) و رده‌بندی سنی استفاده شده است. مقاله [۴۰]، از ویژگی‌های ثابتی شامل نمایه کاربر (نام کاربری، نام، سن و جنسیت کاربر) و ترجیح ثابت کاربر (زبان زیرنویس و زبان صدایی که کاربر ترجیح می‌دهد، نوع محتوای موردعلاقه، بازیگر موردعلاقه و کارگردان موردعلاقه) استفاده کرده است. مقاله [۴۴] بر روی انتخاب ویژگی‌های مناسب با استفاده از تخصیص نهان دیریکله تمرکز کرده است. در مقاله [۸۳] به استخراج ویژگی‌های اشیا موجود مانند چهره‌ها و صحنه‌ها، صداها و کلمات موجود می‌پردازد. در مقاله [۸۴] ویژگی‌های زمانی و مکانی هر قطعه به همراه ویژگی مربوط به رنک به‌کاررفته درصحنه‌های مختلف را استخراج می‌کند.

برخی از مقاله‌ها بر روی ایجاد تنوع در توصیه‌ها تمرکز کرده‌اند. نمونه‌ای از این مقاله‌ها، مقاله [۱۱] است. مقاله [۲۷] نیز بر روی ایده اکتشاف که باعث ایجاد تنوع در توصیه می‌شود تمرکز کرده است.

تعدادی از مقاله‌ها، از کلیدواژه‌ها به‌عنوان بردار ویژگی استفاده کرده‌اند. در برخی دادگان برای هر فیلم خلاصه اثر نیز موجود است. می‌توان از خلاصه‌های موجود، کلیدواژه استخراج کرد و سپس از رویکردهای ارائه‌شده در این مقاله‌ها بهره برد. مقاله‌های [۷] و [۹] ازجمله مقالاتی هستند که از اطلاعات کلیدواژه‌ها استفاده کرده‌اند.

تعدادی از مقاله‌ها از تگ‌ها در طراحی سیستم توصیه‌گر استفاده کرده‌اند. به‌عنوان‌مثال در مقاله [۱۲] ایده پردازش معنایی تگ‌ها ارائه شده است. در مقاله [۳۱]، از word2vec برای استخراج اطلاعات معنایی از تگ‌ها استفاده شده است. در مقاله [۳۰]، از TF-IDF برای یافتن تگ‌های مهم‌تر و مؤثرتر استفاده شده است. مقاله [۲۲] نیز از ایده برچسب استفاده کرده است؛ اما تعریف برچسب در این مقاله توسط کاربر بوده است.

در برخی مقاله‌ها، از ایده‌های حوزه پردازش زبان طبیعی استفاده شده است. به‌عنوان‌مثال، در مقاله [۱۳] و مقاله [۱۴]، الگوریتم‌های داک‌تووک و TD-IDF بر روی متن داستان فیلم اعمال‌شده است. در صورت عدم وجود متن داستان می‌توان این روش‌ها را روی خلاصه‌ای از فیلم اعمال کرد. علاوه بر داک‌تووک سایر بازنمایی‌های قوی‌تر معنایی نیز می‌تواند در این بخش به کار رود.

چالش‌های دیگری در زمینه پیشنهاد برنامه به کاربر وجود دارد. ممکن است فیلمی به کاربر پیشنهاد شود که بسیار شبیه به سلیقه کاربر است، اما امتیاز پایینی دارد. یا این‌که فیلمی با داستان مشابه ولی با سبکی متفاوت به کاربر پیشنهاد شود؛ مثلاً فیلمی که به طنز از روی داستان فیلم دیگری ساخته شده است. مقاله [۱۳] به حل این چالش‌ها پرداخته است.

دسته‌ای از مقاله‌ها نیز ایده جدیدی در بخش یادگیری ماشین ارائه داده‌اند. به‌عنوان‌مثال، مقاله [۱۴]، ایده استفاده از جنگل تصادفی را ارائه داده است. مقاله [۳۴] از طبقه‌بندی بیز ساده استفاده می‌کند که از روش‌های متداول حوزه سیستم توصیه‌گر است. مقاله [۳۵] از شبکه‌های بیزین استفاده کرده است. در مقاله [۴۰] شبکه عصبی به‌کاررفته است که از مدل‌های روز می‌باشد. مقاله [۸۷] از شبکه عصبی پیچشی و متادیتاهای موجود در برنامه استفاده کرده است.

برخی از مقاله‌ها به علاقه‌مندی کاربر به یک شبکه تلویزیونی پرداخته‌اند. علاقه‌مندی کاربر به یک شبکه مفهومی کلی‌تر از علاقه‌مندی به یک برنامه است. نمونه‌ای از این مقاله‌ها، مقاله [۳۷] است. این مقاله به این موضوع پرداخته است که در بازه‌های زمانی علاقه‌مندی کاربر تفاوت می‌کند. مثلاً در ایام خاص سال بر اساس مناسبت‌ها علاقه‌مندی خاصی مطرح است.

پایه اصلی توصیه در برخی از سیستم‌ها، استفاده از اطلاعات شبکه‌های اجتماعی است. این روش‌ها به‌شرطی کاربردی هستند که این اطلاعات در سیستم موجود باشد. نمونه‌ای از این مقاله‌ها، مقاله [۱۵] و [۴۲] است.

تعداد زیادی از مقاله‌های حوزه موسیقی، بر روی محتوای صوتی موسیقی تمرکز کرده‌اند و به استخراج ویژگی‌های صوتی و به دست آوردن بازنمایی از این ویژگی‌ها پرداخته‌اند. مقاله‌های [۱۷, ۱۸, ۱۹, ۲۰, ۲۳, ۲۴, ۲۷, ۲۸, ۳۲, ۸۴, ۸۶] از این دسته هستند.

برخی از پژوهش‌ها در زمینه تعبیه اقلام صورت گرفته است که حجم داده خیلی زیادی از تاریخچه رفتارها موردنیاز است. که این حجم داده در دسترس ما نیست. مقاله [۲۶] از این دسته است.

حالت آگاه از دنباله که در تغییر سلیقه کاربر وجود دارد یکی دیگر

از موضوعات مورد تمرکز در این حوزه است. در این روش‌ها، به حافظه نزدیک اهمیت بیشتری داده می‌شود. مقاله [۲۹] و [۳۰] و [۴۵] از این دسته هستند.

برخی از مقاله‌ها، رویکرد آگاه از زمینه‌دارند. نمونه‌ای از این مقاله‌ها، مقاله [۲۱] است. در این مقاله فعالیت کاربر درک می‌شود و با توجه به آن، به کاربر موسیقی پیشنهاد می‌شود. درنتیجه مثلاً موسیقی‌ای که در هنگام کار به کاربر پیشنهاد می‌شود با موسیقی زمان تفریح متفاوت است.

تمرکز اصلی برخی از مقالات بر روی روش‌های مبتنی نشست است. مقاله [۳۳] از این دسته است.

برخی از مقاله‌ها، بر روی رفتارهای گروهی کاربران تمرکز دارند و به گروهی از کاربران پیشنهاد می‌دهند. نمونه‌ای از این مقاله‌ها، مقاله [۳۵] و [۳۶] است.

۸- خلاصه و جمع‌بندی

این پژوهش باهدف بررسی جامع سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای و با تمرکز ویژه بر رویکردهای مبتنی بر محتوا، به تحلیل عمیق ۴۷ مقاله علمی و مطالعه معماری سیستم‌های شرکت‌های پیشرو در این صنعت پرداخت. تحلیل ادبیات موضوع نشان می‌دهد که حوزه سیستم‌های توصیه‌گر، مسیری تکاملی و پرشتاب را از مدل‌های سنتی به سمت معماری‌های پیچیده و چندوجهی طی کرده است. این مسیر، صرفاً یک پیشرفت الگوریتمی نبوده، بلکه بیانگر تحولی بنیادین در درک مفهوم «محتوا» و «زمینه» در شخصی‌سازی تجربه کاربر است.

یکی از کلیدی‌ترین نتایج این بررسی، تأیید گذار از مدل‌های خالص به سمت سیستم‌های ترکیبی به‌عنوان راهکار غالب و مؤثر در این حوزه است. در حالی که روش‌های پالایش مشارکتی در شناسایی الگوهای رفتاری کاربران قدرتمند هستند، با چالش‌هایی نظیر «شروع سرد» و «پراکندگی داده»[1] مواجه‌اند. از سوی دیگر، رویکردهای مبتنی بر محتوا، با تحلیل ویژگی‌های ذاتی اقلام، این شکاف‌ها را به خوبی پوشش می‌دهند و قابلیت توضیح‌پذیری بالاتری را فراهم می‌آورند. موفقیت شرکت‌هایی مانند نتفلیکس، گواهی بر کارآمدی ترکیب هوشمندانه این دو رویکرد است که در آن، از پالایش مشارکتی برای درک سلایق جامعه کاربران و از تحلیل محتوا برای توصیه‌های دقیق، متنوع و قابل توجیه بهره گرفته می‌شود.

دومین یافته مهم، بازتعریف و تعمیق مفهوم «محتوا» است. در پژوهش‌های اولیه، تحلیل محتوا به فراداده‌های ساده‌ای مانند سبک، بازیگران یا کلمات کلیدی محدود بود. اما امروزه، با پیشرفت در حوزه‌های پردازش زبان طبیعی، بینایی ماشین و پردازش سیگنال، تحلیل محتوا به لایه‌های عمیق‌تری نفوذ کرده است. مقالات موردبررسی نشان می‌دهند که استفاده از تکنیک‌هایی مانند word2vec و Doc2Vec برای استخراج بازنمایی معنایی از خلاصه داستان یا تگ‌های کاربران، و همچنین به‌کارگیری شبکه‌های عصبی کانولوشنی برای تحلیل مستقیم سیگنال صوتی موسیقی یا فریم‌های ویدئویی، به یک استاندارد برای درک دقیق‌تر اقلام تبدیل شده است. این تکامل، سیستم‌ها را قادر ساخته تا شباهت‌های ظریف و غیربدیهی میان اقلام را کشف کرده و از دام «بیش‌تخصصی شدن» رها شوند.

سومین روند کلیدی، حرکت به سوی سیستم‌های توصیه‌گر آگاه از زمینه و پویا است. پژوهش‌های نوین دریافته‌اند که سلیقه کاربر یک مفهوم ثابت نیست، بلکه تحت تأثیر عوامل متعددی مانند زمان روز، مکان، فعالیت جاری (مانند ورزش یا مطالعه) و حتی همراهان کاربر (در سناریوهای تماشای گروهی تلویزیون) تغییر می‌کند. مدل‌هایی که این اطلاعات زمینه‌ای را ادغام می‌کنند، مانند مدل‌های مبتنی بر زنجیره مارکوف برای درک توالی رفتار کاربر یا پروفایل‌سازی وابسته به زمان برای تفکیک اعضای خانواده، توانسته‌اند دقت و مقبولیت توصیه‌ها را به شکل چشمگیری افزایش دهند. این رویکرد، مسئله توصیه را از «چه چیزی را پیشنهاد دهیم؟» به «چه چیزی را در این لحظه و این شرایط خاص پیشنهاد دهیم؟» ارتقا داده است

درنهایت، بررسی سیستم‌های صنعتی مانند یوتیوب و اینستاگرام نشان داد که مقیاس‌پذیری و کارایی، چالش اصلی در دنیای واقعی است. معماری دو مرحله‌ای «تولید کاندیدا و رتبه‌بندی»[2] یک الگوی رایج و موفق برای مواجهه با این چالش است. در این معماری، ابتدا یک الگوریتم سریع و نسبتاً ساده، از میان میلیون‌ها قلم، چند صد کاندیدای مرتبط را استخراج می‌کند و سپس یک مدل پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر (معمولاً مبتنی بر یادگیری عمیق)، این کاندیداها را با دقت بالا رتبه‌بندی می‌نماید. این الگو، تعادلی هوشمندانه میان دقت و هزینه‌های محاسباتی برقرار می‌کند.

در جمع‌بندی، واضح است که آینده سیستم‌های توصیه‌گر چندرسانه‌ای در گروی توسعه مدل‌های ترکیبی، چندوجهی، آگاه از زمینه و مقیاس‌پذیر قرار دارد. چالش‌های پیش رو دیگر صرفاً به بهبود دقت محدود نمی‌شوند، بلکه ایجاد تعادل میان دقت و تنوع، افزایش شفافیت و توضیح‌پذیری مدل‌های یادگیری عمیق، تضمین

[1] Data Sparsity

[2] Candidate Generation & Ranking

انصاف و پرهیز از سوگیری و توسعه رابط‌های کاربری تعاملی و مکالمه‌ای، افق‌های تحقیقاتی آینده را ترسیم می‌کنند. موفقیت در این حوزه، نیازمند هم‌افزایی میان تحلیل عمیق محتوا، درک پویای رفتار کاربر و مهندسی سیستم‌های کارآمد است تا تجربه‌ای غنی، مفید و رضایت‌بخش برای کاربر نهایی فراهم آید.

سپاسگزاری

از شرکت آپاسای داده سیستم که ما را در اجرای تحقیق یاری کرده‌اند و حمایت مالی پژوهشی را بر عهده داشته‌اند سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Deldjoo, Y., et al. Multimedia recommender systems. in Proceedings of the 12th ACM Conference on Recommender Systems. 2018.

[2] Deldjoo, Y., et al. MMTF-14K: a multifaceted movie trailer feature dataset for recommendation and retrieval. in Proceedings of the 9th ACM Multimedia Systems Conference. 2018.

[3] Chong, D., Deep dive into netflix's recommender system. 2020, Medium.

[4] Amato, F., et al., SOS: A multimedia recommender System for Online Social networks. Future generation computer systems, 2019. 93: p. 914-923.

[5] Liang, T., et al., A hybrid recommendation model based on estimation of distribution algorithms. Journal of Computational Information Systems, 2014. 10(2): p. 781-788.

[6] Chen, Y.-L., Y.-H. Yeh, and M.-R. Ma, A movie recommendation method based on users' positive and negative profiles. Information Processing & Management, 2021. 58(3): p. 102531.

[7] Pradeep, N., et al., Content based movie recommendation system. International Journal of Research in Industrial Engineering, 2020. 9(4): p. 337-348.

[8] Singh, R.H., et al., Movie recommendation system using cosine similarity and KNN. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2020. 9(5): p. 556-559.

[9] Almeida, M.S. and A. Britto. MOEA-RS: A Content-Based Recommendation System Supported by a Multi-objective Evolutionary Algorithm. in International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing. 2020. Springer.

[10] Meel, P., et al. Movie Recommendation Using Content-Based and Collaborative Filtering. in International Conference on Innovative Computing and Communications. 2021. Springer.

[11] Singla, R., et al. FLEX: A Content Based Movie Recommender. in 2020 International Conference for Emerging Technology (INCET). 2020. IEEE.

[12] Sottocornola, G., et al. Towards a deep learning model for hybrid recommendation. in Proceedings of the International Conference on Web Intelligence. 2017.

[13] Yin, H., et al., Dynamic user modeling in social media systems. ACM Transactions on Information Systems (TOIS), 2015. 33(3): p. 1-44.

[14] Albanese, M., et al., A multimedia recommender system. ACM Transactions on Internet Technology (TOIT), 2013. 13(1): p. 1-32.

[15] Rajasekar, R., Radhakrishnan, N., Sridar, K., Viji, C., Mohanraj, M., Kalpana, C., & Rajkumar, N. (2025). Intelligent movie recommendation system. Salud, Ciencia y Tecnología-Serie de Conferencias, (4), 1438.

[16] Shashaani, S. (2024, October). Explainability in music recommender system. In Proceedings of the 18th ACM Conference on Recommender Systems (pp. 1395-1401).

[17] Van Den Oord, A., S. Dieleman, and B. Schrauwen. Deep content-based music recommendation. in Neural Information Processing Systems Conference (NIPS 2013). 2013. Neural Information Processing Systems Foundation (NIPS).

[18] Wang, X. and Y. Wang. Improving content-based and hybrid music recommendation using deep learning. in Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia. 2014.

[19] Liu, N.-H., Comparison of content-based music recommendation using different distance estimation methods. Applied intelligence, 2013. 38(2): p. 160-174.

[20] Bogdanov, D., et al., Semantic audio content-based music recommendation and visualization based on user preference examples. Information Processing & Management, 2013. 49(1): p. 13-33.

[21] Wang, X., D. Rosenblum, and Y. Wang. Context-aware mobile music recommendation for daily activities. in Proceedings of the 20th ACM international conference on Multimedia. 2012.

[22] Barragáns-Martínez, A.B., et al., Exploiting social tagging in a web 2.0 recommender system. IEEE Internet Computing, 2010. 14(6): p. 23-30.

[23] Chiliguano, P. and G. Fazekas. Hybrid music recommender using content-based and social information. in 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2016. IEEE.

