Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 1-18

Exploring the Role of Artificial Intelligence in the Law Domain: An Exploratory Approach

Ommolbanin kazemizad[1], Mona Jami Pour[2*], Seyyedeh Fatemeh Faghihi [3]

[1] M.A. Graduate in E-Commerce, Department of Business, Faculty of Management and Accounting, Hazrat-e Masoumeh University, Qom, Iran

[2] Associate Professor, Department of Business, Faculty of Management and Accounting, Hazrat-e Masoumeh University, Qom, Iran

[3] Assistant Professor, Department of Law, Faculty of Theology and Law, Hazrat-e Masoumeh University, Qom, Iran

Received: 08 April 2024, Revised: 09 October 2024, Accepted: 12 October 2024
Paper type: Research

Abstract

Artificial intelligence (AI) technologies have emerged as a significant transformation in the legal field. By utilizing advanced algorithms and computational techniques, AI contributes to solving complex legal issues and enhancing the efficiency of legal systems. In other words, AI can analyze large-scale legal data to identify intricate patterns, thereby assisting key stakeholders in making faster and better decisions. Despite the growing importance of this technology and the increasing interest of countries in investing in it, existing studies have failed to provide a comprehensive understanding of its transformative role for policymakers and decision-makers, often focusing on limited aspects. Accordingly, the main objective of this study is to explore and identify the applications of AI in the legal domain. This research is applied in nature and adopts a qualitative approach, conducted in two stages: meta-synthesis and interviews. In the first stage, using a meta-synthesis approach, 30 selected articles from reputable sources were screened and analyzed to identify existing applications. In the second stage, to enrich the research framework, semi-structured interviews were conducted with eight experts in AI and law. The findings indicate a total of 113 identified applications, categorized into 18 concepts and 5 main themes: monitoring the implementation of laws, crime detection and offender rehabilitation, supporting judicial case proceedings, legal document management, and enhancing public and civil rights enforcement. Despite existing research in this area, no study has yet provided an integrated analysis of the multifaceted role of AI in the legal field. The results of this study can offer practical insights for legal policymakers to identify priorities and investment opportunities, as well as for developers of AI tools in the legal sector.

Keywords: Artificial Intelligence, Smart Law, Meta-Synthesis, Interview, Thematic Analysis.

[*] Corresponding Author's email: m.jami@hmu.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱ الی ۱۸

واکاوی نقش هوش مصنوعی در حوزه حقوق: رویکردی اکتشافی

ام‌البنین کاظمی‌زاد [۱]، مونا جامی‌پور [۲*]، سیده‌فاطمه فقیهی [۳]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد تجارت الکترونیک، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه حضرت معصومه (س)، قم، ایران

[۲] دانشیار گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه حضرت معصومه (س)، قم، ایران

[۳] استادیار گروه حقوق، دانشکده حقوق و الهیات، دانشگاه حضرت معصومه (س)، قم، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

فناوری‌های هوش مصنوعی به‌عنوان یک تحول بزرگ در عرصه حقوق، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. این فناوری‌ها، با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و تکنیک‌های محاسباتی و ریاضی به حل مسائل پیچیده حقوقی و ارتقای کارایی نظام‌های حقوقی کمک می‌کنند. به عبارت دیگر، هوش مصنوعی در این عرصه می‌تواند با تجزیه و تحلیل کلان داده‌های حقوقی به شناسایی الگوهای پیچیده بپردازد و نقش آفرینان این حوزه در اتخاذ تصمیمات بهتر و سریع‌تر یاری رساند. با وجود اهمیت فزاینده این فناوری و تمایل کشورهای مختلف به سرمایه‌گذاری در آن، مطالعات موجود نتوانسته‌اند درک جامعی از نقش کلیدی این فناوری‌های تحول‌آفرین برای تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران ارائه دهند و به جنبه‌های محدودی از آن پرداخته‌اند. در این راستا، هدف اصلی پژوهش حاضر، واکاوی و شناسایی کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه حقوق است. این پژوهش از نظر هدف کاربردی و با رویکرد کیفی طراحی شده و در دو مرحله فراترکیب و مصاحبه انجام شده است. در مرحله اول، با استفاده از رویکرد فراترکیب، ۳۰ مقاله منتخب از منابع معتبر غربالگری شده و به شناسایی کاربردهای موجود در این مطالعات پرداخته شده است. در مرحله دوم، به‌منظور غنی‌سازی چارچوب پژوهش، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته‌ای با هشت نفر از خبرگان حوزه هوش مصنوعی و حقوق انجام شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که در مجموع ۱۱۳ کاربرد شناسایی شده که در ۱۸ مفهوم و ۵ مقوله اصلی دسته‌بندی شده‌اند. این مقوله‌ها شامل: نظارت بر حسن اجرای قوانین، شناسایی جرایم و اصلاح مجرمین، پشتیبانی از فرایند دادرسی پرونده‌های قضایی، مدیریت اسناد حقوقی، و بهبود اجرای حقوق عامه و حقوق شهروندی هستند. باوجود تحقیقاتی که در این حوزه صورت گرفته است، تاکنون مطالعه ای که به واکاوی جنبه‌های مختلف نقش آفرینی هوش مصنوعی در حوزه حقوق به صورت یکپارچه در نظر گیرد، صورت نگرفته است. یافته‌های پژوهش می‌تواند به بصیرتی عملی هم برای مسئولان و سیاست‌گذاران حقوقی، به منظور شناسایی اولویت‌ها و فرصت‌های سرمایه‌گذاری، و هم برای توسعه دهندگان ابزارهای هوش مصنوعی در حوزه حقوق فراهم آورد.

کلیدواژگان: هوش مصنوعی، حقوق هوشمند، فراترکیب، مصاحبه، تحلیل تم.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: m.jami@hmu.ac.ir

۱- مقدمه

انقلاب صنعتی چهارم با ترکیب فناوری‌های پیشرفته‌ای شناخته می‌شود که مرزهای میان حوزه‌های دیجیتال، فیزیکی و بیولوژیکی را از بین می‌برد[۱]. انقلاب صنعتی چهارم، که به‌طور معمول با عنوان صنعت ۴.۰ شناخته می‌شود، پیشرفت‌های بی‌نظیری در فناوری ایجاد کرده است که چارچوب‌های عملیاتی صنایع در سرتاسر جهان را به‌طور کامل بازتعریف می‌کند. تحول دیجیتال، که با ادغام فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند هوش مصنوعی[1](AI)، بلاکچین، داده‌های کلان و اینترنت اشیا [2](IoT) مشخص می‌شود، در مرکز این انقلاب قرار دارد.[۲].

امروزه فناوری هوش مصنوعی به یکی از اولویت‌های اصلی در دستور کار کشورهای مختلف در سراسر جهان تبدیل شده است. هوش مصنوعی می‌تواند منجر به کاربردهای تحول‌آفرین در طیف وسیعی از حوزه‌های صنعتی، فکری و اجتماعی شود که فراتر از دستاوردهای انقلاب‌های صنعتی گذشته است [۳]. هوش مصنوعی به طور کلی به عنوان مجموعه‌ای از فناوری‌ها شناخته می‌شود که قادرند وظایف شناختی را انجام دهند که پیش‌تر تنها توسط انسان‌ها امکان‌پذیر بود[۴]. این فناوری اغلب با مفهوم ربات‌ها شناخته می‌شود؛ اصطلاح «ربات» از واژه‌ای چکی با عنوان «روبوتا» به معنای کار اجباری گرفته شده است [۵].

پیشرفت‌های اخیر در حوزه هوش مصنوعی نشان‌دهنده یک تحول جدید مشابه انقلاب‌های صنعتی و اطلاعاتی است که تغییرات گسترده‌ای در تمامی جنبه‌های جامعه و زندگی به وجود آورده‌اند. به نظر می‌رسد که استفاده از هوش مصنوعی در هر حوزه‌ای می‌تواند تغییرات و تحولات عمده‌ای را به همراه داشته باشد. اگر این موضوع صحت داشته باشد، ورود این فناوری به صنایع گوناگون و به طور کلی نظام حکمرانی کشورها می‌تواند منجر به جهش در فرآیند توسعه شود[۶]. مشابه سایر صنایع و مشاغل، حوزه حقوق نیز از پیشرفت‌های فناوری مصون نمانده است[۸]. در واقع، قوانین به‌منظور پاسخگویی به نیازهای نوظهور و متغیر جوامع که در نتیجه تغییرات اجتماعی، سیاسی، اقتصادی و فناوری پدید می‌آیند، به‌طور مداوم رشد و تحول می‌یابند. این تحولات پیوسته در قوانین، همراه با افزایش سریع تعداد پرونده‌ها، بار زیادی را بر دوش متخصصان حقوقی تحمیل می‌کند. این موضوع به‌طور طبیعی این پرسش را مطرح می‌کند که آیا امکان ارائه کمک‌های ماشینی در این حوزه وجود دارد؟ [۷].

پروفسور تانیا سوردین تأثیرات فناوری بر سیستم قضایی را در قالب سه دسته طبقه‌بندی کرده است: حمایت از دست‌اندرکاران سیستم، جایگزینی عناصری از سیستم که پیش‌تر توسط انسان‌ها انجام می‌شد، و ایجاد تحولی بنیادین در سیستم. او اشاره می‌کند که تاکنون بیشتر اصلاحات محدود به دو دسته اول (حمایت و تکمیل) بوده است. برای مثال، می‌توان تفاوتی بین پشتیبانی از تصمیم‌گیرنده در روند تصمیم‌گیری (مانند راهنمایی او در طی مراحل مختلف) و خودکارسازی فرآیند تصمیم‌گیری قائل شد. بااین‌حال، گسترش هوش مصنوعی در تصمیم‌گیری‌های اداری و رشد ابزارهای حل‌وفصل اختلافات به‌صورت آنلاین – از جمله در چارچوب نظارتی سیستم دادگاه – نشان می‌دهد که دسته سوم نیز با سرعت در حال گسترش است [۹]. ورود فناوری هوش مصنوعی به عرصه حقوق، مسئله‌ای مهم و گسترده است که می‌تواند در ابعاد مختلف دانش حقوق کارایی داشته باشد. از قانون‌گذاری تا ایجاد قراردادهای هوشمند و روش‌های حل‌وفصل اختلافات، می‌توان از ظرفیت‌های فناوری هوش مصنوعی بهره برد [۱۰]. گزارش‌ها، انتشارات رسانه‌ای و سایر ادبیات صنعتی و حرفه‌ای، کاربردهای گسترده هوش مصنوعی را در حوزه قانون و دیگر زمینه‌ها مورد بحث قرار داده‌اند. ایده استفاده از هوش مصنوعی در مسائل حقوقی موضوع جدیدی نیست و از دهه ۱۹۷۰ مورد توجه قرار گرفته است [۹]. سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی کار وکلا، دادستان‌ها، قضات و سایر متخصصان مرتبط را تسهیل کرده و از طریق صرفه‌جویی در زمان، کاهش خطا و افزایش ثبات، می‌تواند به نفع عمومی کمک شایانی کند [۷]. یکی از ابزارهای هوش مصنوعی در این زمینه تبدیل گفتار به متن می‌باشد که در تایپ دادنامه‌ها، اظهارات طرفین پرونده، گزارش‌ها، مستندسازی روند تحقیق به تسریع فرایندهای حقوقی می‌پردازد [۱۱].

یکی از موضوعات پرطرفدار در حوزه قضایی و حقوق در بسیاری از کشورها، استفاده از هوش مصنوعی است. در آمریکا، هوش مصنوعی حتی به حوزه حقوق جزا نیز راه یافته است. برای مثال، در برخی موارد رسیدگی، برای صدور قرار آزادی موقت یا بازداشت، نرم‌افزارها با ارزیابی میزان ریسک ارتکاب مجدد جرم توسط متهم، تصمیم به آزادی یا بازداشت او می‌گیرند [۱۲]. در ایران نیز یکی از تأکیدات سند تحول قضایی، بهره‌گیری از قابلیت‌های فناوری‌های تحول‌آفرین، به‌ویژه هوش مصنوعی است. با این حال، اجرای این رویکرد در حوزه‌های حقوقی با سرعت کافی همراه نبوده است. بی‌شک روش‌های سنتی برای مقابله با جرایم نوظهور کافی نیستند،

[1] Artificial Intelligence

[2] Internet of Things

و ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند چالش‌های قدیمی را برطرف کرده و سرعت امور قضایی را افزایش دهند. به همین دلیل، استفاده از فناوری‌های نوین و هوش مصنوعی در دستور کار قوه قضاییه قرار گرفته است [۱۱].

در ایران، سیاست‌گذاران و مسئولان قوه قضاییه نیز بر اهمیت سرمایه‌گذاری در این حوزه و تسریع به‌کارگیری هوش مصنوعی در فرآیندهای کاری قضایی و حقوقی تأکید کرده و نگرش حمایتی نسبت به کاربردهای فناوری در ارتقاء کیفیت و کمیت رسیدگی‌های قضایی دارند. رئیس قوه قضاییه بیان داشت: «اگر خواهان تحول، کاهش وقوع برخی جرایم، پیشگیری از برخی جرایم، کاهش ورودی‌ها به دستگاه قضا و تقلیل فرآیندها هستیم، ناگزیر باید به سمت توسعه و گسترش بهره‌گیری از فناوری‌های روز حرکت کنیم و در این زمینه تأخیر و تعلل جایز نیست» [۱۳]. رئیس دیوان عالی کشور نیز با اشاره به فناوری‌های روز و استفاده بهینه از هوش مصنوعی اظهار داشت: «سیاست قوه قضاییه بر تقویت استفاده از هوش مصنوعی است و این موضوع در دستور کار قرار گرفته است. با این حال، باید زیرساخت‌های لازم فراهم شود و ان‌شاءالله در گام دوم اقدامات مؤثرتری انجام خواهد شد» [۱۴]. تسریع فرآیندهای قضایی با استفاده از ابزار گفتار به متن، نظارت هوشمند بر دفاتر اسناد رسمی و ابلاغ دیجیتال سردفتری، همچنین گمنام‌سازی ۲۰ میلیون رأی قضایی با بهره‌گیری از هوش مصنوعی به‌منظور استفاده قضات در زمینه‌های آموزشی و مشاهده آرای مشابه، از جمله فعالیت‌هایی است که قوه قضاییه در ایران در راستای به‌کارگیری هوش مصنوعی در حوزه حقوق انجام داده است [۱۵].

با توجه به ضرورت به‌کارگیری هوش مصنوعی در حوزه حقوق و تبدیل آن به اولویت سرمایه‌گذاری در نهادها و مؤسسات حقوقی، مطالعات محدودی در رابطه با بررسی نقش گسترده این فناوری در این حوزه انجام شده است و اکثر پژوهش‌های موجود بر جنبه‌های خاصی از کاربردهای چنین فناوری‌هایی متمرکز بوده‌اند. این خلا در ادبیات پژوهشی، ضرورت واکاوی عمیق‌تر نقش هوش مصنوعی در حوزه حقوق با رویکر کل نگرانه را به‌وضوح نمایان می‌سازد. بنابراین، این مقاله به‌منظور پرکردن این خلأ، با نگاهی جامع و استفاده از تجارب بین‌المللی گزارش شده در مقالات علمی معتبر و دیدگاه‌های خبرگان ایرانی، به تحلیل و بررسی نقش هوش مصنوعی در حوزه حقوق می‌پردازد.

ساختار پژوهش در ادامه بدین صورت است؛ در بخش دوم، ادبیات مرتبط با هوش مصنوعی و کاربردهای آن در حوزه حقوق مطرح می‌شود. در بخش بعدی، مراحل اجرایی پژوهش و روش‌شناسی آن تشریح خواهد شد. بخش چهارم به ارائه یافته‌های حاصل از پژوهش اختصاص دارد. در نهایت، بخش پایانی به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات مربوط می‌پردازد.

۲- ادبیات پژوهش

۲-۱- مفهوم هوش مصنوعی

بررسی ادبیات نشان می‌دهد که "هوش مصنوعی" اصطلاحی بسیار دشوار برای تعریف است [۸، ۱۶]. یکی از دلایل دشواری تعریف هوش مصنوعی از این واقعیت ناشی می‌شود که مشخص نیست منظور جامعه از اصطلاح هوشمند چیست. به گفته جان مک‌کارتی، «مشکل این است که ما نمی‌توانیم به‌طورکلی مشخص کنیم که چه نوع رویه‌های محاسباتی را می‌خواهیم هوشمند بنامیم»[۱۷]. به همین دلیل، در مورد معنای این اصطلاح توافق کمی وجود دارد. در واقع، پیشرفت‌های تکنولوژیکی که تحت عنوان هوش مصنوعی قرار می‌گیرند، به زمان و شرایطی بستگی دارد که فرد در جستجوی تعریف آن است و این مفهوم در طول زمان تغییر می‌کند [۸]. بنابراین، مرور ادبیات نشان می‌دهد که تعریف قطعی و واحدی برای هوش مصنوعی وجود ندارد [۳]، [۲۶-۱۸]. در واقع، هوش مصنوعی به‌طور گسترده به روش‌های محاسباتی اشاره دارد که فرایندهای مرتبط با توانایی‌های شناختی انسان، از جمله تفکر، کسب دانش و سازگاری، و همچنین توانایی حسی برای درک و تعامل را تقلید می‌کنند [۲۴].

۲-۲- هوش مصنوعی و دسته بندی‌های حقوق

کاربران متقاضی استفاده از هوش مصنوعی در حوزه قانون به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: ۱- قانون‌گذاران که مسئول وضع قوانین و مقررات هستند، ۲- قضات و وکلا که در فرآیند دادرسی و اجرای قانون فعالیت می‌کنند، و ۳- حقوقدانان که به فهم، تبیین و آموزش قوانین می‌پردازند [۲۷]. قانون‌گذاران با شناسایی بهترین قوانین، آن‌ها را تنظیم و تصویب می‌کنند. این قوانین از دانش‌های مختلف، شامل علوم منطقی، تجربی و تاریخی، استخراج می‌شوند. همچنین، قانون‌گذاران از یافته‌های مرتبط با اخلاق و دیگر دانش‌های هنجاری نیز استفاده می‌کنند [۲۸].

اجرای قانون به معنای اقدام نماینده دولتی است که به دستور قانونی اعتبار می‌بخشد. مجریان قانون تصمیمات حقوقی فوری را که توسط افسران پلیس و قضات دادگاه‌ها اتخاذ می‌شود، شامل می‌شوند [۲۹]. در زمینه اجرای قانون، هوش مصنوعی فرصت‌های زیادی برای تحلیل و تفسیر دقیق داده‌ها ارائه می‌دهد. برای اینکه اجرای قانون

مؤثر باشد، ضروری است که خروجی یک سیستم هوش مصنوعی منطقی و قابل اعتماد باشد. این موضوع نه‌تنها به برآورد نیازهای عملیاتی، مانند تعیین تعداد و نوع پرسنل مورد نیاز برای یافتن یک مظنون خاص کمک می‌کند، بلکه همچنین امکان ارائه شواهدی که در دادگاه قابل قبول باشد را فراهم می‌آورد[۳۰].

در بین دانشکده‌های حقوق، این توافق وجود دارد که وظیفه اصلی آموزش حقوقی این است که اطمینان حاصل شود فارغ‌التحصیلان برای انجام کارهای حقوقی آماده هستند. مهارت‌های ضروری برای آموزش حقوقی شامل دانش قانون اساسی، حل مسائل، تحقیق و ترکیب حقوقی، ارتباط مؤثر، کار گروهی و استقلال در یادگیری است [۳۱]. با وجود اینکه فرصت‌های شغلی برای وکلای جوان به دلیل ورود هوش مصنوعی که وظایف ساده و تکراری را جایگزین می‌کند، کاهش یافته، دانشکده‌های حقوق باید دانشجویان خود را آماده کنند تا پس از فارغ‌التحصیلی وکیل‌های متخصصی شوند. این امر نیازمند تغییر در برنامه‌های درسی و تمایل به تعامل با فناوری‌های موجود هوش مصنوعی است تا دانشجویان حقوق به‌خوبی برای چشم‌انداز آینده حقوقی آماده شوند [۳۲].

۲-۳- پیشینه پژوهش

[۳۳] مطالعه‌ای با عنوان "بررسی نقش داده‌کاوی و هوش مصنوعی در پیشگیری از جرایم خشن" انجام شده است. این پژوهش به روش اسنادی (کتابخانه‌ای) صورت گرفته و در تلاش است به پرسش‌های مربوط به نقش روش‌های داده‌کاوی و هوش مصنوعی در پیشگیری از جرایم خشن، همچنین چیستی الگوریتم‌ها و روش‌های پرکاربرد برای کشف قواعد جرم و تحلیل فرآیند عملکرد این روش‌ها پاسخ دهد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که توانایی کشف الگوی ارتکاب جرم از ملزومات اصلی برای پیشگیری از وقوع جرم است و روش‌های داده‌کاوی می‌توانند نقش بسیار مهمی در پیشگیری از جرایم خشن ایفا کنند. همچنین، دسته‌بندی متغیرها و ویژگی‌های جرم در به‌کارگیری روش‌های داده‌کاوی برای پیشگیری اهمیت فراوانی دارد. در نهایت، الگوریتم‌های پیش‌بینی، طبقه‌بندی و خوشه‌بندی به‌عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های داده‌کاوی در حوزه تحلیل جرم و جرم‌شناسی شناخته می‌شوند.

[۳۴] پژوهشی با عنوان "تحلیل رایانه‌ای جرم با بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی برای کشف پیش‌دستانه جرم" انجام شده است. در این پژوهش، ابتدا مدلی برای تطابق جرم پیشنهاد می‌شود و سپس با رویکردی مروری و استفاده از مثال‌های کاربردی، نقش نظریه تحلیل بقا و تحلیل ارتباطات در حوزه کشف پیش‌دستانه جرم تبیین می‌گردد.

[۳۵] در پژوهشی با عنوان "هوش مصنوعی و محاکمه سریع در قوه قضاییه: افسانه، واقعیت یا نیاز؟" که در دادگاه عالی برزیل انجام شده است، داده‌ها از طریق جمع‌آوری اسناد و انجام مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته برای تجزیه و تحلیل محتوا گردآوری شده‌اند. نتایج این پژوهش یک مدل چارچوبی را ارائه می‌دهد که منابع و تأثیرات هوش مصنوعی را بر سرعت تصمیم‌گیری‌های حقوقی ترکیب می‌کند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که چگونه هوش مصنوعی می‌تواند به بهبود فرآیند قضایی کمک کند و راه‌حل‌هایی برای قضاوت، پیش‌محاکمه و حمایت قانونی ارائه دهد.

[۵] مطالعه‌ای با عنوان "پیشران‌های ارائه خدمات سایبری پایدار در دولت با تأکید بر حفظ امنیت از طریق هوش مصنوعی" انجام شده است. روش این پژوهش توصیفی-تحلیلی بوده و داده‌ها در بخش نظری از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و در بخش تحلیلی با استفاده از پرسش‌نامه جمع‌آوری شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ۱۲ پیشران با در نظر گرفتن بعد امنیت شناسایی شده‌اند که بالاترین پتانسیل را در ارائه خدمات در حوزه سایبری دارند و این پیشران‌ها در ۴ محور اولویت‌بندی شده‌اند.

[۳۶] در پژوهشی با عنوان "کاربرد الگوریتم تصمیم‌گیری هوش مصنوعی در تحلیل بحران و بهینه‌سازی سیستم دادگاه‌های بین‌المللی"، یک مدل تلفیقی از شبکه عصبی واحد بازگشتی معرفی شده است. این مدل از شبکه عصبی برای انجام وظیفه توصیه‌کردن قانون بهره می‌برد. با آموزش این مدل بر اساس مجموعه‌داده‌های تجربی، نتایج نشان می‌دهد که ساختار مدل ترکیبی پیشنهادی قادر است ویژگی‌های مؤثری را نمایان کند و نمایش‌های معنایی غنی از زمینه را ارائه دهد. این ویژگی‌ها می‌توانند نتایج بهتری را در وظایف طبقه‌بندی برچسب‌های چند دسته‌ای به همراه داشته باشند و در نهایت، ارزش عملی خاصی را ایجاد کنند. این مطالعه بر توانایی الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بهبود عملکرد سیستم دادگاه‌ها و تحلیل مؤثر بحران‌ها تأکید دارد.

[۳۷] پژوهشی تحت عنوان "مدیریت شواهد جرم مالیاتی در اندونزی: رویکرد هوش مصنوعی در سیستم یکپارچه عدالت کیفری" انجام شده است. در این مطالعه، چالش‌های مرتبط با هوش مصنوعی بر اساس نظریه ذی‌نفعان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش به دو نکته اصلی اشاره دارد: اولاً، اداره مدارک مربوط به جرم مالیاتی و فرآیند مصادره به‌صورت دستی، غیر یکپارچه و با دقت پایین انجام می‌شود. در نتیجه، مدیریت شواهد در هر مرحله از نظام عدالت کیفری شفاف نیست. ثانیاً، پیاده‌سازی مدیریت

شواهد جرم مالیاتی با استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند یک مبنای هنجاری عادلانه برای مشروعیت ذی‌نفعان (هم داخلی و هم خارجی) ایجاد کند. به‌طوری‌که ذی‌نفعان داخلی می‌توانند با شفافیت، دقت و عینیت بیشتری به بررسی و تعادل بپردازند و ذی‌نفعان خارجی، از جمله مردم و سازمان‌های غیردولتی، نیز قادر خواهند بود در هر مرحله از نظام عدالت کیفری یکپارچه بر شواهد و فرآیندهای مصادره نظارت کنند.

[۳۸] پژوهشی تحت عنوان "هوش مصنوعی برای امنیت سایبری: نقشه‌برداری سیستماتیک ادبیات" انجام شده است که در آن ۱۳۱ مقاله به عنوان نمونه استفاده شده است. این مطالعه با استفاده از نقشه‌برداری سیستماتیک و به‌کارگیری روش‌های کمی و کیفی، مقالات را تجزیه‌وتحلیل کرده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های هوش مصنوعی نقش مهمی در مبارزه با جرایم سایبری ایفا کرده و به‌طور قابل‌توجهی بر بهبود سیستم‌های تشخیص نفوذ تأثیر گذاشته‌اند. همچنین، بیشتر مطالعات بر روی سیستم‌های تشخیص و پیشگیری از نفوذ تمرکز داشته و رایج‌ترین تکنیک مورد استفاده، ماشین‌های بردار پشتیبان[1] بوده است.

[۳۹] پژوهشی تحت عنوان "بررسی ادبیات سیستماتیک روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی تصمیمات دادگاه" با استفاده از مرور سیستماتیک ادبیات انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که می‌توان از روش‌های مختلف یادگیری ماشین در پیش‌بینی تصمیمات دادگاه استفاده کرد. با توجه به اینکه اکثر این روش‌ها دقتی بیش از ۷۰ درصد را به دست آورده‌اند، عملکرد آن‌ها قابل قبول است. بنابراین، می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی انواع تصمیمات قضایی، به پیشرفت‌های قابل‌توجهی دست یافت.

[۷] پژوهشی تحت عنوان "پردازش زبان طبیعی در قانون: پیش‌بینی نتایج در دادگاه‌های عالی ترکیه" با استفاده از روش تحقیق پیمایشی (آموزش و آزمایش مدل) انجام شده است. این مقاله نتایج جدیدی را در زمینه پیش‌بینی احکام دادگاه قانون اساسی ترکیه و دادگاه‌های استیناف ارائه می‌دهد که تنها با استفاده از توصیفات واقعی و بدون مشاهده احکام واقعی به دست آمده‌اند. همچنین، یافته‌ها نشان می‌دهند که نتایج دادگاه‌های نظام حقوقی ترکیه را می‌توان با دقت بالا پیش‌بینی کرد، به‌ویژه با بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق.

[۴۰] پژوهشی تحت عنوان «کاربرد معیارهای یادگیری ماشین برای فرآیندهای پویا در عدالت الکترونیکی» انجام شده است. در این تحقیق، پژوهشگران روشی را برای ساختاردهی و تجزیه‌وتحلیل مدل‌های داده‌های قانونی مبتنی بر یادگیری ماشین توسعه داده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌های محاسباتی نشان می‌دهند که روش توسعه‌یافته از کارایی لازم برخوردار است و همچنین با استفاده از تفسیر نتایج به‌دست‌آمده، توصیه‌هایی برای ارتقای مقررات اداری ارائه شده است.

در ادامه خلاصه‌ای از پیشینه داخلی پژوهش در جدول ۱ و پیشینه خارجی پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

به طور خلاصه، می‌توان نقدهای زیر را به ادبیات این حوزه مطرح کرد:

اولاً، در مطالعات گذشته بیشتر بر روی کاربرد یک الگوریتم خاص هوش مصنوعی در یک حوزه خاص متمرکز شده‌اند. برخی از تحقیقات به موضوع پیشگیری از جرایم و شناسایی علل آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی پرداخته‌اند[۳۳،۳۴]. در برخی دیگر از مطالعات، بررسی موردی در یک کشور از منظر یکی از مسائل حقوقی انجام شده است[۳۵، ۷، ۳۷]. همچنین، برخی از مطالعات به حوزه امنیت در ارائه خدمات مبتنی بر هوش مصنوعی در خدمات سایبری تمرکز دارند[۵، ۳۸]. بر اساس دانش نویسندگان، مطالعه‌ای که با رویکردی کل‌نگر به واکاوی نقش هوش مصنوعی در حوزه حقوق بپردازد، تاکنون صورت نگرفته است.

ثانیاً، در این پژوهش تلاش شده است تا علاوه بر بررسی بهترین اقدامات و تجربیات بین‌المللی در حوزه پژوهش که در مطالعات معتبر منتشر شده‌اند، نظر خبرگان ایرانی نیز با توجه به اولویت‌ها و شرایط کشور در طراحی چارچوب در نظر گرفته شود. به این منظور، در مرحله اول از رویکرد فراترکیب و در مرحله دوم از مصاحبه با صاحب‌نظران استفاده شده است تا چارچوبی کل نگر از کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه حقوق طراحی شود.