[24] Chou, S.-Y., et al. Addressing cold start for next-song recommendation. in Proceedings of the 10th ACM Conference on Recommender Systems. 2016.

[25] R. Turrin, A.C., R. Pagano, M. Quadrana, and P. Cremonesi, Large scale music recommendation, in LSRS. 2015.

[26] Vasile, F., E. Smirnova, and A. Conneau. Meta-prod2vec: Product embeddings using side-information for recommendation. in Proceedings of the 10th ACM Conference on Recommender Systems. 2016.

[27] Wang, X., et al., Exploration in interactive personalized music recommendation: a reinforcement learning approach. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM), 2014. 11(1): p. 1-22.

[28] Rao, A., et al. Supervised Feature Learning for Music Recommendation. in International Symposium on Signal Processing and Intelligent Recognition Systems. 2020. Springer.

[29] Hosseinzadeh Aghdam, M., et al. Adapting recommendations to contextual changes using hierarchical hidden markov models. in Proceedings of the 9th ACM Conference on Recommender Systems. 2015.

[30] Jannach, D., L. Lerche, and I. Kamehkhosh. Beyond" hitting the hits" Generating coherent music playlist continuations with the right tracks. in Proceedings of the 9th ACM Conference on Recommender Systems. 2015.

[31] Vall, A., et al. A hybrid approach to music playlist continuation based on playlist-song membership. in Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing. 2018.

[32] Vall, A., et al. Music playlist continuation by learning from hand-curated examples and song features: Alleviating the cold-start problem for rare and out-of-set songs. in Proceedings of the 2nd Workshop on Deep Learning for Recommender Systems. 2017.

[33] Gharahighehi, A. and C. Vens, Personalizing diversity versus accuracy in session-based recommender systems. SN Computer Science, 2021. 2(1): p. 1-12.

[34] Engelbert, B.B., M.B.; Kruthoff-Bruwer, R.; Morisse, K. A user supporting personal video recorder by implementing a generic Bayesian classifier based recommendation system. in Proceedings of

[54] Metaxiotis, K., et al., Decision support through knowledge management: the role of the artificial intelligence. Information Management & Computer Security, 2003.

[55] Wondercube® TV Broadcasting GSD/HD digital broadcast. Available from: http://www.jvc.slak.si/pdf/tv%20broadcasting.pdf.

[56] Recommendation Systems: Applications, Examples & Benefits. Available from: https://research.aimultiple.com/recommendation-system/#amazoncom.

[57] Optimizely. Available from: https://aimultiple.com/.

[58] CRM. Available from: https://www.cnbc.com/quotes/CRM.

[59] Clarifai. Available from: https://www.clarifai.com/.

[60] Jinni. Available from: http://www.jinni.com/.

[61] RottenTomatoes. Available from: www.rottentomatoes.com.

[62] MovieLens 100K Dataset. Available from: https://grouplens.org/datasets/movielens/100k/.

[63] Criticker. Available from: http://www.criticker.com/.

[64] Bestsimilar. Available from: bestsimilar.com.

[65] PEACH. 2021 [cited 2021 1 June 2021]; Available from: https://peach.ebu.io/.

[66] Sidana, S., Recommendation systems for online advertising. 2018, Université Grenoble Alpes.

[67] Netflix Prize Data Set. Available from: https://academictorrents.com/details/9b13183dc4d60676b773c9e2cd6de5e5542cee9a.

[68] Eliashberg, J., et al., Demand-driven scheduling of movies in a multiplex. International Journal of Research in Marketing, 2009. 26(2): p. 75-88.

[69] Zarandi, M.H.F., et al., A state of the art review of intelligent scheduling. Artificial Intelligence Review, 2020. 53(1): p. 501-593.

[70] Brown, D.E., J.A. Marin, and W.T. Scherer, A survey of intelligent scheduling systems, in Intelligent Scheduling Systems. 1995, Springer. p. 1-40.

[71] Horen, J.H., Scheduling of network television programs. Management Science, 1980. 26(4): p. 354-370.

[72] Welbank, M., A review of knowledge acquisition techniques for expert systems. 1983: Martlesham Consultancy Services Martlesham Heath, Ipswich.

[73] Piroozfard, H., K.Y. Wong, and A. Hassan, A hybrid genetic algorithm with a knowledge-based operator for solving the job shop scheduling problems. Journal of Optimization, 2016. 2016.

[74] Mitchell, T.M., Machine learning. 1997.

[75] Kocsis, T., et al., Case-Based Reasoning system for mathematical modelling options and resolution methods for production scheduling problems: Case representation, acquisition and retrieval. Computers & Industrial Engineering, 2014. 77: p. 46-64.

[76] Panaggio, M.J., et al., Prediction and Optimal Scheduling of Advertisements in Linear Television. arXiv preprint arXiv:1608.07305, 2016.

[77] Ghassemi Tari, F. and R. Alaei, Scheduling TV commercials using genetic algorithms. International Journal of Production Research, 2013. 51(16): p. 4921-4929.

[78] AlShami, H., Optimising television programming and scheduling. 2017: Lancaster University (United Kingdom).

[79] A case study of designing TV schedules. Available from: http://www.kr.inf.uc3m.es/wp-content/uploads/2019/12/AI4SE-Meer.pdf.

[80] Le, Q. and T. Mikolov. Distributed representations of sentences and documents. in International conference on machine learning. 2014. PMLR.

the 2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops). 2011.

[35] Quan, J.-C.C., S.-B, A Hybrid Recommender System Based on AHP That Awares Contexts with Bayesian Networks for Smart TV, in International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems (HAIS 2014). 2014.

[36] Oh, J.S., Y.; Kim, J.; Humayoun, M.; Park, Y.H.; Yu, H. Time-dependent user profiling for TV recommendation. in Proceedings of the 2nd International Conference on Cloud and Green Computing and 2nd International Conference on Social Computing and Its Applications, CGC/SCA 2012. 2012.

[37] Turrin, R.C., A.; Cremonesi, P.; Pagano, R. Time-based TV programs prediction. in Proceedings of the 1st Workshop on Recommender Systems for Television and Online Video (RecSysTV) 2014. 2014.

[38] da Silva, F.S., L.G.P. Alves, and G. Bressan, Personal TVware: an infrastructure to support the context-aware recommendation for personalized digital TV. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2012. 4(2): p. 131.

[39] Zibriczky, D., et al. Personalized recommendation of linear content on interactive TV platforms: beating the cold start and noisy implicit user feedback. in UMAP workshops. 2012.

[40] Song, S., H. Moustafa, and H. Afifi, Advanced IPTV services personalization through context-aware content recommendation. IEEE Transactions on Multimedia, 2012. 14(6): p. 1528-1537.

[41] Chaudhry, M., et al. Heterogeneous information network based TV program recommendation. in Proceedings of the 16th International Symposium on Advanced Intelligent Systems. 2015.

[42] Barraza-Urbina, A., et al., Using social media data for online television recommendation services at RTÉ Ireland. 2015.

[43] Hromic, H., et al., Event panning in a stream of big data. Research Day 2013 Schedule, 2012: p. 44.

[44] Yuan, J., et al., Context-aware LDA: Balancing relevance and diversity in TV content recommenders. 2015.

[45] Symeonidis, P., et al. Recommending the video to watch next: an offline and online evaluation at YOUTV. de. in Fourteenth ACM conference on recommender systems. 2020.

[46] Basilico, J. Recent Trends in Personalization: A Netflix Perspective. 2019. ICML.

[47] Covington, P., J. Adams, and E. Sargin. Deep neural networks for youtube recommendations. in Proceedings of the 10th ACM conference on recommender systems. 2016.

[48] Implementing the YouTube Recommendations Paper in TensorFlow — Part 1. Available from: https://theiconic.tech/implementing-the-youtube-recommendations-paper-in-tensorflow-part-1-d1e1299d5622.

[49] Krawiec, T., The Amazon Recommendations Secret to Selling More Online. Rejoiner http://rejoiner. com/resources/amazon-recommendations-secret-selling-online/website visited, 2018: p. 1-18.

[50] Mangalindan, J. Amazon's recommendation secret. 2012; Available from: https://fortune.com/2012/07/30/amazons-recommendation-secret/.

[51] Linden, G., B. Smith, and J. York, Amazon. com recommendations: Item-to-item collaborative filtering. IEEE Internet computing, 2003. 7(1): p. 76-80.

[52] Baatarjav, E.-A., S. Phithakkitnukoon, and R. Dantu. Group recommendation system for facebook. in OTM Confederated International Conferences" On the Move to Meaningful Internet Systems". 2008. Springer.

[53] Facebook recommender system. Available from: https://github.com/facebookresearch/dlrm.

[81] He, X., et al. Neural collaborative filtering. in Proceedings of the 26th international conference on world wide web. 2017.

[82] Cheng, H.-T., et al. Wide & deep learning for recommender systems. in Proceedings of the 1st workshop on deep learning for recommender systems. 2016.

[83] Roshdy, Youssef, and Mennat Allah Hassan. "An Efficient Content-Based Video Recommendation." Journal of Computing and Communication 1.1 (2022): 48-64.

[84] Markapudi, Baburao, et al. "Content-based video recommendation system (CBVRS): a novel approach to predict videos using multilayer feed forward neural network and Monte Carlo sampling method." Multimedia Tools and Applications 82.5 (2023): 6965-6991.

[85] Ali, Shaik Faizan Roshan, et al. "Recommender System using Audio and Lyrics." 2023 4th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC). IEEE, 2023.

[86] Burch, Charats, Robert Sprowl, and Mehmet Ergezer. "A multi-user virtual world with music recommendations and mood-based virtual effects." Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vol. 37. No. 13. 2023.

[87] Dudekula, Khasim Vali, et al. "Convolutional Neural Network-Based Personalized Program Recommendation System for Smart Television Users." Sustainability 15.3 (2023): 2206.

[88] Boeker, Maximilian and Aleksandra Urman. "An Empirical Investigation of Personalization Factors on TikTok." Proceedings of the ACM Web Conference 2022 (2022): n. pag.

[89] Liu, Zhuoran, et al. "Monolith: real time recommendation system with collisionless embedding table." arXiv preprint arXiv:2209.07663 (2022).

[90] Ansari, Farooq. The Spotify Audio Features Hit Predictor Dataset (1960-2019). 1, 4TU.Centre for Research Data, 6 Apr. 2020, doi:10.4121/UUID:D77E74B0-66BC-47AC-8B25-5796D3084478.

[91] Moura, Luan; Fontelles, Emanuel; Sampaio, Vinicius; França, Mardônio (2020), "Music Dataset: Lyrics and Metadata from 1950 to 2019", Mendeley Data, V2, doi: 10.17632/3t9vbwxgr5.2

[92] Deldjoo, Y., Schedl, M., Hidasi, B., Wei, Y., He, X. (2022). Multimedia Recommender Systems: Algorithms and Challenges. In: Ricci, F., Rokach, L., Shapira, B. (eds) Recommender Systems Handbook. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2197-4_25

[93] Deldjoo, Yashar and Schedl, Markus and Cremonesi, Paolo and Pasi, Gabriella, "Recommender Systems Leveraging Multimedia Content", ACM Computing Surveys, 2020, 53, 5,

[94] A Survey of Multimedia Recommender Systems: Challenges and Opportunities Mouzhi Ge (1Faculty of Informatics, Masaryk University, Brno 60200, Czech Republic) and Fabio Persia (2Faculty of Computer Science, Free University of Bozen-Bolzano, Bozen-Bolzano, 39100, Italy) International Journal of Semantic Computing 2017 11:03, 411-428

[95] Jiang, Y., Xia, L., Wei, W., Luo, D., Lin, K., & Huang, C. (2024, October). Diffmm: Multi-modal diffusion model for recommendation. In Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Multimedia (pp. 7591-7599).

[96] Malitesta, D., Cornacchia, G., Pomo, C., Merra, F. A., Di Noia, T., & Di Sciascio, E. (2025). Formalizing multimedia recommendation through multimodal deep learning. ACM Transactions on Recommender Systems, 3(3), 1-33.

ITRC
ICT Research Institute
(Iran Telecommunication Research Center)

Journal of Information and Communication Technology

Iranian Society of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 238-257

Analyzing the Relationship between the Digital Economy and the GDP of Iran and Malaysia Using Long Short-Term Memory Neural Networks

Mohammad Kazem Sayadi[1*]

[1] ICT Research Institute, Tehran, Iran

Received: 30 September 2025, Revised: 30 November 2025, Accepted: 24 February 2026
Paper type: Research

Abstract

With the increasing growth of digital technologies, examining the role of the digital economy in the growth and structural changes of the macroeconomics has become one of the key policy issues. The main issue of the present study is to examine the effect of digitalization of the economy on the GDP of Iran and Malaysia, and it uses machine learning algorithms, especially neural networks with Multi-Level Long Short-term Memory layers, to model the behavior of GDP in these countries. In this regard, four separate model configurations have been designed and implemented: (1) a hybrid model including classical economic variables (capital and labor) and information and communication technology (ICT) indicators, (2) a model based solely on ICT indicators, (3) a model based solely on classical economic variables, and (4) a hybrid reduced model. The models were trained independently for each country, and loss function analysis, convergence point determination, and forecast accuracy measurement with an error threshold of 0.1 were used to evaluate their performance. The results showed that digitalization, especially through infrastructure such as fixed broadband internet, mobile network coverage, and international broadband usage, is significantly associated with GDP. The hybrid model that simultaneously uses conventional and digital variables performed best in Iran and Malaysia, indicating that digitalization by itself cannot replace conventional factors of production, but plays a complementary and reinforcing role in the growth process. Accordingly, policymakers seeking to increase economic growth and productivity should pursue the development of digital economy infrastructure alongside investment in human and physical capital.

Keywords: Digital economy; Machine learning; Artificial neural networks; Long short-term memory.

[*] Corresponding Author's email: mk.sayadi@itrc.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۲۳۸ الی ۲۵۷

تحلیل ارتباط اقتصاد دیجیتال و تولید ناخالص داخلی برای کشورهای ایران و مالزی با استفاده از شبکه‌های عصبی کوتاه‌نگر بلندحافظه

محمدکاظم صیادی[1*]

[1] پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با رشد فزاینده فناوری‌های دیجیتال، بررسی نقش اقتصاد دیجیتال در رشد و تحولات ساختاری اقتصاد کلان به یکی از موضوعات کلیدی سیاست‌گذاری تبدیل شده است. مسئله اساسی پژوهش حاضر بررسی اثر دیجیتالی‌شدن اقتصاد بر تولید ناخالص داخلی کشورهای ایران و مالزی است و از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی با لایه‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه، برای مدل‌سازی رفتار تولید ناخالص داخلی در این دو کشور بهره گرفته است. در این راستا، چهار پیکربندی مجزای مدل طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند: (۱) مدلی ترکیبی شامل متغیرهای اقتصادی متعارف (سرمایه و نیروی کار) و شاخص‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات (فاوا)، (۲) مدلی صرفا مبتنی بر شاخص‌های فاوا، (۳) مدلی صرفا بر پایه متغیرهای اقتصادی متعارف، و (۴) مدل تقلیل‌یافته ترکیبی. آموزش مدل‌ها برای این دو کشور به‌طور مستقل انجام گرفته و از تحلیل توابع زیان، تعیین نقطه همگرایی، و سنجش دقت پیش‌بینی با آستانه خطای ۰٫۱ برای ارزیابی عملکرد آن‌ها استفاده شده است. نتایج نشان دادند که دیجیتالی‌شدن، به‌ویژه از طریق زیرساخت‌هایی مانند اینترنت پهن‌باند ثابت، پوشش شبکه‌های موبایل، و استفاده از پهنای باند بین‌المللی، با تولید ناخالص داخلی در ارتباط معناداری قرار دارد. مدل ترکیبی که همزمان از متغیرهای متعارف و دیجیتال بهره می‌برد، در ایران و مالزی بهترین عملکرد را داشت و این امر نشان داد که دیجیتالی‌شدن به‌خودی‌خود نمی‌تواند جایگزین عوامل تولید متعارف شود، اما نقشی مکمل و تقویت‌کننده در فرآیند رشد ایفا می‌کند. بر این اساس، سیاست‌گذاری که در پی افزایش رشد و بهره‌وری اقتصادی هست، باید توسعه زیرساخت‌های اقتصاد دیجیتال را در کنار سرمایه‌گذاری در سرمایه انسانی و فیزیکی دنبال کنند.

کلیدواژگان: اقتصاد دیجیتال؛ یادگیری ماشین؛ شبکه‌های عصبی مصنوعی؛ کوتاه‌نگرهای بلندحافظه.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: mk.sayadi@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

اقتصاد دیجیتال به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابعاد تحول ساختاری اقتصاد جهانی، طی دهه‌های اخیر با شتابی بی‌سابقه توسعه یافته و نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری الگوهای جدید اقتصادی ایفا می‌کند. این تحول نه محصولی ناگهانی، بلکه نتیجه‌ی فرایند تدریجی گذار از موج‌های متوالی دیجیتالی‌شدن است که به ظهور مفاهیمی چون انقلاب صنعتی چهارم و اقتصاد پلتفرمی منجر شده است [۱]. بنا به تعریف باخت و هیکس [۲] برای اقتصاد دیجیتال سه لایه تعریف شده است: لایه هسته که شامل زیرساختهای ارتباطی و اطلاعاتی، نرم‌افزارها و سخت‌افزارهاست، لایه میانی یا دیجیتال زادها که شامل کسب و کارهایی است که به واسطه دیجیتالی شدن بوجود آمده اند، و لایه سوم یا لایه گسترده که شامل بهره گیری از فناوری اطلاعات و ارتباطات در کسب و کارهای عمودی نظیر سلامت، کشاورزی، حمل و نقل، معدن، دولت و ... است. اقتصاد دیجیتال بازتعریفی از نظریه‌های متعارف اقتصادی در شرایط جدید فناورانه است که در آن بسیاری از اصطکاک‌های سنتی بازار به‌شدت کاهش یافته‌اند [۳]

ریشه‌های تاریخی اقتصاد دیجیتال به توسعه فناوری‌های رایانه‌ای در دوران پس از جنگ جهانی دوم و پیدایش اینترنت بازمی‌گردد که به‌تدریج زمینه شکل‌گیری کسب‌وکارهای پلتفرمی و بازارهای دیجیتال امروزی را فراهم کرده است[۴ و ۵]. بررسی تجربه کشورهای مختلف در [۶] نشان می‌دهد که منافع حاصل از اقتصاد دیجیتال اثری قابل توجه بر اقتصاد آنها داشته است. [۷] در تحقیقی توصیفی، به بر بررسی اقتصاد دیجیتال و تأثیر آن بر کسب‌وکارها و کاربران و همچنین ارزیابی فرصت‌های دسترسی آسان و سریع به محصولات و خدماتی که می‌تواند منجر به افزایش کارایی و بهره‌وری شود پرداخته اند. [۸] تأیید می‌کند که دیجیتالی شدن به طور قابل توجهی توسعه اقتصادی با کیفیت بالا را افزایش می‌دهد، نه تنها از طریق بهبود مستقیم بهره‌وری، بلکه با تحریک نوآوری سبز، که به عنوان یک واسطه حیاتی در دستیابی به رشد پایدار عمل می‌کند. هرچند اقتصاد دیجیتال فرصت‌های جدیدی برای رشد پایدار مبتنی بر نوآوری [۹]، گسترش نوآوری‌های سبز[۱۰]، بهبود بهره‌وری [۱۱]، جهانی‌شدن [۱۲]، و رفاه مصرف‌کننده [۱۳] فراهم ساخته است اما همزمان نگرانی‌هایی در خصوص تمرکز بازار، تبعیض اطلاعاتی، نقض حریم خصوصی و نابرابری‌های نوظهور نیز افزایش یافته است [۱۳]. از این رو، مطالعه دقیق و بومی‌شده اثرات اقتصاد دیجیتال به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، همچنان به‌عنوان یک حوزه کلیدی پژوهشی باقی مانده است. این تحولات به نفی نظریات اقتصادی پیشین نظیر [۱۴] تا [۱۷] منجر نمی‌شوند، بلکه مستلزم بازخوانی آن‌ها در محیطی جدید می‌باشد.

با این حال، آثار اقتصاد دیجیتال در میان کشورها به‌طور یکنواخت توزیع نشده و شکاف فزاینده‌ای میان اقتصادهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه در بهره‌برداری از ظرفیت‌های این حوزه مشاهده می‌شود. به‌ویژه، کشورهایی که زیرساخت‌های ارتباطی ضعیف‌تر و نظام مهارتی کمتر انطباق‌یافته دارند، در معرض مخاطراتی چون گسترش نابرابری، حذف مشاغل کم‌مهارت و تمرکز ثروت قرار می‌گیرند [۱۸]؛ همچنین در پژوهش‌هایی چون [۱۹] رابطه منفی میان اقتصاد دیجیتال و رشد اقتصادی تایید شده است.

با وجود رشد چشمگیر فناوری‌های دیجیتال، همچنان شکاف قابل‌توجهی در شناخت جامع از چگونگی تاثیر اقتصاد دیجیتال بر عملکرد کلان اقتصادی وجود دارد؛ به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه‌ای نظیر ایران که بخش عمده‌ای از تحولات دیجیتال آن در دهه‌های اخیر به وقوع پیوسته است [۲۰ و ۲۱]. بخش قابل توجهی از ادبیات موجود پیرامون نقش فناوری‌های دیجیتال در اقتصاد، عمدتا به صورت پراکنده و ناهماهنگ بوده و در نتیجه به اجماع نظری روشن در خصوص سازوکارهای انتقال این اثرات در سطح کلان منجر نشده است [۲۲]. تعاریف معاصر اقتصاد دیجیتال بر خلق ارزش مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال در سه سطح زیرساختی، بسترهای خدمات دیجیتال و کاربردهای پیشرفته اقتصادی تأکید دارند؛ به‌گونه‌ای که اقتصاد دیجیتال‌شده به‌تدریج جایگزین بسیاری از سازوکارهای سنتی تولید، تجارت و خدمات می‌گردد [۲۲]. این روندهای تحولی، نه تنها پیامدهایی برای سیاست‌های اقتصادی در حوزه‌هایی چون سرمایه‌گذاری، تنظیم مقررات، مالکیت فکری و بازار کار دارند، بلکه موجب بازنگری در بسیاری از نظریه‌های متعارف اقتصادی نیز شده‌اند [۳]. در سطح کلان، همگرایی دیجیتال به‌طور مثبت بر رشد اقتصادی تاثیر می‌گذارد، عمدتا با رشد بهره‌وری نیروی کار فناوری‌های دیجیتال به‌عنوان یک عامل تولید جدید در نظر گرفته می‌شوند که نیروی کار جدید با بهره‌وری و کارایی بالاتر و هزینه‌های کسب‌وکار کمتر ایجاد می‌کند [۲۳]. با این حال، تاثیر تحول دیجیتال بر کشورها و بخش‌ها متفاوت است. اقتصادهای توسعه‌یافته از رشد اقتصادی بالاتر سود می‌برند، ولی اقتصادهای نوظهور از ایجاد شغل سود می‌برند [۲۴]. دلیل اصلی تاثیر متفاوت تحول دیجیتال در ساختارهای اقتصادی کشورها نهفته است. اقتصادهای توسعه‌یافته عمدتا به مصرف داخلی متکی هستند و بخش‌های غیرقابل تجارت در آن‌ها اهمیت می‌یابد. از دیگرسو، در اقتصادهای توسعه‌یافته، دیجیتالی‌شدن بهره‌وری را بهبود می‌بخشد

و تاثیر قابل اندازه‌گیری بر رشد اقتصادی دارد. همچنین، فرآیند تحول دیجیتال ارتباط نزدیکی با مفهوم کلان اقتصادی رقابت دیجیتال دارد [۲۵ و ۲۶].

در ایران نیز طی دو دهه گذشته، رشد قابل‌توجهی در شاخص‌های نفوذ فناوری اطلاعات و ارتباطات ثبت شده است؛ به‌گونه‌ای که میزان کاربران اینترنت طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ افزایشی معادل ۲۲،۵۸۰ درصد را تجربه کرده و ایران را در میان ۲۰ کشور نخست جهان از حیث تعداد کاربران اینترنت قرار داده است. این روند صعودی، همراه با تأکید سیاست‌گذاران در اسناد بالادستی مبنی بر ارتقاء سهم اقتصاد دیجیتال در تولید ناخالص داخلی کشور، ضرورت پرداختن به ابعاد اقتصادی این تحول را دوچندان ساخته است. اگرچه بخش قابل‌توجهی از ادبیات موجود به بررسی ارتباط میان اقتصاد دیجیتال و رشد اقتصادی پرداخته است، نتایج پژوهش‌ها در این زمینه همچنان ناهمگن بوده و گاه یافته‌های متضادی را گزارش می‌کنند برای نمونه [۱۸]، [۱۹] و [۲۷]. این ناهمگونی می‌تواند متأثر از تفاوت در متغیرهای مورد استفاده، روش‌شناسی‌های تحلیلی و شرایط خاص اقتصادی کشورها باشد. افزون بر این، در بسیاری از پژوهش‌های پیشین، به ابعاد نامتقارن و غیرخطی تاثیرات دیجیتالی‌شدن اقتصاد کمتر پرداخته شده است. همچنین از ابزارهای جدید مبتنی بر داده نظیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و ... در این بررسی‌ها استفاده نشده است. با توجه به این نکات می‌توان گفت که این پژوهش در تلاش برای پرکردن این گپ‌ها و باز کردن مسیر جدیدی برای پژوهش‌ها در این زمینه است.

در چنین بستری، مسئله اصلی پژوهش حاضر آن است که آیا دیجیتالی‌شدن اقتصاد در ایران می‌تواند به‌عنوان یک مؤلفه ساختاری در تبیین روندهای کلان اقتصادی ایفای نقش کند و چه میزان از تغییرات تولید ناخالص داخلی ایران را می‌توان به تحولات دیجیتال نسبت داد. به بیان دیگر، این مطالعه می‌کوشد بخشی از شکاف‌های نظری و تجربی موجود را در زمینه ارتباط میان اقتصاد دیجیتال و بازتاب کلان آن در اقتصاد ایران را پوشش دهد. با توجه به اهمیت روزافزون دیجیتالی‌شدن در سیاست‌های توسعه‌ای کشور، این پژوهش می‌تواند ضمن پر کردن بخشی از خلاهای پژوهشی موجود، شواهد تجربی معتبری برای سیاست‌گذاری اقتصادی در عصر دیجیتال فراهم سازد. بنابراین، نظر به شکاف موجود در خصوص آثار اقتصاد دیجیتال بر روندهای کلان اقتصاد ایران، هدف اصلی پژوهش کنونی پاسخ به این پرسش محوری است که آیا گسترش دیجیتالی‌شدن در بلندمدت اثری معنادار و ساختاری بر تولید ناخالص داخلی ایران داشته است؟ به‌طور خاص، این پژوهش به بررسی وجود روابط غیرخطی میان شاخص‌های اقتصاد دیجیتال و تولید ناخالص داخلی در اقتصاد ایران می‌پردازد. افزون بر این، جهت تعمیق تحلیل و مقایسه تطبیقی، کشور مالزی به‌عنوان کشور هم‌تراز منتخب وارد مطالعه شده است. انتخاب مالزی به دلیل برخورداری از شباهت‌های ساختاری اقتصادی با ایران، پیشرفت‌های شاخص در توسعه زیرساخت‌های دیجیتال، دسترسی به داده‌های آماری شفاف و همچنین توصیه‌های سیاستی نهادهای بین‌المللی در زمینه تجربیات موفق دیجیتالی‌شدن در کشورهای در حال توسعه صورت گرفته است. این مقایسه، زمینه ارزیابی جایگاه دیجیتال ایران را در قیاس با یک الگوی موفق منطقه‌ای فراهم می‌سازد.

بدین‌ترتیب پژوهش کنونی به‌صورت زیر ترتیب یافته است. نخست، مقدمه ارائه گردید، سپس به مبانی نظری پرداخته خواهد شد و در ادامه پیشینه پژوهش با در نظر گرفتن پژوهش‌های داخلی و خارجی مطرح می‌شود. در بخش بعد به روش‌شناسی اقتصادی می‌پردازیم و در پی آن برآورد مدل، یافته‌ها و نتیجه‌گیری ارائه خواهند شد.

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در ایران به بررسی نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات (فاوا) و مؤلفه‌های اقتصاد دیجیتال بر رشد اقتصادی پرداخته‌اند. نتایج این مطالعات گرچه عمدتا حاکی از اثرات مثبت دیجیتالی‌شدن بر اقتصاد ایران هستند، اما از نظر روش‌شناسی، دامنه متغیرها و سطح تحلیل تفاوت‌هایی دارند.

محققان با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم، اثر برخی شاخص‌های اقتصاد دیجیتال را بر تولید ناخالص داخلی ایران ارزیابی کرده و دریافتند که برخی سناریوهای تقویت فاوا اثر قابل توجهی بر رشد اقتصادی دارد، در حالی که سناریوهای دیگر تاثیر کمتری نشان می‌دهند [۱۹]. نویسندگان دیگری نیز با استفاده از مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی و داده‌های فصلی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۸ به این نتیجه رسیدند که متغیرهای مرتبط با توسعه اینترنت، تراکنش‌های مالی الکترونیکی، سرمایه و نیروی کار اثر مثبت معناداری بر رشد اقتصادی ایران دارند؛ در حالی که متغیر مجازی تحریم اثر منفی معناداری دارد [۲۸].

در سطح تحلیل ساختاری‌تر، محققین [۲۹] با طراحی یک مدل تکاملی، گذار اقتصاد ایران از اقتصاد منابع به اقتصاد دیجیتال را بررسی کرده و بر نقش تعیین‌کننده دولت در فراهم‌سازی زیرساخت‌های مناسب در این گذار تأکید نمودند. همچنین [۳۰] با بهره‌گیری از رویکرد حسابداری رشد برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ نشان داد که هر یک درصد افزایش سهم فاوا از تولید ناخالص داخلی

منجر به ۰٫۹۳ درصد افزایش در رشد اقتصادی ایران می‌شود و این بخش از طریق آثار سرریز دانش و شبکه می‌تواند فراتر از سهم مستقیم خود بر رشد اثرگذار باشد. از منظر بخشی، [۳۱] نشان داد که سرمایه‌گذاری در فاوا نه تنها به صورت مستقیم تولید صنایع کارخانه‌ای را افزایش می‌دهد بلکه آثار سرریز سرمایه‌گذاری بین صنایع نیز معنادار است. در همین راستا، محققین [۳۲] با استفاده از روش خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی، تاثیر مثبت و معنادار پیامدهای خارجی بخش فاوا را بر صادرات و بخش‌های غیرصادراتی اقتصاد ایران گزارش کردند. در مطالعات مقیاس گسترده‌تر، [۳۳] با تحلیل داده‌های پنل ۵۲ کشور اسلامی طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ نشان دادند که در این کشورها، سرمایه‌های غیرفاوا همچنان بیشترین اثرگذاری را بر رشد اقتصادی داشته‌اند، گرچه آثار فناوری اطلاعات نیز قابل توجه بوده است. با وجود این تلاش‌ها، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های داخلی بر روابط خطی و عمدتا کوتاه‌مدت تمرکز داشته و کمتر به ابعاد غیرخطی، پویایی‌های بلندمدت و مقایسه تطبیقی با سایر کشورهای هم‌تراز پرداخته‌اند؛ خلائی که پژوهش حاضر درصدد پوشش آن است..

در سطح کلان، [۳۴] نشان دادند که تاثیر فناوری‌های دیجیتال بر رشد اقتصادی به سطح توسعه کشورها بستگی دارد؛ به‌گونه‌ای که زیرساخت‌های اینترنتی در هر دو گروه کشور مؤثرند، اما نقش تلفن همراه و اینترنت پهن‌باند ثابت در اقتصادهای در حال گذار و نوآور متفاوت است. یافته‌های آنان بر اهمیت زمینه‌های نهادی و سیاست‌های مکمل در بهره‌برداری از ظرفیت دیجیتال تاکید دارد. به‌طور مشابه، [۳۵] در مطالعه‌ای بر استان‌های چین، با طراحی شاخص ترکیبی اقتصاد دیجیتال، دریافتند که زیرساخت و ادغام دیجیتال بیشترین تاثیر را بر بهره‌وری کل عوامل تولید داشته‌اند.

در مطالعاتی با رویکرد اقتصاد سیاسی و حکمرانی، [۱۸] بر پویایی‌های دوگانه اقتصاد دیجیتال در خلق ارزش و شکل‌گیری ریسک‌های ساختاری از جمله تمرکز بازار، نقض حریم خصوصی و تهدیدهای امنیت ملی تاکید می‌کند و خواستار مداخلات حاکمیتی هوشمند برای تنظیم این فضاست. در همین راستا، [۳۶] با تمرکز بر ۱۷۳ شهر چین طی ۲۰۱۸-۲۰۱۱ نشان دادند که توسعه دیجیتال از طریق تقویت کارآفرینی، همگرایی منطقه‌ای و اثرات سرریز می‌تواند رشد اقتصادی پایدار شهری را ارتقاء دهد، گرچه شدت این اثرات میان مناطق متغیر است.