[1] Support Vector Machine

جدول ۱. پیشینه داخلی پژوهش

ردیف	عنوان پژوهش	نام مراجع	روش تحقیق	حوزه موردمطالعه
۱	پیشران‌های ارائه خدمات سایبری پایدار در دولت با تأکید بر حفظ امینت از طریق هوش مصنوعی	[۵]	مرور ادبیات و پیمایشی (پرسش‌نامه)	امنیت سایبری
۲	بررسی نقش داده‌کاوی و هوش مصنوعی در پیشگیری از جرایم خشن	[۳۳]	مرور ادبیات	تحلیل جرم
۳	تحلیل رایانه‌ای جرم با بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی کشف پیش‌دستانه جرم	[۳۴]	مرور ادبیات	تحلیل جرم

جدول ۲. پیشینه خارجی پژوهش

ردیف	عنوان پژوهش	نام مراجع	روش تحقیق	حوزه موردمطالعه
۱	هوش مصنوعی و محاکمه سریع در قوه قضاییه افسانه، واقعیت یا نیاز؟ مطالعه موردی در دادگاه عالی برزیل	[۳۵]	مرور ادبیات، مطالعه موردی و مصاحبه نیمه‌ساختاریافته	قوه قضاییه/ دادگاه عالی برزیل
۲	کاربرد الگوریتم تصمیم‌گیری هوش مصنوعی در تحلیل بحران و بهینه‌سازی سیستم دادگاه‌های بین‌المللی	[۳۶]	پیمایشی (آموزش و آزمایش مدل)	دادگاه
۳	مدیریت شواهد جرم مالیاتی در اندونزی: رویکرد هوش مصنوعی در سیستم یکپارچه عدالت کیفری	[۳۷]	حقوقی _ هنجاری	جرایم
۴	هوش مصنوعی برای امنیت سایبری: نقشه‌برداری سیستماتیک ادبیات	[۳۸]	مرور سیستماتیک ادبیات	امنیت سایبری
۵	بررسی ادبیات سیستماتیک روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی تصمیمات دادگاه	[۳۹]	مرور سیستماتیک ادبیات	دادگاه
۶	پردازش زبان طبیعی در قانون، پیش‌بینی نتایج در دادگاه‌های عالی ترکیه	[۷]	پیمایشی (آموزش و آزمایش مدل)	دادگاه
۷	کاربرد معیارهای یادگیری ماشین برای فرایندهای پویا عدالت الکترونیکی	[۴۰]	پیمایشی (آموزش و آزمایش مدل) و مطالعه موردی	سیستم عدالت الکترونیکی

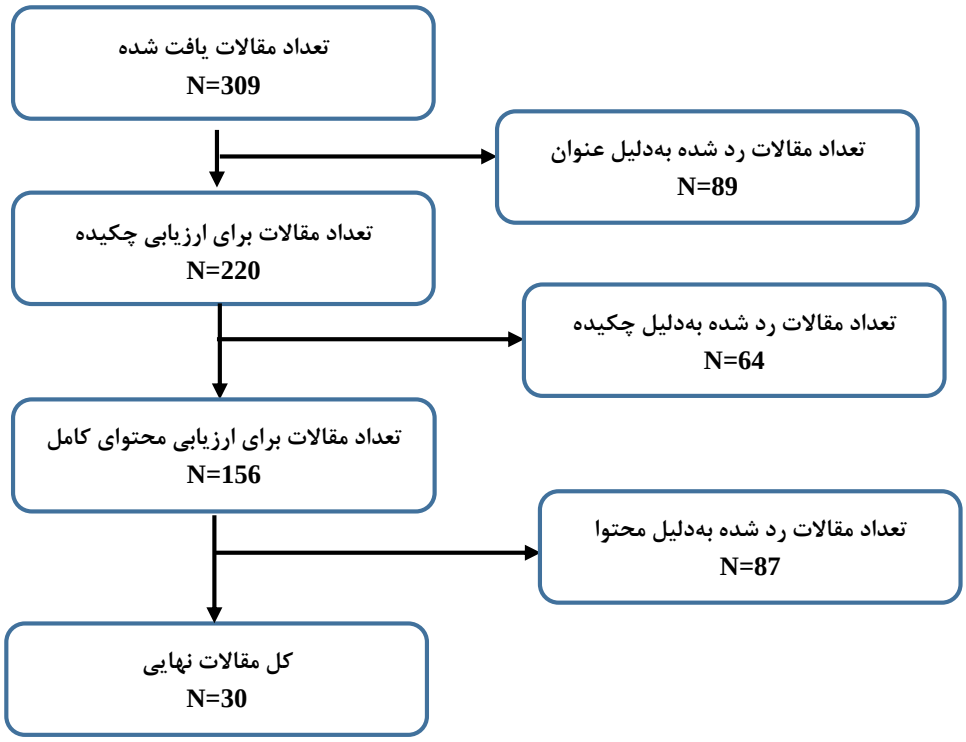
۳- روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی است. ماهیت و شیوه گردآوری داده‌ها به‌صورت کیفی و در دو مرحله، فراترکیب و تحلیل مضمون داده‌های حاصل از مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته، انجام شده است. در مرحله اول، با استفاده از روش فراترکیب، به شناسایی کاربردهایی پرداخته شده که به‌صورت پراکنده در مقالات مختلف اشاره شده‌اند. برای تحقق هدف پژوهش، از روش هفت‌مرحله‌ای ساندلوسکی و باروسو (۲۰۰۷) استفاده شده است. گام‌های هفت‌مرحله‌ای سندلوسکی و باروسو شامل: ۱. تنظیم سؤال تحقیق ۲. بررسی متون به‌صورت نظام‌مند ۳. جست‌وجو و انتخاب مقالات مناسب ۴. استخراج اطلاعات مقاله ۵. کنترل کیفیت ۶. تجزیه‌وتحلیل و ترکیب یافته‌های کیفی و ۷. ارائه یافته‌ها است. جهت جست‌وجوی مقالات مرتبط با هدف پژوهش، تلاش شده است تا مجموعه مقالات منتشر شده در پایگاه‌های داده، مجلات، همایش‌ها و موتور جست‌وجوهای مختلف در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ بررسی شده و واژگان کلیدی آن‌ها انتخاب شود. در جدول ۲ واژگان کلیدی و فرمت جست‌وجو ارائه شده است.

بر اساس نتایج اولیهٔ جست‌وجو ۳۰۹ مقالهٔ مرتبط شناسایی شد و برای انتخاب مقاله‌های مناسب بر اساس الگوریتم نشان‌داده‌شده در شکل ۱، پارامترهای مختلفی مانند عنوان، چکیده، محتوا و کیفیت روش پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۳. کلیدواژه‌های جست‌وجو

حوزه	انگلیسی	فارسی
کلیدواژه‌های حقوق	Law, Legal, Court, justice, Judiciary, Legal documents, cybersecurity, Cyber crimes, crime, Government, electronic government, Smart government, governance, Smart governance, Smart contract, Electronic signature, Smart City, Divorce cases, Lawyer, witness, Chase, prison, politics, election, Police, terrorist, Public Section.	حقوق، قانون، دادگاه، دادگستری/ عدالت، قوه قضاییه، اسناد قانونی، امنیت سایبری، جرایم سایبری، دولت، دولت الکترونیک، دولت هوشمند، حکمرانی، حکمرانی هوشمند، قرارداد هوشمند، امضای الکترونیک، شهر هوشمند، پرونده‌های طلاق، وکیل، شاهد، تعقیب، زندان، سیاست، انتخابات، پلیس، تروریست، بخش عمومی.
کلیدواژه‌های هوش مصنوعی	Artificial intelligence, machine learning, natural language processing, artificial neural network, fuzzy logic, genetic algorithm, deep learning.	هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، پردازش زبان طبیعی، شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، الگوریتم ژنتیک، یادگیری عمیق.
فرمت جست‌وجو	Artificial intelligence and court OR artificial intelligence in court OR application of artificial intelligence in court.	هوش مصنوعی و دادگاه یا هوش مصنوعی در دادگاه یا کاربرد هوش مصنوعی در دادگاه.



شکل ۱. نتایج جست و جو و انتخاب مقالات

در این مرحله از طریق بازبینی چندمرحله‌ای مقالات، از ۳۰۹ مقاله شناسایی شده در مرحله قبل، ۲۷۸ مقاله بنا به دلایل مطرح شده حذف شدند و از یافته‌های ۳۰ مقاله استفاده شده است. جهت تعیین روایی و اعتبار روش فراترکیب از ابزار برنامه مهارت‌های ارزیابی حیاتی استفاده شد و جهت سنجش پایایی مقالات در پژوهش حاضر از ضریب درون موضوعی کاپا[1] استفاده شد. بدین صورت که تعداد ۴ مقاله به‌صورت تصادفی انتخاب و توسط کدگذار دیگری که مسلط به موضوع پژوهش است و همچنین با فرایند کدگذاری نیز آشنا است، کدگذاری شد. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تحلیل قرار گرفت و ضریب کاپا حدود ۰,۷۸۵ به دست آمد. از آن جایی که ضریب کاپا باید بیشتر از ۰,۷ باشد؛ لذا قابلیت اعتماد کدگذاری‌ها تأیید شد.

در مرحله دوم از پژوهش جهت غنای بیشتر یافته‌ها، تکمیل و بومی‌سازی آنها، علاوه بر روش فراترکیب از روش مصاحبه نیز استفاده شد. بدین منظور و بر مبنای اشباع نظری داده‌ها با هشت نفر از خبرگان در حوزه هوش مصنوعی و حقوق با بیش از ۲ سال

[1] Interclass correlation Kappa

سابقه کاری و با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند قضاوتی، مصاحبه نیمه‌ساختاریافته صورت گرفت. در جدول ۴ سؤالات مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته ارائه شده است.

در جدول ۵ نیز توزیع جمعیت‌شناختی مصاحبه‌شوندگان ارائه شده است. برای تعیین روایی مصاحبه‌ها از مراحل هفت‌گانه که توسط کی وال[1] (۱۹۹۶) ارائه شده استفاده شد و جهت تعیین پایایی مصاحبه‌ها مانند مرحله فراترکیب از ضریب درون موضوعی کاپا استفاده شد. بدین صورت که تعداد ۴ مصاحبه به‌صورت تصادفی انتخاب و توسط کدگذار دیگری که مسلط به موضوع پژوهش است و همچنین با فرایند کدگذاری نیز آشنا است، کدگذاری شد. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تحلیل قرار گرفت و ضریب کاپا حدود ۰,۷۸۳ به دست آمد. از آن جایی که ضریب کاپا باید بیشتر از ۰,۷ باشد؛ لذا قابلیت اعتماد کدگذاری‌ها تأیید شد.

جدول ۴. سوالات پژوهش

ردیف	سؤالات
۱	به نظر شما مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه حقوق و سیستم حقوقی چیست؟
۲	هوش مصنوعی در قراردادهای هوشمند چه کاربردهایی می‌تواند داشته باشد؟ آیا تجربه‌ای در استفاده از هوش مصنوعی برای تنظیم قراردادها یا بررسی اسناد حقوقی داشته‌اید؟ نتایج چگونه بوده است؟
۳	به نظر شما، هوش مصنوعی چگونه می‌تواند در پیش‌بینی و پیشگیری از جرایم موثر باشد؟ چه قابلیت‌ها یا روش‌هایی از این فناوری در این زمینه مفید هستند؟
۴	چه کاربردهایی را برای هوش مصنوعی در زمینه طبقه‌بندی و دسته‌بندی اسناد و مدارک حقوقی می‌بینید؟ این فناوری چگونه می‌تواند فرآیندهای مدیریت اسناد را بهبود بخشد؟
۵	به نظر شما، هوش مصنوعی چگونه می‌تواند به ارائه مشاوره حقوقی کمک کند؟ این فناوری تا چه حد می‌تواند در این زمینه جایگزین مشاوران انسانی باشد؟
۶	به نظر شما، چه کاربردهایی برای هوش مصنوعی در حوزه حقوق عمومی و حقوق شهروندی وجود دارد؟ چگونه می‌تواند به ارتقاء حقوق شهروندی و بهبود روابط حقوقی بین مردم و دولت کمک کند؟

جدول ۵. توزیع جمعیت شناختی نمونه‌ها

مصاحبه‌شونده	میزان تحصیلات	رشته تحصیلی	سمت / شغل	سابقه کار	جنسیت
P1	دانشجوی کارشناسی‌ارشد	مهندسی نرم‌افزار	حوزه نرم‌افزار و هوشمندسازی سیستم‌ها	۲۲ سال	مرد
	کارشناسی	حقوق			
P2	دکتری	مدیریت فناوری اطلاعات	عضو هیئت‌علمی دانشگاه/ محقق در حوزه فناوری‌های حقوقی	۱۰ سال	زن
P3	دکتری	هوش مصنوعی	عضو هیئت‌علمی پژوهشگاه قوه قضاییه	۱۰ سال	زن
P4	کارشناسی‌ارشد	مهندسی کامپیوتر	کارشناس هوش مصنوعی	۲ سال	مرد
P5	کارشناسی‌ارشد	حقوق بین‌الملل	سردبیر مجله علمی/محقق در حوزه فناوری‌های حقوقی	۵ سال	زن
P6	دکتری	مدیریت فناوری اطلاعات	عضو هیئت‌علمی دانشگاه/ محقق در حوزه فناوری‌های حقوقی	۱۰ سال	مرد
P7	دکتری	مدیریت فناوری اطلاعات	عضو هیئت‌علمی پژوهشگاه قوه قضاییه/فعال در حوزه هوش مصنوعی	۵ سال	زن
P8	دکتری	حقوق خصوصی	عضو هیئت‌علمی دانشگاه/ محقق در حوزه فناوری‌های حقوقی	۸ سال	مرد

[1] Kvale

۴- یافته‌های پژوهش

در این مرحله یافته‌های حاصل از روش تحقیق فراترکیب و روش مصاحبه تلفیق شدند که در جدول ۶ ارائه شده است. در مجموع ۱۱۳ شاخص شناسایی شد و در ۱۸ مفهوم و ۵ مقوله دسته‌بندی‌شده است که شاخص‌هایی که فقط از مقالات استخراج شدند، شاخص‌هایی که فقط از مصاحبه‌ها به دست آمدند و شاخص‌هایی که هم از مصاحبه و هم از مقالات به دست آمدند در جدول۶ ارائه شده است.

جدول ۶. شاخص‌ها و مفاهیم نهایی پژوهش

مقوله	مفاهیم	شاخص‌ها	مراجع استخراج شاخص‌ها	فراوانی
نظارت بر حسن اجرای قوانین	نظارت بر اجرای قوانین در دستگاه‌های دولتی و قانون‌گذاری	شناسایی رویه‌ها و آیین‌نامه‌های مسئله‌خیز در سازمان‌های دولتی	P2	۱
		تعیین میزان اختلاف رویه‌ها در اجرای قانون در سازمان‌های دولتی	P2	۱
		شناسایی تناقض‌ها در تدوین قوانین و آیین‌نامه‌ها	P2	۱
		شناسایی مشابهت‌ها در شکایات دریافتی از سازمان‌های دولتی	P2	۱
	نظارت بالادستی بر اجرای قوانین در دستگاه‌های قضایی	شناسایی احکام مغایر با استفاده از تکنولوژی نویسه‌خوان نوری [1]	P1	۱
		تحلیل هوشمند آرا صادرشده توسط قاضی و نظارت بر رفتار قاضی	P1	۱
		خدمات کشف و تحلیل انحرافات در رویه قضایی برای مقابله با جرایم و ارزیابی عملکرد حرفه‌ای قضات با سیستم‌های نظارت هوشمند	[۴۰]	۱
		ارزیابی کمی و کیفی فرآیند قانون‌گذاری با بهره‌گیری از سیستم‌های نظارت هوشمند	[۴۰], P8	۲
		ارزیابی کمی و کیفی نحوه اجرای قانون با بهره‌گیری از سیستم‌های نظارت هوشمند	[۴۰], P8	۲
		بررسی انحرافات از تشریفات قانونی (مهلت‌ها، شرایط شکلی و...)	P8	۱
		شناسایی و استخراج متن پرونده‌ها از قالب تصویر و تبدیل به متن قابل جست‌وجو با استفاده از تکنولوژی نویسه‌خوان نوری	, P1] 35[	۲
		شناسایی و دسته‌بندی احکام مشابه و متناقض محاکم برای صدور رأی وحدت رویه یا ایجاد رویه جدید	P1	۱
شناسایی جرایم و اصلاح مجرمین	شناسایی و پیش‌بینی جرایم	شناسایی هوشمند ترافیک شبکه مشکوک و ناهنجاری‌های جدید	[۳۸], [۴۱]	۲
		تشخیص هوشمند نفوذ و درجه نفوذ به سامانه‌ها و شبکه‌های بی‌سیم	[۴۱]، [۴۲]، [۴۳]، [۴۴]	۴
		شناسایی الگوهای سرقت اینترنتی به‌صورت هوشمند	P1	۱
		شناسایی صفحات وب مخرب به‌صورت هوشمند	[۳۸]، [۴۱]، [۴۲]	۳
		شناسایی کاربران مخرب در سامانه‌های حقوقی به‌صورت هوشمند	[۳۸]	۱
		شناسایی ایمیل‌های تله‌گذاری به‌صورت هوشمند	[۴۱]	۱
		شناسایی حملات سایبری به‌صورت هوشمند	[۴۱]، [۴۲]	۲
		تشخیص جعل و سرقت هویت/شناسه یکتای فرد به‌صورت هوشمند	[۳۸]، [۴۱]، [۴۴]	۳
		شناسایی اقدامات سایبری مرتبط با تروریسم به‌صورت هوشمند	[۴۱]، [۲۳]، [۴۵]	۳
		پیش‌بینی قلدری و آزار و اذیت سایبری به‌صورت هوشمند	[۴۳]، [۴۱]	۲
		پیش‌بینی کلاهبرداری‌های سایبری به‌صورت هوشمند	[۴۳]، [۴۱]	۲
	پیش‌بینی احتمال وقوع جرم	پیش‌بینی وقوع جرم بر اساس تحلیل پروفایل افراد و قشرهای مختلف	P7, P8	۲
		شناسایی و تشخیص افراد مشکوک از طریق تحلیل پروفایل	P1, P4	۲
		پیش‌بینی محل و زمان وقوع جرم با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی[2]	P1, P2	۲
		پیش‌بینی تجمع‌های مشکوک با تحلیل داده‌های شبکه‌های اجتماعی	P1	۱

[1] Optical Character Recognition (OCR)
[2] Geographic Information System (GIS)

	برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری پیشگیری از جرایم و اصلاح مجرمین	شناسایی و نظارت هوشمند مناطق جرم‌خیز	P1, P3, P4, P7	۴
		تخصیص هوشمند منابع مالی براساس اولویت پیشگیری از جرایم	P2	۱
		شناسایی دوره‌های آموزشی موردنیاز برای کاهش بزه‌دیدگی و جرایم	P2, P3	۲
		پیشنهاد مجازات‌های بازدارنده با تحلیل کلان‌داده‌ها برای پیشگیری از بروز جرم	P2	۱
		تعیین هوشمند جایابی و چینش مجرمان در زندان‌ها برای کاهش جرایم	P3	۱
		شخصی‌سازی خدمات مشاوره روان‌شناسی به زندانیان براساس پروفایل فردی	P3	۱
پشتیبانی از فرایند دادرسی پرونده‌های قضایی	ارائه مشاوره‌های حقوقی/ دستیار هوشمند کاربران سامانه‌های حقوقی	ارائه مشاوره به کاربران ناآشنا با اصطلاحات قانونی با استفاده از سیستم‌های دستیار حقوقی هوشمند	] ،36 [،[۴۶]]39[۴۷]،[P1, P2, P3, P4, P7, P8	۱۰
		هدایت مراجعه‌کنندگان به مناسب‌ترین وکیل، مشاور حقوقی، و مراجع قضایی براساس نوع درخواست شکوایه با سامانه هوشمند خدمات حقوقی	, P5] 35[	۲
		استفاده از ربات مکالمه[1] برای پاسخ به سؤالات پرتکرار کاربران	P5	۱
		ایجاد میز خدمت هوشمند برای راهنمایی کاربران در انجام صحیح روال قضایی	P4, P7	۲
		پیشنهاد افرادی با پرونده‌های حقوقی مشابه بر مبنای رضایت آن‌ها	P6	۱
		ارائه امکانات قضایی شخصی‌سازی شده به کاربران	P3	۱
	تحقیق و تعقیب جرم در دادسرا	پیش‌بینی میزان احتمال مجرم بودن فرد مظنون از طریق تحلیل داده‌های پرونده و سوابق	P3, P4	۲
		مشابهت‌یابی صحنه‌های جرم مختلف در جرایم سریالی	P7	۱
		بازسازی صحنه جرم با استفاده از ربات‌ها	P7	۱
		اطمینان از صحت صحبت‌های شاکی، متهم یا شاهد با تحلیل احساسات و سنسورهای نوار قلب و نوار مغز	P3	۱
		تشخیص چهره و اثر انگشت برای شناسایی مجرمین با سیستم‌های تشخیص هویت بیومتریک	P1	۱
		اولویت‌بندی پرونده‌ها برای دادرسی با استفاده از تکنولوژی نویسه‌خوان نوری	P1, P2, P6	۳
	رسیدگی و صدور حکم در دادگاه	فردی‌سازی مجازات با توجه به ویژگی‌های مجرمین و شرایط تخفیف و تشدید	[۴۰], P2	۲
		شناسایی احکام و آرای پرونده‌های مشابه مختومه با استفاده از تکنولوژی نویسه‌خوان نوری	[۳۵] , P1, P7	۳
		اطلاع‌رسانی هوشمند درباره رعایت یا عدم رعایت اقدامات تأمینی توسط مجرم	P1	۱
		دیجیتالی کردن مدارک ارائه‌شده به دادگاه، شامل صوت و تصویر، با بهره‌گیری از نویسه‌خوان نوری	P1, P8	۲
		نظارت بر اصالت و صحت شواهد، اسناد و مدارک پرونده‌ها	, P1] 37[	۲
		تبدیل گفتار به نوشتار در دادگاه‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای تشخیص صدا	P1, P3	۲
		پیش‌بینی نتایج و وضعیت پرونده‌ها	، [۳۵]، [۴۰]، [۷]، [۳۹]، [۴۸]، [۴۹] [۵۳]، [۵۰]P1, P2, P3, P6, P8	۱۳
		شناسایی و استخراج پرونده‌های مشابه برای تجمیع رسیدگی و کمک به قضاوت	[۳۹], P1, P2, P7	۴
		ارجاع هوشمند پرونده‌ها بر اساس تخصص قضات	P1, P3, P5, P7	۴
		کمک به قاضی در شناسایی تکرار یا تعدد عناوین اتهامی با استفاده از نویسه‌خوان نوری	P1	۱
		ارجاع هوشمند پرونده‌ها به قضات برای کاهش اطاله دادرسی	P5, P7, P8	۳
مدیریت اسناد حقوقی	مدیریت هوشمند قراردادها	احراز صحت امضای الکترونیکی و دیجیتال قراردادها با سیستم‌های تشخیص هویت بیومتریک و تکنولوژی نویسه‌خوان نوری	P3, P4	۲
		پیشنهاد هوشمند بندهای متن قرارداد با استفاده از سیستم‌های خبره مدیریت قرارداد	P7	۱
		تقلب‌یابی و اعتبارسنجی در قراردادهای هوشمند	P4, P6, P8	۳

[1] Chatbot

		شناسایی آسیب‌پذیری‌های رایج در قراردادها و ارائه پیشنهادهای بهبود	[۵۱]، [۵۲]	۲
		ایجاد قالب‌های نمونه قرارداد و پیش‌نویس بر اساس قراردادهای مشابه	P6, P7	۲
		تعیین میزان پایبندی طرفین قرارداد بر مبنای سوابق ثبت‌شده	P2	۱
		شناسایی سوابق قراردادهای قبلی و موارد معارض	P2	۱
	طبقه‌بندی و بازیابی هوشمند دفاتر ثبت اسناد رسمی	تعیین نوع طبقه و دسته اسناد بر اساس محتوا با استفاده از تکنولوژی نویسه‌خوان نوری	[۵۳]; P2, P3, P4, P5, P8	۶
		یکپارچه‌سازی پایگاه اطلاعات اسناد کشور	P2	۱
		احراز هویت الکترونیکی افراد	P5	۱
		ثبت امضا و اثر انگشت به‌صورت دیجیتال	P3	۱
		تشخیص اصالت اسناد در دفاتر ثبت با سیستم‌های تشخیص هویت بیومتریک	P1	۱
		ارائه مشاوره‌های شخصی‌سازی شده برای تنظیم سند با طراحی سیستم‌های خبره	P2	۱
		بهینه‌سازی جست‌وجوی محتوای اسناد با نرم‌افزارهای نمایه‌ساز هوشمند	[۳۵]	۱
		بازیابی موارد مشابه از اسناد و پرونده‌های حقوقی با استفاده از تکنولوژی نویسه‌خوان نوری	, P7[۴۷]	۲
بهبود اجرای حقوق عامه و حقوق شهروندی	انتخابات	تشخیص صحت اطلاعات نامزدها در نشست‌های انتخاباتی	[۵۴]	۱
		نظرسنجی زودهنگام بهترین نامزد انتخاباتی از دید شهروندان با بهره‌گیری از ربات‌های رای‌گیری[1]	[۵۵]	۱
		سنجش افکار عمومی درباره روال برگزاری انتخابات از طریق تحلیل شبکه‌های اجتماعی	P6	۱
	ارائه خدمات حمل‌ونقل عمومی	ثبت هوشمند پلاک خودروهای متخلف	[۵۶]	۱
		ارسال خودکار هشدارهای ترافیکی به ایمیل متخلفان	[۵۶]	۱
		ردیابی دیجیتال مالک خودرو در صورت اعتراف به جرم	[۵۷]	۱
		کاهش جرایم رانندگی با تحلیل هوشمند رفتار خودرو	P5	۱
		استفاده از چت‌بات برای پاسخ به سؤالات شهروندان در مورد پارکینگ و دیگر خدمات	[۵۸]	۱
		پیش‌بینی هوشمند خطرناک‌ترین ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی در یک منطقه	[۵۸]، [۲۰]	۲
	ارائه خدمات درمانی بهداشتی	شناسایی زودهنگام شیوع بیماری‌های واگیردار با تحلیل کلان‌داده‌های سلامت	[۴۵]، [۴۲]، [۵۹]، [۵۶], P6	۵
		شخصی‌سازی خدمات پزشکی برای شهروندان	[۶۰]; P_7	۲
		شناسایی نوسانات عملکردی پزشکان و مراکز درمانی	P2	۱
		استفاده از چت‌بات‌ها برای پاسخ به پرسش‌های متداول بیماران	[۴۲]، [۵۶]	۲
		گسترش دسترسی به خدمات درمانی در مناطق دورافتاده با سیستم‌های خبره	[۴۵]	۱
		ایجاد سیستم‌های خودمراقبتی ملی برای بیماران مزمن	P6	۱
		تطبیق دی ان ای۲ در تشخیص هویت بیومتریک	P1	۱
	ارائه خدمات حقوق محیط‌زیست و انرژی	مدیریت، دفع و بازیافت هوشمند زباله‌ها با استفاده از ربات‌ها	[۴۲]، [۵۹]، [۵۸]	۳
		پیش‌بینی، نظارت و ارزیابی کیفیت و مصرف آب با بهره‌گیری از کنتورهای هوشمند	[۵۹]، [۴۲]، [۶۳]	۳
		پیش‌بینی و تخمین مصرف انرژی در ساختمان‌های هوشمند	[۵۹]، [۴۲]، [۵۸]	۳
		کنترل و کاهش آلودگی هوا با استفاده از سامانه‌های پایش هوشمند	[۶۳]، [۴۲]، [۵۹]، [۶۰]، [۵۶]	۵
		شناسایی فرسودگی شبکه انرژی شهری از طریق کشف نوسانات مصرف	P7	۱
		پیش‌بینی و مدیریت مصرف برق با بهره‌گیری از کنتورهای هوشمند	[۴۲]	۱
	تأمین امنیت عمومی	شناسایی خشونت در مکان‌های عمومی و پیشگیری از خسارات جانی با سیستم‌های هوشمند تشخیص چهره و حرکات	[۵۸]، [۴۲]، [۲۳]، [۴۵]	۴
		تشخیص اخبار جعلی از اخبار واقعی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی	[۴۲]	۱

[1] RoboVote
[2] DNA

		تحلیل امنیت انسانی در بخش عمومی با استفاده از برنامه‌های هوشمند مانند Watson	[۲۳]	۱
		شناسایی نارضایتی‌های هشداردهنده از طریق تحلیل احساسات در شبکه‌های اجتماعی	[۴۵] P6, [۴۲]، [۵۹]، P7	۵
		کنترل و مدیریت مرزها با استفاده از سیستم‌های پیشرفته تشخیص چهره و ردیابی حرکت	P6	۱
		شناسایی تقلب‌های مالی، انتخاباتی و سایر تقلب‌ها با الگوریتم‌های هوشمند	[۴۵], P6، [۲۳]، [۵۷]	۴
		رصد و شناسایی مجرمان در فضاهای عمومی با نرم‌افزارهای تشخیص چهره	[۲۳]	۱
	ارائه خدمات حقوق مالی	سیستم‌های پرداخت هوشمند	[۵۵]	۱
		پیش‌بینی هوشمند درآمد و نرخ بهره	[۵۹]	۱
		تعیین هوشمند ریسک اعتباری واحدهای دولتی	[۵۹]	۱
		تجارت مستقل و بدون واسطه با استفاده از ربات معامله گر[1]	[۴۵], [۵۷]	۲
		برنامه ریزی مالی خودکار با بهره‌گیری از مشاور روبو[2]	[۵۷]	۱
		بودجه‌بندی هوشمند سرمایه دولتی	[۵۷]	۱
		مدیریت مالی پروژه‌های مشارکت عمومی با بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند مالی	[۵۷], P8	۲
	پشتیبانی از خدمات صیانت از حقوق شهروندان	کمک به ارباب‌رجوع در یافتن اطلاعات و تکمیل فرم‌ها	[۲۳]	۱
		رسیدگی سریع‌تر و باکیفیت بالاتر به درخواست‌های شهروندان	[۲۳]	۱
		چت‌بات برای پاسخگویی به سؤالات شهروندان	[۲۳]	۱
		انتخاب بهترین ارائه‌دهنده خدمات برای شهروندان، مطابق با نیازهای فرد	[۵۹]	۱
		صدور حکم‌های عادلانه‌تر با کاهش خطاهای انسانی	P1,P2	۲
		تسریع فرایند دادرسی و صدور حکم از طریق اتوماسیون فرایند اطاله دادرسی	]36[	۱

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با آغاز انقلاب صنعتی چهارم، فناوری هوش مصنوعی توجه بسیاری از کسب‌وکارها و صنایع را به خود جلب کرده است. بسیاری از شرکت‌ها و مشاغل به منظور افزایش بهره‌وری و بهبود عملکرد خود از هوش مصنوعی استفاده می‌کنند. حوزه حقوق نیز از این نفوذ فناوری بی‌نصیب نمانده است. شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات حقوقی، وکلا، قضات و سایر متخصصان این حوزه می‌توانند با بهره‌گیری از فناوری هوش مصنوعی در حل مشکلات حقوقی خود کمک بگیرند. علی‌رغم اهمیت و ضرورت این موضوع، تا کنون پژوهشی که به‌طور جامع به بررسی کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه حقوق پرداخته باشد، انجام نشده است که هدف اصلی پژوهش حاضر می‌باشد.

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از روش فراترکیب، از یافته‌های ۳۰ مقاله بهره‌گیری شد و کاربردهایی که به‌صورت پراکنده در این مقالات ذکر شده بود، جمع‌آوری گردید. در مرحله بعد، به‌منظور غنای یافته‌ها و بومی‌سازی آن‌ها، با هشت نفر از خبرگان حوزه هوش مصنوعی و حقوق مصاحبه نیمه‌ساختاریافته‌ای انجام شد. در نهایت، با ترکیب نتایج حاصل از روش فراترکیب و مصاحبه، مجموعاً ۱۱۳ کاربرد شناسایی شد که در ۵ مقوله و ۱۸ مفهوم دسته‌بندی گردید.

مقوله اول، نظارت بر حسن اجرای قوانین است که شامل نظارت بر اجرای قوانین در دستگاه‌های دولتی و همچنین نظارت بالادستی بر اجرای قوانین در دستگاه‌های قضایی می‌باشد. مقوله دوم، شناسایی جرایم و اصلاح مجرمین است که شامل شناسایی و پیش‌بینی جرایم، پیش‌بینی احتمال وقوع جرم و همچنین برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری برای پیشگیری از جرایم و اصلاح مجرمین می‌باشد. مقوله سوم، پشتیبانی از فرآیند دادرسی پرونده‌های قضایی است که شامل ارائه مشاوره‌های حقوقی و دستیار هوشمند به کاربران سامانه‌های حقوقی، تحقیق و تعقیب جرم در دادسرا و رسیدگی و صدور حکم در دادگاه می‌باشد. چهارمین مقوله، مدیریت اسناد حقوقی است که شامل مدیریت هوشمند قراردادها و طبقه‌بندی و بازیابی هوشمند دفاتر ثبت‌اسناد می‌شود. آخرین مقوله، بهبود اجرای حقوق عامه و حقوق شهروندی است که شامل مفاهیم انتخابات، ارائه خدمات حمل‌ونقل عمومی، ارائه خدمات درمانی و بهداشتی، ارائه

[1] Robo-traders
[2] Robo-advisors

خدمات حقوق محیط‌زیست و انرژی، تأمین امنیت عمومی، ارائه خدمات حقوق مالی و پشتیبانی از خدمات صیانت از حقوق شهروندان می‌باشد. که در ادامه به تفضیل در مورد هریک از دسته بندی کاربردها بحث شده است.

- **نظارت بر حسن اجرای قوانین**

اولین مقوله در پژوهش حاضر، نظارت بر حسن اجرای قوانین است. یکی از کاربردهای جالب فناوری هوش مصنوعی که هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارد، تشخیص رفتارهای ناهنجار در سازمان‌ها و ارگان‌های دولتی است که امکان انطباق قانونی مؤثرتری را فراهم می‌کند. هوش مصنوعی می‌تواند پایگاه‌های اطلاعاتی داخلی شرکت‌های دولتی را بررسی کند و به شناسایی رفتارهایی بپردازد که با عملکرد معمولی متفاوت است. در برخی موارد، رفتار ناهنجار می‌تواند به شناسایی فعالیت‌های غیرقانونی منجر شود. همچنین، اساسنامه‌ها و تصمیمات قانونی نوعی داده را ارائه می‌دهند که می‌تواند توسط فناوری هوش مصنوعی تجزیه‌وتحلیل شود [۶۴]. علاوه بر این، با استفاده از فناوری هوش مصنوعی می‌توان اطمینان حاصل کرد که حل‌وفصل اختلافات توسط یک دادگاه خاص، با نتایج دادگاه‌های دیگر در مورد حقایق و مسائل حقوقی مشابه مطابقت دارد. چین با برنامه سیستم مرجع پرونده مشابه خود، که موقعیت‌های واقعی و قانونی مشابه را مقایسه می‌کند، پیشگام در این زمینه بوده است. این برنامه نه‌تنها به دادگاه محاکمه، بلکه به افرادی که اقدامات دادگاه بدوی را بررسی می‌کنند، راهنمایی می‌کند و به مقابله با قضات ضعیف و کم‌سواد کمک می‌کند. استفاده از نرم‌افزارهای هوش مصنوعی که بر مجموعه‌ای از پرونده‌ها تکیه می‌کنند که به نتایج صحیح دست یافته‌اند، سطحی از نظارت را فراهم می‌کند که به‌طور مؤثری از دستاوردهای بهترین قضات آموزش‌دیده سیستم بهره‌برداری می‌کند [۶۴].