در مطالعات کشورهای در حال توسعه، [۳۷] در آفریقا، تاثیر متفاوت انواع کاربری دیجیتال (فردی، تجاری و دولتی) را بررسی کرده و نشان دادند که استفاده فردی بیشترین اثر را بر رشد اقتصادی دارد. [۳۸] نیز با بررسی ۵۹ کشور طی ۲۰۱۰-۱۹۹۵ دریافت که سرمایه‌گذاری در فاوا در همه گروه‌های درآمدی اثر مثبت دارد؛ اما تفاوت معناداری میان کشورها یافت نشد و نقش عوامل مکمل همچون سرمایه انسانی و باز بودن تجاری پررنگ‌تر بود.

در سطح کشورهای خاص و منطقه‌ای، محققین [۳۹] در اتحادیه اروپا رابطه مثبت و معنادار میان فاوا و رشد اقتصادی را با مدل‌سازی ساختاری تایید کردند و نقش سرمایه انسانی و نوآوری را به‌عنوان کانال‌های انتقال معرفی نمودند. همچنین [۴۰] در مطالعه‌ای روی کشورهای بریکس نشان دادند که فناوری اطلاعات، سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی و جهانی‌شدن در تعامل با یکدیگر رشد اقتصادی را تقویت می‌کنند و اهمیت آزادسازی بخش فناوری را برجسته کردند.

در حوزه توسعه اجتماعی-اقتصادی، پژوهشگران [۴۱] با بهره‌گیری از رویکرد قابلیت‌ها در پاکستان، اثرات فاوا را فراتر از رشد اقتصادی، در ابعاد توانمندسازی فردی، تماس اجتماعی و تحولات فرهنگی تحلیل کرده‌اند. [۴۲] نیز نقش رسانه‌های جمعی و فاوا را در کاهش فساد، فقر و نابرابری در کشورهای در حال توسعه بررسی کرده و به دوگانگی ظرفیت‌های فناورانه در کاهش یا تعمیق شکاف‌های اجتماعی پرداخته است. در نهایت، [۴۳] با تمرکز بر صنایع ایالات متحده و هلند، نشان داد که سرمایه‌گذاری در فاوا از مسیر افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید، اثر ضدتورمی در سطح بخشی داشته و بر اهمیت ترکیب فاوا با سرمایه انسانی تأکید کرده است.

با وجود این مطالعات گسترده، همچنان چالش‌های مهمی در تحلیل روابط غیرخطی، پویایی‌های بلندمدت و شناسایی تفاوت‌های ساختاری میان کشورها و مناطق باقی مانده است. به‌ویژه برای کشورهایی نظیر ایران، پژوهش‌های تطبیقی که بتوانند این پیچیدگی‌ها را با بهره‌گیری از روش‌های نوین مدل‌سازی بررسی نمایند، بسیار محدود است؛ خلائی که پژوهش حاضر درصدد پاسخ‌گویی به آن است.

۳- روش‌شناسی

از منظر روش‌شناسی، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی نوع کوتاه‌نگر بلندحافظه، کوشیده است تا پیچیدگی‌های روابط غیرخطی میان متغیرهای اقتصادی را در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ تحلیل کند. بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق در حوزه اقتصاد کلان، با توجه به توان بالای آن‌ها در پردازش حجم عظیم داده‌های اقتصادی و استخراج الگوهای پنهان، فرصت‌های جدیدی برای تحلیل دقیق‌تر پویایی‌های اقتصاد دیجیتال فراهم می‌آورد [۴۴]. در زیربخش‌های

بعدی این موضوع دقیق تر بیان می‌گردد.

۳-۱- پایه‌های آماری

متغیرهای مورد بررسی در بازه ۱۴۰۲-۱۳۸۰ در دو دسته کلی جای می‌گیرند: (الف) شاخص‌های اقتصادی: «تولید ناخالص داخلی»، «موجودی سرمایه» و «نیروی کار»؛ (ب) شاخص‌های اقتصاد دیجیتال: «اشتراک پهن‌باند ثابت »، «اشتراک تلفن ثابت »، «خانوارهای دارای دسترسی به اینترنت در منزل »، «استفاده از پهنای باند بین‌المللی »، «اشتراک تلفن همراه » و «پوشش جمعیتی شبکه‌های موبایل ». انتخاب متغیرهای مناسب برای بازنمایی اقتصاد دیجیتال، از مراحل اساسی طراحی مدل در این پژوهش بوده است. از میان طیف گسترده‌ای از شاخص‌های فاوا، ما شش متغیر کلیدی را انتخاب کردیم که به‌لحاظ نظری، تجربی و آماری، توان تبیینی بالایی برای تاثیر اقتصاد دیجیتال بر تولید ناخالص داخلی دارند. دلایل انتخاب این متغیرها:

- شمول و پوشش فراگیر اقتصاد دیجیتال: متغیرهای انتخاب‌شده نمایانگر سه لایه اساسی اقتصاد دیجیتال- زیرساخت دسترسی، استفاده کاربران، ظرفیت فنی و تکنولوژیک- هستند. این پوشش چندلایه کمک می‌کند تا از یک‌سو وضعیت دسترسی دیجیتال و از سوی دیگر سطح بهره‌برداری فنی در مدل لحاظ شود.
- در دسترس بودن داده‌ها برای هر دو کشور: بسیاری از دیگر متغیرهای فاوا، مانند تراکنش‌های مالی دیجیتال، هوش مصنوعی، یا شاخص‌های حکمرانی دیجیتال، یا داده‌های تاریخی ندارند یا برای کشورهای در حال توسعه به‌صورت پیوسته در دسترس نیستند. بنابراین، قابلیت مقایسه بین‌کشوری و تداوم زمانی داده‌ها معیار مهمی در انتخاب بودند.
- پیشینه تحقیقاتی معتبر: مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی (مانند گزارش‌های اتحادیه بین‌المللی مخابرات، بانک جهانی و کنفرانس تجارت و توسعه سازمان ملل) از همین متغیرها برای تحلیل تاثیر فاوا بر رشد اقتصادی استفاده کرده‌اند به‌طوری که در اکثر گزارش‌ها به‌عنوان شاخص‌های موثر بر بهره‌وری و رشد معرفی شده‌اند.
- همخوانی با ساختار اقتصادی کشورهای منتخب: انتخاب ایران و مالزی با توجه به ساختار متفاوت اقتصادی‌شان بود. متغیرهای انتخاب‌شده به‌گونه‌ای طراحی شدند که هم در ساختار دیجیتال و در حال گذار (مانند ایران) و هم در اقتصادهای دیجیتال (مانند مالزی) قابلیت تبیین داشته باشند.
- پرهیز از هم‌خطی شدید میان متغیرها: از منظر آماری، متغیرهایی انتخاب شده‌اند که علی‌رغم همبستگی مفهومی، هم‌خطی شدید آماری با یکدیگر نداشته باشند تا از بروز خطای تفسیر در مدل‌سازی جلوگیری شود.

۳-۲- یادگیری ماشین به‌عنوان روش‌شناسی اقتصادی

الگوهای یادگیری ماشین می‌توانند به‌طور موثر حجم زیادی از داده‌ها را پردازش کنند، و می‌تواند به ساخت الگوهای اقتصادی پیچیده‌تر منجر شود. ادبیات نشان می‌دهد که الگوهای یادگیری ماشین می‌توانند از طریق موارد زیر در اقتصاد به ایفای نقش بپردازند:

- روابط اقتصادی اغلب غیرخطی و پویا هستند. الگوهای یادگیری ماشین می‌توانند این الگوهای پیچیده را الگوسازی کنند.
- پردازش داده‌ها برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و استخراج اطلاعات جدید.

پژوهشگران [۴۵] استدلال می‌کنند که موفقیت یادگیری ماشین عمدتا به دلیل توانایی آن در کشف ساختارهای پیچیده در داده‌هایی است که لزوما از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند. همچنین، آن‌ها پیشنهاد می‌کنند که استفاده از یادگیری ماشین در اقتصاد مستلزم یافتن وظایف مرتبط است که در آن تمرکز بر بهبود دقت پیش‌بینی‌ها یا کشف الگوهایی از مجموعه داده‌های پیچیده است که قابل تعمیم هستند.

رویکرد متعارف در اقتصاد، همانطور که در متون برجسته مانند [۴۶ و ۴۷] مثال زده شده است، مشخص کردن یک هدف یا یک برآورد احتمال است که تابعی از توزیع احتمال توام داده‌ها است. اغلب، هدف پارامتری از یک الگوی آماری است که توزیع مجموعه‌ای از متغیرها (معمولا مشروط به برخی متغیرهای دیگر) را بر حسب مجموعه‌ای از پارامترها، که می‌تواند یک مجموعه متناهی یا نامتناهی باشد، توصیف می‌کند. با توجه به یک نمونه تصادفی از جامعه مورد نظر، پارامترهای مورد نظر با استفاده از یک تابع هدف مانند مجموع مربع خطا یا تابع بیشینه درست‌نمایی برآورد می‌گردد. تمرکز، بیشتر بر روی کیفیت برآوردگرهای هدف است که به‌طور متعارف از طریق کارایی نمونه بزرگ اندازه‌گیری می‌شود. در مقابل، در ادبیات یادگیری ماشین تمرکز به‌طور معمول بر روی توسعه الگوریتم‌ها است [۴۸]. هدف الگوریتم‌ها معمولا پیش‌بینی برخی از متغیرها، یا طبقه‌بندی واحدها بر اساس اطلاعات محدود است.

۳-۳- چارچوب مدل

هدف این پژوهش الگوسازی روابط پیچیده میان تولید ناخالص داخلی و متغیرهای مختلف اقتصاد دیجیتال است. متغیرهای اقتصاد دیجیتال به‌کاررفته در این پژوهش عبارتند از اشتراک پهن‌باند ثابت، اشتراک تلفن ثابت، خانوارهای دارای دسترسی به اینترنت در منزل، استفاده از پهنای باند بین‌المللی، اشتراک تلفن همراه و پوشش جمعیتی شبکه‌های موبایل. فرض می‌شود که تابع تولید اقتصاد، با گنجاندن متغیرهای اقتصاد دیجیتال، نقطه آغاز مناسبی است. فرم عمومی تابع تولید توسعه‌یافته در این پژوهش به‌شرح زیر است:

$$GDP_t = f(L_t, K_t, ICT_t)$$
$$= f(L_t, K_t, FBS_t, FTS_t, HIAH_t, IBU_t, MCD_t, MCS_t)$$

که در آن GDP_t تولید ناخالص داخلی، L_t نهاده نیروی کار، K_t نهاده سرمایه، FBS_t اشتراک پهن‌باند ثابت[1]، FTS_t اشتراک تلفن ثابت[2]، $HIAH_t$ خانوارهای دارای دسترسی به اینترنت در منزل[3]، IBU_t استفاده از پهنای باند بین‌المللی[4]، MCD_t اشتراک تلفن همراه[5] و MCS_t پوشش جمعیتی شبکه‌های موبایل[6] می‌باشند.

گنجاندن یادگیری ماشین در این چارچوب اجازه می‌دهد تا روابط پیچیده‌تری مورد الگوسازی قرار گیرد. به‌جای فرض رابطه خطی میان این متغیرها، الگوهای یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی با کوتاه‌نگرهای بلندمدت می‌توانند روابط غیرخطی را از داده‌ها یاد بگیرند. در این راستا مدل‌های دقیق و همگرا، نه‌تنها ابزار پیش‌بینی بلکه راهنمای سیاست‌گذاری هوشمندانه در عصر اقتصاد دیجیتال هستند.

۳-۴- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی الگوهای محاسباتی هستند که برای شبیه‌سازی نحوه کارکرد شبکه‌های عصبی زیستی مغز آدم طراحی شده‌اند. شبکه‌ها از گره‌های همبند به یکدیگر (یا نورون‌ها) تشکیل شده است که در لایه‌ها گوناگون سازمان‌دهی شده‌اند. اجزای اصلی یک شبکه عصبی مصنوعی عبارتند از:

- **لایه ورودی**: داده‌های ورودی را دریافت می‌کند.
- **لایه‌های پنهان**: لایه‌هایی که ورودی‌ها را با استفاده از همبندهای وزنی پردازش می‌کنند.
- **لایه خروجی**: پیش‌بینی پایانی را تولید می‌کند.

هر نورون در یک شبکه عصبی مصنوعی یک جمع وزنی از ورودی‌ها انجام می‌دهد و سپس یک تابع فعال‌سازی[7] را برای معرفی غیرخطی بودن اعمال می‌کند. برای یک شبکه عصبی ساده با یک لایه پنهان، بیان ریاضی به‌صورت زیر است

$$y = f(W_2 f(W_1 X + b_1) + b_2)$$

که در آن، X ماتریس ورودی (مانند نیروی کار، سرمایه و متغیرهای اقتصاد دیجیتال)، W_1 و W_2 وزن‌های همبندها بین لایه‌ها هستند، b_1 و b_2 مقادیر اریب هستند، $f(\cdot)$ نیز تابع فعال‌سازی است.

آموزش شبکه عصبی مصنوعی از طریق پس‌انتشار خطا[8] انجام می‌شود. به‌طوری که الگو با کمینه‌کردن تابع خطا، وزن‌ها را بهینه می‌کند [۴۹].

۳-۵- مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه

مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه یک نوع ویژه از شبکه‌های عصبی بازگشتی[9] هستند که برای داده‌های دنباله‌ای طراحی شده‌اند و به‌ویژه برای پیش‌بینی داده‌های سری زمانی مناسب هستند. آن‌ها مشکل کاهش گرادیان که در شبکه‌های عصبی بازگشتی متعارف به‌وجود می‌آید را حل کردند و حفظ اطلاعات را در طول دنباله‌های بلند امکان‌پذیر می‌کنند.

در شبکه‌های عصبی بازگشتی، لایه‌های بازگشتی یا لایه‌های پنهان از سلول‌های بازگشتی تشکیل شده‌اند که حالات آن تحت تاثیر حالت‌های گذشته و ورودی‌های کنونی به آن با همبندها مورد بازخورد[10] قرار می‌گیرد. لایه‌های بازگشتی را می‌توان در معماری‌های مختلف سازمان‌دهی کرد تا شبکه‌های عصبی بازگشتی مختلفی را تشکیل دهد. بنابراین، شبکه‌های عصبی بازگشتی عمدتا توسط سلول‌های بازگشتی تو در تو و معماری شبکه به‌دست می‌آیند [۴۹].

هر واحد کوتاه‌نگر بلندحافظه دربرگیرنده سه دروازه اصلی است:

- دروازه فراموشی[11]: تصمیم می‌گیرد چه اطلاعاتی از گام‌های زمانی پیشین از حافظه سلولی حذف شود.

$$f_t = \sigma(W_f[h_{t-1}, x_t] + b_f)$$

[1] Fixed-broadband subscriptions
[2] Fixed-telephone subscriptions
[3] Households with internet access at home
[4] International bandwidth usage
[5] Mobile-cellular subscriptions
[6] Mobile Cellular Subscriptions
[7] Activation function
[8] backpropagation
[9] RNN: Recurrent Neural Network
[10] Feedback connections
[11] Forget gate

- دروازه ورودی[1]: کنترل می‌کند چه مقدار اطلاعات جدید باید در حافظه سلولی ذخیره شود.

$$i_t = \sigma(W_i[h_{t-1}, x_t] + b_i)$$

- دروازه خروجی[2]: تصمیم می‌گیرد خروجی واحد کوتاه‌نگر بلندحافظه بر اساس وضعیت سلول چه باشد.

$$o_t = \sigma(W_o[h_{t-1}, x_t] + b_o)$$

خروجی h_t بر اساس وضعیت سلول C_t و دروازه خروجی o_t تعیین می‌شود

$$h_t = o_t tanh(C_t)$$

وضعیت سلول بر اساس دروازه‌های فراموشی و ورودی به‌صورت زیر به‌روز می‌شود

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \hat{C}_t$$

که در آن C_t وضعیت حافظه سلول، i_t خروجی در زمان t است و $\hat{C}_t$ وضعیت کاندیدای سلول است (اطلاعات جدید).

۴- برآورد مدل

در این بخش، به تحلیل نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه چندلایه[3] در قالب چهار پیکربندی مجزا پرداخته می‌شود؛ مدل نخست ترکیبی از متغیرهای متعارف اقتصادی و شاخص‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات[4] (فاوا) به‌عنوان نمایندگان اقتصاد دیجیتال، را شامل می‌شود، مدل دوم صرفا مبتنی بر متغیرهای فاوا، یعنی اقتصاد دیجیتال است، مدل سوم صرفا بر پایه متغیرهای متعارف اقتصاد، نیروی کار وسرمایه می‌باشد و مدل چهارم تلاشی است برای بهینه‌سازی ترکیب متغیرهای ورودی از طریق کاهش تعداد متغیرهای فاوا از ۶ به ۳، بر پایه همبستگی بالای این متغیرها با تولید ناخالص داخلی. هدف اصلی این تحلیل، پاسخ به پرسش محوری پژوهش مبنی بر نقش و اثرگذاری اقتصاد دیجیتال بر عملکرد اقتصاد کلان کشور است. در همین راستا، عملکرد مدل‌ها در دو کشور ایران و مالزی با سطوح متفاوت بلوغ دیجیتال مورد واکاوی قرار گرفته است. در این فصل، ضمن تحلیل روند همگرایی توابع هزینه و ارزیابی دقت پیش‌بینی بر اساس آستانه تعیین‌شده، به مقایسه توان تبیینی هر یک از مدل‌ها پرداخته می‌شود. یافته‌های حاصل، نه تنها به اعتبارسنجی قابلیت مدل‌های یادگیری عمیق در حوزه اقتصاد کلان کمک می‌کنند، بلکه از منظر سیاست‌گذاری نیز، شواهدی معنادار برای طراحی مسیر گذار به سوی اقتصاد دیجیتال فراهم می‌آورند.

در این بخش نخست به بررسی همبستگی میان شاخص‌های اقتصادی و شاخص‌های مرتبط با فناوری اطلاعات و ارتباطات در دو کشور ایران و مالزی می‌پردازدیم. با بهره‌گیری از نمودارهای همبستگی (شکل ۱ و شکل ۲)، قدرت و جهت روابط میان متغیرهای کلیدی اقتصادی و دیجیتال به‌صورت بصری تحلیل شده است. هدف، ارزیابی میزان یکپارچگی زیرساخت‌های دیجیتال با عملکرد اقتصادی در این دو کشور و آشکارسازی نقاط قوت، ضعف و تفاوت‌های ساختاری است.

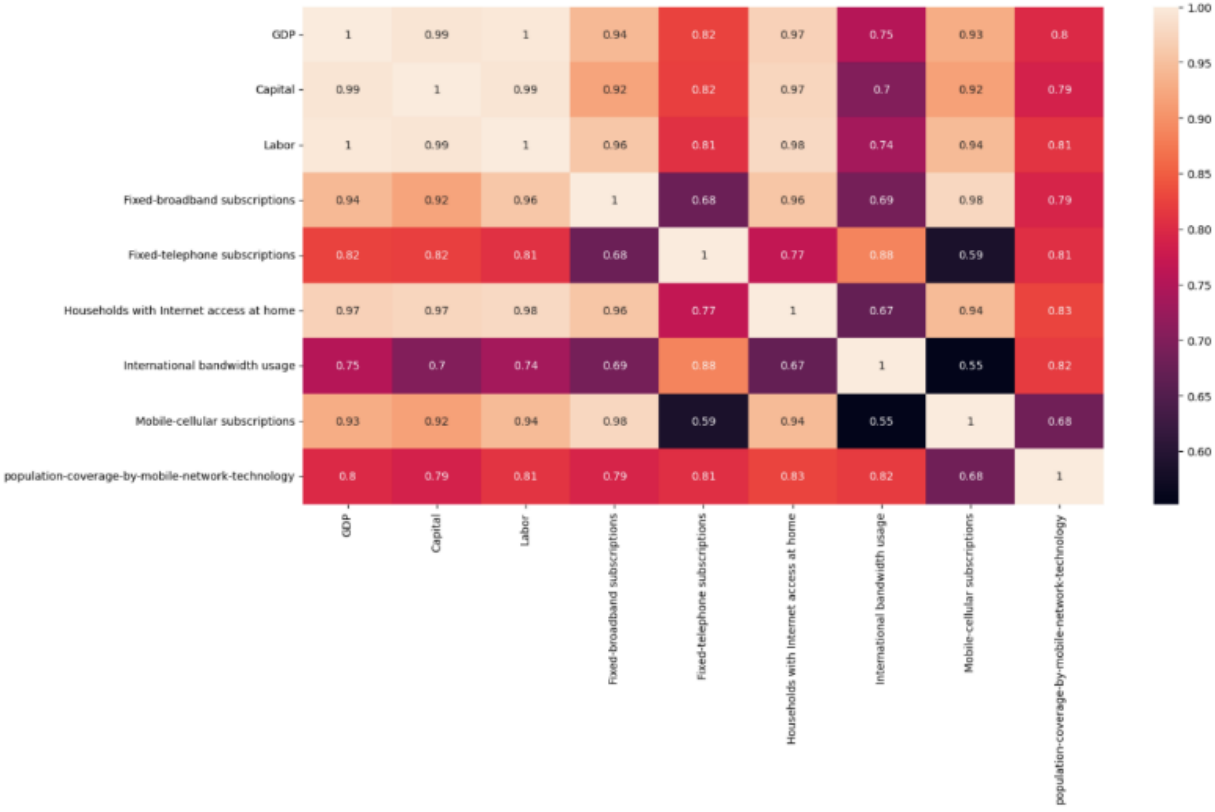
در ایران، همبستگی بین شاخص‌های اقتصادی از جمله تولید ناخالص داخلی، سرمایه و نیروی کار بسیار بالا و قابل پیش‌بینی است (۰.۹۵). از منظر زیرساخت دیجیتال، بیشترین همبستگی با شاخص‌های اقتصادی متعلق به خانوارهای دارای اینترنت در منزل (۰.۹ تا ۰.۹۲) و اشتراک پهن‌باند ثابت (۰.۸۶ تا ۰.۹۰) است. در مقابل، استفاده از پهنای باند بین‌المللی همبستگی ضعیف‌تری نشان می‌دهد (با سرمایه ۰.۶۱، با تلفن ثابت ۰.۴۴ و با پوشش جمعیتی شبکه‌های موبایل ۰.۴۲). این نتایج گویای یکپارچگی داخلی قوی اما محدودیت در تعاملات بین‌المللی دیجیتال است که ممکن است ناشی از تحریم‌ها، چالش‌های فنی یا ضعف در سرمایه‌گذاری برون‌مرزی باشد. در مالزی، همبستگی بین تولید ناخالص داخلی، سرمایه و نیروی کار نزدیک به کامل است (۰.۹۹ تا ۱.۰۰)، که نشان‌دهنده یک ساختار اقتصادی منسجم و هماهنگ است. از منظر زیرساخت دیجیتال، همبستگی بالایی بین شاخص‌های اقتصاد دیجیتال و اقتصاد مشاهده می‌شود. خانوارهای دارای اینترنت در منزل، پهن‌باند ثابت (۰.۹۴ تا ۰.۹۸) و اشتراک موبایل و نیروی کار (۰.۹۴) و پهن‌باند و نیروی کار (۰.۹۶). اگرچه همبستگی بین تلفن ثابت و استفاده از پهنای باند بین‌المللی با سایر شاخص‌ها پایین‌تر است، ساختار دیجیتال مالزی بیشتر به سمت فناوری موبایل‌محور و سیاست‌های دیجیتالی پیشرفته گرایش دارد.

نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که:

- ایران دارای زیرساخت دیجیتال با تمرکز بر ارتباطات ثابت و دسترسی خانگی به اینترنت است، اما در همگرایی بین‌المللی با چالش مواجه است.
- مالزی یک اقتصاد دیجیتال پیشروتر، موبایل‌محور و هماهنگ با رشد اقتصادی دارد که نشان‌دهنده موفقیت در پیاده‌سازی سیاست‌های تحول دیجیتال است.

[1] Input gate
[2] Output gate
[3] Multi-Level LSTM: Multi-Level Long Short-term Memory
[4] ICT: Information and Communications Technology

شکل ۱. ماتریس همبستگی متغیرهای اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال با تولید ناخالص داخلی ایران



شکل ۲. ماتریس همبستگی متغیرهای اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال با تولید ناخالص داخلی مالزی

از منظر سیاست‌گذاری، ایران می‌تواند با تقویت اتصال بین‌المللی، ارتقای شبکه‌های همراه و گذار به خدمات موبایلی، یکپارچگی دیجیتال خود را افزایش دهد و سپس با تداوم توسعه زیرساخت‌های مبتنی بر پهنای باند و گسترش دسترسی در مناطق کمتر توسعه‌یافته، مزیت‌های رقابتی خود را حفظ کند.

۴-۱- پردازش داده‌ها و یادگیری الگو

۴-۱-۱- پیش‌پردازش داده‌ها

مدیریت داده‌های گمشده: داده‌های گمشده در مجموعه‌های داده بزرگ رایج است. این داده‌ها می‌توانند با استفاده از تکنیک‌هایی مانند پر کردن پیش‌رو/عقب یا روش‌های جبرانی مدیریت شوند.

نرمال‌سازی[1]: تمام متغیرها به‌کمک رابطه زیر، نرمال‌سازی می‌شوند تا در مقیاس یکسانی قرار گیرند تا از تسلط یک متغیر بر بقیه به‌دلیل تفاوت مقیاس‌ها جلوگیری شود.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

مهندسی ویژگی‌ها[2]: ایجاد متغیرهای وقفه‌ای و میانگین‌های متحرک می‌تواند به مدل در شبیه‌سازی الگوهای زمانی کمک کند.

جدول ۱. مقایسه همبستگی متغیرهای اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال با تولید ناخالص داخلی ایران و مالزی

جفت متغیر	ایران	مالزی	تحلیل تطبیقی
تولید ناخالص داخلی و نیروی کار	٪۹۵	۱۰۰٪	ارتباط قوی‌تر در مالزی
تولید ناخالص داخلی و موجودی سرمایه	٪۹۴	۹۹٪	همبستگی کامل در مالزی
تولید ناخالص داخلی و اینترنت در منزل	٪۹۰	٪۹۷	ادغام بالاتر در مالزی
پهن‌باند و اینترنت در منزل	٪۹۹	٪۹۶	قوی در هر دو کشور
پهنای باند و سرمایه	٪۶۱	٪۷۰	اندکی بهتر در مالزی
پهنای باند و موبایل	٪۸۶	٪۵۵	یکپارچگی بهتر در ایران
تلفن ثابت و اینترنت در منزل	٪۷۸	٪۷۷	شباهت ساختاری
پوشش موبایل و پهنای باند	٪۴۲	٪۸۲	همسویی بسیار بهتر در مالزی

[1] Normalization
[2] Feature Engineering

۴-۱-۲- یادگیری الگو

فرآیند یادگیری شامل تنظیم وزن‌ها در الگو برای کمینه کردن خطای پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. الگو از طریق تکرار در مجموعه داده‌ها، آموزش داده می‌شود و وزن‌ها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تنظیم می‌شود. فرآیند به شرح زیر است:

۱. گام نخست، پیش‌نگرش[3]: داده‌های ورودی از طریق شبکه عبور کرده و پیش‌بینی‌هایی تولید می‌شود.
۲. گام دوم، محاسبه خطا[4]: الگو پیش‌بینی‌های خود را با مقادیر واقعی (رشداقتصادی) مقایسه می‌کند و از یک تابع هزینه استفاده می‌کند. در این پژوهش، به‌کارگیری تابع هزینه با معیار خطای مطلق میانگین[5]، به دلیل مقاومت آن نسبت به داده‌های پرت و سادگی تفسیر، انتخاب شده است. این تابع از لحاظ واحد، عملکرد مدل را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کند.

تابع هزینه معیاری است برای اندازه‌گیری اینکه پیش‌بینی‌های مدل چقدر با مقادیر واقعی مطابقت دارند. برای مسائل رگرسیونی (پیش‌بینی مقادیر پیوسته)، یک تابع هزینه معمول، خطای مربع میانگین[6] است. با این حال، در برخی از مسائل، خطای مطلق میانگین[7] گزینه بهتری است. خطای مطلق میانگین با محاسبه میانگین اختلافات مطلق بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |y_i - \hat{y}_i|$$

که در آن: y_i مقدار واقعی است، $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی‌شده است و n تعداد کل داده‌ها است

خطای مطلق میانگین در مسائل پیش‌بینی که در آن‌ها مقادیر پیوسته (مانند پیش‌بینی وضعیت آب و هوا) پیش‌بینی می‌شود.

۳. گام سوم، پس‌نگرش[8]: الگو گرادیان تابع هزینه را نسبت به هر وزن محاسبه کرده و وزن‌ها را با توجه آن به‌روز می‌کند. در این گام از بهینه‌ساز آدام[9] که با بهره‌گیری از ایده‌های گشتاور نخست و دوم گرادیان، نرخ یادگیری تطبیقی را برای هر پارامتر

[3] Forward pass
[4] Loss Calculation
[5] MAE: Mean Absolute Error
[6] MSE: Mean Squared Error
[7] MAE: Mean Absolute Error
[8] Backward pass
[9] ADAM: Adaptive Moment Estimation

فراهم می‌کند، استفاده خواهیم کرد. به‌روزرسانی‌های الگوریتمی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که از تغییرات شدید و ناگهانی در گرادیان‌ها جلوگیری کرده و در نتیجه همگرایی پایدارتری را در فرایند آموزش فراهم می‌سازند.

عملکرد الگو بستگی به انتخاب ابرپارامترهای گوناگون، از جمله تعداد لایه‌ها و تعداد نورون‌ها در هر لایه، نرخ یادگیری، اندازه دسته، توابع فعال‌سازی و نوع بهینه‌ساز دارد. تنظیم ابرپارامترها از طریق جست‌وجوی شبکه‌ای یا جست‌وجوی تصادفی همراه با اعتبارسنجی متقابل برای یافتن تنظیمات بهینه انجام می‌شود.

در قلب این تحلیل، بررسی رفتار توابع هزینه و به‌ویژه همگرایی آن‌ها در طول فرایند آموزش، به‌منزله معیاری بنیادین برای سنجش کیفیت یادگیری و قابلیت تعمیم مدل‌ها به داده‌های دیده‌نشده تلقی می‌شود. همگرایی تابع هزینه بدین معناست که در طول دوره‌های آموزش، مدل به‌تدریج به نقطه‌ای می‌رسد که در آن مقادیر خطای پیش‌بینی (هم در داده‌های آموزشی و هم در داده‌های اعتبارسنجی) به کمینه‌ای پایدار می‌رسند.

۴-۱-۳- مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه طراحی‌شده در پیش‌بینی تولید ناخالص داخلی

در راستای تحلیل اثر اقتصاد دیجیتال بر عملکرد اقتصاد کلان، دو مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه چندلایه طراحی شد. در مدل نخست، متغیرهای کلیدی تابع تولید متعارف شامل سرمایه فیزیکی و نیروی کار در کنار شش شاخص منتخب از زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. در مقابل، مدل دوم صرفا بر پایه شاخص‌های فاوا شکل گرفت تا اثر خالص فناوری دیجیتال بر تولید ناخالص داخلی کشورها بررسی شود. این دو مدل به‌صورت جداگانه برای ایران و مالزی اجرا شدند تا با مقایسه دو ساختار اقتصادی با سطوح متفاوت بلوغ دیجیتال، الگوی مشخصی از تاثیر فناوری در سطح کلان شناسایی شود.

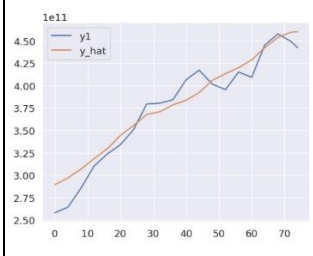
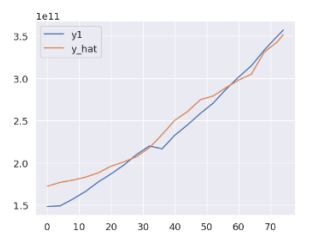
در سال‌های اخیر، ادغام روزافزون فناوری‌های دیجیتال با ساختارهای اقتصادی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، ضرورت بازنگری در مبانی نظری مدل‌سازی رشد اقتصادی را ایجاب کرده است. در این میان، مدل‌های متعارف مبتنی بر تابع تولید متعارف – متشکل از سرمایه و نیروی کار – قادر به درک پیچیدگی‌های نوظهور اقتصاد دیجیتال نیستند. در این پژوهش، به منظور پاسخ به پرسش محوری «اقتصاد دیجیتال چگونه بر اقتصاد کلان کشور اثرگذار است؟»، از الگوریتم‌های یادگیری عمیق و مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه استفاده شده است. هدف، بررسی قدرت تبیینی شاخص‌های فاوا بر تولید ناخالص داخلی و مقایسه آن با متغیرهای متعارف اقتصاد کلان است.