- **شناسایی جرایم و اصلاح مجرمین**

شناسایی جرایم و اصلاح مجرمین، دومین مقوله مورد بررسی است. امروزه، توسعه بانک‌های اطلاعاتی و پردازش آن‌ها نقش مهمی در شناسایی الگوهای جرم برای پلیس و سازمان‌های امنیتی ایفا می‌کند. در این راستا، روش‌های داده‌کاوی و پردازش‌های هوش مصنوعی به‌عنوان ابزارهای قدرتمندی در کشف الگو و استخراج دانش از پایگاه‌داده‌ها برای فرایند تصمیم‌گیری به‌منظور پیشگیری و کنترل جرایم شناخته می‌شوند. این روش‌ها و ابزارهای داده‌کاوی با شناسایی روابط پنهان و نامشهود میان متغیرها در مجموعه‌داده‌های انبوه، ماهیت پیچیده جرم و جنایت را روشن کرده و زمینه را برای مقابله با آن فراهم می‌سازند [۲۴]. ابزار ارزیابی آسیب ریسک[1] توسط پلیس دورهام بریتانیا[2] برای شناسایی الگوهای تکرار جرم در بین مجرمان طراحی شده است. این ابزار در سال ۲۰۱۳ برای پیش‌بینی میزان تکرار جرم استفاده شد و با موفقیت ۹۸ درصد از مجرمان کم‌خطر و ۸۸ درصد از مجرمان پرخطر را شناسایی کرد. همچنین، اخیراً پلیس لندن اعلام کرده است که قصد دارد از فناوری تشخیص چهره به‌منظور کمک به شناسایی مظنونان استفاده کند [۴۵]. همچنین، مهم‌ترین دستاورد استفاده از روش‌های داده‌کاوی در تحلیل جرایم، کشف الگوهای ارتکاب جرم، شناسایی زمینه‌های ایجاد آن و پیش‌بینی روند تحولات آتی در راستای آگاهی‌بخشی به مجریان قانون است. پیامد نهایی این فرآیند کاهش فرصت‌های ارتکاب جرم در جامعه است. برخی از متخصصان جرم‌شناسی بر این باورند که رفتارهای تبهکارانه ناشی از وجود فرصت‌های مناسب برای ارتکاب جرم در یک مکان و زمان خاص است، و از بین بردن یا کاهش این فرصت‌ها می‌تواند به کاهش جرم منجر شود [۲۴].

- **پشتیبانی از فرایند دادرسی پرونده‌های قضایی**

مقوله بعدی پشتیبانی از فرآیند دادرسی پرونده‌های قضایی است. یکی از مأموریت‌های شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات حقوقی، مشاوره به کاربران در ارائه راهنمایی، نظارت و پشتیبانی در یک فرآیند قانونی خاص تحت نظارت متخصصان همان حوزه است. با این حال، این فرآیندهای مشاوره به دلیل تعداد بالای درخواست‌ها دچار تأخیر می‌شوند. این تأخیر می‌تواند هزینه‌های بیشتری را برای مؤسساتی که این مشاوره حقوقی را ارائه می‌دهند، به همراه داشته باشد و منجر به پاسخ دیرهنگام به درخواست‌های کاربران گردد. به منظور کاهش هزینه‌های زمانی، حوزه حقوقی علاقه‌مندی زیادی به استفاده از هوش مصنوعی نشان داده است [۴۶]. همچنین یکی از زمینه‌هایی که هوش مصنوعی در آن به‌خوبی عمل کرده است، حوزه تحقیقات حقوقی است که به دادستان‌ها کمک می‌کند تا تحقیقات مرتبط با جرایم را به سرعت انجام دهند [64]. از سوی دیگر، دادگاه‌های هوشمند به کاربرد قضایی فناوری هوش مصنوعی و تسهیلات و خدمات هوشمندانه‌ای که برای حرفه محاکمه ارائه می‌دهند، توجه بیشتری دارند. در حال حاضر، ساخت دادگاه‌های هوشمند عمدتاً بر محور عمومی‌سازی و استفاده از داده‌های کلان قضایی و فناوری هوش مصنوعی در فرایند اطلاع‌رسانی دادگاه‌ها متمرکز است [۳۶]. استفاده از هوش مصنوعی به‌عنوان یک راه‌حل برای رفع مشکلات

[1] Harm Assessment Risk Tool (HART)

[2] UK's Durham

عدالت، به‌ویژه در زمینه رسیدگی به مسائل مرتبط با محاکمه سریع، مورد توجه قرار گرفته است [۳۵].

- **مدیریت اسناد حقوقی**

مدیریت اسناد حقوقی به‌عنوان چهارمین مقوله در این پژوهش معرفی شده است. در قراردادهای هوشمند، سیستم قراردادنویسی مبتنی بر فناوری هوش مصنوعی الگوریتم‌های خود را بر روی مجموعه‌ای از داده‌های قراردادی طراحی می‌کند تا الگوها را شناسایی و متغیرهای کلیدی مانند جملات، تاریخ، طرفین قرارداد و غیره را استخراج نماید. این نرم‌افزار به شرکت‌ها در مدیریت مؤثر قراردادها کمک می‌کند؛ زیرا می‌تواند به‌راحتی نکات موجود در هر قرارداد را شناسایی و به آن‌ها دسترسی پیدا کند. همچنین قراردادهای ارائه‌شده به سیستم را مورد تحلیل، اعتبارسنجی و ارزیابی ریسک قرار می‌دهد [۲۳].

در تئوری، سیستم‌های طبقه‌بندی اسناد مبتنی بر فناوری هوش مصنوعی قادرند بسیاری از کارهای دستی زمان‌بر که به کارشناسان حقوقی نیاز دارند، حذف کنند. به‌عنوان مثال، یک کارشناس حقوقی باید صدها یا حتی هزاران سند را مطالعه کند تا نظرات را در دسته‌بندی‌های موضوعی قرار دهد، درحالی‌که یک سیستم خودکار می‌تواند این کار را با تلاش بسیار کم یا بدون تلاش انسانی انجام دهد [۵۳].

- **بهبود اجرای حقوق عامه و حقوق شهروندی**

آخرین مقوله در این پژوهش به بهبود اجرای حقوق عامه و حقوق شهروندی اختصاص دارد. در حوزه انتخابات، بسیاری از کشورهای دموکراتیک از هوش مصنوعی به‌واسطه دموکراسی الکترونیکی و سیستم رأی‌گیری الکترونیکی استفاده می‌کنند. این فناوری در انتخابات عمومی با راه‌اندازی سامانه‌های مختلف حمایتی برای تسهیل مراحل انتخابات پیاده‌سازی شده است. این سیستم‌ها به منظور آسان‌تر کردن فرآیندهای انتخاباتی برای برگزارکنندگان و شرکت‌کنندگان و همچنین ارائه اطلاعات به مردم طراحی شده‌اند [۵۴]. همچنین، برنامه‌های کاربردی هوش مصنوعی برای بهبود و نوآوری در ارائه خدمات عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حوزه خدمات حمل‌ونقل عمومی، شهر هیوستون[1] به‌زودی مسیرهای پلیس رباتی را در مراکز حمل‌ونقل مختلف برای مقابله با جرایم کوچک و آزادسازی منابع مجری قانون آغاز خواهد کرد. همچنین، ربات‌ها در حال آزمایش هستند تا به تقویت پرسنل مجری قانون کمک کنند و از وقوع درگیری‌ها بین آن‌ها و مردم بکاهند. در ایالات متحده، که اخیراً چندین توقف معمول ترافیک به درگیری منجر شده است، ربات‌ها به‌عنوان میانجی در برخوردهای بین افسران پلیس و رانندگان آزمایش می‌شوند [۴۵]. در بخش خدمات درمانی و بهداشتی، دستگاه‌های نوآورانه‌ای که به سیستم‌های از راه دور متصل هستند، امکان نظارت بر سلامت سالمندان را از خانه یا بیمارستان‌ها و همچنین در مناطق روستایی دورافتاده فراهم می‌کنند [۵۷].

از سال ۲۰۱۹، کشورها تحت تأثیر پاندمی کووید قرار گرفته‌اند و شهرها علاوه بر چالش‌های موجود، با مسائل جدیدی نیز مواجه شده‌اند. این اپیدمی تأثیرات قابل توجهی بر جنبه‌های مختلفی از جمله سلامت هوشمند، لجستیک، نظارت بر جمعیت، امنیت داده‌ها و مدیریت بحران داشته است. تحقیقات نشان می‌دهد که شهرهای هوشمند با نرخ تأثیر کمتری از کووید (کمتر از ۲٪) مواجه بوده‌اند، در حالی که شهرهای سنتی با نرخ مرگ‌ومیر بالاتری روبه‌رو هستند [۴۲]. هوش مصنوعی می‌تواند در بهینه‌سازی و پیش‌بینی مصرف انرژی، از طریق توسعه ماشین‌های هوشمند تولید برق و مدیریت متعادل مصرف انرژی، مورد استفاده قرار گیرد [۵۷]. یک سیستم اطلاعات جغرافیایی مبتنی بر دانش نیز می‌تواند در تصمیم‌گیری و تدوین سیاست‌ها برای مسائل مرتبط با نظارت و مدیریت محیط‌زیست مورد استفاده قرار گیرد [۵۷]. از سوی دیگر محققان مؤسسه فناوری جورجیا[2]، دانشگاه اموری[3] و دانشگاه کالیفرنیا[4]، اروین[5] با اداره نجات آتش‌نشانی آتلانتا[6] برای توسعه الگوریتمی که قادر به پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی در ساختمان‌ها بود، همکاری کردند. این الگوریتم رتبه‌بندی خطر آتش‌سوزی را برای ۵۰۰۰ ساختمان طبقه‌بندی کرد و ۱۹۳۹۷ ساختمان دیگر را پیدا کرد که نیاز به بازرسی دارند. علاوه بر این، الگوریتم قادر به پیش‌بینی ۷۳ درصد از حوادث آتش‌سوزی در منطقه موردمطالعه بود[۴۵].

خدمات حقوق مالی نیز می‌توانند با بهره‌گیری از برنامه‌های کاربردی هوش مصنوعی بهبود یابند و مزایای چشمگیری در ارائه این خدمات ایجاد کنند [۵۷]. به طور مثال چین از هوش مصنوعی برای بهبود موقعیت اقتصادی خود در سراسر جهان استفاده می‌کند[۵۵]. در نهایت، پلتفرم‌های تعامل بین سازمان‌های عمومی و ذی‌نفعان مختلف شهر به‌واسطه طیف گسترده‌ای از برنامه‌های هوش مصنوعی

[1] Houston
[2] Georgia
[3] Emory University
[4] University of California
[5] Irvine
[6] Atlanta Fire Rescue Department

در حال تحول هستند. در این میان، چت‌بات‌ها به‌عنوان محبوب‌ترین دسته از این برنامه‌ها شناخته می‌شوند. راماس[1]، نام یک ربات چت است که توسط اداره برق و آب دبی در ژانویه ۲۰۱۷ مستقر شد که می‌تواند به سؤالات ساکنان به زبان عربی و انگلیسی پاسخ دهد و آگاهی بیشتری را در مورد مسائل کاربردی ارتقا دهد. راماس در اولین سال فعالیت خود به حدود ۷۰۰۰۰۰ پرسش پاسخ داد که منجر به کاهش ۸۰ درصدی بازدیدهای حضوری شد[۴۵]. همچنین با استفاده از سیستم‌های اطلاعاتی مبتنی بر هوش مصنوعی خدمات را می‌توان به‌صورت دیجیتالی انجام داد، به طور مثال فرم‌های موردنیاز را می‌توان به‌صورت آنلاین بدون نیاز به مراجعه مستقیم به پیشخوان بارگذاری کرد و افراد می‌توانند از به روزرسانی اطلاعات برنامه خود مطلع شوند[۵۶]. در نهایت چارچوب توسعه یافته یک دیدگاه تقریباجامع نسبت به به کارگیری فناوری هوش مصنوعی در حوزه حقوق ارائه می‌کند و می‌تواند به متخصصان حقوقی دید و چشم اندازی در خصوص کاربردهای هوش مصنوعی در حقوق ارائه دهد. با توجه به اینکه شاخص پیش بینی نتایج و وضعیت پرونده‌ها در مفهوم رسیدگی و صدور حکم در دادگاه بیشترین فراوانی را در بین ۱۱۳ شاخص شناسایی شده دارد، لذا پیشنهاد می‌شود در نظام قضایی کشور به خصوص در دادگاه‌ها یکسری از وظایف روتین و تکراری توسط هوش مصنوعی انجام گیرد. به طور مثال پرونده‌هایی که روال ساده تری دارند به هوش مصنوعی ارجاع داده شود تا قضات به پرونده‌های پیچیده‌تر که نیاز به تفکر و تجزیه و تحلیل انسانی است، رسیدگی کنند.

۶- محدویت‌های پژوهش و پیشنهادات برای تحقیقات آتی

این پژوهش نیز همانند سایر مطالعات با محدودیت‌هایی همراه بوده است و رفع این محدودیت‌ها راهی برای مطالعات کمی و کیفی پس از خود باز می‌کند. نخست اینکه چارچوب پیشنهادی در سطح تئوریک ارائه شده و در عمل به‌کار گرفته نشده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود چارچوب پیشنهادی در نهادها و مراجع حقوقی با بهره‌گیری از رویکرد مطالعه موردی مورد استفاده قرار گیرد تا علاوه بر واکاوی کاربردهای هوش مصنوعی با ماهیت فعالیت‌های آن سازمان به شناسایی نقاط ضعف و قوت خود در بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مبتنی بر هوش مصنوعی بپردازند. دومین محدودیت این پژوهش این است که در پژوهش حاضر به طور کلی حوزه حقوق مورد بررسی قرار گرفته است و تمرکز بر حوزه‌های تخصصی صورت نگرفته است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی به واکاوی نقش هوش مصنوعی در حوزه‌هایی چون حقوق محیط زیست، حقوق بشر، حقوق کودکان، حقوق بیمار، حقوق خانواده و غیره پرداخته شود. سوم اینکه واکاوی کاربردها با نظر متخصصان ایرانی و نیز مطالعات بین المللی صورت گرفته در این حوزه صورت گرفته است. بنابراین پیشنهاد می‌شود به شناسایی ریسک‌های بکارگیری چنین فناوری‌هایی در بستر فرهنگی اجتماعی کشور نیز پرداخته شود تا بصیرت کاملی از سرمایه‌گذاری در این حوزه برای سیاستگذاران فراهم آورد.

مراجع

[1] C. O.Aigbavboa, A.Ebekozien, , & N. Mkhize, “An assessment of South African airlines’ growth in the era of fourth industrial revolution technologies: the unexplored dimension”, Journal of Facilities Management, 23(1), 19-33, 2025.

[2] A. Syah, & A. Anca, “Digital Transformation in the Financial Industry: Opportunities and Challenges in the Era of the Fourth Industrial Revolution”, 2025.

[3] D. Valle-Cruz, J. I. Criado, R. Sandoval-Almazán, and E. A. Ruvalcaba-Gomez, “Assessing the public policy-cycle framework in the age of artificial intelligence: From agenda setting to policy evaluation”, Government Information Quarterly, 37(4), 101509, 2020.

[4] J .Kokina, S. Blanchette, T. H. Davenport, & D. Pachamanova, “Challenges and opportunities for artificial intelligence in auditing: Evidence from the field” International Journal of Accounting Information Systems, 56, 100734, 2025.

[۵] محمدحسینی، بابک، هادی‌زاده، مرتضی و قافله باشی، سید فهیم، "پیشران‌های ارائهٔ خدمات سایبری پایدار در دولت با تأکید بر حفظ امنیت از طریق هوش مصنوعی"، دوفصلنامه آینده‌پژوهی ایران، دوره ۵ شماره ۲، صص۳۵-۶۵، ۱۳۹۹.

[۶] [۶] اجاقی، حامد، ظهوریان نادعلی، ایمان، سلیمانی روزبهانی، فاطمه، "نگاشت نقشه مصنوعات و تولیدکنندگان زیست بوم هوش مصنوعی ایران برمبنای گستره تحول‌آفرینی"، دوفصلنامه فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران، دوره ۱۵ شماره‌های ۵۷ و ۵۸، صص ۱۵۲-۱۳۸، ۱۴۰۲.

[7] E. Mumcuoğlu, C. E. Öztürk, H. M. Ozaktas, and A. Koç, “Natural language processing in law: Prediction of outcomes in the higher courts of Turkey”, Information Processing & Management, 58(5), 102684, 2021.

[8] B. Alarie, A. Niblett, and A. H. Yoon, “How artificial intelligence will affect the practice of law”, University of Toronto Law Journal, 68, 106-124, 2018.

[9] F. Bell, “Family law, access to justice, and automation”, Macquarie LJ, 19, 103-132, 2019.

[۱۰] مهرافزا، محمدرضا، زرگز، افشین و حبیبی درگاه، بهنام، "هوش مصنوعی و داوری تجاری بین المللی"، تحقیقات حقوقی تطبیقی ایران و بین الملل، دوره ۱۱ شماره ۴۲، ۱۳۹۷.

[1] Rammas

[۱۱] درگاه ملی قوه قضاییه، " تسریع فرآیندهای قضایی با استفاده از ابزار گفتار به متن"، ۹ خرداد، ۱۴۰۲.

https://lnkfwd.com/u/JvrT1pjH (Last Visited: 2024-10-07).

[۱۲] تخشید، زهرا،"مقدمه‌ای بر چالش‌های هوش مصنوعی در حوزهٔ مسئولیت‌های مدنی"، حقوق خصوصی، دوره ۱۸ شماره ۱، صص ۲۲۷-۲۲۵، ۱۴۰۰.

[۱۳] درگاه ملی قوه قضاییه، "دستورات رئیس دستگاه قضا در راستای توسعه به¬کارگیری تجهیزات فناورانه در عدلیه"،۲۷ آذر، ۱۴۰۲.

https://eadl.ir/news/ctl/ArticleView/mid/395/articleId/86213/categoryId/14/300 (Last Visited: 2024- 10- 07).

[۱۴] درگاه ملی قوه قضاییه، " سیاست قوه قضاییه بر تقویت استفاده از هوش مصنوعی است"، درگاه ملی قوه قضاییه، ۲۰ مرداد، ۱۴۰۳.

https://eadl.ir/news/ctl/ArticleView/mid/395/articleId/87847/categoryId/14/87847 (Last Visited: 2024-10-07).

[۱۵] درگاه ملی قوه قضایی، " گمنام سازی ۲۰ میلیون رای قضایی با استفاده از هوش مصنوعی در سامانه تناد"، ۱۶ مهر، ۱۴۰۳.

https://lnkfwd.com/u/JvpSq2v2 (Last Visited: 2024-10-07).

[16] G. Chimuka, "Impact of artificial intelligence on patent law. Towards a new analytical framework–[the Multi-Level Model]", World Patent Information, 59, 101926, 2019.

[17] T. T. Krupiy, "A vulnerability analysis: Theorising the impact of artificial intelligence decision-making processes on individuals, society and human diversity from a social justice perspective", Computer Law & Security Review, 38, 105429, 2020.

[18] B. C. Stahl, R. Rodrigues, N. Santiago, and K. Macnish, "A European Agency for Artificial Intelligence: Protecting fundamental rights and ethical values", Computer Law & Security Review, 45, 105661, 2022.

[19] G. Volkmar, P. M. Fischer, and S. Reinecke, "Artificial Intelligence and Machine Learning: Exploring drivers, barriers, and future developments in marketing management", Journal of Business Research, 149, 599-614, 2022 .

[20] L. Longin, and O. Deroy, "Augmenting perception: How artificial intelligence transforms sensory substitution", Consciousness and Cognition, 99, 103280, 2022.

[21] L. Richter, M. Lehna, S. Marchand, C. Scholz, A. Dreher, S. Klaiber, and S. Lenk, "Artificial Intelligence for Electricity Supply Chain automation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 163, 112459, 2022.

[22] P. C. Arias, "Artificial Intelligence & Machine Learning: a model for a new judicial system?", Revista internacional jurídica y empresarial, (3), 81-91, 2020.

[23] B. W. Wirtz, J. C. Weyerer, C. Geyer, "Artificial intelligence and the public sector—applications and challenges", International Journal of Public Administration, 42(7), 596-615, 2019.

[24] B. L. Jimma, "Artificial Intelligence in Healthcare: A Bibliometric Analysis" Telematics and Informatics Reports, 100041, 2023.

[۲۵] روشن، سید علیقلی، یعقوبی، نورمحمد و مومنی، امیررضا، "کاربست هوش مصنوعی در بخش دولتی: مطالعه‌ای فراترکیب"، فصلنامه علوم مدیریت ایران، دوره ۱۶، شماره۶۱، صص۱۱۷- ۱۴۵، ۱۴۰۰.

[۲۶] ابوذری، مهرنوش، حقوق و هوش مصنوعی، تهران، نشر میزان، چاپ اول، ۱۴۰۰.

[۲۷] دانش پژوه، مصطفی، مقدمه علم حقوق (با رویکرد به حقوق ایران و اسلام)، قم، پژوهشگاه حوزه و دانشگاه، ۱۳۹۲.

[۲۸] حبیب نژاد، سید احمد و تقی زاده، احمد، "نیاز سنجی تقنینی؛ عنصری بایسته در قانونگذاری شایسته"، فصلنامه دانش حقوق عمومی، دوره ۸ شماره ۲۶، صص ۲۵- ۴۶، ۱۳۹۸.

[29] N. Petit, "Artificial intelligence and automated law enforcement: A review paper", Available at SSRN ,3145133,2018.

[30] S.Raaijmakers, "Artificial intelligence for law enforcement: challenges and opportunities, IEEE security & privacy, 17(5), 74-77, 2019.

[31] A. Babacan, & H.Babacan, A transformative approach to work integrated learning in legal education", Education+ Training, 57(2), 170-183, 2015.

[32] M.Reid, "A call to arms: why and how lawyers and law schools should embrace artificial intelligence, U. Tol. L. Rev., 50, 477, 2018.

[۳۳] آورزمانی، حمید و صفایی نبات، حمیده، "بررسی نقش داده‌کاوی و هوش مصنوعی در پیشگیری از جرایم خشن"، فصلنامه مطالعات پیشگیری از جرم، دوره ۱۱شماره ۳۸، صص۱۴۶- ۱۷۰، ۱۳۹۵.

[۳۴] کیوان پور، محمدرضا، "تحلیل رایانه‌ای جرم با بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی کشف پیشدستانه جرم"، کارآگاه، دوره ۲،شماره ۷، پلیس آگاهی ناجا، ۱۳۸۸.

[35] W. G. de Sousa, R. A. Fidelis, P. H. de Souza Bermejo, A. G. da Silva Gonçalo, and B. de Souza Melo "Artificial intelligence and speedy trial in the judiciary: Myth, reality or need? A case study in the Brazilian Supreme Court (STF)", Government Information Quarterly, 39(1), 101660, 2022.

[36] Y. Zhang, Y. Zhao, and Y. Zhao, "The Application of Artificial Intelligence Decision-Making Algorithm in Crisis Analysis and Optimization of the International Court System", Mobile Information Systems, 2022.

[37] A. H. Bolifaar, and H. D. P. Sinaga, "Managing Evidence of Tax Crime in Indonesia: An Artificial Intelligence Approach in Integrated Criminal Justice System", AYER JOURNAL, 27(1), 143-158, 2020.

[38] I. Wiafe, F. N. Koranteng, E. N. Obeng, N., Wiafe, A. Assyne, and S. R. Gulliver, "Artificial intelligence for cybersecurity: a systematic mapping of literature", IEEE Access, 8, 146598-146612, 2020.

[39] N. A. K. Rosili, N. H. Zakaria, R. Hassan, S. Kasim, F. Z. C. Kasim, and T. Sutikno, "A systematic literature review of machine learning methods in predicting court decisions", IAES International Journal of Artificial Intelligence, 10(4), 1091, 2021.

[40] O. Metsker, E. Trofimov, and G. Kopanitsa, "Application of machine learning metrics for dynamic E-justice processes", In 2021 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT),2021, (pp. 293-300), IEEE.

[41] P. U.Chinedu, W. Nwankwo, F. U. Masajuwa, and S .Imoisi, "Cybercrime Detection and Prevention Efforts in the Last Decade: An Overview of the Possibilities of Machine Learning Models", Review of International Geographical Education Online, 11(7), 2021.

[42] H. M. K. K. M. B. Herath, and M. Mittal, "Adoption of artificial intelligence in smart cities: A comprehensive review", International Journal of Information Management Data Insights, 2(1), 100076, 2022.

[54] P. Akbar, M. J. Loilatu, U. Pribadi, and S. Sudiar, "Implementation of Artificial Intelligence by the General Elections Commission in Creating a Credible Voter List" In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, (Vol. 717, No. 1, p. 012017), IOP Publishing.

[55] J. Reis, P. E. Santo, and N, Melão, "Influence of artificial intelligence on public employment and its impact on politics: a systematic literature review", Brazilian Journal of Operations & Production Management, 18(3), 1-22, 2021.

[56] M. Saadah, "Artificial Intelligence for Smart Governance; towards Jambi Smart City", In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. (Vol. 717, No. 1, p. 012030), IOP Publishing.

[57] P. Sharma, and A, Joshi, "Challenges of using big data for humanitarian relief: lessons from the literature", Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2019.

[58] A. Ben Rjab, and S. Mellouli, (2019). "Artificial intelligence in smart cities: Systematic literature network analysis", In Proceedings of the 12th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance, 2019, pp. 259-269.

[59] W. G. de Sousa, E. R. P. de Melo, P. H. D. S. Bermejo, R. A. S. Farias, and A. O. Gomes, "How and where is artificial intelligence in the public sector going? A literature review and research agenda", Government Information Quarterly, 36(4), 101392, 2019.

[60] C. Alexopoulos, Z. Lachana, A. Androutsopoulou, V. Diamantopoulou, Y. Charalabidis, and M. A. Loutsaris, "How machine learning is changing e-government" In Proceedings of the 12th international conference on theory and practice of electronic governance, 2019, (pp. 354-363).

[61] O. Golubchikov, and M. Thornbush, "Artificial intelligence and robotics in smart city strategies and planned smart development", Smart Cities, 3(4), 2020.

[62] A. Ortega-Fernández, R. Martín-Rojas, and V. J. García-Morales, "Artificial intelligence in the urban environment: Smart cities as models for developing innovation and sustainability", Sustainability, 12(19), 7860, 2020.

[63] R. W. Campbell, "Artificial intelligence in the courtroom: The delivery of justice in the age of machine learning", Colo. Tech. LJ, 18, 323, 2020.

[43] Z. Abbass, Z. Ali, M. Ali, B. Akbar, and A. Saleem, "A framework to predict social crime through twitter tweets by using machine learning", In 2020 IEEE 14th International Conference on Semantic Computing (ICSC),2020, (pp. 363-368), IEEE.

[44] R. Ch, T. R. Gadekallu, M. H. Abidi, and A. Al-Ahmari, "Computational system to classify cyber crime offenses using machine learning", Sustainability, 12(10), 4087, 2020.

[45] T. Yigitcanlar, K. C. Desouza, L. Butler, and F. Roozkhosh, (2020), "Contributions and risks of artificial intelligence (AI) in building smarter cities: Insights from a systematic review of the literature", Energies, 13(6), 1473, 2020.

[46] D. A. Rincón-Riveros, S. M. Salazar-Molina, W. A. Pinto-Cáceres, S. P. Amaya, and J. M. Calderon, "Automation System Based on NLP for Legal Clinic Assistance", IFAC-PapersOnLine, 54(13), 283-288, 2021.

[47] C. Xiao, X. Hu, Z. Liu, C. Tu, M, Sun, "Lawformer: A pre-trained language model for chinese legal long documents", AI Open, 2, 79-84, 2021.

[48] J. Li, G. Zhang, H.Yan, L.Yu, and T. Meng, "A Markov logic networks based method to predict judicial decisions of divorce cases", In 2018 IEEE International Conference on Smart Cloud (SmartCloud),2018, (pp. 129-132), IEEE.

[49] J. Li, G. Zhang, L. Yu, and T. Meng, "Research and design on cognitive computing framework for predicting judicial decisions", Journal of Signal Processing Systems, 91(10), 1159-1167, 2018.

[50] Y. H. Lai, and H. C. Che, "Modeling patent legal value by Extension Neural Network", Expert Systems with Applications, 36(7), 10520-10528, 2009.

[51] Y. Xu, G. Hu, L. You, and C. Cao, "A Novel Machine Learning-Based Analysis Model for Smart Contract Vulnerability", Security and Communication Networks, 2021.

[52] P. Momeni, Y. Wang, and R. Samavi, "Machine learning model for smart contracts security analysis", In 2019 17th International Conference on Privacy, Security and Trust (PST), 2019, (pp. 1-6), IEEE.

[53] S. Undavia, A. Meyers, and J. E. Ortega, "A comparative study of classifying legal documents with neural networks", In 2018 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2018, (pp. 515-522), IEEE.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 19-42

Challenges of Blockchain Implementation in Supply Chain: A Multi-Criteria Decision-Making Approach

Parninan Hendiazad[1], Nasser Safaie[2*], Majid Mirzaee Ghazani[3]

[1] Department of Industrial Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[2] Department of Industrial Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[3] Department of Industrial Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Received: 28 July 2024, Revised: 27 October 2024, Accepted: 06 November 2024
Paper type: Research

Abstract

Today, blockchain has emerged as an advanced and secure technology in supply chain management. This innovative approach involves linking transaction information through encrypted blocks sequentially. Although research in blockchain has primarily highlighted its benefits, significant obstacles remain underexplored. This study first identifies barriers to blockchain adoption in sustainable supply chains from the literature. The goal is to evaluate these factors in terms of effectiveness and influence, using a combined DEMATEL and ANP technique. By focusing on management practices, the research systematically identifies and ranks issues related to blockchain integration in sustainable supply chains. The results indicate that the criteria with the highest priority among twelve selective barriers are: "disagreement among supply chain partners and stakeholders regarding blockchain technology," "resistance from traditional supply chain partners to blockchain implementation," and "lack of trust in blockchain's security capabilities in its application within the supply chain." Finally, the study offers management recommendations to address these obstacles. Recommendations include: clearly presenting blockchain security rules and standards at the organizational level, increasing awareness of blockchain's security capabilities through adequate advertising, and providing public training to clarify technology ambiguities for organization members.

Keywords: Blockchain technology, Supply chain, Fuzzy DEMATEL, Fuzzy ANP, Fuzzy Delphi.

* Corresponding author's email: nsafaie@kntu.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۹ الی ۴۲

چالش‌های پیاده‌سازی بلاکچین در زنجیره تامین با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره

پرنیان هندی آزاد[۱]، ناصر صفایی[*۲]، مجید میرزایی قزانی[۳]

[۱] دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[۲] دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[۳] دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

امروزه بلاکچین به عنوان یک فناوری پیشرفته و ایمن در حوزه مدیریت زنجیره تامین ظهور کرده است. این رویکرد نوآورانه شامل اتصال اطلاعات تراکنش از طریق بلوک‌های رمزگذاری شده به روشی متوالی است. تا کنون پژوهش‌های انجام شده در زمینه بلاکچین بیشتر به مزایای این تکنولوژی پرداخته است ولی در این مسیر، موانع مهمی نیز وجود دارند که به طور کافی مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در پژوهش حاضر، ابتدا موانع پذیرش بلاکچین در زنجیره تامین از ادبیات استخراج شده است. چون هدف، ارزیابی عوامل از نظر تاثیرگذاری و تاثیرپذیری است، از تکنیک ترکیبی دیمتل و تحلیل شبکه‌ای استفاده شده است. این تحقیق با تمرکز بر شیوه‌های مدیریتی، به طور سیستماتیک اشکالات و موانع مرتبط با ادغام بلاکچین در زنجیره تامین را شناسایی و رتبه بندی کرده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که به ترتیب معیارهای «عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در به کارگیری فناوری بلاکچین»، «مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین» و «عدم اعتماد به توانمندی امنیتی فناوری بلاکچین در به کارگیری آن در زنجیره تامین» دارای بالاترین اولویت در میان دوازده مانع انتخابی است. در انتها توصیه‌های مدیریتی متناسب با موانع ارائه گردیده است. ارائه شفاف قوانین و استانداردهای امنیتی بلاکچین در سطح سازمان‌ها، تبلیغات کافی برای قابلیت‌ها و توانمندی‌های امنیت بلاکچین در زنجیره تامین برای کاربران، ارائه آموزش‌های همگانی برای آگاهی اعضای سازمان جهت برطرف شدن ابهامات این تکنولوژی از جمله راهکارهای مدیریتی این پژوهش می‌باشد.

کلیدواژگان: تکنولوژی بلاکچین، زنجیره تامین، دیمتل فازی، تحلیل شبکه‌ای فازی، دلفی فازی.

[*] رایانامهٔ نویسنده مسئول: nsafaie@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های علمی و فناوری با شتاب بالایی اتفاق افتاده که تأثیرات قابل توجهی بر زندگی روزمره و بخش‌های مختلف کاری گذاشته‌اند. با ظهور فناوری‌های جدید، برخی از آن‌ها به سرعت در جامعه پذیرفته می‌شوند و تغییرات عمیقی در شیوه‌های موجود ایجاد می‌کنند؛ در حالی که برخی دیگر به دلایل متعددی با استقبال کمتری مواجه می‌شوند و به تدریج از صحنه خارج می‌گردند. به همین دلیل، شناسایی و تحلیل عواملی که منجر به پذیرش یا عدم پذیرش فناوری‌ها می‌شود، به یک موضوع کلیدی برای محققان تبدیل شده است. برای پاسخ به این نیاز، در طول دهه‌های گذشته مدل‌ها و نظریه‌های متعددی توسعه یافته‌اند که به بررسی فرآیندهای پذیرش فناوری توسط کاربران می‌پردازند و سعی دارند درک بهتری از دلایل موفقیت یا شکست این فناوری‌ها ارائه دهند. این نظریه‌ها با تحلیل عوامل مؤثر بر رفتار کاربران، مسیر پذیرش و استفاده از فناوری‌های جدید را شفاف‌تر می‌کنند و به پژوهشگران این امکان را می‌دهند که فناوری‌ها را به‌طور مؤثرتری طراحی و پیاده‌سازی نمایند[1].

پذیرش فناوری به فرآیند قبول و به‌کارگیری نوآوری‌ها و فناوری‌های جدید توسط کاربران اطلاق می‌شود. این مفهوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا موفقیت فناوری‌ها به میزان پذیرش آن‌ها توسط جامعه بستگی دارد. نظریه‌های مختلفی در این زمینه توسعه یافته‌اند که به بررسی عواملی می‌پردازند که می‌توانند بر تصمیم‌گیری کاربران برای پذیرش یا عدم پذیرش فناوری تأثیر بگذارند. یکی از مدل‌های برجسته در این زمینه، مدل پذیرش فناوری[1] است که دو عامل کلیدی «مفید بودن» و «سهولت استفاده» را به عنوان عوامل اصلی تعیین‌کننده پذیرش فناوری معرفی می‌کند. علاوه بر این، نظریه یکپارچه‌سازی پذیرش و استفاده از فناوری یوتی‌ای‌توتی[2] نیز به شناسایی عواملی نظیر تأثیر اجتماعی و تسهیل شرایط می‌پردازد که می‌تواند بر رفتار پذیرش تأثیر بگذارد[2].

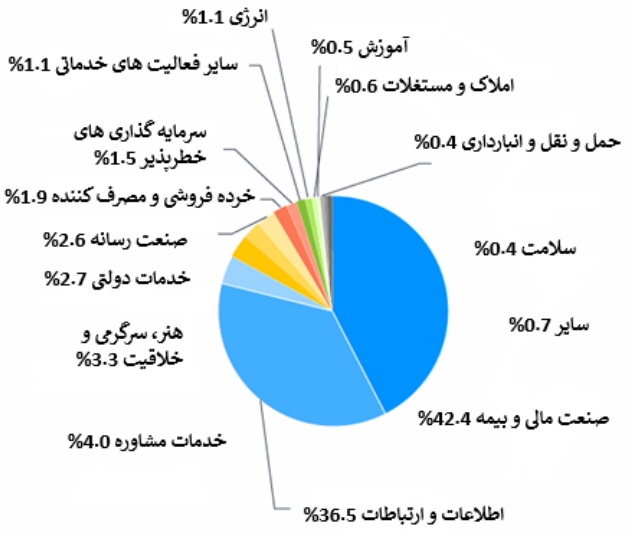
پذیرش فناوری‌های نوین در زنجیره تأمین به عنوان یک عامل کلیدی در بهبود کارایی و تقویت ارتباطات بین شرکای زنجیره تامین شناخته می‌شود. فناوری اطلاعات یکپارچه می‌تواند جریان اطلاعات را تسهیل کرده و همکاری بهتری بین تامین‌کنندگان و مشتریان فراهم آورد. این فناوری‌ها به سازمان‌ها کمک می‌کنند تا فرآیندهای داخلی را بهبود بخشند و به یکپارچگی بالاتری در زنجیره تامین دست یابند. با این حال، چالش‌هایی در پذیرش و پیاده‌سازی این فناوری‌ها وجود دارد که می‌تواند بر موفقیت آن‌ها تاثیر بگذارد . بنابراین، درک دقیق از ابعاد مختلف پذیرش فناوری و تاثیر آن بر زنجیره تامین برای بهینه‌سازی فرآیندها و ایجاد همکاری مؤثر ضروری است[3] .

با ورود فناوری بلاکچین، مدیریت و انتقال اطلاعات در زنجیره تامین تحول یافته است. شرکت‌ها به دلیل ترس از افشای نقاط ضعف و اطلاعات حساس خود، مقاوم به تغییر هستند و از اشتراک‌گذاری اطلاعات اجتناب می‌کنند. این نقص در ارتباطات می‌تواند منجر به عدم شفافیت و اطمینان در زنجیره تامین شود. بلاکچین با ارائه امنیت، شفافیت، عدم وابستگی به واسطه‌گران و ثبت غیرقابل تغییر داده‌ها، این مشکلات را رفع می‌کند[4]. همچنین مدیریت موجودی ناکافی می‌تواند منجر به انباشت بیش از حد منابع، عدم دسترسی خریداران به محصولات، از دست رفتن فروش و افزایش هزینه‌ها شود. فناوری بلاکچین به کسب‌وکارها امکان می‌دهد تا به صورت زنده بر تمام مراحل زنجیره تامین نظارت کنند. این فناوری به شرکای زنجیره تامین اجازه می‌دهد تا با همکاری و اشتراک‌گذاری اطلاعات، تصمیم‌های صحیح‌تری بگیرند و محصولات پایدارتری تولید کنند [5]. یکی دیگر از مشکلات اساسی در زنجیره تامین، غیرقابل ردیابی بودن کالا است. غیرقابل ردیابی بودن کالاها در زنجیره تامین منجر به کاهش کارآیی، شفافیت، افزایش ریسک و افت کیفیت می‌شود. فناوری بلاکچین با ثبت دقیق و غیرقابل دست‌کاری تراکنش‌ها، امکان ردیابی دارایی‌ها را فراهم کرده و این مشکلات را حل می‌کند[6].

علاوه بر این، بهینه‌سازی عملکرد صادرات در بازار جهانی برای شرکت‌های کوچک و متوسط اهمیت زیادی دارد. صادرات موثر نیازمند مدیریت اسناد، ترخیص کالا و هماهنگی لجستیکی پیچیده است. فناوری بلاکچین می‌تواند با بهبود کارایی و امنیت عملیات، تحویل به موقع کالا، افزایش رضایت مشتری و کاهش هزینه‌های عملیاتی را برای این شرکت‌ها فراهم کند[7]. به این ترتیب کاربرد فناوری بلاکچین تا کنون توانسته است صرفه‌جویی‌های قابل ملاحظه‌ای را در هزینه‌ها به همراه داشته باشد. به عنوان نمونه، شرکت بین‌المللی حمل و نقل بزرگ مرسک[3] پس از شروع همکاری با شرکت آی‌بی‌ام[4] با مدیریت بهینه کانتینرهای دریایی خود، توانست میلیاردها دلار در هزینه‌ها صرفه‌جویی کند[8]. بلاکچین، به عنوان یک تکنولوژی نوآورانه، در سال‌های اخیر به سرعت به یکی

[1] TAM
[2] UTAUT
[3] Mearsk Line (Shipping Company)
[4] The International Business Machines

از محورهای اصلی توجه دولت‌ها و شرکت‌ها تبدیل شده است. این تکنولوژی که ابتدا با ارزهای دیجیتال همچون بیت‌کوین شناخته شد، به عنوان یک اکوسیستم گسترده از کاربردها در حوزه‌های مختلف به کار برده شده است. شکل ۱ درصد استارت‌آپ‌ها در صنایع مختلف با تمرکز بر فناوری بلاکچین را نشان می‌دهد.



شکل ۱. درصد استارت آپ‌ها در صنایع مختلف با تمرکز بر فناوری بلاکچین [9]

پژوهش‌های فعلی در زمینه بلاکچین بیشتر به مزایای این تکنولوژی متمرکز شده‌اند ولی در این مسیر، موانع مهمی نیز وجود دارند که به طور کافی مورد توجه قرار نگرفته‌اند. برای پیشرفت بهتر در این حوزه، ضروری است که تحقیقات بیشتری به شناسایی و حل این موانع اختصاص یابد. هدف اصلی پژوهش حاضر عبارت است از بررسی و نگاشت موانعی که برای پذیرش تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تامین وجود دارد و همچنین بررسی میزان تاثیر عوامل شناسایی شده بر یکدیگر و رتبه‌بندی عوامل از نظر میزان تاثیرگذاری و تاثیرپذیری آن‌ها. این پژوهش بر حسب هدف با توجه به پرداختن به حل یک مسئله در دنیای واقعی، در حیطه پژوهش‌های کاربردی و از نظر گردآوری اطلاعات جزو پژوهش‌های پیمایشی قرار گرفته است. در این پژوهش، ابتدا موانع پذیرش بلاکچین در زنجیره تأمین از مرور ادبیات استخراج شده است و سپس با استفاده از روش ترکیبی، شامل ترکیب دیمتل[1] و تحلیل شبکه‌ای فازی[2]، موانع رتبه‌بندی شده است. هدف این پژوهش ارزیابی عوامل از نظر تأثیرگذاری و تأثیرپذیری است. به همین منظور، پرسش‌های زیر مطرح شده است:

۱. موانع پذیرش تکنولوژی بلاکچین چیست؟
۲. آیا تکنولوژی بلاکچین به تکامل شبکه زنجیره تأمین کمک می‌کند؟
۳. تأثیر موانع پذیرش تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تأمین بر یکدیگر چگونه است؟
۴. راهکارهای مدیریتی جهت مقابله با موانع استفاده از تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تأمین چیست؟
۵. رفع موانع پذیرش تکنولوژی بلاکچین، چه تأثیری بر پیشرفت شبکه زنجیره تأمین خواهد داشت؟

۲- پیشینه تحقیق

مطالعه حاضر به بررسی موانع پذیرش بلاکچین در مدیریت زنجیره تامین با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته است. در این پژوهش، تلاش شده است تا با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیلی، علل و موانع مختلف در مسیر پذیرش بلاکچین در زنجیره تامین شناسایی گردد و راهکارهایی برای پیشگیری یا غلبه بر این موانع ارائه گردد.

معمارپور[10] به بررسی تحلیل و اولویت‌بندی موانع پذیرش فناوری بلاکچین در زمینه لجستیک بشردوستانه پرداخته‌اند. این پژوهش با هدف ارائه یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی موانع، از رویکرد اف‌ام‌ای‌ای[3] مبتنی بر زد-آراس[4] در سه مرحله استفاده کرده است. در مرحله اول، ۱۰ مانع اصلی شناسایی و مقادیر آرپی‌ان[5] محاسبه شده است. سپس، با دریافت نظرات خبرگان، به این عوامل وزن‌دهی شده و در نهایت، با در نظر گرفتن عدم قطعیت، موانع اولویت‌بندی گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مشکلات یکپارچه‌سازی، ریسک حملات سایبری و ریسک‌های فناوری به عنوان موانع بحرانی شناسایی شده‌اند و روش پیشنهادی در مقایسه با دیگر روش‌ها، مانند اف‌ام‌ای‌ای و آراس فازی، مؤثرتر و قابل اعتمادتر بوده است.

فرهادی [11] به بررسی و اولویت‌بندی موانع استفاده از تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تأمین شرکت‌های بسته‌بندی صنایع غذایی در شهرکرد پرداخته است. هدف این تحقیق شناسایی موانع و مشکلات موجود در مسیر استفاده از بلاکچین در زنجیره تأمین صنایع غذایی بوده است. پژوهش از روش آمیخته (کیفی و کمی) استفاده کرده و با جمع‌آوری داده‌ها از خبرگان و انجام مطالعات میدانی، موانع

[1] DEMATEL
[2] ANP: The Analytic Network Process
[3] FMEA: Failure Mode and Effects Analysis
[4] Z-ARAS: Additive Ratio Assessment
[5] RPN: Risk Priority Number

شناسایی و سپس با استفاده از روش تحلیل مضمون و دیمتل، اولویت‌بندی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نبود تعهد مدیریت و موانع داخلی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر استفاده از بلاکچین در زنجیره تأمین صنایع غذایی هستند و بر ضرورت برطرف کردن این موانع تأکید شده است.

رحیمی [12] به بررسی استفاده از فناوری بلاکچین در زنجیره تأمین صنایع غذایی پرداخته است. هدف اصلی این تحقیق شناسایی موانع موجود در مسیر استفاده از بلاکچین و ارائه یک مدل سلسله‌مراتبی برای این حوزه بوده است. در این راستا، ابتدا موانع مهم شناسایی و سپس با استفاده از مدل‌سازی ساختاری تفسیری، روابط بین این موانع بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که موانع داخلی سازمانی و قانونی بیشترین تأثیر را در استفاده از بلاکچین در زنجیره تأمین صنایع غذایی دارند.

کایسنون [13] به بررسی مدیریت زنجیره تأمین پایدار با تمرکز بر موانع انتقال فناوری بلاکچین در زنجیره تأمین کشاورزی در اقتصادهای در حال توسعه پرداخته است. این پژوهش به دنبال راهکارهایی برای مقابله با مشکلاتی مانند آلودگی غذایی، فساد و کار کودکان در صنعت کشاورزی است. نویسنده ابتدا با استفاده از بررسی ادبیات، یک چارچوب دو سطحی از موانع را ارائه داده که شامل ۴ مانع اصلی و ۲۲ مانع فرعی می‌شود. سپس از روش تصمیم‌گیری گروهی سلسله‌مراتبی مبتنی بر دیمتل و مجموعه‌های احساسی مبهم احتمالی برای اولویت‌بندی موانع و شناسایی روابط تأثیرگذار بین آن‌ها استفاده کرده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مانع داخلی سازمانی به عنوان مهم‌ترین مانع تشخیص داده شده و مانع سیستم به عنوان مانعی با بیشترین تأثیر محاسبه شده است. همچنین، از مهم‌ترین موانع فرعی می‌توان به کمبود تعهد و پشتیبانی مدیریت، کمبود آگاهی مشتریان، چالش‌های امنیتی و کمبود مشارکت صنعت در روش‌های اخلاقی و ایمنی اشاره کرد.

یان [14] بر روی موضوعات مدیریت پسماند ساختمانی و فناوری بلاکچین تمرکز دارد و به شناسایی موانع انتقال فناوری بلاکچین در مدیریت پسماند ساختمانی و ارزیابی اهمیت آن‌ها می‌پردازد. این تحقیق به دلیل اهمیت بالای مدیریت پسماند ساختمانی برای تولید و توسعه پایدار و همچنین پتانسیل بالای فناوری بلاکچین برای بهبود فرآیندهای مدیریت پسماند انجام شده است. نویسنده ابتدا یک چارچوب نظری بر مبنای مطالعات پیشین و یک مطالعه تجربی جدید توسعه داده که شامل پانزده مصاحبه در پنج شرکت حمل و نقل است. سپس از یک روش تجزیه و تحلیل فازی برای شناسایی موانع، ارزیابی اهمیت آن‌ها و روشن کردن ارتباطات بین آن‌ها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که وابستگی موانع به هم، اقداماتی که درباره یک یا چند مانع انجام می‌شود، می‌تواند تأثیرات چرخه بسته‌ای ایجاد کند. این یافته‌ها تأکید می‌کند که دولت و نهادهای مربوطه نقش بسیار حیاتی در انتقال فناوری بلاکچین در مدیریت پسماند ساختمانی دارند.

ساهو [15] با انجام یک بررسی ادبیات سیستماتیک و تحلیل بایبلومتریک[1] بر ۱۴۶ مقاله مرتبط با بلاکچین در زمینه مدیریت زنجیره تامین پایدار، به یک مرور جامع از تحقیقات با کیفیت در این حوزه پرداخته است. نتایج نشان داده است که بلاکچین در ارتقای فعالیت‌های تجاری پایدار، سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری با استفاده از بلاکچین، و سامانه حمل و نقل هوشمند تاثیرگذار است.

بودخوم[16] نقش بلاکچین در مدیریت زنجیره تامین پایدار را بررسی کرده و از روش جستجوی جامع در ادبیات و نظرات متخصصان برای تحلیل موانع بهره برده‌اند. موانع اجرای بلاکچین در سه بعد تکنولوژیک و سیستمی، محیطی و سازمان داخلی دسته‌بندی شده‌اند. متدلوژی این پژوهشگر ترکیب دیمتل و ای‌اچ‌پی فازی[2] بوده است و نتایج نشان داده که «سیاست و پشتیبانی دولت» و «چالش‌ها در ادغام شیوه‌های پایدار و فناوری بلاکچین در مدیریت زنجیره تامین پایدار» به عنوان موانع مهم در مسیر اجرای بلاکچین در مدیریت زنجیره تامین پایدار مراکش مطرح شده‌اند.

کوهی زاده و همکاران [17] به چگونگی دست‌یابی و بهبود پایداری مدیریت زنجیره تامین در توسط تکنولوژی بلاکچین پرداخته‌اند. وی از روش تصمیم‌گیری گروهی دیمتل فازی برای تحلیل موانع پذیرش بلاکچین استفاده کرده است. نتایج نشانگر آن است که موانع زنجیره تامین و فناوری از مهم‌ترین موانع در میان دانشگاهیان و کارشناسان صنعت هستند و این مطالعه مبانی نظری و عملی را برای درک بیشتر از پیاده‌سازی تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تامین پایدار را فراهم کرده و به پیشنهادهای تحقیقاتی جهت مطالعات آتی پرداخته است.

صابری [18] بحرانی در مدیریت و کنترل زنجیره‌های تامین جهانی را مورد بررسی قرار داده است. در این پژوهش، به بررسی قراردادهای هوشمند و تکنولوژی بلاکچین و نقش آن‌ها در تحقق اهداف پایداری زنجیره تأمین مورد توجه قرار گرفته است. موانع ممکن در پذیرش

[1] Bibliometric

[2] IFAHP

بلاکچین، از جمله موانع بین‌سازمانی، داخل سازمان، فنی و خارجی ارائه و به بررسی نحوه پیشگیری و پذیرش این تکنولوژی در زنجیره تأمین پایدار پرداخته شده است. مطالعه به معرفی چارچوبی برای ارزیابی اولویت‌ها و موانع با استفاده از تکنیک‌های دیمتل و ای‌اچ‌پی فازی پرداخته است. طبق تحقیقات انجام شده، پژوهشگران در سال‌های اخیر موانع پذیرش تکنولوژی بلاکچین را در چهار دسته شامل موانع سازمانی، تکنولوژیکی و سیستمی، اجتماعی و اقتصادی، محیطی و خارجی و دولتی قرار دادند و با روش‌های تحقیق متفاوت پژوهش کردند.

الکورایچی[19] به بررسی موانع مؤثر بر پذیرش فناوری بلاکچین در زنجیره تأمین کشاورزی-غذایی (AFSC) در اقتصادهای در حال توسعه پرداخته‌اند. در این پژوهش با هدف ارتقای عملکرد زنجیره تأمین و تسهیل پیاده‌سازی مؤثر بلاکچین، ابتدا از طریق مرور نظام‌مند منابع علمی، موانع کلیدی شناسایی شده و سپس با نظرات خبرگان اعتبارسنجی شده‌اند. برای تحلیل ساختاری روابط میان موانع، از ترکیب دو روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری [1]و تکنیک DEMATEL استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که موانع متعددی از جمله ضعف زیرساخت‌های فناوری، نبود سیاست‌های حمایتی مشخص، کمبود نیروی انسانی ماهر و هزینه‌های بالای پیاده‌سازی، بر پذیرش این فناوری تأثیرگذارند. تحلیل‌های انجام‌شده به شناسایی روابط علّی میان این موانع و درک بهتر از سازوکار تأثیرگذاری آن‌ها بر یکدیگر کمک کرده است. یافته‌ها، بینشی منحصربه‌فرد برای مدیران زنجیره تأمین کشاورزی، ارائه‌دهندگان خدمات بلاکچین و سیاست‌گذاران فراهم می‌آورد تا راهبردها و سیاست‌هایی مؤثر برای پذیرش موفق این فناوری در کشورهای در حال توسعه تدوین نمایند.

نگارپور و همکاران [20] به بررسی چالش‌های مرتبط با حفظ حریم خصوصی کاربران در شبکه‌های اجتماعی پرداخته‌اند. در این پژوهش، با هدف ارتقای امنیت داده‌های شخصی و مقابله با تهدیدات ناشی از افشای اطلاعات، ابتدا به مرور ادبیات موجود پیرامون روش‌های متمرکز حفاظت از حریم خصوصی پرداخته شده است. سپس روشی مبتنی بر فناوری بلاکچین برای افزایش سطح محرمانگی کاربران ارائه شده است. این روش تلاش دارد با بهره‌گیری از ویژگی‌هایی نظیر تمرکززدایی، تغییرناپذیری و شفافیت، میزان افشای ناخواسته اطلاعات را به حداقل برساند. در بخش پیاده‌سازی، عملکرد این روش مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بلاکچین می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ریسک حملات سایبری و سوءاستفاده از داده‌های شخصی را کاهش دهد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند برای توسعه‌دهندگان پلتفرم‌های اجتماعی و سیاست‌گذاران حوزه فناوری اطلاعات، در طراحی راهکارهایی برای حفاظت مؤثرتر از حریم خصوصی کاربران مفید باشد.

موانعی که توسط نویسنده گردآوری شده، با صلاح دید ۳۰ خبره بلاکچین ادغام، شفاف و یا موارد جدید به آن‌ها اضافه شده است که این موانع به چهار دسته اصلی موانع سازمانی، موانع خارجی، موانع اقتصادی- اجتماعی و موانع تکنولوژیکی- سیستمی تقسیم شدند که در جدول ۱ آمده است.

در تحقیقات پیشین در حوزه بلاکچین و زنجیره تأمین، تلاش‌های زیادی برای شناسایی موانع و چالش‌های اجرایی این فناوری انجام شده است. با این حال، اغلب این مطالعات بر روش‌های سنتی و ابزارهای تحلیلی محدود متمرکز بوده و از رویکردهای نوین و ترکیبی غافل مانده‌اند. نوآوری اصلی این تحقیق در به‌کارگیری یک روش تحلیلی ترکیبی است که شامل دیمتل فازی و تحلیل شبکه‌ای فازی می‌باشد. این رویکرد به‌طور جامع و بهینه به شناسایی و اولویت‌بندی موانع پذیرش بلاکچین در زنجیره تأمین می‌پردازد و با تجمیع داده‌ها و تحلیل‌های دقیق، بینش‌های عمیق‌تری را ارائه می‌دهد. این روش نوآورانه می‌تواند به عنوان یک چارچوب جدید در مطالعات آینده در این حوزه مطرح شود و به بهبود فرآیندهای پذیرش و پیاده‌سازی بلاکچین کمک کند.

[1] ISM

جدول ۱. دسته‌بندی موانع پذیرش

ردیف	دسته بندی	معیار	منبع
۱	موانع سازمانی	ابهام در اهداف سازمانی	[13]
۲		چالش در ادغام تکنولوژی بلاکچین و زنجیره تامین	[17]
۳		فقدان پشتیبانی مدیریت عالی و منابع انسانی	[21][22][23]
۴		روش‌های حسابداری سنتی	[17][21]
۵		فقدان نیروی متخصص کافی در تکنولوژی بلاکچین	[17][21][22]
۶	موانع خارجی	استفاده در فعالیت‌های غیر قانونی	[17][21]
۷		عدم شفافیت قوانین و مقررات مربوط به تکنولوژی بلاکچین	[17][18][21][22]
۸		مغایرت قوانین و استانداردهای زنجیره تامین با تکنولوژی بلاکچین	[17][21]
۹		رقابت بر سر میزان سرمایه‌گذاری شرکت‌ها در بکارگیری تکنولوژی بلاکچین	[17][21][22]
۱۰		عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در بکارگیری تکنولوژی بلاکچین	[17][21][22]
۱۱		کمبود تقاضا برای محصولات پایدار	[24]
۱۲		مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای تکنولوژی بلاکچین	[17][18][21][22]
۱۳	موانع اقتصادی- اجتماعی	عدم آگاهی مشتری در مورد تاثیر تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تامین	[17][18][21][24]
۱۴		کمبود آموزش	[24]
۱۵		چالش‌های مالیاتی	[24]
۱۶		عدم توجه به استانداردهای زیست محیطی	[17]
۱۷		عدم توجیه اقتصادی در توسعه زنجیره تامین بر بستر تکنولوژی بلاکچین	[25]
۱۸		چالش رعایت حریم خصوصی در بکارگیری تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تامین	[17][18][21][22]
۱۹	موانع تکنولوژیکی- سیستمی	هزینه انرژی بالا	[24]
۲۰		کیفیت پایین اینترنت	[23]
۲۱		عدم وجود ابزار برای اجرای تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تامین	[17][18]
۲۲		عدم اعتماد به توانمندی امنیتی تکنولوژی بلاکچین در بکارگیری آن در زنجیره تامین	[17][18][21][22]

۳- مبانی نظری

در طول چند دهه گذشته، به دلیل پذیرش فناوری‌های دیجیتال، تغییر قابل توجهی در محیط کسب و کار جهانی ایجاد شده است. صنعت نسل پنجم[1] فناوری ارتباطات جدید است که جایگزین صنعت نسل چهارم در نظر گرفته شده است، هدف آن استفاده از خلاقیت متخصصان در همکاری با ربات‌های کارآمد، هوشمند و دقیق، به منظور دست یابی به راه‌حل‌های نوین برای تولید با منابع کارآمدتر و انعطاف پذیرتر در مقایسه با نسل چهارم است [25]. در صنعت نسل پنجم، عواملی مانند سرمایه اجتماعی، جهت گیری کارآفرینی و رقابت در درک قابلیت مدیریتی و عملکرد در صنایع ضروری هستند. در صنعت نسل پنجم، عواملی مانند سرمایه اجتماعی، جهت گیری کارآفرینی و رقابت در درک قابلیت مدیریتی و عملکرد در صنایع ضروری هستند [26]. صنعت نسل پنجم مبتنی بر پیشرفت‌های صنعت نسل چهارم است که با ادغام فناوری‌های دیجیتال در فرآیندهای تولید مشخص شده است. انتقال به صنعت نسل پنجم شامل پذیرش فناوری‌های پیشرفته، همکاری، ایجاد دانش و نوآوری است [27]. ادغام زنجیره تامین با نوع صنعت که بر میزان اثربخشی تاثیر می‌گذارد قابلیت سفارشی‌سازی انبوه را در صنایع افزایش می‌دهد [28]. نوآوری در صنایعی مانند هوش مصنوعی[2]، فناوری-مالی[3] و اینترنت اشیاء[4] تحت تاثیر تغییرات ساختاری هستند که توسط رویدادهایی مانند بیماری پاندامیک کووید-۱۹[5] تسریع شده‌اند [29].صنعت نسل پنجم ارتباطات(5G) در حوزه بلاکچین تاثیرات زیادی دارد و این دو تکنولوژی با هم ترکیب شده، تاثیرات مضاعف و جالبی ایجاد کرده اند. ترکیب این دو، در بهبود عملکرد اموری مانند انتقال داده‌های حساس و اطلاعات مالی موثر است. برای مثال، در زمینه انتقال اطلاعات در زنجیره تامین، این ترکیب می‌تواند امنیت بیشتری برای اطلاعات شرکا فراهم کند. فناوری بلاکچین اطلاعات را در بلوک‌های متوالی ثبت و تایید می‌کند، که این اطلاعات غیرقابل تغییر و دستکاری می‌شوند. این فناوری، تمام تراکنش‌های بین شرکت‌ها را ضبط کرده و به راحتی تغییر یا هک شدن اطلاعات را غیرممکن می‌کند. اضافه کردن بلوک جدید به زنجیره باعث ایجاد پیچیدگی زیادی می‌شود و فرآیندهای تقلب و تغییر تاریخچه تراکنش‌ها را دشوار می‌کند[30].

[1] Industry 5.0
[2] AI- Intelligent Assistant
[3] FinTech- Financial Technology
[4] IoT-Internet of Things
[5] COVID-19

تکنولوژی بلاکچین به دلیل توانایی‌های امنیتی و شفافیتی که ارائه می‌دهد توانسته است توجه فراوانی را به خود جلب کند به گونه‌ای که در کاربردهای متعددی به عنوان یک ابزار قدرتمند مورد استفاده قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، از برجسته‌ترین کاربردهای آن می‌توان به استفاده از ارزهای دیجیتالی، انتقال دارایی‌ها، تضمین امنیت تراکنش‌های اینترنت اشیاء، ردیابی مبادلات مالی بین‌المللی و حتی انجام فعالیت‌ها در حوزه‌های پزشکی و زنجیره‌تامین اشاره کرد. این تکنولوژی به طور مستمر در حال تکامل و پیشرفت است و منجر به تغییرات چشم‌گیری در مدل‌های کسب و کار و ساختارهای اجتماعی شده است [31]. شکل ۲ چگونگی عملکرد بلاکچین درتکامل زنجیره تامین در بحث لجستیک را به تصویر کشیده است.

شکل ۲. چگونگی عملکرد بلاکچین در زنجیره تامین [32]

در سه دهه اخیر، پایداری در زنجیره تامین به یک عامل اساسی در تحریک تقاضا و ایجاد وفاداری مشتریان تبدیل شده است. اخیرا، اهمیت زنجیره تأمین برای ایجاد یک اقتصاد جهانی پایدار به طرز چشمگیری افزایش یافته است. بیش از ۹۳ درصد از ۲۵۰ شرکت بزرگ جهان گزارش داده‌اند که به پایداری توجه دارند[33]. مفهوم زنجیره تامین پایدار به معنای توجه به اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی در فرآیندهای تأمین مواد و خدمات است. این مفهوم بر اهمیت مدیریت منابع و احترام به حقوق انسانی تأکید دارد و بهبود کارایی، کاهش آلودگی، استفاده بهینه از منابع و حفظ منابع طبیعی را هدف قرار می‌دهد. در واقع، زنجیره تامین پایدار نه‌تنها به مزیت‌های اقتصادی، بلکه به حفظ محیط زیست و بهبود شرایط اجتماعی نیز کمک می‌کند[34].

در راستای تحقق این اهداف، صنعت نسل پنجم که با سه محور اصلی خود، یعنی محوریت انسان، پایداری و تاب‌آوری، نقش کلیدی ایفا می‌کند [35]. محوریت انسان در این صنعت به معنای استفاده از فناوری‌های هوشمند در کنار نیروی انسانی است که نه تنها موجب افزایش انعطاف‌پذیری و خلاقیت در فرآیندهای تأمین می‌شود، بلکه توجه به حقوق انسانی و ارتقای شرایط کاری را نیز به همراه دارد. از سوی دیگر، پایداری به عنوان یکی از اصول صنعت نسل پنجم، باعث می‌شود که فرآیندهای تأمین با کاهش ضایعات، بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش آلودگی‌های محیطی همراه باشند. تاب‌آوری نیز با به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته و تحلیل‌های پیش‌بینی‌کننده، به زنجیره‌های تأمین کمک می‌کند تا در برابر بحران‌ها و اختلالات مقاوم‌تر شوند و بتوانند به سرعت با تغییرات محیطی سازگار شوند .در مجموع، صنعت نسل پنجم از طریق تعامل این سه عنصر اساسی، زنجیره‌های تأمین را به سمت پایداری بیشتر و عملکرد بهتر هدایت می‌کند[36].