چهار پیکربندی مجزا از مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه طراحی و آموزش داده شد:

- مدل نخست (اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال): سرمایه، نیروی کار، و شش شاخص فاوا به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند.
- مدل دوم (فقط اقتصاد دیجیتال): صرفا شاخص‌های فاوا به‌عنوان ورودی‌ها استفاده شده‌اند تا اثر خالص دیجیتال‌سازی بر تولید بررسی شود.
- مدل سوم (فقط اقتصاد متعارف): صرفا شاخص‌های اقتصاد متعارف به‌عنوان ورودی‌ها استفاده شده‌اند تا اثر خالص متغیرهای کلیدی اقتصادی را بر تولید بررسی کند.
- مدل چهارم (اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال): مدل چهارم تلاشی است برای بهینه‌سازی ترکیب متغیرهای ورودی از طریق کاهش تعداد متغیرهای فاوا از ۶ به ۳، بر پایه همبستگی بالای این متغیرها با تولید ناخالص داخلی.

۵- یافته‌های تحلیلی مدل‌ها

مدل‌ها به‌صورت جداگانه برای ایران و مالزی، به‌عنوان دو اقتصاد با سطوح متفاوت بلوغ دیجیتال، برآورد گردیده‌اند. مدل نخست در ایران توانسته است روند صعودی بلندمدت تولید ناخالص داخلی را با دقت مناسبی بازسازی کند. مدل به‌رغم وجود نوسانات کوتاه‌مدت در داده‌های واقعی، توانسته است مسیر کلی را دنبال کرده و رفتار کلان اقتصادی کشور را شبیه‌سازی نماید. این عملکرد، اثربخشی ترکیب متغیرهای اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال را در تبیین رفتار تولید ناخالص داخلی ایران تایید می‌کند.

ایران	مالزی
	

شکل ۳. داده‌های واقعی تولید ناخالص داخلی ایران و پیش‌بینی آن به‌کمک مدل نخست

نکته مهم آن است که هموار بودن پیش‌بینی‌ها نسبت به داده‌های واقعی، ویژگی رایج مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه است و نشان از توانایی آن در فیلتر کردن نویزهای کوتاه‌مدت دارد. با این حال، از منظر اقتصادی، این مدل تاکید می‌کند که در اقتصاد ایران، فناوری اطلاعات به‌عنوان یک مکمل و نه جایگزین سرمایه و نیروی کار عمل می‌کند. در مالزی، مدل عملکردی بهتر دارد. پیش‌بینی‌های تولید ناخالص داخلی تقریبا به‌طور کامل بر داده‌های واقعی منطبق‌اند، که نشان‌دهنده کیفیت بالای داده‌ها و قدرت بالای سیگنال‌دهی شاخص‌های اقتصاد دیجیتال است. این نتیجه با ساختار اقتصادی مالزی که دیجیتال‌محورتر از ایران است، سازگار است. از منظر سیاست‌گذاری، این یافته‌ها نشان می‌دهد که در اقتصادهایی با بلوغ دیجیتال بالا، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات می‌تواند به اندازه سرمایه فیزیکی و نیروی کار در تحریک رشد اقتصادی نقش داشته باشد.

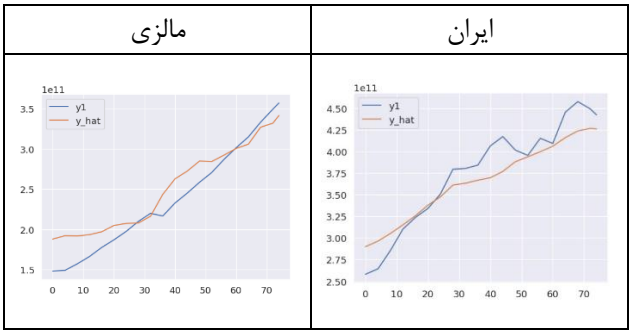
پس از اجرای موفق مدل نخست که شامل ترکیبی از متغیرهای اقتصادی (سرمایه و نیروی کار) و شاخص‌های فاوا بود، اکنون برای اینکه اثر خالص اقتصاد دیجیتال بر اقتصاد را واکاوی نماییم، به اجرای مدل دوم می‌پردازیم که تنها از شاخص‌های اقتصاد دیجیتال استفاده می‌کند. در مدل دوم، متغیرهای متعارف اقتصادی سرمایه و نیروی کار حذف شده‌اند تا تنها تاثیر متغیرهای فاوا بررسی شود. هدف این است که کارایی زیرساخت‌های دیجیتال در تبیین تغییرات تولید ناخالص داخلی مورد ارزیابی قرار گیرد و عملکرد دو مدل در دو کشور ایران و مالزی با یکدیگر مقایسه شود.

مدل دوم در ایران گرچه توانسته است روند کلی تولید ناخالص داخلی را بازتاب دهد، اما دچار کم‌برآوردی است و واکنش کندی نسبت به تغییرات شدید دارد. این یافته به وضوح نشان می‌دهد که اقتصاد دیجیتال به‌تنهایی قادر به توضیح نوسانات کلان در ایران نیست و همچنان نیازمند همراهی عوامل متعارف تولید است (شکل ۴).

از منظر سیاست‌گذاری، این پیام مهم است: تا زمانی که بسترهای فیزیکی و انسانی لازم توسعه نیافته‌اند، دیجیتال‌سازی به تنهایی قادر به خلق ارزش اقتصادی بالا نخواهد بود. در مالزی، مدل دوم عملکرد بسیار بهتری دارد و به داده‌های واقعی نزدیک می‌شود. این موضوع حاکی از آن است که در ساختار اقتصادی مالزی، اقتصاد دیجیتال توانسته جایگزینی تدریجی برای متغیرهای متعارف فراهم آورد و نقش مستقلی در تحریک تولید ناخالص داخلی ایفا کند. از منظر تحلیلی، مدل مالزی گواهی بر این است که با گذر از مراحل مقدماتی توسعه، اقتصاد دیجیتال می‌تواند به یک پیشران کلیدی رشد تبدیل شود.

در گام بعدی، عملکرد مدل سوم که تنها شامل سرمایه و نیروی کار به‌عنوان متغیرهای مستقل است، بررسی می‌شود. در این گام برای اینکه اثر خالص متغیرهای کلیدی و متعارف اثرگذار بر اقتصاد را واکاوی نماییم، به اجرای مدل سوم می‌پردازیم که تنها از متغیرهای اقتصاد متعارف استفاده می‌کند. هدف این است که کارایی زیرساخت‌های کلیدی اقتصادی را در تبیین تغییرات تولید ناخالص داخلی مورد ارزیابی قرار دهیم و عملکرد چهار مدل در دو کشور ایران و مالزی با یکدیگر مقایسه شود. این مدل به‌عنوان خط پایه‌ای برای سنجش میزان اثرگذاری اقتصاد دیجیتال، اهمیت تحلیلی بالایی دارد چرا که سقف توان تبیین متغیرهای متعارف را مشخص می‌کند.

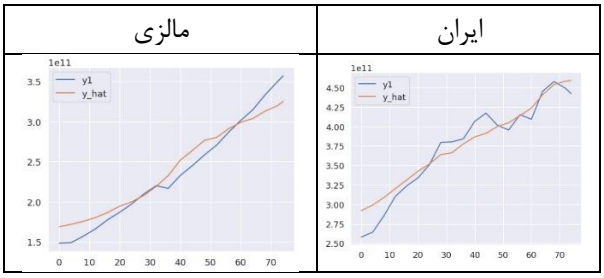
در ایران مدل سوم به‌خوبی توانسته است روند کلی و صعودی تولید ناخالص داخلی را شناسایی کند و به‌خوبی شیب و ساختار کلی تولید ناخالص داخلی را دنبال کرده است.



شکل ۴. داده‌های واقعی تولید ناخالص داخلی ایران و پیش‌بینی آن به‌کمک مدل دوم

شکل ۵. داده‌های واقعی تولید ناخالص داخلی ایران و پیش‌بینی آن به‌کمک مدل سوم

عملکرد مدل سوم در مالزی نسبت به ایران دقیق‌تر است و شکاف کمتری را میان داده‌های واقعی و برآوردی شاهد هستیم. این بدان‌معنا نیست که مدل سوم برای ایران از توضیح‌دهندگی خوبی برخوردار نیست چراکه ساختار تولید ناخالص داخلی در هر دو کشور، بنابر مدل سوم، به‌خوبی به دست آمده است. مدل چهارم تلاشی است برای بهینه‌سازی ترکیب متغیرهای ورودی از طریق کاهش تعداد متغیرهای فاوا از ۶ به ۳، بر پایه همبستگی بالای این متغیرها با تولید ناخالص داخلی. این سه متغیر عبارت‌اند از: اشتراک اینترنت پهن‌باند ثابت، درصد خانوارهای دارای اینترنت در منزل و تعداد اشتراک‌های تلفن همراه. در کنار این سه متغیر دیجیتال، دو متغیر سنتی اقتصادی یعنی سرمایه و نیروی کار نیز در مدل لحاظ شده‌اند. بنابراین، مدل چهارم ترکیبی بهینه‌شده از متغیرهای متعارف و اقتصاد دیجیتال است که با هدف کاهش پیچیدگی مدل و افزایش تمرکز بر شاخص‌های پرقدرت طراحی شده است.



شکل ۶. داده‌های واقعی تولید ناخالص داخلی ایران و پیش‌بینی آن به‌کمک مدل چهارم

مدل به‌خوبی روند کلی تولید ناخالص داخلی ایران را دنبال کرده است. اگرچه برخی نوسانات جزئی نسبت به مدل ۱ و ۳ وجود دارد، ولی فاصله بین خط پیش‌بینی‌شده و مقدار واقعی در اکثر بازه‌ها کوچک و منظم است. مدل، نقاط اوج و فرود تولید ناخالص داخلی را با درجه دقت مناسبی بازتولید کرده است. این عملکرد نسبتا قوی با استفاده از تنها سه متغیر اقتصاد دیجیتال، بیانگر سهم اندک متغیرهای اقتصاد دیجیتال در برابر متغیرهای اقتصاد متعارف بوده و همچنین از دیگرسو کیفیت بالای انتخاب متغیرهای دیجیتال و توان تبیین آن‌ها را نشان می‌دهد.

در مالزی نیز مدل چهارم عملکرد بسیار قابل قبولی دارد. روند پیش‌بینی‌شده تقریبا منطبق بر مسیر واقعی تولید ناخالص داخلی است. قدرت مدل در بازتولید رشد مداوم اقتصاد مالزی نشان می‌دهد که متغیرهای اقتصاد دیجیتال می‌توانند به‌عنوان نقش مکمل در اقتصاد به ایفای نقش بپردازند.

مدل چهارم با هدف ساده‌سازی ورودی‌ها و تمرکز بر متغیرهای دیجیتال با بیشترین همبستگی با تولید ناخالص داخلی طراحی شد؛ به این معنا که به‌جای استفاده از شش شاخص اقتصاد دیجیتال، تنها سه متغیر با بالاترین ضریب همبستگی وارد مدل شدند. با این حال، نتایج مدل چهارم تفاوت قابل توجهی با نتایج مدل نخست که از ترکیب کامل متغیرهای متعارف و دیجیتال استفاده می‌کرد، نشان نداد. دلیل این مسئله را می‌توان در سه سطح تبیین کرد:

- وجود همپوشانی اطلاعاتی میان متغیرهای اقتصاد دیجیتال: بسیاری از متغیرهای فاوا دارای همبستگی درون‌گروهی بالایی هستند؛ به‌عبارت دیگر، متغیرهایی مانند پهنای باند بین‌المللی، تلفن ثابت یا پوشش جمعیتی شبکه موبایل، اغلب همان سیگنالی را منتقل می‌کنند که متغیرهایی نظیر اشتراک اینترنت و دسترسی خانگی به اینترنت منتقل می‌کنند. در نتیجه، حذف برخی از آن‌ها منجر به از دست دادن اطلاعات متمایز نشد و مدل همچنان قدرت پیش‌بینی خود را حفظ کرد.
- قابلیت استخراج ویژگی‌ها توسط کوتاه‌نگر بلندمدت: الگوریتم‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه به‌دلیل ساختار شبکه‌ای و حافظه‌دار خود، قادرند ویژگی‌های کلیدی را حتی از ورودی‌های محدود استخراج کنند. بنابراین، اگرچه تعداد متغیرهای دیجیتال کاهش یافته است، اما مدل همچنان توانسته الگوهای دینامیک موجود در همان سه شاخص را به‌خوبی یاد بگیرد و بازتولید کند.
- انتخاب مؤثرترین متغیرها از نظر آماری و نظری: سه متغیر انتخاب‌شده در مدل چهارم نه‌تنها همبستگی بالایی با تولید ناخالص داخلی داشتند، بلکه از منظر نظری نیز نماینده ابعاد کلیدی دیجیتالی‌شدن (دسترسی، اتصال، و نفوذ) هستند. در نتیجه، حتی با کاهش ابعاد داده، مدل از هسته اصلی سیگنال اقتصادی موجود در فاوا بهره‌مند بوده است.

جدول ۲ به‌طور خلاصه عملکرد هر چهار مدل را برای دو کشور ایران و مالزی به‌خوبی تشریح می‌کند. جدول نشان می‌دهد که نقش اقتصاد دیجیتال در اقتصاد کلان، تابعی از سطح توسعه و بلوغ دیجیتال هر کشور است.

سرمایه و نیروی کار به‌تنهایی قادرند روند کلی تولید ناخالص داخلی را بازنمایی می‌کنند. در هر دو کشور، افزودن شاخص‌های فاوا، دقت مدل را افزایش می‌دهد که امری طبیعی به‌لحاظ فنی در علم داده است. این مورد به این دلیل رخ می‌دهد که متغیرهای توضیحی بیشتری به مدل افزوده شده است. ولی اگر مدل سوم و چهارم را به‌عنوان معیاری برای سنجش میزان اثرگذاری اقتصاد دیجیتال در نظر بگیریم، متوجه خواهیم شد که در هر دو کشور متغیرهای

متعارف و کلیدی اقتصاد کلان برای توضیح‌دهندگی تولید ناخالص داخلی از اهمیت درخور نگرشی برخوردارند. تحلیل جداگانه برای هر کشور نشان می‌دهد در ایران، فاوا نقش مکمل دارد و تا رسیدن به سطحی از بلوغ دیجیتال، نمی‌توان انتظار داشت که دیجیتال‌سازی به تنهایی موتور رشد اقتصادی باشد. در مقابل، مالزی نشان داده است که در اقتصادهای دیجیتالی‌شده، اقتصاد دیجیتال می‌تواند نقش اساسی در شکل‌دهی مسیر رشد ایفا کند. بنابراین، توصیه‌های سیاستی کلیدی عبارتند از:

- طراحی مدل‌های اقتصادی باید متناسب با مرحله بلوغ دیجیتال صورت گیرد. یک نسخه واحد برای همه کشورها پاسخ‌گو نیست.

جدول ۲. تحلیل تطبیقی میان چهار مدل

کشور	ویژگی	مدل نخست	مدل دوم	مدل سوم	مدل چهارم
ایران	متغیرها	اقتصاد متعارف + اقتصاد دیجیتال	اقتصاد دیجیتال	اقتصاد متعارف	اقتصاد متعارف + اقتصاد دیجیتال
	برازش مدل	برازش خوب با انحراف‌های جزئی	برازش ضعیف غیر قابل قبول	برازش خوب با انحراف‌ها ی جزئی	برازش خوب با انحراف‌های جزئی
	روند بلندمدت	به‌دقت دنبال شده است	غیر قابل قبول	به‌دقت دنبال شده است	به‌دقت دنبال شده است
	زیرساخت اقتصاد دیجیتال	تاثیر نسبتا ضعیف			
مالزی	متغیرها	اقتصاد متعارف + اقتصاد دیجیتال	اقتصاد دیجیتال	اقتصاد متعارف	اقتصاد متعارف + اقتصاد دیجیتال
	برازش مدل	برازش خوب با انحراف‌های جزئی	برازش ضعیف‌تر نسبت به مدل نخست	برازش خوب با انحراف‌ها ی جزئی	برازش خوب با انحراف‌های جزئی
	روند بلندمدت	به‌دقت دنبال شده است	با دقت ضعیف‌تر نسبت به مدل نخست	به‌دقت دنبال شده است	به‌دقت دنبال شده است
	زیرساخت اقتصاد دیجیتال	تاثیر قوی نسبت به ایران			

- از آنجا که توسعه اقتصاد دیجیتال در سیاست‌های توسعه‌ای به‌عنوان مکمل تلقی شود، نه جایگزین، ایران بایستی در فاز نخست به سرمایه‌گذاری همزمان بر زیرساخت‌های دیجیتال در کنار تقویت سرمایه انسانی/فیزیکی تمرکز کند. در فاز دوم پس از بلوغ اقتصاد دیجیتال در اقتصاد، بایستی با تداوم سیاست‌های دیجیتالی‌سازی، آن را تبدیل به پیشرانی مستقل برای رشد در نظر بگیرد. تمرکز بر کیفیت دسترسی، امنیت سایبری و نوآوری دیجیتال باید در اولویت قرار گیرد.

۵-۱-۱- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در چارچوب پاسخ به پرسش اصلی این پژوهش مبنی بر واکاوی نقش اقتصاد دیجیتال در شکل‌دهی به متغیرهای اقتصاد کلان کشور، تحلیل عملکرد مدل‌های یادگیری عمیق مورد استفاده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اکنون می‌خواهیم ببینیم آیا خطای یادگیری مدل‌های به‌کاررفته در طول زمان کاهش یافته و همگرا می‌شود یا خیر؟ اگر توابع هزینه کمینه شده و مقادیر آن‌ها همگرا شود بدان‌معناست که مدل از روند یادگیری درستی برخوردار بوده و نتایج مدل قابل اتکا می‌باشد. تحلیل روند همگرایی توابع هزینه، نه‌تنها از منظر یادگیری ماشین، بلکه به‌عنوان سنجه‌ای کلیدی برای قابلیت اتکای اقتصادی مدل‌ها تلقی می‌شود. در غیاب همگرایی، نمی‌توان به خروجی مدل‌ها اعتماد کرد، چرا که پیش‌بینی‌ها فاقد ثبات و دقت خواهند بود. از سوی دیگر، همگرایی موفق، خصوصا در داده‌های اعتبارسنجی، بیانگر توانایی مدل در تعریف روابط علی و پایدار میان متغیرهای اقتصاد دیجیتال و تولید ناخالص داخلی است.

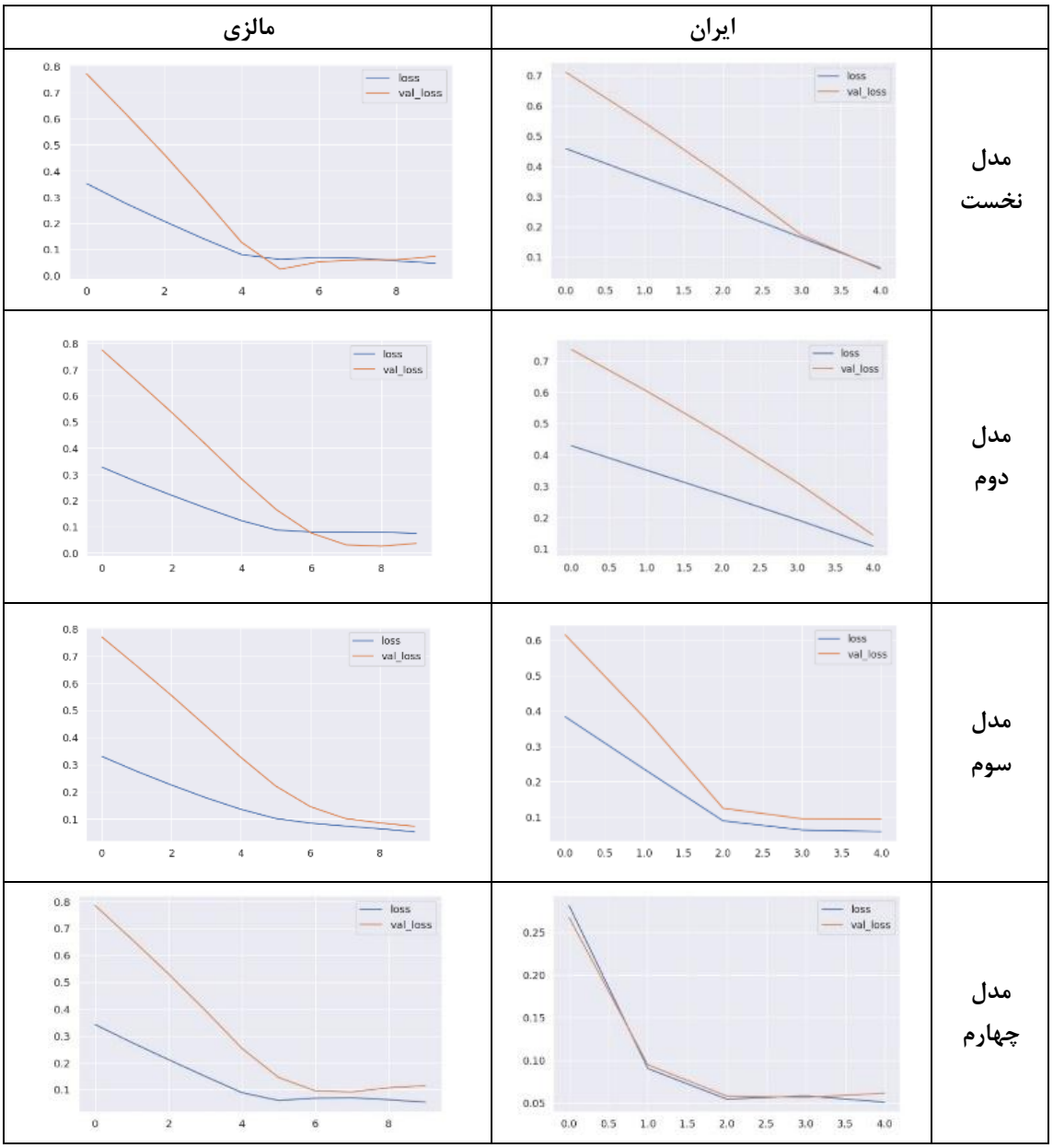
تحلیل همگرایی توابع هزینه

تحلیل همگرایی تابع زیان در مدل‌های یادگیری عمیق، به‌ویژه شبکه‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه، نه‌تنها از منظر تجربی بلکه از نظر ریاضی و نظری نیز اهمیت فراوانی دارد. هدف این بخش آن است که نشان دهد چرا همگرایی تابع زیان، صرفا یک نمودار بصری نبوده، بلکه از منظر ریاضی، مبنای معتبری برای ارزیابی کیفیت یادگیری، پایداری مدل و اتکاپذیری نتایج پیش‌بینی به شمار می‌رود. همگرایی تابع زیان، تنها یک نمودار بصری نیست، بلکه شرط بنیادی برای اتکاپذیری مدل و استفاده از آن در تحلیل‌های کلان اقتصادی است. تحلیل رفتار همگرایی نمودارهای تغییرات خطای آموزش[1] و خطای اعتبارسنجی[2] برای مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه برآوردشده در هر دو مدل حاکی از یادگیری تدریجی و پایدار ساختارهای داده‌ای بود. در مدل‌نخست، برای هر دو کشور، تابع هزینه آموزش و اعتبارسنجی

[1] Loss function

[2] Value of Loss function

کاهش یافته و به مقادیر پایینی همگرا شد که نشانه‌ای از یادگیری موثر و ساختاردهی درست مدل است. در مدل دوم، گرچه همگرایی در مالزی با سرعت و پایداری بالایی رخ داد، در ایران همگرایی رخ نداده. این نتایج تاییدمی‌کند که نقش اقتصاد دیجیتال در کشورهایی با زیرساخت‌های دیجیتال پیشرفته، قابلیت پیش‌بینی اقتصادی بالاتری دارد و می‌توان از آن در مدل‌سازی کلان استفاده کرد.



شکل ۷. تحلیل همگرایی توابع هزینه

همان‌گونه که قابل مشاهده است در ایران، به‌هنگام برازش مدل دوم، همگرایی رخ نداده که نشان می‌دهد حذف متغیرهای کلیدی متعارف باعث کاهش قدرت تبیین مدل شده است. از دیگرسو در مالزی، همگرایی تقریبا کامل و پایدار بوده است. این نتیجه حکایت از آن دارد که زیرساخت‌های دیجیتال در مالزی قادرند به‌تنهایی بخشی از پویایی تولید ناخالص داخلی را تبیین کنند. این همگرایی در مدل‌ها، از یک سو بیانگر این است که فرایند یادگیری به‌طور موثری الگوهای موجود در داده‌های اقتصادی و دیجیتال را استخراج نموده و مدل به نقطه بهینه رسیده است. از سوی دیگر، همگرایی ثابت نشان‌دهنده‌ی توانمندی مدل در کاهش احتمال بیش‌برازش بوده و به تعمیم‌پذیری آن اطمینان می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه تطبیقی همگرایی توابع هزینه

همگرایی		ایران	مالزی
مدل نخست	وضعیت همگرایی	همگرا	همگرا
	خطای اعتبارسنجی	۰٫۰۷۵	۰٫۰۵
	سرعت همگرایی	در ۳ دوره	در ۴ دوره
	پایداری روند یادگیری	پایدار	پایدار
مدل دوم	وضعیت همگرایی	ناهمگرا	همگرا
	خطای اعتبارسنجی	بالای ۱۰ درصد	۰٫۰۹
	سرعت همگرایی	-	در ۵ دوره
	پایداری روند یادگیری	ناپایدار	پایدار
مدل سوم	وضعیت همگرایی	همگرا	همگرا
	خطای اعتبارسنجی	۰٫۹۵	۰٫۰۸
	سرعت همگرایی	در ۳ دوره	در ۵ دوره
	پایداری روند یادگیری	پایدار	پایدار
مدل چهارم	وضعیت همگرایی	همگرا	همگرا
	خطای اعتبارسنجی	۰٫۰۴	۰٫۱
	سرعت همگرایی	در ۳ دوره	در ۵ دوره
	پایداری روند یادگیری	پایدار	پایدار

در مدل‌های یادگیری عمیق مانند کوتاه‌نگرهای بلندحافظه، تعیین تعداد بهینه دوره‌های آموزشی برای جلوگیری از بیش‌برازش اهمیت دارد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از الگوریتم توقف زودهنگام، برای ایران ۵ دوره و برای مالزی ۱۰ دوره بهینه تشخیص داده شد. این تفاوت ناشی از چهار عامل است: (الف) ساختار داده‌ها؛ اقتصاد ایران ساده‌تر و کمتر دیجیتالی‌شده و اقتصاد مالزی پیچیده‌تر و غنی‌تر است. (ب) نسبت سیگنال به نویز؛ داده‌های ایران به‌دلیل شوک‌های اقتصادی ناپایدارترند و مدل زودتر دچار بیش‌برازش می‌شود. (پ) عملکرد الگوریتم توقف زودهنگام که مانع ادامه آموزش پس از تثبیت زیان اعتبارسنجی می‌شود. (ت) تفاوت در رفتار الگوریتم آدام؛ مدل ایران به‌دلیل نوسانات بیشتر گرادیان، سریع‌تر ولی با ریسک بیش‌برازش همگرا می‌شود، در حالی که مدل مالزی با آهنگ یکنواخت‌تر و دقیق‌تر آموزش می‌بینند.

تحلیل دقت پیش‌بینی بر اساس آستانه خطا

برای ارزیابی عملکرد پیش‌بینی مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه، از شاخص دقت[1] بهره می‌جوییم؛ رویکردی که به‌ویژه در کاربردهایی که انحرافات جزئی از مقادیر واقعی از نظر اقتصادی بی‌اهمیت تلقی می‌شوند، مفید است. به‌طور ویژه، با تعریف تابع یک تابع نشانگر[2]، $I_{[Error_t \le \varepsilon]}$، پیش‌بینی زمانی دقیق در نظر گرفته می‌شود که خطای قدر مطلق آن در محدوده آستانه از پیش تعیین‌شده‌ای قرار گیرد. دقت کلی مدل به‌صورت نسبت تعداد پیش‌بینی‌هایی که در این محدوده قرار دارند به کل تعداد مشاهدات تعریف می‌شود.

$$I_t = \begin{cases} 1 & if\ |\hat{y}_t - y_t| \le \varepsilon \\ 0 & o.w. \end{cases}$$

این شاخص یک معیار عملی و قابل تفسیر ارائه می‌دهد؛ به‌ویژه در پیش‌بینی‌های اقتصادی که خطاهای جزئی تاثیر معناداری بر تصمیم‌گیری یا سیاست‌گذاری ندارند. بنابراین، با تعریف یک آستانه دقت برابر با ۰٫۰۱ برای خطای مطلق پیش‌بینی، عملکرد هر مدل از منظر دقت بررسی شد، که پیش‌بینی‌هایی با خطای کمتر از آن، «دقیق» و قابل‌اعتماد در نظر گرفته می‌شوند. در مدل نخست، دقت بالای پیش‌بینی به‌ویژه در مالزی (۹۶٪) نشان‌دهنده قدرت بالای مدل است. در مدل دوم، حذف متغیرهای متعارف موجب کاهش دقت شده و در ایران (۷۰٪) نتایج حتی به‌دلیل ناهمگرایی مدل چندان قابل تفسیر نیست. مدل سوم در هر دو کشور عملکرد خوبی دارد و به مدل نخست نزدیک است. افزودن شاخص‌های فاوا موجب بهبود دقت در هر دو کشور شده که نشان می‌دهد متغیرهای متعارف همچنان اهمیت دارند، اما به تنهایی برای پیش‌بینی کافی نیستند. این نتایج اهمیت مکمل بودن فناوری دیجیتال در اقتصادهای در حال توسعه مانند ایران را تایید می‌کند.

مدل نخست در هر دو کشور از نظر همگرایی و دقت پیش‌بینی عملکرد بهتری نسبت به مدل دوم دارد. مالزی در هر دو مدل دقت بالاتری نسبت به ایران دارد که بازتاب‌دهنده بلوغ دیجیتال و کیفیت داده‌های بالاتر در آن کشور است. در ایران، دقت ۸۹٫۳٪ مدل نخست بر اهمیت متغیرهای متعارف مانند سرمایه و نیروی کار در تبیین تولید ناخالص داخلی تأکید دارد. در مالزی نیز شاخص‌های دیجیتال حتی بدون متغیرهای متعارف توان تبیینی نسبی دارند. طبق نتایج برای ارزیابی مدل‌های یادگیری عمیق، همگرایی الگوریتمی و دقت پیش‌بینی را باید همزمان در نظر گرفت. مدل نخست هر دو شرط را برآورده کرده و برای تحلیل اقتصادی در هر دو کشور قابل اعتماد است؛ ولی مدل دوم تنها در مالزی نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند.

[1] Accuracy

[2] Indicator function

جدول ۴. مقایسه تطبیقی دقت پیش‌بینی مدل‌های نخست و دوم در هر کشور

کشور	مدل	پیش‌بینی‌های دقیق	پیش‌بینی‌های بیرون از آستانه	دقت
ایران	مدل نخست	۶۷	۸	۹۰ درصد
	مدل دوم	۵۳	۲۲	۷۰ درصد
	مدل سوم	۶۵	۱۰	۸۶ درصد
	مدل چهارم	۶۷	۸	۹۰ درصد
مالزی	مدل نخست	۷۲	۳	۹۶ درصد
	مدل دوم	۶۰	۱۵	۸۰ درصد
	مدل سوم	۶۸	۷	۹۰ درصد
	مدل چهارم	۶۹	۶	۹۲ درصد

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی نقش دیجیتالی‌شدن اقتصاد بر تولید ناخالص داخلی ایران و انجام یک مقایسه تطبیقی با کشور مالزی طراحی شده است. پرسش اصلی تحقیق آن بود که آیا گسترش اقتصاد دیجیتال در ایران می‌تواند اثری معنادار بر عملکرد کلان اقتصادی داشته باشد؟ همچنین در قالب پرسش‌های فرعی، این موضوع بررسی شد که آیا دیجیتالی‌شدن می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های تغییر ساختاری اقتصاد ایران تلقی شود و چه جایگاهی در راهبردهای کلان توسعه‌ای کشور دارد.

یافته‌های پژوهش، بر پایه مدل‌سازی کوتاه‌نگرِ بلندحافظه و ارزیابی چهار مدل تحلیلی شامل مدل‌های ترکیبی، دیجیتال‌محور و متعارف، توانستند پاسخ روشنی به پرسش‌های تحقیق ارائه دهند. نتایج نشان داد که دیجیتالی‌شدن، به‌ویژه از طریق شاخص‌هایی مانند اینترنت پهن‌باند ثابت، پوشش شبکه‌های تلفن همراه و میزان استفاده از پهنای باند بین‌المللی، با تولید ناخالص داخلی رابطه‌ای معنادار دارد. در هر دو کشور، مدل ترکیبی—که هم‌زمان شامل متغیرهای متعارف و دیجیتال است—عملکرد بهتری داشت. این نتیجه تأیید می‌کند که دیجیتالی‌شدن هرچند عامل مستقلی برای رشد نیست، اما می‌تواند نقش مکمل و تقویت‌کننده‌ای در کنار عوامل تولید سنتی ایفا کند.