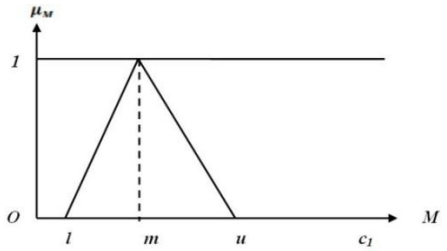
فناوری بلاکچین می‌تواند با بهبود مصرف انرژی، ذخیره‌سازی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به حفظ منابع طبیعی کمک کند و مشکلات زیست‌محیطی را کاهش دهد[37]. با تکیه بر قراردادهای هوشمند، بلاکچین قادر است هزینه‌ها را کاهش دهد و به شکل مؤثر تاخیرهای اداری ناشی از روند دستی و یا نیمه خودکار را کاهش دهد[38]. فناوری بلاکچین برای ارزیابی تامین‌کنندگان امکان نظارت دقیق بر عملکرد پایداری را فراهم می‌کند. این فناوری اطمینان حاصل می‌کند که محصولات از تولیدکننده تا مصرف‌کننده بدون واسطه منتقل شوند، بسته‌بندی‌ها قابل ردیابی باشند و تاثیرات زیست‌محیطی نیز تحت نظر قرار گیرند[39]. می‌توان با مدیریت دقیق فرایندهای تامین و توزیع در شبکه‌های زنجیره تامین و بهره‌گیری از مفهوم پایداری برای هر مرحله از این فرایندها، اهداف توسعه پایدار را به‌طور کامل دست‌یافتنی‌تر کرد. داده‌های موجود در بلاکچین تغییر ناپذیرند زیرا تغییر یک بلوک مستلزم به‌روزرسانی تمام دفتر کل از همان نقطه به بعد است[40].

در دهه‌های اخیر، فناوری بلاکچین به عنوان عامل نوآورانه‌ای در مدیریت زنجیره تامین ظهور کرده است. اما همچنان موانعی در راه پذیرش آن در این حوزه وجود دارد که باید شناسایی و رفع شوند. این مطالعه به بررسی عمیق‌تر این موانع می‌پردازد و از روش‌های مناسب برای شناسایی و رفع آنها استفاده می‌کند تا توانایی بلاکچین

در بهبود پایداری زنجیره تامین را تسهیل کند. از جمله ویژگی‌های مطالعه علمی با هدف حقیقت‌یابی، استفاده از یک روش تحقیقی مناسب است. روش پژوهش به عنوان یک فرایند نظام‌مند برای یافتن پاسخ یک پرسش یا حل یک مسئله است. در این بخش ضمن توضیح روش پژوهش، به توصیف و بررسی جامعه و نمونه پژوهش پرداخته می‌شود. سپس ابزار گردآوری اطلاعات (پرسشنامه‌ها) معرفی شده است و در پایان نیز به اختصار تصمیم‌گیری چند شاخصه مطرح می‌گردد.

۳-۱- روش دلفی فازی

قضاوت‌های افراد در مورد ارجحیت‌ها اغلب برای تخمین ارزش عددی دقیق غیرشفاف است. به کارگیری منطق فازی برای بررسی مسائلی که دارای ابهام و عدم قطعیت هستند مفید است . اعداد فازی را با نماد ~ بالای عدد نشان می‌دهند. عدد فازی مثلثی در شکل۳ نشان داده‌شده است[41].



شکل ۳. .نمایش عدد فازی مثلثی

روش دلفی برای نخستین بار توسط دلکی و هلمر در سال ۱۹۶۳ ارائه شد. در بسیاری از موقعیت‌های واقعی، قضاوت متخصصان نمی‌تواند به صورت اعداد کمّی قطعی بیان و تفسیر شود؛ به عبارت دیگر داده‌ها و اعداد قطعی به منظور مدل کردن سیستم‌های دنیای واقعی به علت ابهام و عدم قطعیت موجود در قضاوت تصمیم گیرندگان ناکافی است. در این راستا به منظور غلبه بر این مشکل که به وسیله لطفی‌زاده «نظریه مجموعه‌های فازی» در سال ۱۹۶۵ ارائه شد، ابزار مناسبی برای مقابله با ابهام و عدم قطعیت موجود در فرآیند تصمیم‌گیری است. در این پژوهش از روش دلفی فازی به منظور تأیید و غربالگری شاخص‌های شناسایی شده استفاده شده است. این روش ترکیبی از روش دلفی و نظریه مجموعه‌های فازی است که توسط ایشیکاوا و همکاران ارائه شد.

گامهای روش دلفی فازی عبارتند از [42]:

۳-۱-۱- شناسایی شاخص‌های پژوهش با استفاده از مرور جامع مبانی نظری پژوهش

۳-۱-۲- جمع‌آوری نظرهای متخصصان تصمیم گیرنده: در این گام بعد از شناسایی معیارها، گروه تصمیم‌گیری متشکل از خبرگان مرتبط با موضوع پژوهش تشکیل شده و پرسش‌نامه، به منظور تعیین مرتبط بودن شاخص‌های شناسایی شده با موضوع اصلی پژوهش و غربالگری برای آن‌ها ارسال شده است که در آن متغیرهای زبانی و اعداد دلفی فازی طبق جدول ۲، برای بیان اهمیت هر شاخص به کار رفته است.

جدول ۲. عبارات زبانی و اعداد دلفی فازی[43]

عبارات زبانی	اعداد فازی مثلثی
خیلی کم	(0, 0, 0.25)
کم	(0, 0.25, 0.5)
متوسط	(0.25, 0.5, 0.75)
زیاد	(0.5, 0.75, 1)
خیلی زیاد	(0.75, 1, 1)

۳-۱-۳- تایید و غربالگری شاخص‌ها: این کار از طریق مقایسه مقدار ارزش اکتسابی هر شاخص با مقدار آستانه $\tilde{S}$ صورت می‌پذیرد. مقدار آستانه با استنباط ذهنی تصمیم‌گیرنده معین می‌شود و مستقیم بر روی تعداد عواملی که غربال می‌شوند تاثیرخواهد داشت هیچ راه ساده و قانونی برای تعیین مقدار آستانه وجود ندارد. در این پژوهش مقدار ۰,۷ به عنوان مقدار آستانه در نظر گرفته شده است [44]. برای این کار ابتدا باید مقادیر فازی مثلثی نظرهای خبرگان محاسبه شده سپس برای محاسبه میانگین نظرات n پاسخ دهنده، میانگین فازی آن‌ها محاسبه شود. محاسبه عدد فازی $\boldsymbol{\tau}$ برای هر یک از شاخص‌ها با استفاده از روابط ۱ تا ۴ صورت می‌گیرد [45].

$$\tilde{\tau}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}), \quad i = 1,2,\dots,n \quad j = 1,2,\dots,m, \tag{۱}$$

$$a_j = \sum \frac{a_{ij}}{n} \tag{۲}$$

$$b_j = \sum \frac{b_{ij}}{n}, \tag{۳}$$

$$c_j = \sum \frac{c_{ij}}{n}, \tag{۴}$$

در روابط ۱ تا ۴ اندیس i به فرد خبره و اندیس j به شاخص تصمیم‌گیری اشاره دارد. همچنین مقدار دیفازی شده میانگین عدد فازی از رابطه ۵ بدست می‌آید در این معادله (a) حد پایینی،(b) حد میانی و (c) حد بالایی است.

$$Crisp = \frac{a+b+c}{3}, \tag{۵}$$

۳-۲- روش ترکیب دیمتل و تحلیل شبکه‌ای فازی

تکنیک ترکیب دیمتل و تحلیل شبکه‌ای از رویکردهای جدید ترکیب دو روش دیمتل با ANP[1] است. این رویکرد با استفاده از ماتریس ارتباطات کل دیمتل، سوپرماتریس‌های ANP را تشکیل داده و به محاسبه وزن شاخص‌های پژوهش می‌پردازد. گام‌های این روش عبارت است از [46]:

۳-۲-۱- محاسبه ماتریس ارتباط مستقیم (D)

در این گام از پاسخ‌دهندگان خواسته شد تا میزان تأثیرگذاری معیار i بر معیار j را با استفاده از جدول ۳ نشان دهند. برای در نظر گرفتن نظر همه خبرگان طبق رابطه 3 از آن‌ها میانگین حسابی گرفته می‌شود.

$$\tilde{z} = \frac{\tilde{x}^1 \oplus \tilde{x}^2 \oplus \tilde{x}^3 \oplus \ldots \oplus x^p}{p} \qquad (۶)$$

در این فرمول p تعداد خبرگان و $\tilde{x}^1$، $\tilde{x}^2$، $\tilde{x}^p$ به ترتیب ماتریس مقایسه زوجی خبره ۱، خبره ۲ و خبره p می‌باشد و$\tilde{z}$ عدد فازی مثلثی به صورت $\tilde{z}_{ij} = (l'_{ij}, m'_{ij}, u'_{ij})$ است.

جدول ۳. طیف پنج درجه‌ای تکنیک ترکیب دیمتل و تحلیل شبکه‌ای و معادل قطعی برای عبارات کلامی

متغیر	معادل قطعی	معادل فازی
بدون تأثیر	۰	(0.0,0.0,0.25)
تأثیر کم	۱	(0.0,0.25,0.5)
تأثیر متوسط	۲	(0.25,0.5,0.75)
تأثیر زیاد	۳	(0.5,0.75,1)
تأثیر خیلی زیاد	۴	(0.75,1,1)

۳-۲-۲- نرمال‌سازی ماتریس ارتباط مستقیم

مطابق با رابطه ۷ ماتریس میانگین گام اول را نرمال کرده که آن ماتریس H نام دارد. برای نرمال‌سازی ماتریس به دست آمده، از فرمول‌های ۷ و ۸ استفاده شده است:

$$\tilde{H}_{ij} = \frac{\tilde{z}_{ij}}{r} = \left(\frac{l'_{ij}}{r}, \frac{m'_{ij}}{r}, \frac{u'_{ij}}{r}\right) = (l''_{ij}, m''_{ij}, u''_{ij}) \qquad (۷)$$

که r از رابطه ۸ به‌دست می‌آید:

$$r = \max_{1 \le i \le n}\left(\sum_{j=1}^{n} u'_{ij}, \sum_{i=1}^{n} u'_{ij}\right) \qquad (۸)$$

۳-۲-۳- محاسبه ماتریس ارتباط کامل معیارها (Tc)

بعد از محاسبه ماتریس‌های فوق، ماتریس روابط کل فازی با توجه به فرمول‌های ۴ و ۵ به‌دست می‌آید.

$$T = \lim_{k \to +\infty}(\tilde{H}^1 \oplus \tilde{H}^2 \oplus \ldots \oplus \tilde{H}^k) \qquad (۹)$$

که هر درایه آن عدد فازی به صورت است $\tilde{t}_{ij} = \left(l^t_{ij}, m^t_{ij}, u^t_{ij}\right)$ است و به صورت روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲محاسبه می‌شود:

$$[l^t_{ij}] = H_l \times (I - H_l)^{-1} \qquad (۱۰)$$

$$[m^t_{ij}] = H_m \times (I - H_m)^{-1} \qquad (۱۱)$$

$$[u^t_{ij}] = H_u \times (I - H_u)^{-1} \qquad (۱۲)$$

در این فرمول‌ها I ماتریس یکه و H_l، H_m و H_u هر کدام ماتریس n×n هستند که درایه‌های آن را به ترتیب عدد پایین، عدد میانی و عدد بالاییِ اعداد فازیِ مثلثیِ ماتریسِ H تشکیل می‌دهد.

۳-۲-۴- محاسبه شدت و جهت تاثیر

مطابق با رابطه ۸ و ۹ میزان شاخص D_iو R_j را محاسبه می‌نماییم. شاخص Ri بیانگر مجموع سطر i ام و شاخص Rj بیانگر مجموع ستون j ام از ماتریس Tc با توجه به بعد مربوطه می‌باشد. که از روابط ۱۳ و ۱۴ محاسبه می‌شوند.

$$\tilde{D} = \left(\tilde{D}_i\right)_{n\times 1} = \left[\sum_{j=1}^{n} \tilde{T}_{ij}\right]_{n\times 1}, \qquad (۱۳)$$

$$\tilde{R} = \left(\tilde{R}_i\right)_{1\times n} = \left[\sum_{j=1}^{n} \tilde{T}_{ij}\right]_{1\times n} \qquad (۱۴)$$

سپس میزان تعامل شاخص‌ها $(\tilde{D}_i + \tilde{R}_i)$ و رابطه بین معیارها $(\tilde{D}_i - \tilde{R}_i)$ مشخص می‌شود. اگر

- $\tilde{D}_i - \tilde{R}_i > 0$ باشد معیار مربوطه اثرگذار و اگر $\tilde{D}_i - \tilde{R}_i < 0$ باشد معیار مربوطه اثرپذیر است.
- $Ri + Dj$ = شدت اثرگذاری و اثرپذیری (به عبارت دیگر هرچه مقدار Ri+Dj، عاملی بیشتر باشد، آن عامل تعامل بیشتری با سایر عوامل سیستم دارد.)
- $Ri - Dj$ = جهت تأثیر گذاری یا تأثیر پذیری (بدین صورت که اگر $Ri - Dj > 0$ باشد معیار مربوطه علت و اگر $Dj < 0$ باشد معیار مربوطه معلول است).

با توجه به مقادیر محاسبه شده در فوق، مقدار شاخص $ri + dj$ و $ri - dj$ برای معیارها و همچنین شاخص $\tilde{D}_i + \tilde{R}_i$ و $\tilde{D}_i - \tilde{R}_i$ برای ابعاد بدست آورده و سپس با استفاده از فرمول ۱۵ فازی‌زدایی شده

[1] The analytic network process

است:

$$\text{defuuzy} = \frac{((u-l)+(m-l))}{3} + l \qquad (۱۵)$$

در این معادله (l) حد پایینی،(m) حد میانی و (u)حد بالایی است.

۳-۲-۵- ترسیم نقشه روابط شبکه (NRM)

جهت تعیین نقشه روابط شبکه (NRM)، باید ارزش آستانه محاسبه شود. با این روش می‌توان از روابط جزئی صرف نظر کرده و شبکه روابط قابل اعتنا را ترسیم کرد. تنها روابطی که مقادیر آنها در ماتریس T_C و T_D از مقدار آستانه بزرگ تر باشد درNRM نمایش داده خواهد شد. برای محاسبه مقدار آستانه روابط، کافی است تا با استفاده از نظر خبرگان و یا میانگین مقادیر، برای هر T_C^{ij} (در ماتریس T_C) و همچنین میانگین مقادیر ماتریس T_D (برای ترسیم نقشه روابط ابعاد) محاسبه شود. بعد از آنکه شدت آستانه تعیین شد، تمامی مقادیری که کوچکتر ازآستانه باشد صفر شده یعنی آن رابطه علی، در نظر گرفته نمی‌شود. بدین منظور ماتریس ارتباط کامل ابعاد و معیارها با استفاده از رابطه ۱۵ فازی زدایی می‌شود.

۳-۲-۶- نرمال‌سازی ماتریس ارتباط کامل معیارها ($T_C^{\propto}$) و تشکیل سوپرماتریس موزون

ماتریس Tc با استفاده از روابط ۱۶ تا ۱۸ نرمال می‌شوند؛ به این طریق که در این گام مجموع هر سطر T_C^{ij} را با توجه به بعد مربوطه محاسبه و سپس در هر T_C^{ij}، هر عنصر بر مجموع عناصر سطر مربوط به خود تقسیم می‌گردد. برای مثال اگر هر $T_C^{\propto}$ را شامل مجموعه‌ای از $T_C^{\propto ij}$ بدانیم، $T_C^{\propto 11}$ از نرمال‌سازی T_C^{11} به دست می‌آید. با ترانسپوز ماتریس $T_C^{\propto}$، سوپر ماتریس موزون حاصل می‌شود.

$$\boldsymbol{T}_C^{\alpha} = \begin{array}{c|c} & \begin{matrix} D_1 & & D_j & & D_n \\ c_{11}\ldots c_{1m_1} & \cdots & c_{j1}\ldots c_{jm_j} & \cdots & c_{n1}\ldots c_{nm_n} \end{matrix} \\ \begin{matrix} D_1 \\ \vdots \\ D_i \\ \vdots \\ D_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \boldsymbol{T}_c^{\alpha 11} & \cdots & \boldsymbol{T}_c^{\alpha 1j} & \cdots & \boldsymbol{T}_c^{\alpha 1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{T}_c^{\alpha i1} & \cdots & \boldsymbol{T}_c^{\alpha ij} & \cdots & \boldsymbol{T}_c^{\alpha in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{T}_c^{\alpha n1} & \cdots & \boldsymbol{T}_c^{\alpha nj} & \cdots & \boldsymbol{T}_c^{\alpha nn} \end{bmatrix} \end{array} \qquad (۱۶)$$

$$d_{ci}^{11} = \sum_{j=1}^{m_1} t_{cij}^{11} \ , i = 1, 2, \ldots, m_1 \qquad (۱۷)$$

$$\boldsymbol{T}_C^{\propto 11} = \begin{bmatrix} t_{c11}^{11}/d_{c1}^{11} & \cdots & t_{c1j}^{11}/d_{c1}^{11} & \cdots & t_{c1m1}^{11}/d_{c1}^{11} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ t_{ci1}^{11}/d_{ci}^{11} & \cdots & t_{cij}^{11}/d_{ci}^{11} & \cdots & t_{cim1}^{11}/d_{ci}^{11} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ t_{cm11}^{11}/d_{cm1}^{11} & \cdots & t_{cm1j}^{11}/d_{cm1}^{11} & \cdots & t_{cm1m1}^{11}/d_{cm1}^{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{c11}^{\propto 11} & \cdots & t_{c1j}^{\propto 11} & \cdots & t_{c1m1}^{\propto 11} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ t_{ci1}^{\propto 11} & \cdots & t_{cij}^{\propto 11} & \cdots & t_{cim1}^{\propto 11} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ t_{cm1\,1}^{\propto 11} & \cdots & t_{cm1j}^{\propto 11} & \cdots & t_{cm1m1}^{\propto 11} \end{bmatrix} \qquad (۱۸)$$

۳-۲-۷- محدود کردن سوپرماتریس موزون

مطابق با رابطه ۱۹ سوپرماتریس موزون را آن قدر به توان (متوالی اعداد فرد) رسانیده تا تمامی اعداد هر سطر همگرا شوند.

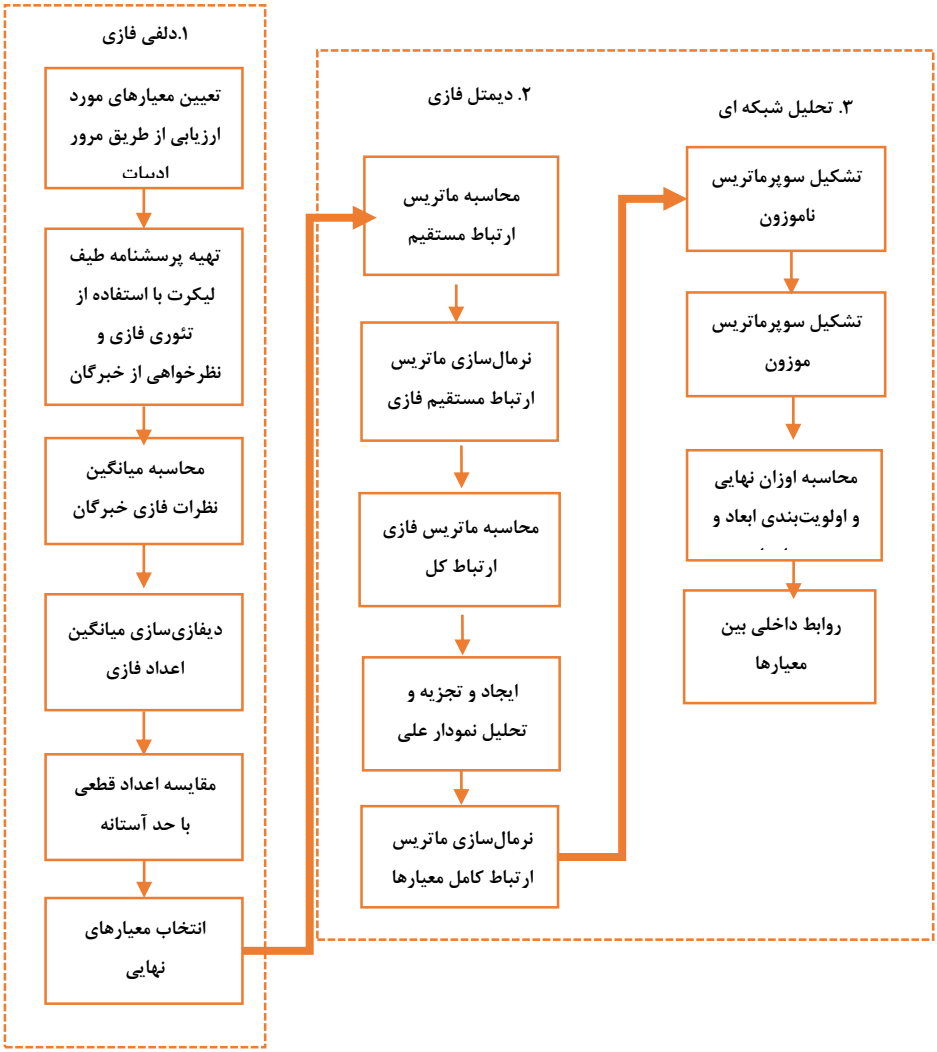
$$\lim_{Z\to\infty}(W^{\propto l})^Z,\ \lim_{Z\to\infty}(W^{\propto m})^Z,\ \lim_{Z\to\infty}(W^{\propto u})^Z \qquad (۱۹)$$

۴- روش پژوهش

این پژوهش از لحاظ هدف، در دسته تحقیقات کاربردی قرار می‌گیرد، چرا که به دنبال یافتن راه‌حل‌هایی برای یک مسئله در دنیای واقعی است. همچنین از نظر شیوه گردآوری اطلاعات، در زمره پژوهش‌های پیمایشی محسوب می‌شود. در این تحقیق، ابتدا موانع پذیرش بلاکچین در زنجیره تأمین از طریق مرور ادبیات شناسایی و سپس به تأیید خبرگان این حوزه خواهند رسید. سپس با استفاده از روش ترکیبی دیمتل فازی و تحلیل شبکه‌ای فازی عوامل مختلف رتبه‌بندی خواهند شد. در شکل ۴ مراحل تحقیق آورده شده است.

۵- تجزیه و تحلیل داده‌ها

از مهم‌ترین بخش هر تحقیق، تجزیه و تحلیل اطلاعات است. انتخاب یک روش تحقیق مناسب، تا حد زیادی محقق را در جلوگیری از بروز اشتباهات در امر تحقیق یاری می‌رساند. داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده منابع خامی هستند که جهت کاربردی شدن نتایج آن‌ها بایستی توسط ابزار مناسب مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. در مبحث قبل، در مورد روش انجام پژوهش بحث شد. لذا در این بخش جهت دستیابی به اهداف و پاسخ به سؤالات پژوهشی به تجزیه و تحلیل داده‌ها پرداخته شده است.



شکل ۴. چارچوب تحقیق

۵-۱- ابزارهای جمع‌آوری داده‌های پژوهش

در پژوهش پیمایشی حاضر جهت جمع‌آوری داده‌ها از دو پرسشنامه استفاده شده است. پرسشنامه بر اساس طیف لیکرت جهت تایید و غربالگری شاخص‌ها و نیز پرسشنامه دیمتل بر اساس طیف ۰ تا ۴ جهت بررسی تاثیرگذاری و تاثیرپذیری است. جامعه آماری پژوهش حاضرعبارت است از شرکت‌های کوچک و متوسط ایران که حداقل دارای سابقه کار بالای ۱۰ سال هستند و روش نمونه‌گیری گلوله برفی است که با استفاده از آن، تعداد ۳۰ متخصص بلاکچین در زمینه توسعه و یا برنامه نویسی و یا مدیریت پروژه‌ها انتخاب شدند.

در ابتدای مبحث مبانی نظری به تعاریف بلاکچین، مدیریت زنجیره تامین و زنجیره تامین پایدار و اهمیت بلاکچین در بهبود آن‌ها اشاره شد. این پژوهش تلفیقی از روش‌های دلفی فازی و ترکیب دیمتل و تحلیل شبکه‌ای فازی، به دنبال بهینه‌سازی فرآیندها و تصمیم‌گیری‌ها در زنجیره تامین باتوجه به عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌های موجود در محیط کسب و کار است.

۵-۲- روایی پرسشنامه

منظور از روایی این است که مقیاس و محتوای ابزار یا سوالات مندرج در ابزار گردآوری اطلاعات دقیقاً متغیرها و موضوع مورد مطالعه را بسنجد؛ یعنی اینکه هم داده‌های گردآوری شده از طریق ابزار مازاد بر نیاز تحقیق نباشد و هم اینکه بخشی از داده‌های مورد نیاز در رابطه با سنجش متغیرها در محتوای ابزار حذف نشده باشد یا به عبارت دیگر، عین واقعیت را به خوبی نشان دهد. در این پژوهش

پرسشنامه از لحاظ روایی ظاهری به تایید خبرگان پژوهش رسیده شده است.

۵-۳- پایایی پرسشنامه

پایایی یکی از ویژگی‌های فنی ابزار اندازه گیری است و با این امر سروکار دارد که ابزار اندازه گیری در شرایط یکسان تا چه اندازه نتایج یکسانی بدست می‌آورد. در این پژوهش برای بدست آوردن پایایی پرسشنامه از ضریب آلفای کرونباخ سوالات پرسش نامه عدد ۰,۸۵۵ شده است که بیش از ۰,۷ است و قابل قبول می‌باشد.

۵-۴- عوامل پژوهش

در این بخش، پرسشنامه ای شامل ۲۲ مانع پذیرش بلاکچین در زنجیره تامین پایدار با استفاده از روش دلفی فازی در اختیار اعضای گروه خبره قرار گرفت و از آنها درخواست شد نظرشان را درباره‌ی هر مانع در قالب متغیرهای کلامی مندرج در پرسشنامه بیان کنند. نتایج اولیه از نظرات خبرگان در جدول ۴ آورده شده است.

در جدول ۵ شمارش نظرات خبرگان به شاخص‌های پژوهش آورده شده است. برای فازی‌سازی اعداد، ابتدا بر اساس طیف جدول ۱، به عدد فازی تبدیل می‌کنیم سپس بر اساس روابط ۲ تا ۴ میانگین فازی از امتیازات اخذ می‌شود و سپس توسط رابطه ۲۰ میانگین فازی به عدد قطعی تبدیل می‌شود نتایج کلیه محاسبات فازی‌سازی در مرحله اول دلفی، در جدول ۴ آورده شده است. به عنوان مثال معیار ردیف ۱ محاسبات دلفی فازی به صورت زیر می‌باشد:

صفر خبره امتیاز خیلی کم، صفر خبره امتیاز کم، ۹ خبره امتیاز متوسط، ۱۲ خبره امتیاز زیاد و ۹ خبره امتیاز خیلی زیاد داده‌اند. بنابراین امتیاز فازی و غیرفازی (قطعی) به صورت فرمول ۲۰ محاسبه می‌گردد.

جدول ۱.نتایج نظرات خبرگان

ردیف	معیار	میزان اهمیت				
		خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
۱	عدم آگاهی مشتری در مورد تاثیر فناوری بلاکچین در پایداری زنجیره تامین	۰	۰	۹	۱۲	۹
۲	هزینه انرژی بالا	۱	۴	۱۴	۱۱	۰
۳	کمبود آموزش	۰	۷	۹	۱۴	۰
۴	ابهام در اهداف سازمانی	۰	۰	۱۴	۱۲	۴
۵	چالش رعایت حریم خصوصی در به کارگیری فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	۰	۳	۸	۶	۱۳
۶	چالش در ادغام فناوری بلاکچین و زنجیره تامین پایدار	۰	۰	۱۱	۷	۱۲
۷	استفاده در فعالیت‌های غیر قانونی	۰	۰	۱۶	۱۴	۰
۸	کیفیت پایین اینترنت	۰	۸	۱۱	۱۱	۰
۹	فقدان پشتیبانی مدیریت عالی و منابع انسانی	۸	۴	۱۰	۴	۴
۱۰	عدم شفافیت قوانین و مقررات مربوط به فناوری بلاکچین	۰	۰	۸	۱۰	۱۲
۱۱	روش‌های حسابداری سنتی	۰	۴	۱۱	۱۵	۰
۱۲	مغایرت قوانین و استانداردهای زنجیره تامین با فناوری بلاکچین	۰	۳	۷	۴	۱۶
۱۳	رقابت بر سر میزان سرمایه‌گذاری شرکت‌ها در بکارگیری فناوری بلاکچین	۰	۰	۱۰	۱۲	۸
۱۴	عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در بکارگیری فناوری بلاکچین	۰	۰	۰	۴	۲۶
۱۵	کمبود تقاضا برای محصولات پایدار	۱	۸	۱۲	۹	۰
۱۶	چالش‌های مالیاتی	۰	۵	۱۴	۱۱	۰
۱۷	عدم توجه به استانداردهای زیست محیطی	۳	۱۰	۵	۱۲	۰
۱۸	عدم اعتماد به توانمندی امنیتی فناوری بلاکچین در بکارگیری آن در زنجیره تامین	۰	۰	۴	۱۱	۱۵
۱۹	فقدان نیروی متخصص کافی در فناوری بلاکچین	۰	۴	۴	۷	۱۵
۲۰	مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین	۰	۰	۱	۱۱	۱۸
۲۱	عدم وجود ابزار برای اجرای فناوری بلاکچین در زنجیره تامین پایدار	۰	۶	۰	۱۱	۱۳
۲۲	عدم توجیه اقتصادی در توسعه پایداری زنجیره تامین بر بستر فناوری بلاکچین	۰	۰	۴	۱۸	۸

(۲۰)

$$\text{امتیاز}_{\text{فازی}} = \frac{0 \times (0,0,0.25) + 0 \times (0,0.25,0.5) + 9 \times (0.25,0.5,0.75) + 12 \times (0.5,0.75,1) + 9 \times (0.75,1,1)}{30}$$

$$= (0.5,0.75,0.925)$$

$$\text{امتیاز}_{\text{قطعی}} = \frac{0.5 + 0.75 + 0.925}{3} = 0.725$$

در این پژوهش عدد آستانه ۰٫۷ در نظر گرفته می‌شود که نتایج در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۲.نتایج دلفی فازی

ردیف	معیار	میانگین فازی	میانگین غیرفازی	وضعیت
۱	عدم آگاهی مشتری در مورد تاثیر فناوری بلاکچین در پایداری زنجیره تامین	(۰٫۵،۰٫۷۵،۰٫۹۲۵)	۰٫۷۲۵	تایید
۲	هزینه انرژی بالا	(۰٫۳،۰٫۵۴۲،۰٫۷۹۲)	۰٫۵۴۴	رد
۳	کمبود آموزش	(۰٫۳۰۸،۰٫۵۵۸،۰٫۸۰۸)	۰٫۵۵۸	رد
۴	ابهام در اهداف سازمانی	(۰٫۴۱۷،۰٫۶۶۷،۰٫۸۸۳)	۰٫۶۵۶	رد
۵	چالش رعایت حریم خصوصی در بکارگیری فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	(۰٫۴۹۲،۰٫۷۴۲،۰٫۸۸۳)	۰٫۷۰۶	تایید
۶	چالش در ادغام فناوری بلاکچین و زنجیره تامین پایدار	(۰٫۵۰۸،۰٫۷۵۸،۰٫۹۰۸)	۰٫۷۲۵	تایید
۷	استفاده در فعالیت‌های غیر قانونی	(۰٫۳۶۷،۰٫۶۱۷،۰٫۸۶۷)	۰٫۶۱۷	رد
۸	کیفیت پایین اینترنت	(۰٫۲۷۵،۰٫۵۲۵،۰٫۷۷۵)	۰٫۵۲۵	رد
۹	فقدان پشتیبانی مدیریت عالی و منابع انسانی	(۰٫۲۵،۰٫۴۳۳،۰٫۶۵)	۰٫۴۴۴	رد
۱۰	عدم شفافیت قوانین و مقررات مربوط به فناوری بلاکچین	(۰٫۵۳۳،۰٫۷۸۳،۰٫۹۳۳)	۰٫۷۵۰	تایید
۱۱	روش‌های حسابداری سنتی	(۰٫۳۴۲،۰٫۵۹۲،۰٫۸۴۲)	۰٫۵۹۲	رد
۱۲	مغایرت قوانین و استانداردهای زنجیره تامین با فناوری بلاکچین	(۰٫۵۲۵،۰٫۷۷۵،۰٫۸۹۲)	۰٫۷۳۱	تایید
۱۳	رقابت بر سر میزان سرمایه‌گذاری شرکت‌ها در بکارگیری فناوری بلاکچین	(۰٫۴۸۳،۰٫۷۳۳،۰٫۹۱۷)	۰٫۷۱۱	تایید
۱۴	عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در بکارگیری فناوری بلاکچین	(۰٫۷۱۷،۰٫۹۶۷،۱)	۰٫۸۹۴	تایید
۱۵	کمبود تقاضا برای محصولات پایدار	(۰٫۲۵،۰٫۴۹۲،۰٫۷۴۲)	۰٫۴۹۴	رد
۱۶	چالش‌های مالیاتی	(۰٫۳،۰٫۵۵،۰٫۸)	۰٫۵۵۰	رد
۱۷	عدم توجه به استاندارهای زیست محیطی	(۰٫۲۴۲،۰٫۴۶۷،۰٫۷۱۷)	۰٫۴۷۵	رد
۱۸	عدم اعتماد به توانمندی امنیتی فناوری بلاکچین در بکارگیری آن در زنجیره تامین	(۰٫۵۹۲،۰٫۸۴۲،۰٫۹۶۷)	۰٫۸۰۰	تایید
۱۹	فقدان نیروی متخصص کافی در فناوری بلاکچین	(۰٫۵۲۵،۰٫۷۷۵،۰٫۹)	۰٫۷۳۳	تایید
۲۰	مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین	(۰٫۶۴۲،۰٫۸۹۲،۰٫۹۹۲)	۰٫۸۴۲	تایید
۲۱	عدم وجود ابزار برای اجرای فناوری بلاکچین در زنجیره تامین پایدار	(۰٫۵۰۸،۰٫۷۵۸،۰٫۹)	۰٫۷۲۲	تایید
۲۲	عدم توجیه اقتصادی در توسعه پایداری زنجیره تامین بر بستر فناوری بلاکچین	(۰٫۵۳۳،۰٫۷۸۳،۰٫۹۶۷)	۰٫۷۶۱	تایید

با توجه به نتایج روش دلفی فازی، ۱۰ مانع میانگین غیرفازی کمتر از ۰٫۷ کسب کرده‌اند و حذف می‌شوند و ۱۲ مانع تایید نهایی می‌شوند که در جدول ۶ به صورت کد بندی آورده شده‌اند.