بررسی تطبیقی ایران و مالزی ابعاد عمیق‌تری از تحلیل را آشکار ساخت. در مالزی، مدل دیجیتال‌محور نیز از دقت بالایی برخوردار بود؛ موضوعی که نشان‌دهنده بلوغ زیرساخت‌های دیجیتال و نقش مستقل فناوری اطلاعات و ارتباطات در رشد اقتصادی این کشور است. در مقابل، در ایران مدل‌هایی که صرفاً بر متغیرهای دیجیتال استوار بودند، دقت کمتری داشتند. این امر نشان می‌دهد که زیرساخت‌های دیجیتال در ایران هنوز به مرحله‌ای نرسیده‌اند که بتوانند به‌تنهایی تبیین‌کننده تحولات کلان اقتصادی باشند و همچنان نیازمند تقویت و توسعه‌اند.

از منظر سیاست‌گذاری، نتایج بیانگر آن است که در اقتصادهایی با بلوغ دیجیتال بالا، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات می‌تواند نقشی مشابه سرمایه‌گذاری در سرمایه فیزیکی و نیروی کار در تحریک رشد داشته باشد. بنابراین، سیاست‌های توسعه‌ای باید تقویت زیرساخت‌های اقتصاد دیجیتال را هم‌پای توسعه سرمایه انسانی و فیزیکی دنبال کنند. گسترش اینترنت پهن‌باند، افزایش پوشش شبکه‌های تلفن همراه و تقویت ظرفیت پهنای باند بین‌المللی از جمله مؤلفه‌هایی هستند که می‌توانند پایه‌های اقتصاد دیجیتال ایران را تقویت کرده و مسیر گذار ساختاری آن را تسهیل نمایند. تأکید بر مکمل بودن اقتصاد دیجیتال با اقتصاد سنتی—نه جایگزینی آن—باید محور سیاست‌گذاری‌های آینده باشد.

پژوهش حاضر علاوه بر پاسخ‌دهی به پرسش‌های اصلی و آزمون فرضیات، مبنایی کاربردی برای طراحی سیاست‌های ترکیبی سازگار با شرایط اقتصاد ایران فراهم کرده و امکان بهره‌گیری از تجارب موفق بین‌المللی را نیز فراهم ساخته است. نتایج مدل دوم نشان می‌دهد که اقتصاد دیجیتال به‌تنهایی قادر به توضیح نوسانات اقتصاد کلان در ایران نیست و همچنان نیازمند همراهی عوامل متعارف تولید است. این موضوع حامل پیام مهمی برای سیاست‌گذاران است: تا زمانی که بسترهای فیزیکی و انسانی توسعه نیافته‌اند، دیجیتال‌سازی به‌تنهایی توان خلق ارزش اقتصادی قابل‌توجه را نخواهد داشت. در مقابل، الگوی مالزی نشان می‌دهد که پس از عبور از مراحل اولیه توسعه، اقتصاد دیجیتال می‌تواند به یکی از پیشران‌های اصلی رشد تبدیل شود.

بررسی مدل‌های سوم و چهارم نیز بیانگر آن است که در هر دو کشور، متغیرهای متعارف اقتصاد کلان همچنان نقش مهمی در توضیح تولید ناخالص داخلی دارند. تحلیل تفکیکی نتایج نشان می‌دهد که در ایران فناوری اطلاعات و ارتباطات بیشتر نقش مکمل دارد و تا رسیدن به مرحله بلوغ دیجیتال نمی‌توان انتظار داشت

اقتصاد دیجیتال به‌طور مستقل موتور رشد باشد. در مقابل، شواهد مربوط به مالزی نشان می‌دهد که در اقتصادهای دیجیتالی‌شده، نقش اقتصاد دیجیتال در شکل‌دهی مسیر رشد بسیار پررنگ‌تر و تعیین‌کننده‌تر است.

بر اساس نتایج پژوهش می‌توان توصیه‌های سیاستی و مدیریتی زیر را برای تصمیم گیران کشور ارائه نمود:

- توسعه‌ی زیرساخت‌های دیجیتال باید هم‌زمان با سرمایه‌گذاری در آموزش، مهارت‌آفرینی و تأمین سرمایه فیزیکی برنامه‌ریزی شود تا دیجیتال‌سازی به‌صورت مؤثر ارزش‌آفرینی کند.
- برنامه‌ریزی بودجه‌ای و ساختاری برای توسعه فیزیکی زیرساخت‌ها از طریق ترکیب سرمایه‌گذاری عمومی، مشوق‌های سرمایه‌گذاری خصوصی و مدل‌های مشارکت عمومی-خصوصی می‌تواند نقش اقتصاد دیجیتال در رشد ناخالص داخلی را پررنگ‌تر کند.
- حمایت از اکوسیستم‌های نوآوری دیجیتال، سرمایه‌گذاری در آموزش و پژوهش برای ایجاد قابلیت تولید فناوری بومی و تقویت نقش دیجیتال به‌عنوان پیشران رشد ناخالص داخلی باید در راس تصمیمات مدیران قرار گیرد.
- پژوهش تأکید می‌کند که اقتصاد دیجیتال به‌تنهایی قادر به تبیین رشد اقتصادی در ایران نیست و در حال حاضر نقش مکمل دارد.
- بنابراین، سیاست‌گذاران نباید آن را جایگزین عوامل سنتی تولید بدانند، بلکه باید راهبردی طراحی کنند که ترکیب این دو را تقویت کند. دیجیتال‌سازی ارزش بالایی دارد اما مکمل است؛ برای آنکه دیجیتال تبدیل به موتور مستقل رشد شود، باید پیش‌شرط‌های فیزیکی و انسانی فراهم گردد. بنابراین، سیاست‌گذاریِ موفق باید همزمان زیرساخت بسازد، مهارت ایجاد کند و تامین سرمایه را تقویت نماید.
- نتایج نشان می‌دهد که در نبود بسترهای انسانی و نهادی مناسب، دیجیتالی‌شدن توان خلق ارزش قابل‌توجه ندارد. از این رو لازم است ارتقای مهارت‌های مرتبط با اقتصاد دیجیتال، تقویت ظرفیت مدیریتی و حکمرانی دیجیتال، ایجاد چارچوب‌های نهادی هماهنگ برای سیاست‌گذاری و نظارت در اولویت برنامه‌های ملی قرار گیرد.
- از آنجا که مدل دیجیتال‌محور در ایران عملکرد ضعیف‌تری دارد، سیاست‌گذاران باید انتظار داشته باشند که اثرگذاری مستقل اقتصاد دیجیتال پس از طی مراحل مقدماتی توسعه نمایان شود.
- بنابراین، سیاست‌های دیجیتال باید بلندمدت، تدریجی و مرحله‌به‌مرحله طراحی شوند.
- با توجه به نتایج مدل‌ها، مناسب است چارچوب‌های سیاستی ایران اقتصاد دیجیتال را نه موتور اصلی بلکه شتاب‌دهنده رشد در کنار سایر عوامل بدانند. این نگاه سیاستی واقع‌بینانه‌تر بوده و با شرایط فعلی اقتصاد ایران سازگار است.

پژوهشگران در تحقیقات آتی می‌توانند متغیرهای بیشتری از اقتصاد دیجیتال را در بررسی‌های خود لحاظ کنند و اثر آنها بر اقتصاد کشور را بررسی کنند. همچنین در بررسی‌های دیگر می‌توانند مقایسه را بین چند کشور دیگر نیز انجام دهند.

مراجع

[1] K. Schwab, The Fourth Industrial Revolution, Penguin Books Limited, 2017.

[2] R. Bukht and R. Heeks, Defining, Conceptualising and Measuring the Digital Economy, Development Informatics Working Paper No. 68, Aug. 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3431732

[3] A. Goldfarb, C. Tucker, "Digital economics," Journal of Economic Literature, vol. 57, no. 1, pp. 3–43, 2019.

[4] K. Hafner و M. Lyon, Where Wizards Stay Up Late: The Origins of the Internet, New York: Touchstone, Simon & Schuster, 1996.

[5] S. Greenstein, How the Internet Became Commercial: Innovation, Privatization, and the Birth of a New Network, Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2015.

[6] N. Moradhassel and B. Mohebikhah, "Estimating the Value of Digital Economy Core Spillover in Iran," Journal of Information and Communication Technology, vol. 15, no. 57, pp. 111–121, 2023, doi: 10.61186/jict.44104.15.57.111.

[7] L. Xia, S. Baghaie, and S. M. Sajadi, "The digital economy: Challenges and opportunities in the new era of technology and electronic communications," Ain Shams Engineering Journal, vol. 15, no. 2, p. 102411, 2024.

[8] Z. Chen and R. Xing, *"Digital economy, green innovation and high-quality economic development,"* International Review of Economics & Finance, vol. 99, p. 104029, 2025.

[9] A. Raihan, *"A review of the potential opportunities and challenges of the digital economy for sustainability,"* Innovation and Green Development, vol. 3, no. 4, p. 100174, 2024.

[10] J. Mokyr, *"Long-term economic growth and the history of technology,"* in *Handbook of Economic Growth*, vol. 1, Part B, P. Aghion and S. N. Durlauf, Eds. Elsevier, 2005, pp. 1113–1180. doi: 10.1016/S1574-0684(05)01017-8.

[11] E. Brynjolfsson و L. M. Hitt, "Computing Productivity: Firm-Level Evidence," Review of Economics and Statistics, vol. 85, no. 4, pp. 793–808, 2003.

[12] A. Agrawal, N. Lacetera, and E. Lyons, "Does standardized information in online markets disproportionately benefit job applicants from less developed countries?," Journal of International Economics, vol. 103, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1016/j.jinteco.2016.08.003.

[13] E. Brynjolfsson, Y. Hu, و M. D. Smith, "Consumer Surplus in the Digital Economy: Estimating the Value of Increased Product

Variety at Online Booksellers," Management Science, vol. 49, no. 11, pp. 1580–1596, 2003.

[14] G. J. Stigler, "The Economics of Information," Journal of Political Economy, vol. 69, no. 3, pp. 213–225, 1961.

[15] P. A. Diamond, "A Model of Price Adjustment," Journal of Economic Theory, vol. 3, no. 2, pp. 156–168, 1971.

[16] C. Shapiro و H. R. Varian, Information Rules: A Strategic Guide to the Network Economy, Cambridge: Harvard Business School Press, 1998.

[17] H. R. Varian, Intermediate Microeconomics: A Modern Approach, 8th ed., New York: W.W. Norton & Company, 2010.

[18] M. Spence, "Government and economics in the digital economy," Journal of Government and Economics, vol. 3, 2021, Art. no. 100020.

[۱۹] م. مهرکام، م.ت. تقوی فرد، و ا. جهانگرد، "مدلی برای تحلیل نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات در رشد تولید ناخالص داخلی ایران با رویکرد پویایی سیستم"، رساله دکتری مدیریت فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، ۱۴۰۰.

[20] P. Koutroumpis, "The Economic Impact of Broadband on Growth: A Simultaneous Approach," Telecommunications Policy, vol. 33, no. 9, 2009.

[21] R. Katz و P. Koutroumpis, "Measuring Socio-Economic Digitization: A Paradigm Shift," Social Science Research Network, 2012.

[22] R. Bukht و R. Heeks, "Defining, conceptualising and measuring the digital economy," Development Informatics Working Paper, no. 68, 2017.

[23] H. Aly, "Digital transformation, development and productivity in developing countries: is artificial intelligence a curse or a blessing?," Review of Economics and Political Science, vol. 7, no. 4, pp. 238–256, 2022.

[24] L. Mićić, "Digital transformation and its influence on GDP," Economics, vol. 5, no. 2, pp. 135–147, 2017, doi: 10.1515/eoik-2017-0028.

[25] E. Roszko-Wójtowicz و M. M. Grzelak, "Macroeconomic stability and the level of competitiveness in EU member states: A comparative dynamic approach," Oeconomia Copernicana, vol. 11, no. 4, pp. 657–688, 2020, doi: 10.24136/oc.2020.027.

[26] A. Małkowska, M. Urbaniec, و M. Kosała, "The impact of digital transformation on European countries: Insights from a comparative analysis," Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy, vol. 16, no. 2, pp. 325–355, 2021, doi: 10.24136/eq.2021.012.

[27] ع. پناهی‌فرد، م. پیری، و س. کیان‌پور، "بررسی تأثیر اقتصاد دیجیتال در بازاریابی بر توسعه صادرات و رشد اقتصادی همدان: رویکرد توابع کاپیولا"، فصلنامه تخصصی رشد فناوری، دوره ۲۰، شماره ۷۸، ۱۴۰۳.

[۲۸] ف. توسلی، ف. دژپسند، و ع. عرب مازار، "بررسی اثر دیجیتالی شدن اقتصاد بر رشد اقتصادی ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم اقتصادی و سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۹.

[۲۹] م.ع. مرادی و م.رضا هدایتی، "طراحی مدل تکاملی گذار ایران به اقتصاد دیجیتال"، فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال هجدهم، شماره ۶۸، صص. ۲۱۹-۲۵۱، ۱۳۹۷.

[۳۰] ک. امامی، "آیا افزایش سهم فناوری اطلاعات و ارتباطات از تولید ناخالص داخلی در کشور ایران ضروری است؟"، فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال هجدهم، شماره ۶۸، بهار ۱۳۹۷، صص. ۴۵-۷۴، ۱۳۹۶.

[۳۱] س. مشیری، "برآورد آثار مستقیم و سرریز سرمایه‌گذاری در فناوری اطلاعات و ارتباطات بر تولید صنایع ایران با تأکید بر نقش سرمایه‌ی انسانی و ظرفیت جذب"، فصلنامه تحقیقات اقتصادی، جلد ۵۲، شماره ۲، صص. ۳۹۵-۴۲۶، ۱۳۹۶.

[۳۲] ص. معتقد، ه. رنجبر، و س. دایی کریم‌زاده، "رابطه فناوری اطلاعات و ارتباطات، بخش‌های صادراتی و غیرصادراتی و رشد اقتصادی در ایران: تعمیم مدل فدر"، مدلسازی اقتصادی، جلد ۸، شماره ۴ (پیاپی ۲۸)، صص. ۲۷-۴۴، ۱۳۹۳.

[۳۳] م.ع. مرادی، م. کبریایی، و م. گنجی، "تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر رشد اقتصادی کشورهای اسلامی منتخب"، فصلنامه اقتصاد و تجارت نوین، شماره ۲۹ و ۳۰، پاییز ۱۳۹۱، صص. ۷۹-۱۰۸، ۱۳۹۱.

[34] A. L. Gómez and S. J. López, "Innovation and transformation: Keys to the success of SMES in the digital age," Journal of Economics, Innovative Management and Entrepreneurship, vol. 2, no. 3, 2024.

[35] W. Zhang, S. Zhao, X. Wan, and Y. Yao, "Study on the effect of digital economy on high-quality economic development in China," PLOS ONE, vol. 16, no. 9, p. e0257365, 2021.

[36] Jiao S, Sun Q. Digital Economic Development and Its Impact on Economic Growth in China: Research Based on the Prespective of Sustainability. Sustainability. 2021; 13(18):10245. https://doi.org/10.3390/su131810245

[37] Solomon, E. M., & van Klyton, A. (2020). The impact of digital technology usage on economic growth in Africa. Utilities policy, 67, 101104.

[38] Niebel, T. (2018). ICT and economic growth–Comparing developing, emerging and developed countries. World development, 104, 197-211.

[39] Fernández-Portillo, A., Almodóvar-González, M., & Hernández-Mogollón, R. (2020). Impact of ICT development on economic growth. A study of OECD European union countries. Technology in Society, 63, 101420.

[40] Latif, Z., Latif, S., Ximei, L., Pathan, Z. H., Salam, S., & Jianqiu, Z. (2018). The dynamics of ICT, foreign direct investment, globalization and economic growth: Panel estimation robust to heterogeneity and cross-sectional dependence. Telematics and informatics, 35(2), 318-328.

[41] Palvia, P., Baqir, N., & Nemati, H. (2018). ICT for socio-economic development: A citizens' perspective. Information & Management, 55(2), 160-176.

[42] S. Bandyopadhyay, "Knowledge-Based Economic Development: Mass Media and the Weightless Economy," STICERD, London School of Economics and Oriel College, Oxford University, 2009.

[43] L. Raffestin, "ICT Spending and Inflation at the Sectorial Level," University of Paris, 2011.

[44] M. Kabza, "Artificial intelligence in financial services–benefits and costs," in Innovation in Financial services, Routledge, 2020, pp. 183-198.

[45] S. Mullainathan و J. Spiess, "Machine learning: an applied econometric approach," Journal of Economic Perspectives, vol. 31, pp. 87–106, 2017.

[۴۶] Wooldridge JM. 2010. Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data. Cambridge, MA: MIT Press

[۴۷] Angrist JD, Pischke JS. 2008. Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press

[48] Wu X, Kumar V, Quinlan JR, Ghosh J, Yang Q, et al. 2008. Top 10 algorithms in data mining. Knowl. Inform. Syst. 14:1–37

[49] Athey, S., & Imbens, G. W. (2019). Machine learning methods that economists should know about. Annual Review of Economics, 11(1), 685-725.