جدول ۳.موانع پذیرش بلاکچین در زنجیره تامین پایدار(نهایی)

ردیف	معیار	کد
۱	عدم آگاهی مشتری در مورد تاثیر فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	C1
۲	چالش رعایت حریم خصوصی در بکارگیری فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	C2
۳	چالش در ادغام فناوری بلاکچین و زنجیره تامین	C3
۴	عدم شفافیت قوانین و مقررات مربوط به فناوری بلاکچین	C4
۵	مغایرت قوانین و استانداردهای زنجیره تامین با فناوری بلاکچین	C5
۶	رقابت بر سر میزان سرمایه‌گذاری شرکت‌ها در بکارگیری فناوری بلاکچین	C6
۷	عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در بکارگیری فناوری بلاکچین	C7
۸	عدم اعتماد به توانمندی امنیتی فناوری بلاکچین در بکارگیری آن در زنجیره تامین	C8
۹	فقدان نیروی متخصص کافی در فناوری بلاکچین	C9
۱۰	مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین	C10
۱۱	عدم وجود ابزار برای اجرای فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	C11
۱۲	عدم توجیه اقتصادی در توسعه زنجیره تامین بر بستر فناوری بلاکچین	C12

۵-۵- دیمتل فازی

در این بخش به پیاده‌سازی تکنیک دیمتل فازی برای ۱۲ شاخص تایید شده پرداخته می‌شود.

۵-۵-۱- تشکیل ماتریس ارتباط مستقیم

در این بخش ماتریس دیمتل در اختیار ۳۰ نفر از خبرگان قرار داده شد تا بر اساس طیف ۰ تا ۴ جدول دیمتل فازی، تاثیرگذاری هر معیار بر روی دیگر معیارها مشخص شود. سپس با استفاده از رابطه ۶ نظرات پاسخ‌دهندگان ادغام شد. نتایج در پیوست ۱ آورده شده است.

۵-۵-۲- نرمال کردن ماتریس ارتباط مستقیم

در این مرحله با استفاده از رابطه ۷ و ۸ ماتریس ارتباط مستقیم معیارها (پیوست ۱) نرمال می‌گردد. جهت نرمال‌سازی باید ماکزیمم مجموع سطری حدهای بالای ماتریس ارتباطات مستقیم را بدست آورد (در اینجا ۸,۷۲۲). سپس تمامی اعداد ماتریس ارتباطات مستقیم (پیوست ۱) بر این عدد تقسیم شود. نتیجه در پیوست ۲ آورده شده است.

۵-۵-۳- تشکیل ماتریس ارتباط کامل (T)

در این مرحله با استفاده از رابطه ۱۰ و ۱۱ و۱۲ ماتریس ارتباطات کامل (T) را تشکیل می‌دهیم برای محاسبه ماتریس ارتباط کامل ابتدا ماتریس همانی (I_{12*12}) تشکیل شده است. سپس ماتریس همانی منهای ماتریس نرمال شده و ماتریس حاصل معکوس می‌گردد. در نهایت ماتریس نرمال در ماتریس معکوس ضرب می‌شود که در پیوست ۳ آورده شده است.

۵-۵-۴- ایجاد و تجزیه تحلیل نمودار علی

در این مرحله بر اساس روابط ۱۳ و ۱۴ جمع سطر (D) و جمع ستون (R) ماتریس ارتباطات کامل (پیوست ۳) را بدست آورده و سپس مقدار D+R و D-R محاسبه شده است. در این مرحله جهت دیفازی کردن مقادیر از رابطه ۱۵ استفاده شده است. نتایج در جدول ۷ آورده شده است.

در جدول۶، جمع عناصر هر سطر (D) نشانگر میزان تاثیرگذاری آن عامل بر سایر عامل‌های سیستم است. براین اساس مانع «عدم وجود ابزار برای اجرای فناوری بلاکچین در زنجیره تامین» از بیشترین تاثیرگذاری برخوردار است. برخی دلایل تاثیر این مانع در پذیرش بلاکچین در زنجیره تامین عبارت است از:

۱. پیچیدگی فنی: بلاکچین، یک فناوری پیچیده تخصصی است که برای اجرای موثر آن در زنجیره تامین، توانایی و مهارت فنی خاص خود را می‌طلبد. عدم وجود این توانمندی‌ها می‌تواند باعث تردید و مخالفت سازمان‌ها شود.

جدول ۴.جدول مقادیر D وR معیارها

نام معیار	کد	Di	Ri	$(Di)^{def}_{uzzy}$	$(Ri)^{defuzz}_{y}$	Di+Ri	Di-Ri	نوع معیار
عدم آگاهی مشتری در مورد تاثیر فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	C1	(۰,۴۴۲،۱,۳۴۵،۸,۹۷۲)	(۰,۳۲۶،۱,۱۳۱،۸,۲۳۶)	۳,۵۸۶	۳,۲۳۱	۶,۸۱۷	۰,۳۵۵	تاثیرگذار
چالش رعایت حریم خصوصی در بکارگیری فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	C2	(۰,۴۶۵،۱,۴۳۳،۹,۴۹)	(۰,۴۴۹،۱,۴۰۳،۹,۱۳۴)	۳,۷۹۶	۳,۶۶۲	۷,۴۵۸	۰,۱۳۴	تاثیرگذار
چالش در ادغام فناوری بلاکچین و زنجیره تامین	C3	(۰,۶۷۳،۱,۸۵۲،۱۰,۷۶۵)	(۰,۶۵۸،۱,۸۱۱،۱۰,۶۶۷)	۴,۴۳۰	۴,۳۷۹	۸,۸۰۹	۰,۰۵۲	تاثیرگذار
عدم شفافیت قوانین و مقررات مربوط به فناوری بلاکچین	C4	(۰,۵۵۷،۱,۶۱۵،۹,۸۸۷)	(۰,۴۶۸،۱,۴۰۷،۹,۱۵)	۴,۰۱۹	۳,۶۷۵	۷,۶۹۴	۰,۳۴۴	تاثیرگذار
مغایرت قوانین و استانداردهای زنجیره تامین با فناوری بلاکچین	C5	(۰,۵۷۲،۱,۶۸۴،۱۰,۳۰۷)	(۰,۳۸۳،۱,۲۲۸،۸,۴۳۵)	۴,۱۸۸	۳,۳۴۹	۷,۵۳۶	۰,۸۳۹	تاثیرگذار
رقابت بر سر میزان سرمایه‌گذاری شرکت‌ها در بکارگیری فناوری بلاکچین	C6	(۰,۴۹۴،۱,۴۶۲،۹,۳۹۲)	(۰,۵۲۴،۱,۵۷۸،۹,۹۸۸)	۳,۷۸۳	۴,۰۳۰	۷,۸۱۳	۰,۲۴۸-	تاثیرپذیر
عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در بکارگیری فناوری بلاکچین	C7	(۰,۶۰۲،۱,۶۸۳،۱۰,۲۲۵)	(۰,۸۸۴،۲,۲۲۷،۱۱,۸۰۱)	۴,۱۷۰	۴,۹۷۱	۹,۱۴۱	۰,۸۰۱-	تاثیرپذیر
عدم اعتماد به توانمندی امنیتی فناوری بلاکچین در بکارگیری آن در زنجیره تامین	C8	(۰,۵۹۳،۱,۷۰۴،۱۰,۱۸۶)	(۰,۷۴۳،۱,۹۸۳،۱۱,۲۵۲)	۴,۱۶۱	۴,۶۵۹	۸,۸۲۰	۰,۴۹۸-	تاثیرپذیر
فقدان نیروی متخصص کافی در فناوری بلاکچین	C9	(۰,۶۴۵،۱,۷۷۸،۱۰,۴۸۲)	(۰,۴۶،۱,۴۱۳،۹,۳۷۴)	۴,۳۰۲	۳,۷۴۹	۸,۰۵۱	۰,۵۵۳	تاثیرگذار
مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین	C10	(۰,۵۷۶،۱,۵۸۳،۹,۶۴۹)	(۰,۸۳۹،۲,۱۶۶،۱۱,۶۹۵)	۳,۹۳۶	۴,۹۰۰	۸,۸۳۶	۰,۹۶۴-	تاثیرپذیر
عدم وجود ابزار برای اجرای فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	C11	(۰,۷۴۲،۱,۹۵،۱۰,۹۷)	(۰,۴۴۷،۱,۳۹۲،۹,۲۸۲)	۴,۵۵۴	۳,۷۰۷	۸,۲۶۱	۰,۸۴۷	تاثیرگذار
عدم توجیه اقتصادی در توسعه زنجیره تامین بر بستر فناوری بلاکچین	C12	(۰,۵۳۵،۱,۵۲۸،۹,۵۱۲)	(۰,۷۱۶،۱,۸۷۷،۱۰,۸۲۳)	۳,۸۵۸	۴,۴۷۲	۸,۳۳۰	۰,۶۱۴-	تاثیرپذیر

۲. هزینه و زمان: راه‌اندازی یک سیستم بلاکچین در زنجیره تامین نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجه مالی و زمانی دارد که این امر ممکن است سبب تاخیر در تصمیم‌گیری‌ها شود.

۳. نگرانی از امنیت: بلاکچین به عنوان یک سیستم عمومی و شفاف شناخته شده است، اما امنیت اطلاعات و داده‌های زنجیره تامین نیز بسیار حائز اهمیت است. اگر ابزارهای امنیتی مورد نیاز برای محافظت از داده‌ها در بلاکچین فراهم نشود، ممکن است بروز مشکلات امنیتی مانع انتقال سازمان‌ها به این فناوری شود.

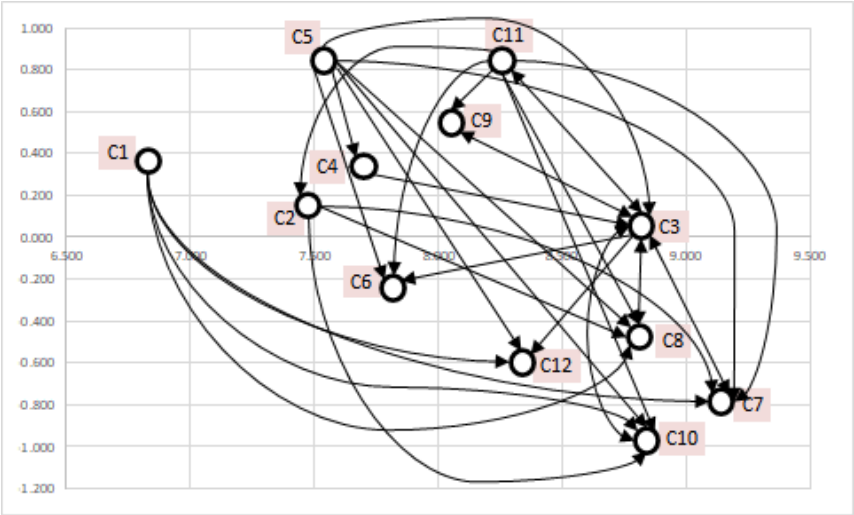
۴. تغییر فرهنگ سازمانی: پذیرش بلاکچین نیازمند تغییراتی در فرهنگ و فرآیندهای داخلی سازمان است. این تغییرات ممکن است مقاومت و مخالفت درون سازمانی را به همراه داشته باشد.

۵. ابهام نسبت به قوانین و مقررات: بسیاری از کشورها و صنایع قوانین مخصوص خود را دارد. عدم تطابق با این قوانین ممکن است باعث نگرانی‌های حقوقی شود و مانع از پذیرش بلاکچین در زنجیره تامین شود.

بنابراین، عدم وجود ابزارهای مناسب برای اجرای بلاکچین در زنجیره تامین می‌تواند باعث تردید و مخالفت شرکت‌ها و سازمان‌ها شود و تأثیر بسیار زیادی در پذیرش این فناوری داشته باشد.

جمع عناصر ستون (R) برای هر عامل نشان‌گر میزان تاثیرپذیری آن عامل از سایر عوامل سیستم است. براین اساس مانع «عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در به کارگیری فناوری بلاکچین» از میزان تاثیرپذیری زیادی برخوردار است. بردار عمودی (D-R)، قدرت تاثیرگذاری هر عامل را نشان می‌دهد. بطور کلی اگر D-R مثبت باشد، متغیر، یک متغیر علت محسوب می‌شود و اگر منفی باشد، معلول محسوب می‌شود. همان طور که از ستون آخر جدول ۶ مشخص است، معیارهایی که زیر خط افقی قرار گرفته‌اند، معیارهای معلول یا تاثیرپذیر هستند و معیارهایی که در بالای محور افقی هستند جنبه علت و تاثیرگذاری دارند. برای مثال معیارهای شماره C6، C8، C12، C7 و C10 معیارهای تاثیرپذیر هستند و

معیار شماره C10(مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین)، نسبت به معیار C12(عدم توجیه اقتصادی در توسعه زنجیره تامین بر بستر فناوری بلاکچین) تاثیرپذیرتر است. در شکل ۵ نمودار علی معیارها نشان داده شده است.



شکل ۱.نمودار علی معیارها

۵-۶- نرمال‌سازی ماتریس ارتباط کامل معیارها ($T_C^{\propto}$) و تشکیل سوپرماتریس ناموزون

در ماتریس (TC) که در جدول ۱۲ آورده شده است، مجموع هر سطر T_C^{ij}، با توجه به سطر مربوطه محاسبه و سپس در هر T_C^{ij}، هر عنصر بر مجموع عناصر سطر مربوط به خود تقسیم می‌گردد. برای مثال اگر هر $T_C^{\propto}$ را شامل مجموعه‌ای از $T_C^{\propto ij}$ بدانیم، $T_C^{\propto 11}$ از نرمال‌سازی T_C^{11} به دست آمده است و با ترانسپوز ماتریس $T_C^{\propto}$، سوپر ماتریس ناموزون است که در جدول ۸ آورده شده است.

۵-۷- تشکیل سوپرماتریس موزون

با ترنسپوز کردن سوپرماتریس ناموزون که در جدول ۸ آورده شده است سوپرماتریس موزون تشکیل می‌شود که نتایج در پیوست ۴ آورده شده است.

۵-۷-۱- تشکیل سوپرماتریس حدی

مطابق با رابطه ۱۹، سوپرماتریس موزون را آنقدر به توان (متوالی اعداد فرد) رسانیده تا تمامی اعداد هر سطر همگرا شوند. سوپرماتریس موزون در این پژوهش در توان ۵ به همگرایی رسید، که در پیوست ۵ آورده شده است.

۵-۷-۲- استخراج اوزان و اولویت‌بندی عوامل

در این گام با استفاده از رابطه ۱۴ اوزانی که از سوپرماتریس حددار استخراج شده است تبدیل به عدد قطعی می‌شود، نتایج در جدول ۹ آورده شده است. بر این اساس «عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در به کارگیری فناوری بلاکچین» با وزن ۰,۱۱۳۵ رتبه اول را کسب کرده است. «مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین» با وزن ۰,۱۰۹۵ رتبه دوم و «عدم اعتماد به توانمندی امنیتی فناوری بلاکچین در به کارگیری آن در زنجیره تامین» با وزن ۰,۱۰۰۳ رتبه سوم را کسب کرده است. در شکل ۶ وزن معیارها آورده شده است.

در واقع این رتبه‌بندی به دلایل زیر می‌باشد:

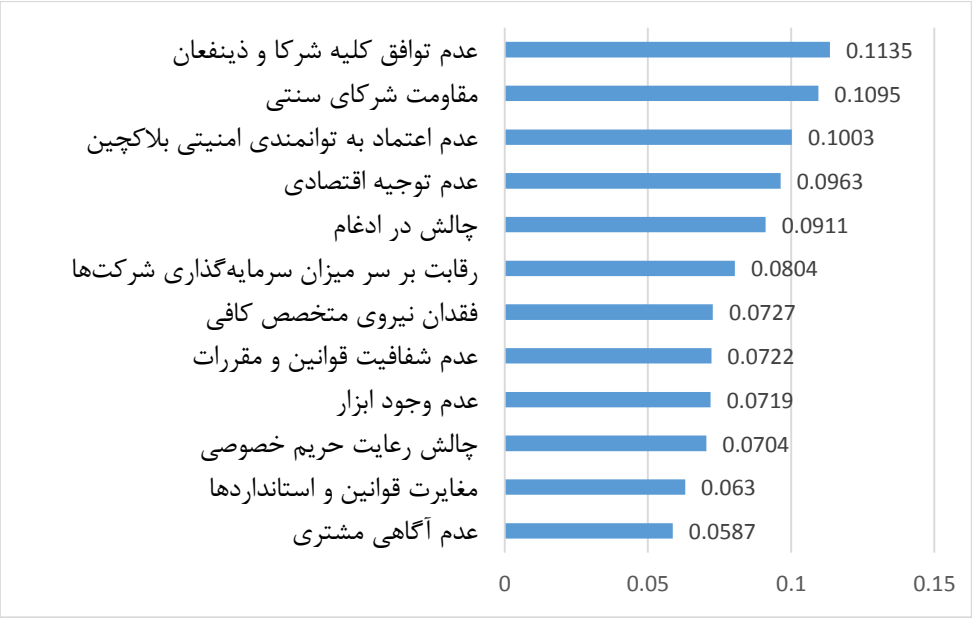
۱. عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین: موفقیت بلاکچین در یک زنجیره تامین، نیاز به توافق و همکاری تمام شرکا و ذینفعان در زنجیره تامین دارد. اگر تمامی اعضای زنجیره تامین با بلاکچین موافقت نکنند، پیاده‌سازی بلاکچین موفق نخواهد بود.
۲. مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین: شرکای سنتی ممکن است به دلیل عادت به فرآیندهای گذشته و سنتی وترس از تغییر، هزینه‌های اجرای بلاکچین یا دیگر دلایل، مقاومت نشان دهند. این مقاومت می‌تواند مانع مهمی در مسیر پذیرش بلاکچین تلقی گردد.
۳. عدم اعتماد به توانمندی امنیتی فناوری بلاکچین: با توجه به اهمیت امنیت اطلاعات، اگر ذینفعان زنجیره تامین به توانمندی امنیتی بلاکچین در حفاظت از داده‌ها و فرآیندها اعتماد نکنند، پذیرش این فناوری دشوار خواهد بود.

جدول ۸. سوپرماتریس ناموزون

	C1	C2	C3	C4	....	C11	C12
C1	(۰,۰۱۹،۰,۰۳۷،۰,۰۶۶)	(۰,۰۴۶،۰,۰۶۴،۰,۰۷۵)	(۰,۰۷۹،۰,۰۹۱،۰,۰۸۹)	(۰,۰۶،۰,۰۷۲،۰,۰۷۶)	.....	(۰,۰۸۸،۰,۰۸۴،۰,۰۷۹)	(۰,۱۳۳،۰,۱۰۷،۰,۰۹۲)
C2	(۰,۰۵۳،۰,۰۶۳،۰,۰۷)	(۰,۰۲۷،۰,۰۴۷،۰,۰۷۳)	(۰,۰۹۱،۰,۰۹۱،۰,۰۸۹)	(۰,۱۰۷،۰,۰۸۷،۰,۰۷۸)	.....	(۰,۰۶۴،۰,۰۷۳،۰,۰۷۸)	(۰,۰۵۳،۰,۰۷۵،۰,۰۸۷)
C3	(۰,۰۵۱،۰,۰۶،۰,۰۶۹)	(۰,۰۷۲،۰,۰۷۴،۰,۰۷۷)	(۰,۰۳۷،۰,۰۵۹،۰,۰۸۴)	(۰,۰۷۲،۰,۰۷۴،۰,۰۷۶)	.....	(۰,۰۸۴،۰,۰۷۹،۰,۰۷۹)	(۰,۰۹۶،۰,۰۹۶،۰,۰۹)
C4	(۰,۰۵۸،۰,۰۶۲،۰,۰۶۹)	(۰,۱۰۴،۰,۰۸۷،۰,۰۷۹)	(۰,۱۰۸،۰,۰۹۶،۰,۰۹)	(۰,۰۲۸،۰,۰۴۷،۰,۰۷۳)	.....	(۰,۰۴۸،۰,۰۶۶،۰,۰۷۷)	(۰,۰۷۲،۰,۰۸۳،۰,۰۸۹)
C5	(۰,۰۴۱،۰,۰۵۷،۰,۰۶۹)	(۰,۰۹۶،۰,۰۸۵،۰,۰۷۸)	(۰,۱۱۶،۰,۱۰۱،۰,۰۹)	(۰,۱۱۳،۰,۰۸۹،۰,۰۷۸)	.....	(۰,۰۶۳،۰,۰۷۴،۰,۰۷۸)	(۰,۰۹۲،۰,۰۹۱،۰,۰۹)
C6	(۰,۰۳۱،۰,۰۵۲،۰,۰۶۸)	(۰,۰۴۵،۰,۰۶۹،۰,۰۷۶)	(۰,۱۰۶،۰,۰۹۶،۰,۰۸۹)	(۰,۰۷۶،۰,۰۷۵،۰,۰۷۷)	.....	(۰,۰۷۶،۰,۰۷۵،۰,۰۷۸)	(۰,۱۲۸،۰,۱۰۷،۰,۰۹۲)
C7	(۰,۰۵،۰,۰۶۱،۰,۰۶۹)	(۰,۰۷۶،۰,۰۷۶،۰,۰۷۷)	(۰,۰۹۲،۰,۰۹۳،۰,۰۸۹)	(۰,۰۷۷،۰,۰۷۶،۰,۰۷۷)	.....	(۰,۰۷۱،۰,۰۷۲،۰,۰۷۸)	(۰,۱۲۱،۰,۱۰۲،۰,۰۹۱)
C8	(۰,۰۶۱،۰,۰۶۲،۰,۰۶۹)	(۰,۰۸۲،۰,۰۷۹،۰,۰۷۷)	(۰,۱۱۳،۰,۱۰۱،۰,۰۹)	(۰,۰۷۳،۰,۰۷۶،۰,۰۷۷)	.....	(۰,۰۶۲،۰,۰۷،۰,۰۷۷)	(۰,۰۸۸،۰,۰۹،۰,۰۸۹)
C9	(۰,۰۴۷،۰,۰۵۹،۰,۰۶۹)	(۰,۰۴۴،۰,۰۶۷،۰,۰۷۶)	(۰,۱۳،۰,۱۰۷،۰,۰۹۱)	(۰,۰۵۴،۰,۰۶۶،۰,۰۷۶)	.....	(۰,۰۷،۰,۰۷۳،۰,۰۷۸)	(۰,۱۳۶،۰,۱۱،۰,۰۹۳)
C10	(۰,۰۷۲،۰,۰۶۹،۰,۰۷)	(۰,۰۵۲،۰,۰۶۵،۰,۰۷۵)	(۰,۰۸۳،۰,۰۸۷،۰,۰۸۸)	(۰,۰۶۳،۰,۰۶۹،۰,۰۷۶)	.....	(۰,۰۵۸،۰,۰۶۷،۰,۰۷۷)	(۰,۱۴۶،۰,۱۱۴،۰,۰۹۳)
C11	(۰,۰۴،۰,۰۵۳،۰,۰۶۸)	(۰,۰۷۴،۰,۰۷۶،۰,۰۷۷)	(۰,۱۱۴،۰,۱۰۱،۰,۰۹۱)	(۰,۰۴۷،۰,۰۶۳،۰,۰۷۵)	.....	(۰,۰۲۶،۰,۰۴۶،۰,۰۷۳)	(۰,۱۲۳،۰,۱۰۶،۰,۰۹۲)
C12	(۰,۰۳۷،۰,۰۵۲،۰,۰۶۸)	(۰,۰۴۷،۰,۰۶۲،۰,۰۷۵)	(۰,۰۷۱،۰,۰۸۵،۰,۰۸۸)	(۰,۰۵۴،۰,۰۶۹،۰,۰۷۶)	.....	(۰,۰۸۳،۰,۰۷۹،۰,۰۷۹)	(۰,۰۴۵،۰,۰۶۳،۰,۰۸۶)

جدول ۵.اوزان نسبی و نهایی عوامل

نام معیار	کد معیار	وزن	رتبه
عدم آگاهی مشتری در مورد تاثیر فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	C1	۰,۰۵۸۷	۱۲
چالش رعایت حریم خصوصی در به کارگیری فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	C2	۰,۰۷۰۴	۱۰
چالش در ادغام فناوری بلاکچین و زنجیره تامین	C3	۰,۰۹۱۱	۵
عدم شفافیت قوانین و مقررات مربوط به فناوری بلاکچین	C4	۰,۰۷۲۲	۸
مغایرت قوانین و استانداردهای زنجیره تامین با فناوری بلاکچین	C5	۰,۰۶۳۰	۱۱
رقابت بر سر میزان سرمایه‌گذاری شرکت‌ها در بکارگیری فناوری بلاکچین	C6	۰,۰۸۰۴	۶
عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در به کارگیری فناوری بلاکچین	C7	۰,۱۱۳۵	۱
عدم اعتماد به توانمندی امنیتی فناوری بلاکچین در به کارگیری آن در زنجیره تامین	C8	۰,۱۰۰۳	۳
فقدان نیروی متخصص کافی در فناوری بلاکچین	C9	۰,۰۷۲۷	۷
مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین	C10	۰,۱۰۹۵	۲
عدم وجود ابزار برای اجرای فناوری بلاکچین در زنجیره تامین	C11	۰,۰۷۱۹	۹
عدم توجیه اقتصادی در توسعه زنجیره تامین بر بستر فناوری بلاکچین	C12	۰,۰۹۶۳	۴



شکل ۲.وزن معیارها

۵-۷-۳- روابط داخلی بین معیارها

در این مرحله برای ترسیم روابط قابل اعتنا، ماتریس فازی ارتباطات کل دیفازی شد (پیوست ۳) و سپس حدآستانه (میانگین حسابی درایه‌ها) مشخص شد. چنان چه هر یک از اعداد از حد آستانه بیشتر بود نشان از ارتباط معنادار بین معیار سطر i و ستون j آن سلول دارد. مقدار آستانه بر این بخش برابر با۰/۳۳۹می‌باشد بنابراین درایه-هایی که از عدد ۰/۳۳۹ بیشتر هستند با علامت ستاره (*) مشخص شده‌اند که نشان از ارتباط معنادار دارند که در جدول ۱۰ آورده شده است. به عنوان مثال در سطر اول که معیار C1 است در ستون‌های مربوط به C7، C8، C10 و C12 ستاره دار است که نشان داده است که معیار C1 بر روی این ۴ معیار تاثیردارد.

جدول ۱۰ ماتریس غیرفازی ارتباطات کل معیارها

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
C1	۰,۲۱۶	۰,۲۶۱	۰,۳۱۹	۰,۲۷۰	۰,۲۳۴	۰,۲۹۳	۰,۳۶۴*	۰,۳۵۱*	۰,۲۸۴	۰,۳۶۴*	۰,۲۸۷	۰,۳۴۳*
C2	۰,۲۵۹	۰,۲۵۶	۰,۳۳۸	۰,۳۰۶	۰,۲۸۶	۰,۳۱۲	۰,۳۸۴*	۰,۳۷۵*	۰,۲۸۸	۰,۳۷۹*	۰,۲۹۱	۰,۳۲۰
C3	۰,۲۹۶	۰,۳۳۷	۰,۳۴۶*	۰,۳۳۵	۰,۳۱۸	۰,۳۵۸*	۰,۴۵۹*	۰,۴۲۷*	۰,۳۴۶*	۰,۴۵۲*	۰,۳۵۱*	۰,۴۰۵*
C4	۰,۲۷۳	۰,۳۲۵	۰,۳۶۷*	۰,۲۷۰	۰,۳۰۷	۰,۳۱۶	۰,۴۰۷*	۰,۳۹۹*	۰,۳۰۳	۰,۴۰۴*	۰,۲۹۸	۰,۳۵۱*
C5	۰,۲۷۶	۰,۳۳۵	۰,۳۸۸*	۰,۳۴*	۰,۲۵۸	۰,۳۵*	۰,۴۲۳*	۰,۳۹۳*	۰,۳۰۳	۰,۴۲۳*	۰,۳۲۲	۰,۳۷۷*
C6	۰,۲۴۳	۰,۲۷۹	۰,۳۴۴*	۰,۲۹۰	۰,۲۶۷	۰,۲۷۹	۰,۳۹۶*	۰,۳۵۳*	۰,۳۰۶	۰,۳۷۳*	۰,۲۹۲	۰,۳۶۱*
C7	۰,۲۸۰	۰,۳۱۹	۰,۳۷۳*	۰,۳۲۱	۰,۲۸۹	۰,۳۴۶*	۰,۳۶۸*	۰,۴۰۹*	۰,۳۱۹	۰,۴۳۵*	۰,۳۱۹	۰,۳۹۳*
C8	۰,۲۸۳	۰,۳۲۴	۰,۳۸۶*	۰,۳۱۹	۰,۲۸۴	۰,۳۴۱*	۰,۴۳۶*	۰,۳۴۶*	۰,۳۲۸	۰,۴۲۶*	۰,۳۱۵	۰,۳۷۲*
C9	۰,۲۸۷	۰,۳۱۴	۰,۴۰۹*	۰,۳۱۶	۰,۲۸۱	۰,۳۷۳*	۰,۴۳۶*	۰,۴۱۹*	۰,۲۹۳	۰,۴۲۵*	۰,۳۳۱	۰,۴۱۸*
C10	۰,۲۷۶	۰,۲۸۶	۰,۳۴۷*	۰,۲۹۳	۰,۲۶۵	۰,۳۳۱	۰,۴۲۱*	۰,۳۹۲*	۰,۳۰۰	۰,۳۴۳*	۰,۲۹۴	۰,۳۸۷*
C11	۰,۲۹۳	۰,۳۴۸*	۰,۴۲۵*	۰,۳۲۸	۰,۳۱۰	۰,۳۷۷*	۰,۴۶۲*	۰,۴۳۸*	۰,۳۷۲*	۰,۴۶۲*	۰,۳۰۴	۰,۴۳۴*
C12	۰,۲۴۸	۰,۲۷۸	۰,۳۳۶	۰,۲۸۷	۰,۲۵۰	۰,۳۵۴*	۰,۴۱۵*	۰,۳۵۷*	۰,۳۰۵	۰,۴۱۴*	۰,۳۰۴	۰,۳۱۲

۶- توصیه‌های مدیریتی

در این بخش راهکارهای مدیریتی برای غلبه بر موانع پذیرش بلاکچین در زنجیره تامین ارائه شده است. برای پذیرش بلاکچین در زنجیره تامین، لازم است تغییرات استراتژیک شامل به‌روزرسانی فناوری‌ها و افزایش شفافیت اعمال شود. ایجاد نقشه‌راه مدیریت

تغییر حائز اهمیت است که شامل ایجاد آگاهی، تمایل و حمایت، دانش فنی، توانمندسازی و تقویت تغییر است. نقش مدیریت ارشد در این فرآیند بسیار مهم است و با ایجاد اراده و تعهد در سطح بالا، اعضای تیم را به هماهنگی با اهداف بلاکچین هدایت می‌کند تا موفقیت فرآیند تغییرات تضمین شود. طبق تحقیقات انجام شده در این پژوهش اهم موانع پذیرش بلاکچین به ترتیب اولویت همراه با ارائه راهکار برای ازمیان برداشتن این موانع در ادامه مورد بحث قرار گرفته است:

«عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین» نشان‌دهنده نقص در توافق و هماهنگی بین اعضای زنجیره است. برای حل اختلافات و عدم توافق در استفاده از بلاکچین در زنجیره تامین، ایجاد فرآیندهای مذاکره موثر اساسی است. همچنین، اعضا باید از مزایای بلاکچین آگاه شوند و آموزش‌های همگانی برای آشنایی با این فناوری ارائه شود. تشویق به توسعه استانداردها و قوانین مشترک همچنین می‌تواند به ایجاد فرهنگ همکاری و ارتقاء شفافیت در زنجیره تامین کمک کند.

«مقاومت شرکای سنتی در استفاده از بلاکچین در زنجیره تامین» به عدم تمایل یا ناتوانی آنها در پذیرش این تکنولوژی اشاره دارد. برای مقابله با این موانع، ارائه اطلاعات درباره مزایا و اثرات مثبت بلاکچین، آگاهی از بهبودهای ممکن، کاهش هزینه‌ها و افزایش شفافیت می‌تواند مفید باشد. همچنین، ارتقاء توانمندی‌ها از طریق دوره‌های آموزشی و مشاوره و ارائه نمونه‌های موفق از استفاده از بلاکچین می‌تواند به پذیرش این فناوری توسط شرکای سنتی کمک کند.

«عدم اعتماد به توانمندی‌های امنیتی بلاکچین در زنجیره تامین» به ناکارآمدی راهکارهای امنیتی برای مدیریت زنجیره تامین اشاره دارد. برای حل این مشکل، نیاز است که استانداردهای امنیتی بلاکچین شفافاً توضیح داده شوند و اطلاع‌رسانی در مورد الگوهای رمزنگاری و تکنولوژی‌های امنیتی مورد استفاده صورت بگیرد. همچنین، استانداردهای بین‌المللی برای بلاکچین و زنجیره تامین باید به وضوح ارائه شوند تا اعتماد به امنیت بلاکچین در زنجیره تامین برای کاربران تضمین شود.

برای برداشتن موانع و اجرای تغییرات به شکل کارآمد، می‌توان از مدل‌های معتبر مدیریت تغییر همچون آدکار[1] و کاتر[2] بهره گرفت. مدل آدکار، بر روی ایجاد آگاهی، تمایل، دانش، توانمندی، و تقویت تغییر تأکید دارد، در حالی‌که مدل کاتر مراحل تعیین ضرورت، ایجاد تیم رهبری، ارتقاء برنامه‌های آموزشی، ارتقاء ابتکارات و... را پوشش می‌دهد.

در پایان، برگزاری جلسات بازخورد، ایجاد فرهنگ کنترل کیفیت، و تنظیم بهینه فرآیندهای جاری پیشنهاد می‌شود. تحقیقات در زمینه به‌کارگیری بلاکچین در مدیریت زنجیره تامین ارائه شده است و موانع اصلی از جمله عدم توافق شرکا، مقاومت شرکای سنتی، و عدم اعتماد به امنیت بلاکچین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای حل این موانع، راهکارهایی از قبیل رمزنگاری مطمئن، اطلاع‌رسانی فعال در زمینه امنیت بلاکچین و استفاده از استانداردهای امنیتی معین ارائه شده است. این تدابیر، بهبود شفافیت، اعتماد و کارآمدی در زنجیره تامین را افزایش می‌دهد و نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری بلاکچین در زنجیره تامین می‌تواند باعث بهبود عملکرد و اطمینان در فرآیندها گردد و نقاط ضعف موجود در سیستم‌های فعلی را اصلاح نماید.

۷- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، بلاکچین به عنوان یک ابزار قدرتمند برای بهبود زنجیره تامین مورد توجه سازمان‌ها در سراسر جهان قرار گرفته است. این تکنولوژی نه تنها موانع معمول در فرآیندهای زنجیره تامین را رفع می‌کند، بلکه شفافیت بیشتر، افزایش اطمینان، و بهبود کارایی را نیز فراهم می‌سازد. یکی از چالش‌های اصلی در پذیرش بلاکچین در زنجیره تامین، شناسایی و برطرف کردن موانع مختلف است. در این پژوهش بر اساس پیشینه تحقیقات تعداد ۲۲ مانع فناوری بلاکچین در زنجیره تامین استخراج شد که بر اساس روش دلفی فازی ۱۰ مانع حذف و ۱۲ مانع تایید شدند. سپس با استفاده از روش ترکیب دیمتل و تحلیل شبکه‌ای فازی تاثیرگذاری و تاثیرپذیری این شاخص‌ها انجام شد. نتایج روش ترکیب دیمتل و تحلیل شبکه‌ای نشان داد که در بین ۱۲ مانع، عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در به کارگیری فناوری بلاکچین با وزن ۰,۱۱۳۵ رتبه اول را کسب کرده است. مقاومت شرکای سنتی زنجیره تامین در اجرای فناوری بلاکچین با وزن ۰,۱۰۹۵ رتبه دوم و عدم اعتماد به توانمندی امنیتی فناوری بلاکچین در به کارگیری آن در زنجیره تامین با وزن ۰,۱۰۰۳ رتبه سوم را کسب کرده است.

بخش اعتبارسنجی این تحقیق به تفکیک موانع بر پایه ادبیات موجود در زمینه فناوری بلاکچین پرداخته است. نظرات و تحلیل‌های ارائه شده توسط محققان باعث تعیین و توضیح درستی اطلاعات و مواردی شده اند که در نتیجه‌گیری نهایی مورد استفاده

[1] ADKAR

[2] Kotter

قرار گرفته‌اند. پژوهش یان [11] موانع پذیرش بلاکچین را به دو دسته اصلی موانع داخلی سازمانی و چالش‌های سیستم تقسیم کرده‌اند. «مقاومت شرکای سنتی زنجیره تأمین» در پژوهش حاضر به موانع داخلی سازمانی در پژوهش یان مرتبط است. این تطابق نشان‌دهنده وجود چالش‌های مشابه در پذیرش بلاکچین از سوی شرکای سنتی در هر دو پژوهش است.

صابری [15] معتقدند که موانع پذیرش بلاکچین بر روابط بین شرکای زنجیره تامین تاثیر گذاشته و همچنین به موانع تکنولوژیکی و سیستمی به عنوان موانع مهم اشاره شده است. کوهی‌زاده [16] بیشترین موانع را در دسته موانع تکنولوژیکی و خارجی یافته است با توجه به جدول ۱ و ۲ عدم اعتماد به مسائل امنیتی بلاکچین در دسته موانع تکنولوژیکی و عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان زنجیره تامین در بکارگیری فناوری بلاکچین و مقاومت شرکای سنتی در بکارگیری فناوری بلاکچین در زنجیره تامین در دسته موانع خارجی قرار گرفته است.

۸- محدودیت‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آینده

پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی مواجه بوده است که تأثیر بر دقت و جامعیت آن داشته‌اند. از جمله دسترسی محدود به اطلاعات شرکای تجاری موجب کاهش توانمندی در جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل برخی از جنبه‌های تحقیق گردیده است. همچنین محدودیت در دسترسی به پایگاه‌های داده و اطلاعات مهم برخی از موضوعات تحقیقاتی، ممکن است نقاط ضعفی را در جمع‌آوری اطلاعات ایجاد کرده باشد. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که مانع "عدم توافق کلیه شرکا و ذینفعان" از جهات مختلف برتری دارد. مواردی مانند مقاومت شرکای سنتی و ناکافی بودن اعتماد به توانمندی امنیتی بلاکچین نیز معرفی شده‌اند. پیشنهادات برای تحقیقات آینده شامل توسعه راهکارهای حل مسائل، تحلیل اقتصادی، تاثیرات حقوقی و استانداردها و مقایسه با سایر صنایع است.

مراجع

[1] Yadegari, M., Mohammadi, S., & Masoumi, A. H. (2022). Technology adoption: an analysis of the major models and theories. Technology Analysis & Strategic Management. https://doi.org/10.1080/09537325.2022.2071255

[2] Chavoshi, A., & Hamidi, H. (2019). Social, individual, technological and pedagogical factors influencing mobile learning acceptance in higher education: A case from Iran. Telematics and Informatics, 38, 111-122. https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.09.007

[3] Khan, A., Khokhar, M. A., & Zafar, A. (2023). The role of supply chain integration between integrated information technology and financial performance – a disaggregated framework and findings. The International Journal of Logistics Management. https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2022-0040

[4] Hosseini Dehshiri, S. J., & Amiri, M. (2024). Evaluation of blockchain implementation solutions in the sustainable supply chain: A novel hybrid decision approach based on Z-numbers. Expert Systems with Applications, 235, 121123. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121123.

[5] Su, C.-M., et al. (2015). Improving sustainable supply chain management using a novel hierarchical grey-DEMATEL approach. Journal of Cleaner Production. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.080.

[6] Lee, K. L., & Zhang, T. (2023). Revolutionizing supply chains: Unveiling the power of blockchain technology for enhanced transparency and performance. International Journal of Technology and Innovation Management, 3, 19–27.

[7] Purwaningsih, E., Muslikh, M., Suhaeri, S., & Basrowi, B. (2024). Utilizing blockchain technology in enhancing supply chain efficiency and export performance, and its implications on the financial performance of SMEs. Uncertain Supply Chain Management, 12, 449–460.

[8] Nayak, G., & Dhaigude, A. S. (2019). A conceptual model of sustainable supply chain management in small and medium enterprises using blockchain technology. Cogent Economics & Finance, 7, 1667184.

[9] Appinventiv, "The Real Impact of Blockchain Technology on the Economy," Aug. 31, 2024. [Online]. Available: https://appinventiv.com/blog/real-impact-of-blockchain-technology-on-economy/. [Accessed: Oct. 12, 2024].

[۱۰] معمارپور غیاثی، علی، عباسی، مرتضی، پیری، مرتضی، و اخوان، پیمان. (۱۴۰۳). موانع پیاده‌سازی تکنولوژی بلاکچین در لجستیک بشردوستانه در شرایط عدم قطعیت .مطالعات مدیریت کسب و کار هوشمند doi: 10.22054/ims.2023.72916.2304. ,12(47), 153-184

[۱۱] فرهادی، فرهاد، فتحی، محمد رضا، و کیانی هرچگانی، مرتضی. (۱۴۰۲). شناسایی و اولویت‌بندی موانع به‌کارگیری تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تأمین پایدار (مورد مطالعه: شرکت‌های بسته‌بندی صنایع غذایی شهرکرد) .علوم و فنون بسته‌بندی.

[۱۲] رحیمی، اکبر، تقی‌زاده، قاسم، و محمودآبادی، سمیرا. (۱۴۰۱). ارائه مدل ساختاری تفسیری موانع به‌کارگیری فناوری بلاکچین در زنجیره تأمین صنایع غذایی .مدیریت تولید و عملیات13 ,(۱ (۲۸ پیاپی)), ۷۹-۱۰۴ . https://sid.ir/paper/1039909/fa.

[13] Quayson, M., Bai, C., Sarkis, J., et al. (2024). Evaluating barriers to blockchain technology for sustainable agricultural supply chain: A fuzzy hierarchical group DEMATEL approach. Operational Management Research. https://doi.org/10.1007/s12063-024-00443-x.

[14] Yuan, H., Du, W., Zuo, J., & Ma, X. (2024). Paving a traceable green pathway towards sustainable construction: A fuzzy ISM-DEMATEL analysis of blockchain technology adoption barriers in construction waste management. Ain Shams Engineering Journal, 15(4), 102627. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102627.

[15] Sahoo, S., Kumar, S., Sivarajah, U., Lim, W. M., Westland, J. C., & Kumar, A. (2022). Blockchain for sustainable supply chain management: Trends and ways forward. Electronic Commerce Research. https://doi.org/10.1007/s10660-022-09569-1.

[16] Boutkhoum, O., Hanine, M., Nabil, M., El Barakaz, F., Lee, E., Rustam, F., & Ashraf, I. (2021). Analysis and evaluation of barriers influencing blockchain implementation in Moroccan sustainable supply chain management: An integrated IFAHP-DEMATEL framework. Mathematics, 9, 1601. https://doi.org/10.3390/math9141601.

[17] Kouhizadeh, M., Saberi, S., & Sarkis, J. (2020). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. International Journal of Production

Economics. Advanced online publication. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831.

[18] Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. International Journal of Production Research, 57(7), 2117-2135. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261.

[19] Elkorany, A., Shaaban, E., Haggag, M., & Elshaer, I. A. (2025). Assessing adoption challenges of blockchain technology in agri-food supply chain. Logistics, 4(1), 5. https://doi.org/10.3390/logistics4010005

[20] زمانی باب گهری، ا.، حسینی، م. (۲۰۲۴). ارائه روشی مبتنی بر بلاکچین برای حفظ حریم خصوصی کاربران در شبکه‌های اجتماعی. فصلنامه فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران، ۱۶(61)، ۲۰۵–217.

[21] Liu, P., Hendalianpour, A., Hamzehlou, M., Feylizadeh, M. R., & Razmi, J. (2021). Identify and Rank the Challenges of Implementing Sustainable Supply Chain Blockchain Technology Using the Bayesian Best Worst Method. Technological and Economic Development of Economy, 27(3), 656–680. Doi:/10.3846/tede.2021.14421

[22] Naseem, M. H., Yang, J., Zhang, T., & Alam, W. (2023). Utilizing fuzzy ahp in the evaluation of barriers to blockchain implementation in reverse logistics. Sustainability, 15(10), 7961. https://doi.org/10.3390/su15107961

[۲۳] **کیانی هرچگانی م** .(1401). شناسایی موانع تکنولوژی بلاکچین در زنجیره تأمین پایدار (مورد مطالعه: شرکت ورق خودرو چهارمحال و بختیاری) .نشریه علمی رویکردهای پژوهشی نوین مدیریت و حسابداری **6**(23), 880-893. Retrieved from https://majournal.ir/index.php/ma/article/view/1752

[24] Kafeel, Huzaifa, Kumar, Vikas, & Duong, Linh. (2023). Blockchain in supply chain management: A synthesis of barriers and enablers for managers. International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences, 8(1), 15-42. ISSN 2455-7749.

[25] Maddikonta, P. K. R., Fam, K. - V., Prabaduoi, B., Deepa, N., Doi, K., Gadkalo, T. R., Ruby, R., & Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: Exploring enabling technologies and potential applications. Journal of Industrial Integration Information, 26, 100257. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257.

[26] Akomea, S. Y., Agyapong, A., Aidoo, S. O., & Kyei, S. M. (2023). The roles of social capital, entrepreneurial orientation and competitive intensity in managerial capability and performance relationship: Evidence from an emerging market economy. Journal of Strategy and Management, 16(2), 341-361. https://doi.org/10.1108/jsma-04-2022-0073.

[27] Bettiol, M., Capestro, M., Maria, E. D., & Grandinetti, R. (2023). Leveraging on intra- and inter-organizational collaboration in Industry 4.0 adoption for knowledge creation and innovation. European Journal of Innovation Management, 26(7), 328-352. https://doi.org/10.1108/ejim-10-2022-0593.

[28] Yang, Q., Geng, R., Feng, T., & Li, T. (2023). Impacts of supply chain integration on product- and service-oriented mass customisation capability: The role of customer need. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 53(3), 354-377. https://doi.org/10.1108/ijpdlm-02-2022-0051.

[29] Hu, Y., Wen, J., & Yan, Y. (2015). Measuring the performance of knowledge resources using a value perspective: Integrating BSC and ANP. Journal of Knowledge Management, 19, 1250–1272.

[30] Moosavi, N., & Taherdoost, H. (2024, January 30). Blockchain technology, structure, and applications: A survey. Authorea. https://doi.org/10.22541/au.170663631.17372632/v1.

[31] Tapscott, D. (2018). 2018 Blockchain regulation roundtable: Addressing the regulatory challenges of disruptive innovation.

[32] Blog.solistica.com, "Blockchain and Supply Chain Sustainability," April 2, 2022. [Online]. Available: https://blog.solistica.com. [Accessed: Oct. 12, 2024].

[33] Park, A., & Li, H. (2021). The effect of blockchain technology on supply chain sustainability performances. Sustainability, 13(4), 1726. https://doi.org/10.3390/su13041726.

[34] Shekarian, E., Ijadi, B., Zare, A., & Majava, J. (2022). Sustainable supply chain management: A comprehensive systematic review of industrial practices. Sustainability, 14, 7892. https://doi.org/10.3390/su14137892.

[35] Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407.

[36] Jamil, M. A., Mustofa, R., Hossain, N. U. I., Rahman, S. M. A., & Chowdhury, S. (2024). A structural equation modeling framework for exploring the industry 5.0 and sustainable supply chain determinants. Supply Chain Analytics, 6, 100060. https://doi.org/10.1016/j.sca.2024.100060.

[37] Sternberg, H. S., Hoffmann, E., & Roeck, D. (2021). The struggle is real: A blockchain supply chain case study review. Journal of Business Logistics, 42(1), 71-87. https://doi.org/10.1111/jbl.12240.

[38] Bahramand, H., Maqsoodi, A., & Koupi, J. (2021). Exploring blockchain applications in humanitarian supply chains: Findings from a blockchain supply chain pilot project. International Journal of Operations & Production Management, 41(9), 1522-1543. https://doi.org/10.1108/IJOPM-12-2020-0884.

[39] van Hoek, R. (2020). Developing a framework for considering blockchain pilots in the supply chain – Lessons from early industry adopters. Supply Chain Management, 25(1), 115-121. https://doi.org/10.1108/SCM-05-2019-0206

[40] Sharma, M., Patidar, A., Anchlia, N., et al. (2023). Blockchain adoption in the food supply chain for new business opportunities: An integrated approach. Operations Management Research, 16, 1949-1967. https://doi.org/10.1007/s12063-023-00416-6.

[41] Patil S.and Kant R., (2014). " A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers," Expert Systems with Applications, vol. 41, no. 2, pp. 679-693.

[۴۲] موسوی، پ.، یوسفی‌زنوز، ر.، و حسن‌پور، ا. (۱۳۹۴). شناسایی ریسک‌های اطلاعاتی سازمانی با استفاده از روش دلفی فازی در صنعت بانکداری .مدیریت فناوری اطلاعات، ۷(۱)، ۱۶۳-۱۸۴ . https://sid.ir/paper/140465/fa.

[۴۳] میرسپاسی، ن.، طلوعی اشلقی، ع.، معمارزاده، غ.، و پیدایی، م. (۱۳۸۹). طراحی مدل تعالی منابع انسانی در سازمان‌های دولتی ایران با استفاده از تکنیک دلفی فازی .آینده‌پژوهی مدیریت، ۲۱(۴)، ۱-۲۲.

[۴۴] راهداری، ع. و نصر، م. (۱۳۹۶). چالش‌های اتاق فکر در ایران .فصلنامه علمی - پژوهشی فرآیند مدیریت و توسعه، ۳۰(۲) ، ۲۳-۵۴.

[۴۵] صیف‌الدین‌اسل، ا.، صققی، ف.، زلفقاری‌زاده، م.، محمدی‌حمیدی، م.، حمیدی، م.، و اسکاریان، م. (۱۳۹۵). استخراج شاخص‌های کلیدی توسعه تحقیقاتی با استفاده از روش دلفی فازی ایشیکاوا برای بخش بهداشت. رهبرد، ۲۵(۸۱)، ۵-۲۶ . ۱۳۹۵,۲۵,۴,۱,۷doi:20.1001.1.10283102.

[46] Hu, Y., Wen, J., & Yan, Y. (2015). Measuring the performance of knowledge resources using a value perspective: integrating BSC and ANP. Journal of Knowledge Management, 19, 1250–1272.

پیوست1 .ماتریس ارتباط مستقیم معیارها

	C1	C2	C3	C4	....	C11	C12
C1	(۰,۰۰,۰,۲۵)	(۰,۰۸۳,۰,۲۲۲,۰,۴۷۲)	(۰,۱۶۷,۰,۳۸۹,۰,۶۳۹)	(۰,۱۳۹,۰,۳۳۳,۰,۵۵۶)	.....	(۰,۲۵,۰,۴۷۲,۰,۶۹۴)	(۰,۳۶۱,۰,۵۵۶,۰,۷۷۸)
C2	(۰,۱۳۹,۰,۳۳۳,۰,۵۸۳)	(۰,۰۰,۰,۲۵)	(۰,۲۲۲,۰,۴۱۷,۰,۶۳۹)	(۰,۳۳۳,۰,۵۲۸,۰,۷۵)	.....	(۰,۱۶۷,۰,۳۶۱,۰,۶۱۱)	(۰,۰۵۶,۰,۱۶۷,۰,۴۱۷)
C3	(۰,۱۹۴,۰,۳۸۹,۰,۶۱۱)	(۰,۲۷۸,۰,۴۷۲,۰,۶۹۴)	(۰,۰۰,۰,۲۵)	(۰,۲۷۸,۰,۴۷۲,۰,۶۳۹)	.....	(۰,۳۶۱,۰,۵۸۳,۰,۸۰۶)	(۰,۳۳۳,۰,۵۸۳,۰,۷۷۸)
C4	(۰,۱۹۴,۰,۳۶۱,۰,۵۸۳)	(۰,۳۸۹,۰,۶۱۱,۰,۸۰۶)	(۰,۳۶۱,۰,۵۵۶,۰,۷۵)	(۰,۰۰,۰,۲۵)	.....	(۰,۱۱۱,۰,۳۰۶,۰,۵۵۶)	(۰,۱۶۷,۰,۳۳۳,۰,۵۸۳)
C5	(۰,۱۱۱,۰,۳۰۶,۰,۵۵۶)	(۰,۳۶۱,۰,۶۱۱,۰,۸۰۶)	(۰,۴۱۷,۰,۶۶۷,۰,۸۳۳)	(۰,۴۴۴,۰,۶۶۷,۰,۸۰۶)	.....	(۰,۱۹۴,۰,۴۴۴,۰,۶۹۴)	(۰,۲۷۸,۰,۴۷۲,۰,۶۹۴)
C6	(۰,۰۵۶,۰,۱۹۴,۰,۴۴۴)	(۰,۰۸۳,۰,۳۰۶,۰,۵۵۶)	(۰,۳۰۶,۰,۵,۰,۶۹۴)	(۰,۲۲۲,۰,۳۸۹,۰,۶۱۱)	.....	(۰,۲۲۲,۰,۳۸۹,۰,۵۸۳)	(۰,۳۸۹,۰,۶۱۱,۰,۸۰۶)
C7	(۰,۱۶۷,۰,۳۶۱,۰,۵۸۳)	(۰,۲۷۸,۰,۴۷۲,۰,۶۶۷)	(۰,۳۰۶,۰,۵۲۸,۰,۷۲۲)	(۰,۲۷۸,۰,۴۷۲,۰,۶۹۴)	.....	(۰,۲۵,۰,۴۱۷,۰,۶۳۹)	(۰,۴۴۴,۰,۶۳۹,۰,۸۳۳)
C8	(۰,۲۲۲,۰,۳۸۹,۰,۶۱۱)	(۰,۳۰۶,۰,۵۲۸,۰,۷۲۲)	(۰,۴۱۷,۰,۶۶۷,۰,۸۶۱)	(۰,۲۵,۰,۴۷۲,۰,۶۶۷)	.....	(۰,۱۹۴,۰,۳۸۹,۰,۶۱۱)	(۰,۲۵,۰,۴۴۴,۰,۶۳۹)
C9	(۰,۱۶۷,۰,۳۶۱,۰,۶۱۱)	(۰,۱۱۱,۰,۳۶۱,۰,۵۸۳)	(۰,۵۵۶,۰,۸۰۶,۰,۹۴۴)	(۰,۱۶۷,۰,۳۳۳,۰,۵۸۳)	.....	(۰,۲۵,۰,۴۴۴,۰,۶۹۴)	(۰,۵۵۶,۰,۸۰۶,۰,۹۷۲)
C10	(۰,۲۷۸,۰,۴۷۲,۰,۶۶۷)	(۰,۱۳۹,۰,۲۷۸,۰,۵)	(۰,۲۵,۰,۴۱۷,۰,۶۳۹)	(۰,۱۹۴,۰,۳۳۳,۰,۵۵۶)	.....	(۰,۱۶۷,۰,۳۰۶,۰,۵۲۸)	(۰,۵۵۶,۰,۷۷۸,۰,۹۱۷)
C11	(۰,۱۳۹,۰,۲۷۸,۰,۵۲۸)	(۰,۳۳۳,۰,۵۵۶,۰,۷۲۲)	(۰,۵۲۸,۰,۷۷۸,۰,۹۴۴)	(۰,۱۳۹,۰,۳۰۶,۰,۵۵۶)	.....	(۰,۰۰,۰,۲۵)	(۰,۵۵۶,۰,۸۰۶,۰,۹۱۷)
C12	(۰,۰۸۳,۰,۱۹۴,۰,۴۴۴)	(۰,۱۱۱,۰,۲۲۲,۰,۴۷۲)	(۰,۱۶۷,۰,۳۶۱,۰,۶۱۱)	(۰,۱۳۹,۰,۳۳۳,۰,۵۸۳)	.....	(۰,۲۷۸,۰,۴۷۲,۰,۶۹۴)	(۰,۰۰,۰,۲۵)

پیوست2 .ماتریس نرمال شده ارتباط مستقیم معیارها

	C1	C2	C3	C4	....	C11	C12
C1	(۰,۰۰,۰,۰۲۹)	(۰,۰۱۰,۰,۰۲۵,۰,۰۵۴)	(۰,۰۱۹,۰,۰۴۵,۰,۰۷۳)	(۰,۰۱۶,۰,۰۳۸,۰,۰۶۴)	.....	(۰,۰۲۹,۰,۰۵۴,۰,۰۸)	(۰,۰۴۱,۰,۰۶۴,۰,۰۸۹)
C2	(۰,۰۱۶,۰,۰۳۸,۰,۰۶۷)	(۰,۰۰,۰,۰۲۹)	(۰,۰۲۵,۰,۰۴۸,۰,۰۷۳)	(۰,۰۳۸,۰,۰۶۱,۰,۰۸۶)	.....	(۰,۰۱۹,۰,۰۴۱,۰,۰۷)	(۰,۰۰۶,۰,۰۱۹,۰,۰۴۸)
C3	(۰,۰۲۲,۰,۰۴۵,۰,۰۷)	(۰,۰۳۲,۰,۰۵۴,۰,۰۸)	(۰,۰۰,۰,۰۲۹)	(۰,۰۳۲,۰,۰۵۴,۰,۰۷۳)	.....	(۰,۰۴۱,۰,۰۶۷,۰,۰۹۲)	(۰,۰۳۸,۰,۰۶۷,۰,۰۸۹)
C4	(۰,۰۲۲,۰,۰۴۱,۰,۰۶۷)	(۰,۰۴۵,۰,۰۷,۰,۰۹۲)	(۰,۰۴۱,۰,۰۶۴,۰,۰۸۶)	(۰,۰۰,۰,۰۲۹)	.....	(۰,۰۱۳,۰,۰۳۵,۰,۰۶۴)	(۰,۰۱۹,۰,۰۳۸,۰,۰۶۷)
C5	(۰,۰۱۳,۰,۰۳۵,۰,۰۶۴)	(۰,۰۴۱,۰,۰۷,۰,۰۹۲)	(۰,۰۴۸,۰,۰۷۶,۰,۰۹۶)	(۰,۰۵۱,۰,۰۷۶,۰,۰۹۲)	.....	(۰,۰۲۲,۰,۰۵۱,۰,۰۸)	(۰,۰۳۲,۰,۰۵۴,۰,۰۸)
C6	(۰,۰۰۶,۰,۰۲۲,۰,۰۵۱)	(۰,۰۱۰,۰,۰۳۵,۰,۰۶۴)	(۰,۰۳۵,۰,۰۵۷,۰,۰۸)	(۰,۰۲۵,۰,۰۴۵,۰,۰۷)	.....	(۰,۰۲۵,۰,۰۴۵,۰,۰۶۷)	(۰,۰۴۵,۰,۰۷,۰,۰۹۲)
C7	(۰,۰۱۹,۰,۰۴۱,۰,۰۶۷)	(۰,۰۳۲,۰,۰۵۴,۰,۰۷۶)	(۰,۰۳۵,۰,۰۶۱,۰,۰۸۳)	(۰,۰۳۲,۰,۰۵۴,۰,۰۸)	.....	(۰,۰۲۹,۰,۰۴۸,۰,۰۷۳)	(۰,۰۵۱,۰,۰۷۳,۰,۰۹۶)
C8	(۰,۰۲۵,۰,۰۴۵,۰,۰۷)	(۰,۰۳۵,۰,۰۶۱,۰,۰۸۳)	(۰,۰۴۸,۰,۰۷۶,۰,۰۹۹)	(۰,۰۲۹,۰,۰۵۴,۰,۰۷۶)	.....	(۰,۰۲۲,۰,۰۴۵,۰,۰۷)	(۰,۰۲۹,۰,۰۵۱,۰,۰۷۳)
C9	(۰,۰۱۹,۰,۰۴۱,۰,۰۷)	(۰,۰۱۳,۰,۰۴۱,۰,۰۶۷)	(۰,۰۶۴,۰,۰۹۲,۰,۱۰۸)	(۰,۰۱۹,۰,۰۳۸,۰,۰۶۷)	.....	(۰,۰۲۹,۰,۰۵۱,۰,۰۸)	(۰,۰۶۴,۰,۰۹۲,۰,۱۱۱)
C10	(۰,۰۳۲,۰,۰۵۴,۰,۰۷۶)	(۰,۰۱۶,۰,۰۳۲,۰,۰۵۷)	(۰,۰۲۹,۰,۰۴۸,۰,۰۷۳)	(۰,۰۲۲,۰,۰۳۸,۰,۰۶۴)	.....	(۰,۰۱۹,۰,۰۳۵,۰,۰۶۱)	(۰,۰۶۴,۰,۰۸۹,۰,۱۰۵)
C11	(۰,۰۱۶,۰,۰۳۲,۰,۰۶۱)	(۰,۰۳۸,۰,۰۶۴,۰,۰۸۳)	(۰,۰۶۱,۰,۰۸۹,۰,۱۰۸)	(۰,۰۱۶,۰,۰۳۵,۰,۰۶۴)	.....	(۰,۰۰,۰,۰۲۹)	(۰,۰۶۴,۰,۰۹۲,۰,۱۰۵)
C12	(۰,۰۱۰,۰,۰۲۲,۰,۰۵۱)	(۰,۰۱۳,۰,۰۲۵,۰,۰۵۴)	(۰,۰۱۹,۰,۰۴۱,۰,۰۷)	(۰,۰۱۶,۰,۰۳۸,۰,۰۶۷)	.....	(۰,۰۳۲,۰,۰۵۴,۰,۰۸)	(۰,۰۰,۰,۰۲۹)

پیوست3 ماتریس ارتباطات کامل معیارها

	C1	C2	C3	C4	....	C11	C12
C1	(۰,۰۰۸,۰,۰۵,۰,۵۹۱)	(۰,۰۲۰,۰,۰۸۶,۰,۶۷۶)	(۰,۰۳۵,۰,۱۲۲,۰,۷۹۹)	(۰,۰۲۶,۰,۰۹۷,۰,۶۸۶)	.....	(۰,۰۳۹,۰,۱۱۳,۰,۷۱۱)	(۰,۰۵۹,۰,۱۴۴,۰,۸۲۶)
C2	(۰,۰۲۵,۰,۰۹۱,۰,۶۶)	(۰,۰۱۳,۰,۰۶۷,۰,۶۸۹)	(۰,۰۴۲,۰,۱۳۱,۰,۸۴۲)	(۰,۰۵,۰,۱۲۴,۰,۷۴۴)	.....	(۰,۰۳,۰,۱۰۴,۰,۷۳۸)	(۰,۰۲۵,۰,۱۰۷,۰,۸۲۹)
C3	(۰,۰۳۴,۰,۱۱۲,۰,۷۴۳)	(۰,۰۴۸,۰,۱۳۷,۰,۸۲۵)	(۰,۰۲۵,۰,۱۱,۰,۹۰۳)	(۰,۰۴۹,۰,۱۳۷,۰,۸۲۱)	.....	(۰,۰۵۷,۰,۱۴۷,۰,۸۴۹)	(۰,۰۶۴,۰,۱۷۷,۰,۹۷۳)
C4	(۰,۰۳۳,۰,۱,۰,۶۸۵)	(۰,۰۵۸,۰,۱۴۱,۰,۷۷۷)	(۰,۰۶,۰,۱۵۵,۰,۸۸۵)	(۰,۰۱۶,۰,۰۷۶,۰,۷۱۸)	.....	(۰,۰۲۶,۰,۱۰۷,۰,۷۶۱)	(۰,۰۴,۰,۱۳۴,۰,۸۷۹)
C5	(۰,۰۲۳,۰,۰۹۷,۰,۷۰۸)	(۰,۰۵۵,۰,۱۴۴,۰,۸۰۵)	(۰,۰۶۶,۰,۱۷,۰,۹۲۷)	(۰,۰۶۴,۰,۱۵,۰,۸۰۷)	.....	(۰,۰۳۶,۰,۱۲۵,۰,۸۰۵)	(۰,۰۵۳,۰,۱۵۳,۰,۹۲۵)
C6	(۰,۰۱۶,۰,۰۷۶,۰,۶۳۹)	(۰,۰۲۲,۰,۱۰۱,۰,۷۱۵)	(۰,۰۵۲,۰,۱۴۱,۰,۸۳۹)	(۰,۰۳۸,۰,۱۱,۰,۷۲۲)	.....	(۰,۰۳۸,۰,۱۰۹,۰,۷۲۹)	(۰,۰۶۳,۰,۱۵۶,۰,۸۶۳)
C7	(۰,۰۳,۰,۱۰۲,۰,۷۰۶)	(۰,۰۴۶,۰,۱۲۸,۰,۷۸۴)	(۰,۰۵۵,۰,۱۵۶,۰,۹۰۹)	(۰,۰۴۶,۰,۱۲۸,۰,۷۸۹)	.....	(۰,۰۴۳,۰,۱۲۲,۰,۷۹۳)	(۰,۰۷۳,۰,۱۷۲,۰,۹۳۴)
C8	(۰,۰۳۶,۰,۱۰۶,۰,۷۰۷)	(۰,۰۴۹,۰,۱۳۵,۰,۷۸۸)	(۰,۰۶۷,۰,۱۷۱,۰,۹۲۱)	(۰,۰۴۳,۰,۱۳,۰,۷۸۳)	.....	(۰,۰۳۷,۰,۱۲,۰,۷۸۸)	(۰,۰۵۲,۰,۱۵۴,۰,۹۱۱)
C9	(۰,۰۳۱,۰,۱۰۵,۰,۷۲۵)	(۰,۰۲۸,۰,۱۲,۰,۷۹۳)	(۰,۰۸۴,۰,۱۹,۰,۹۵۳)	(۰,۰۳۵,۰,۱۱۸,۰,۷۹۵)	.....	(۰,۰۴۵,۰,۱۳,۰,۸۱۸)	(۰,۰۸۷,۰,۱۹۶,۰,۹۷)
C10	(۰,۰۴۱,۰,۱۱,۰,۶۷۸)	(۰,۰۳,۰,۱۰۳,۰,۷۲۶)	(۰,۰۴۸,۰,۱۳۸,۰,۸۵۴)	(۰,۰۳۶,۰,۱۰۹,۰,۷۳۴)	.....	(۰,۰۳۴,۰,۱۰۶,۰,۷۴۱)	(۰,۰۸۴,۰,۱۸,۰,۸۹۵)
C11	(۰,۰۳,۰,۱۰۳,۰,۷۴۷)	(۰,۰۵۵,۰,۱۴۸,۰,۸۴۲)	(۰,۰۸۵,۰,۱۹۸,۰,۹۹۳)	(۰,۰۳۵,۰,۱۲۳,۰,۸۲۶)	.....	(۰,۰۱۹,۰,۰۸۹,۰,۸۰۴)	(۰,۰۹۱,۰,۲۰۷,۱,۰۰۵)
C12	(۰,۰۲۰,۰,۰۷۹,۰,۶۴۶)	(۰,۰۲۵,۰,۰۹۴,۰,۷۱۴)	(۰,۰۳۸,۰,۱۳,۰,۸۴)	(۰,۰۲۹,۰,۱۰۶,۰,۷۲۷)	.....	(۰,۰۴۴,۰,۱۲,۰,۷۴۸)	(۰,۰۲۴,۰,۰۹۷,۰,۸۱۴)

پیوست4 .سوپرماتریس موزون

	C1	C2	C3	C4	....	C11	C12
C1	(۰,۰۱۹۰,۰۳۷۰,۰۶۶)	(۰,۰۵۳۰,۰۶۳۰,۰۷)	(۰,۰۵۱۰,۰۶۰,۰۶۹)	(۰,۰۵۸۰,۰۶۲۰,۰۶۹)	.....	(۰,۰۴۰,۰۵۳۰,۰۶۸)	(۰,۰۳۷۰,۰۵۲۰,۰۶۸)
C2	(۰,۰۴۶۰,۰۶۴۰,۰۷۵)	(۰,۰۲۷۰,۰۴۷۰,۰۷۳)	(۰,۰۷۲۰,۰۷۴۰,۰۷۷)	(۰,۱۰۴۰,۰۸۷۰,۰۷۹)	.....	(۰,۰۷۴۰,۰۷۶۰,۰۷۷)	(۰,۰۴۷۰,۰۶۲۰,۰۷۵)
C3	(۰,۰۷۹۰,۰۹۱۰,۰۸۹)	(۰,۰۹۱۰,۰۹۱۰,۰۸۹)	(۰,۰۳۷۰,۰۵۹۰,۰۸۴)	(۰,۱۰۸۰,۰۹۶۰,۰۹)	.....	(۰,۱۱۴۰,۱۰۱۰,۰۹۱)	(۰,۰۷۱۰,۰۸۵۰,۰۸۸)
C4	(۰,۰۶۰,۰۷۲۰,۰۷۶)	(۰,۱۰۷۰,۰۸۷۰,۰۷۸)	(۰,۰۷۲۰,۰۷۴۰,۰۷۶)	(۰,۰۲۸۰,۰۴۷۰,۰۷۳)	.....	(۰,۰۴۷۰,۰۶۳۰,۰۷۵)	(۰,۰۵۴۰,۰۶۹۰,۰۷۶)
C5	(۰,۰۳۴۰,۰۵۱۰,۰۶۹)	(۰,۰۹۶۰,۰۸۳۰,۰۷۳)	(۰,۰۷۶۰,۰۷۲۰,۰۷۲)	(۰,۱۰۵۰,۰۸۵۰,۰۷۳)	.....	(۰,۰۵۰,۰۶۲۰,۰۷)	(۰,۰۲۲۰,۰۵۲۰,۰۶۹)
C6	(۰,۰۶۷۰,۰۷۷۰,۰۸۳)	(۰,۰۷۴۰,۰۷۸۰,۰۸۳)	(۰,۰۶۶۰,۰۷۵۰,۰۸۳)	(۰,۰۴۵۰,۰۷۰,۰۸۲)	.....	(۰,۰۷۷۰,۰۸۲۰,۰۸۳)	(۰,۱۴۴۰,۱۰۷۰,۰۸۶)
C7	(۰,۱۲۸۰,۱۱۴۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۲۰,۱۱۲۰,۰۹۹)	(۰,۱۳۶۰,۱۱۸۰,۰۹۹)	(۰,۱۲۶۰,۱۱۲۰,۰۹۸)	.....	(۰,۱۲۱۰,۱۱۲۰,۰۹۸)	(۰,۱۷۰,۱۳۰,۱)
C8	(۰,۱۳۲۰,۱۱۰,۰۹۵)	(۰,۱۳۴۰,۱۱۱۰,۰۹۵)	(۰,۱۱۰,۱۰۴۰,۰۹۴)	(۰,۱۲۹۰,۱۱۱۰,۰۹۶)	.....	(۰,۱۱۱۰,۱۰۳۰,۰۹۴)	(۰,۰۷۸۰,۰۹۳۰,۰۹۳)
C9	(۰,۰۸۳۰,۰۷۹۰,۰۷۹)	(۰,۰۵۸۰,۰۶۹۰,۰۷۸)	(۰,۰۷۱۰,۰۷۵۰,۰۷۹)	(۰,۰۵۲۰,۰۶۸۰,۰۷۸)	.....	(۰,۰۹۶۰,۰۸۵۰,۰۸)	(۰,۰۷۹۰,۰۷۹۰,۰۷۹)
C10	(۰,۱۳۲۰,۱۱۴۰,۰۹۸)	(۰,۱۱۹۰,۱۱۰,۰۹۷)	(۰,۱۲۹۰,۱۱۴۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۴۰,۱۱۱۰,۰۹۷)	.....	(۰,۱۲۲۰,۱۱۲۰,۰۹۸)	(۰,۱۷۱۰,۱۳۱۰,۱)
C11	(۰,۰۸۸۰,۰۸۴۰,۰۷۹)	(۰,۰۶۴۰,۰۷۳۰,۰۷۸)	(۰,۰۸۴۰,۰۷۹۰,۰۷۹)	(۰,۰۴۸۰,۰۶۶۰,۰۷۷)	.....	(۰,۰۲۶۰,۰۴۶۰,۰۷۳)	(۰,۰۸۳۰,۰۷۹۰,۰۷۹)
C12	(۰,۱۳۳۰,۱۰۷۰,۰۹۲)	(۰,۰۵۳۰,۰۷۵۰,۰۸۷)	(۰,۰۹۶۰,۰۹۶۰,۰۹)	(۰,۰۷۲۰,۰۸۳۰,۰۸۹)	.....	(۰,۱۲۳۰,۱۰۶۰,۰۹۲)	(۰,۰۴۵۰,۰۶۳۰,۰۸۶)

پیوست5 .سوپرماتریس حدی

	C1	C2	C3	C4	....	C11	C12
C1	(۰,۰۴۹۰,۰۵۸۰,۰۶۹)	(۰,۰۴۹۰,۰۵۸۰,۰۶۹)	(۰,۰۴۹۰,۰۵۸۰,۰۶۹)	(۰,۰۴۹۰,۰۵۸۰,۰۶۹)	.....	(۰,۰۴۹۰,۰۵۸۰,۰۶۹)	(۰,۰۴۹۰,۰۵۸۰,۰۶۹)
C2	(۰,۰۶۴۰,۰۷۱۰,۰۷۶)	(۰,۰۶۴۰,۰۷۱۰,۰۷۶)	(۰,۰۶۴۰,۰۷۱۰,۰۷۶)	(۰,۰۶۴۰,۰۷۱۰,۰۷۶)	.....	(۰,۰۶۴۰,۰۷۱۰,۰۷۶)	(۰,۰۶۴۰,۰۷۱۰,۰۷۶)
C3	(۰,۰۹۳۰,۰۹۲۰,۰۸۹)	(۰,۰۹۳۰,۰۹۲۰,۰۸۹)	(۰,۰۹۳۰,۰۹۲۰,۰۸۹)	(۰,۰۹۳۰,۰۹۲۰,۰۸۹)	.....	(۰,۰۹۳۰,۰۹۲۰,۰۸۹)	(۰,۰۹۳۰,۰۹۲۰,۰۸۹)
C4	(۰,۰۶۸۰,۰۷۲۰,۰۷۶)	(۰,۰۶۸۰,۰۷۲۰,۰۷۶)	(۰,۰۶۸۰,۰۷۲۰,۰۷۶)	(۰,۰۶۸۰,۰۷۲۰,۰۷۶)	.....	(۰,۰۶۸۰,۰۷۲۰,۰۷۶)	(۰,۰۶۸۰,۰۷۲۰,۰۷۶)
C5	(۰,۰۵۶۰,۰۶۳۰,۰۷)	(۰,۰۵۶۰,۰۶۳۰,۰۷)	(۰,۰۵۶۰,۰۶۳۰,۰۷)	(۰,۰۵۶۰,۰۶۳۰,۰۷)	.....	(۰,۰۵۶۰,۰۶۳۰,۰۷)	(۰,۰۵۶۰,۰۶۳۰,۰۷)
C6	(۰,۰۷۷۰,۰۸۱۰,۰۸۳)	(۰,۰۷۷۰,۰۸۱۰,۰۸۳)	(۰,۰۷۷۰,۰۸۱۰,۰۸۳)	(۰,۰۷۷۰,۰۸۱۰,۰۸۳)	.....	(۰,۰۷۷۰,۰۸۱۰,۰۸۳)	(۰,۰۷۷۰,۰۸۱۰,۰۸۳)
C7	(۰,۱۲۹۰,۱۱۳۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۹۰,۱۱۳۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۹۰,۱۱۳۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۹۰,۱۱۳۰,۰۹۸)	.....	(۰,۱۲۹۰,۱۱۳۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۹۰,۱۱۳۰,۰۹۸)
C8	(۰,۱۰۶۰,۱۰۱۰,۰۹۴)	(۰,۱۰۶۰,۱۰۱۰,۰۹۴)	(۰,۱۰۶۰,۱۰۱۰,۰۹۴)	(۰,۱۰۶۰,۱۰۱۰,۰۹۴)	.....	(۰,۱۰۶۰,۱۰۱۰,۰۹۴)	(۰,۱۰۶۰,۱۰۱۰,۰۹۴)
C9	(۰,۰۶۷۰,۰۷۳۰,۰۷۸)	(۰,۰۶۷۰,۰۷۳۰,۰۷۸)	(۰,۰۶۷۰,۰۷۳۰,۰۷۸)	(۰,۰۶۷۰,۰۷۳۰,۰۷۸)	.....	(۰,۰۶۷۰,۰۷۳۰,۰۷۸)	(۰,۰۶۷۰,۰۷۳۰,۰۷۸)
C10	(۰,۱۲۱۰,۱۱۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۱۰,۱۱۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۱۰,۱۱۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۱۰,۱۱۰,۰۹۸)	.....	(۰,۱۲۱۰,۱۱۰,۰۹۸)	(۰,۱۲۱۰,۱۱۰,۰۹۸)
C11	(۰,۰۶۷۰,۰۷۲۰,۰۷۷)	(۰,۰۶۷۰,۰۷۲۰,۰۷۷)	(۰,۰۶۷۰,۰۷۲۰,۰۷۷)	(۰,۰۶۷۰,۰۷۲۰,۰۷۷)	.....	(۰,۰۶۷۰,۰۷۲۰,۰۷۷)	(۰,۰۶۷۰,۰۷۲۰,۰۷۷)
C12	(۰,۱۰۳۰,۰۹۵۰,۰۹)	(۰,۱۰۳۰,۰۹۵۰,۰۹)	(۰,۱۰۳۰,۰۹۵۰,۰۹)	(۰,۱۰۳۰,۰۹۵۰,۰۹)	.....	(۰,۱۰۳۰,۰۹۵۰,۰۹)	(۰,۱۰۳۰,۰۹۵۰,۰۹)

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 43-54

Synthetic Photoplethysmogram (PPG) Generation Using Genetic Programming Based Generative Model

Fatemeh Ghasemi[1], Fardin Abdali Mohammadi[1]*

[1] Department of Computer Engineering and Information Technology, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 16 December 2023, Revised: 01 October 2024, Accepted: 01 December 2024
Paper type: Research

Abstract

Today, advancements in Information and Communication Technology (ICT), particularly in healthcare and cardiac activity monitoring, have led to increased adoption of Photoplethysmogram (PPG) technology in smart devices and mobile phones. The development of generative models for producing artificial PPG signals faces challenges such as a lack of diversity and constraints in training data. This article employs a Genetic Programming (GP) based approach to introduce a generative model capable of producing PPG data with increased diversity and enhanced accuracy using an initial sample of PPG signals. In contrast to conventional regression, Genetic Programming automates the determination of the mathematical model's structure and compositions. The proposed approach, with a Mean Squared Error (MSE) of 0.0001, Root Mean Square Error (RMSE) of 0.01, and a correlation of 0.999, demonstrates superior performance due to appropriate optimization and acceptable accuracy in generating synthetic PPG data. It outperforms other methods in terms of efficiency and execution capability, especially in resource-constrained environments.

Keywords: Photoplethysmogram, Generative Model, Genetic Programming, Scalability, Mathematical Model.

* Corresponding Author's email: fardin.abdali@razi.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۴۳ الی ۵۴

تولید سیگنال فوتوپلتیسموگرام (PPG) مصنوعی با استفاده از مدل سازنده مبتنی بر برنامه‌نویسی ژنتیک

فاطمه قاسمی[1]، فردین ابدالی محمدی[2]*

[1]دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
[2]دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱
نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

امروزه تحولات فناوری اطلاعات و ارتباطات در حوزه سلامت، به‌ویژه در نظارت بر فعالیت‌های قلبی، به افزایش استفاده از تکنولوژی فوتوپلتیسموگرام (PPG: Photoplethysmogram) در دستگاه‌های هوشمند و تلفن‌های همراه منجر شده است. توسعهٔ مدل‌های سازنده به جهت تولید سیگنال‌های مصنوعی PPG نیازمند حل چالش‌هایی مانند کمبود تنوع و محدودیت داده‌ها در آموزش مدل‌های یادگیری عمیق است. این مقاله، یک رویکرد مبتنی بر برنامه‌نویسی ژنتیک (GP: Genetic Programming) را به کار می‌گیرد تا مدل سازنده‌ای را ارائه دهد که با کمک یک نمونهٔ اولیه از سیگنال PPG، قادر به تولید داده‌هایی با تنوع بیشتر و دقت افزوده‌شده باشد. برخلاف رگرسیون معمول، در برنامه‌نویسی ژنتیک ساختار و ترکیبات مدل ریاضی به‌صورت خودکار تعیین می‌گردد. رویکرد پیشنهادی، با داشتن اندازه خطای میانگین (MSE: Mean Squared Error) برابر با ۰٫۰۰۰۱، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE: Root Mean Squared Error) به‌اندازه ۰٫۰۱ و همبستگی ۰٫۹۹۹ نشان می‌دهد که به دلیل بهینگی مناسب و دقت قابل‌قبول در تولید داده‌های PPG مصنوعی، نسبت به دیگر روش‌ها برتری دارد و ازنظر کارایی و قابلیت اجرا در محیط‌های با منابع محدود نیز مؤثر عمل می‌کند.

کلیدواژگان: فوتوپلتیسموگرام، مدل سازنده، برنامه‌نویسی ژنتیک، مقیاس‌پذیری، مدل ریاضی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: fardin.abdali@razi.ac.ir

۱- مقدمه

اخیراً استفاده از تکنولوژی فوتوپلتیسموگرام (PPG)، به‌عنوان یک روش کم‌هزینه و آسان، در تلفن‌های همراه و دستگاه‌های پوشیدنی هوشمند، مورد توجه قرارگرفته است [۱, ۲]. PPG یک روش غیرتهاجمی برای اندازه‌گیری تغییرات حجم خون در رگ انسان است که از طریق آن می‌توان تغییرات در نرخ ضربان قلب را به دست آورد. با استفاده از سیگنال PPG می‌توان بر فعالیت‌های قلبی ازجمله ضربان قلب و فشارخون نظارت داشت و به همین علت سیگنال PPG در زمینه‌های ورزشی و نظارت بر سلامت انسان بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد[۳-۵]. امروزه با توجه به اهمیت سیگنال PPG، وجود داده‌های مربوط به این سیگنال به جهت آموزش مدل‌های یادگیری عمیق بسیار حائز اهمیت است. این‌گونه از مدل‌ها برای آموزش نیازمند مقادیر فراوان و متنوعی از داده‌های PPG می‌باشند. تاکنون مجموعه داده‌های PPG گوناگونی ازجمله WristPPG [۶]، BioSec.Lab [۷]، PPG-BP [۸] و PPG-DaLiA [۹] ارائه شده‌اند. داده‌های PPG موجود در مجموعه WristPPG با فرکانس ۲۵۶ هرتز از ۹ شخص در بازه سنی ۲۲ تا ۳۲ در حالت‌های مختلف فیزیکی به‌دست آمده است. مجموعه BioSec.Lab شامل ۲۱۸ داده PPG از ۸۶ شخص در بازه سنی ۱۹ تا ۳۵ است که در حالت‌های مختلف با فرکانس ۱۰۰ هرتز نمونه‌برداری شده است. نمونه‌های PPG در PPG-BP شامل ۶۵۷ نمونه از ۲۱۹ شخص با فرکانس ۱ کیلوهرتز است و سن افراد شرکت‌کننده از ۲۰ تا ۸۹ متغیر است. در PPG-DaLiA، طیف وسیع‌تری از نمونه‌های PPG وجود دارد. این داده‌ها در طول ۳۶ ساعت از ۱۵ نفر در بازه سنی ۲۱ تا ۵۵ نمونه‌برداری شده است.

باتوجه‌به مجموعه‌داده‌های موجود PPG، برخلاف تنوع و فراوانی داده‌های الکتروکاردیوگرام (ECG)، به‌وضوح کمبود داده و عدم تنوع نمونه‌های سیگنال PPG مشهود است [۱۰]. این مسئله سبب ارائه مدل‌های سازنده در جهت تولید سیگنال‌های PPG به‌صورت مصنوعی شده است. ازاین‌رو، با استفاده از این مدل‌ها، داده‌ها به‌سادگی و با تنوع بسیاری تولید می‌شوند که این امر سبب پیشرفت در عملکرد مدل‌های یادگیری عمیق خواهد شد [۱۱, ۱۲]. با این‌حال ایجاد یک مدل سازنده برای تولید سیگنال PPG که جزو سیگنال‌های حیاتی محسوب می‌شود، چالش‌هایی دارد و نیازمند ارزیابی دقیق داده‌های تولیدشده از نظر صحت و کیفیت است.

در سال‌های گذشته، با توجه به توسعهٔ حوزه پزشکی و دستگاه‌های پوشیدنی و نیاز به تولید داده‌های سری زمانی، ایدهٔ استفاده از مدل‌های سازنده به‌عنوان یکی از ابزارهای بسیار مؤثر و کارآمد در این زمینه مطرح شد. نکتهٔ حائز اهمیت آن است که خروجی مدل‌های سازندهٔ سیگنال‌های حیاتی، نیازمند دقت بسیار بالا هستند.

در این بخش به روش‌های ارائه‌شده در جهت تولید سیگنال‌های PPG و ECG مختصراً اشاره خواهد شد. اغلب رویکردهای مدل‌سازی سیگنال‌های حیاتی عمدتاً بر اساس توابع گاوسی و شبکه‌های GAN می‌باشند. به‌طور مثال در روشی که در [۱۳] معرفی‌شده است، با استفاده از یک مدل پویا گاوسی مبتنی بر موج، مدل سازنده‌ای به منظور تولید داده‌های سیگنال الکتروکاردیوگرام ارائه‌شده است. در روشی دیگر با استفاده از آنالیز دنباله پالس‌های سیگنال PPG، سعی شده است تا با بررسی ویژگی‌های مهم دنباله، یک مدل سازنده سیگنال PPG ایجاد شود [۱۴]. در مدل‌های سازندهٔ PPG کمینه بودن خطای نقاط مهم سیگنال PPG بسیار حائز اهمیت است. برای این کار وانگ و همکاران یک مدل سازندهٔ PPG را با در نظر گرفتن مقدار خطای تخمین نقاط مهم سیگنال PPG با استفاده از ۴ یا ۵ تابع گاوسی را با دقت قابل قبولی ارائه دادند [۱۵]. لو و همکاران با هدف افزایش دقت در تولید سیگنال PPG مصنوعی روشی مبتنی بر لگاریتم نرمال و توابع گاوسی ارائه داده‌اند که استفاده از لگاریتم نرمال در این روش، سبب افزایش دقت مدل در ویژگی‌های طولانی سیگنال PPG شده است [۱۶] در ادامه تانگ و همکاران با استفاده از دو تابع گاوسی توانستند که سیگنال PPG را به‌صورت تک ضربانی تولید کنند که این روش در کنار دقت مناسب پارامترهای کمتری نیز دارد [۱۷].

شبکه‌های GAN نیز به‌عنوان یکی از مدل‌های یادگیری عمیق در جهت تولید داده‌های مصنوعی ارائه شده‌اند. این نوع از شبکه‌های عصبی در حوزهٔ تولید سیگنال‌های پزشکی نیز بسیار کاربردی هستند [۱۸]. بروفی و همکاران توانستند با استفاده از شبکه DCGAN بر مبنای کانولوشن دوبعدی، سیگنال ECG و PPG تولید کنند. بدین‌صورت که این مدل ابتدا داده‌های ECG و PPG را به تصویر سیاه و سفید تبدیل می‌کند سپس این تصویر به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شود. خروجی مدل سازنده ارائه‌شده یک تصویر سیاه و سفید است که درنهایت آن تصویر به یک سیگنال تبدیل می‌شود [۱۹]. در اغلب اوقات تولید داده در جهت افزایش دقت طبقه‌بند استفاده می‌شود. به‌طور مثال در روش [۲۰] با استفاده از CGAN، سیگنال PPG مصنوعی با این هدف تولید می‌شود. مدل انتشار نیز اخیراً به یکی از استانداردهای تولید داده‌های مصنوعی تبدیل‌شده است. استفاده از مدل انتشار در روش‌های [۲۱, ۲۲] در تولید سیگنال ECG نشان می‌دهند که این‌گونه از مدل‌ها پتانسیل بسیاری در زمینهٔ تولید داده‌های مصنوعی مانند ECG و PPG خواهند داشت.

بااین‌حال، مسئله حائز اهمیت آن است که ایجاد مدل‌های سازنده با استفاده از شبکه‌های عصبی، هرچند که دارای دقت خوبی می‌باشند، اما پیچیدگی بسیار بالای آن‌ها منجر به افزایش حجم مدل و

نیازمندی به منابع محاسباتی بیشتر خواهد شد. با توجه به گسترش استفاده از دستگاه‌هایی بر مبنای PPG [۲۳]، باید به این موضوع توجه داشت که استفاده از این‌گونه مدل‌ها در مواجه با دستگاه‌هایی با منابع محدود به چالش کشیده می‌شود؛ بنابراین، امروزه نیازمند توسعهٔ مدل‌های سازنده با دقت مناسب و درعین‌حال با پیچیدگی کمتر برای اجرا بر محیط‌هایی با منابع محدود هستیم.

در این پژوهش، تمرکز بر ارائهٔ یک مدل سازنده مبتنی بر برنامه‌نویسی ژنتیک به‌منظور استخراج یک سیگنال PPG مصنوعی می‌باشد. برنامه‌نویسی ژنتیک که به‌عنوان مدل رگرسیونی نیز شناخته می‌شود[۲۴] ، یک متد تکاملی برمبنای درخت است که از طریق ایجاد راه‌حل‌های گوناگون و اعمال تکنیک‌های مختلف ازجمله انتخاب، جهش و ترکیب تلاش می‌کند تا در طی نسل‌های مختلف و با بهره‌گیری از ترکیب عملگرهای حسابی(+,−,*,/) و عملگرهای هندسی(sin, cos) در بین فضای حالات موجود به بهترین جواب برسد[۲۵, ۲۶]. این روش به دلیل توانایی در یافتن راه‌حل‌های بهینه با استفاده از ترکیب عملیات ژنتیک در مسائل چالشی شناخته‌شده است [۲۷, ۲۸]. در برنامه‌نویسی ژنتیک، با تنظیم صحیح پارامترها، می‌توان عملکرد، دقت و میزان بهینگی مدل رگرسیونی را بهبود بخشید [۲۹]. این رویکرد از اهمیت ویژه‌ای در تولید مدل‌های پیشرفته و کاربردی در مسائل مختلف برخوردار است. در این روش، یک نمونه از سیگنال PPG به‌عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور کاهش خطای مدل و بهبود عملکرد، پیش‌پردازش‌های لازم بر روی داده‌ها انجام می‌شود. سپس مدل GP با بهره‌گیری از نمونهٔ اولیه PPG، در طی نسل‌های مختلف بهترین مدل را انتخاب می‌کند. درنهایت خروجی به‌صورت یک مدل ریاضی سازندهٔ سیگنال PPG با میزان بهینگی و دقت قابل‌قبول ارائه می‌شود.

در بخش دوم این مقاله به‌تفصیل روش پیشنهادی مورد بحث قرار خواهد گرفت. سپس در بخش سوم، نتایج حاصل از اجرای این روش، ارزیابی پارامترها، دقت مدل و مقایسهٔ آن با دیگر روش‌های موجود به طور جامع مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت و درنهایت بخش نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

هدف از ارائهٔ روش پیشنهادی، ایجاد یک مدل سازنده سیگنال PPG بادقت و بهینگی مطلوب است. به‌منظور دستیابی به این مدل، یک تابع تکه‌ای *F(x)* تعریف می‌شود که از زیر توابع $\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\}$ تشکیل شده‌است. هر یک از زیر توابع توسط الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) ایجاد می‌شود و قسمت مشخصی از یک سیگنال PPG را نمایش می‌دهد. فرمول تابع تکه‌ای *F(x)* در معادله ۱ نمایش داده‌شده است.

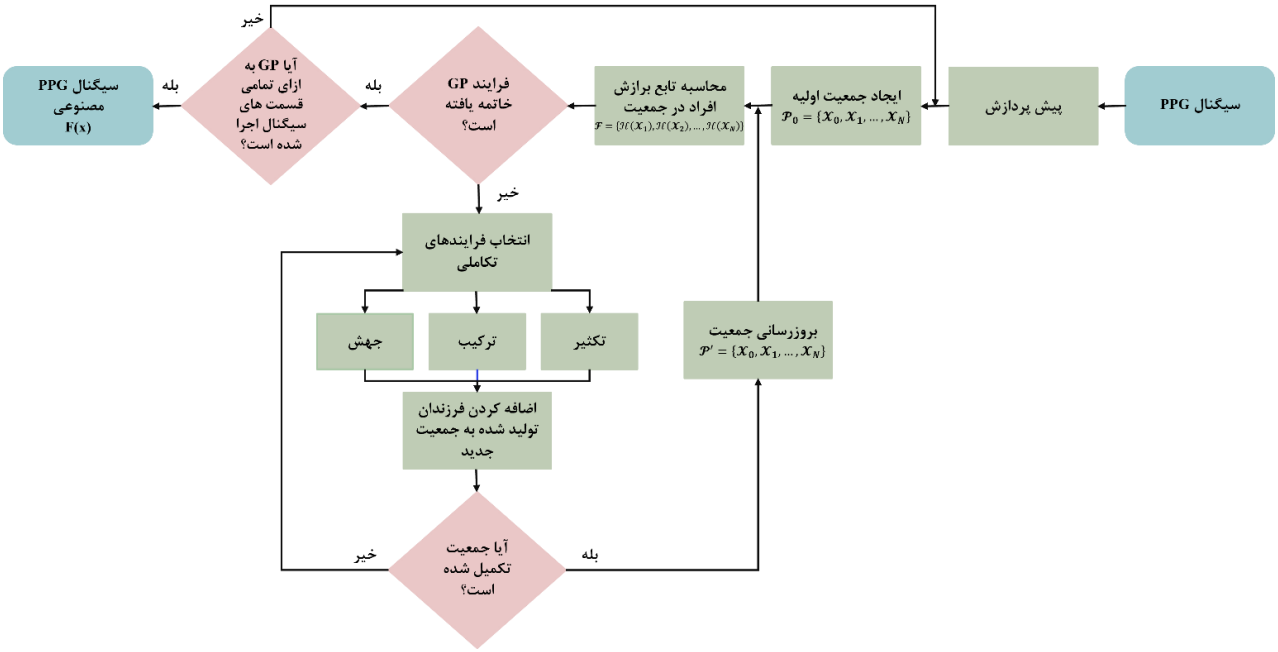
$$F(x) = \begin{cases} f_1(x) = exp_1 & 0 \le x < m \\ f_2(x) = exp_2 & m \le x < 2m \\ \vdots & \\ f_n(x) = exp_n & (n-1)m \le x < n * m \end{cases} \quad (۱)$$

در معادله ۱، بردار x، نمونه‌های سیگنال PPG است. عبارت exp بخشی از مدل سازنده سیگنال PPG است که توسط ترکیبی از عبارات ریاضی تولید می‌شود. درمجموع تابع تکه‌ای *F(x)* شامل n زیر تابع می‌باشد و سیگنال PPG با اجرای تابع *F(x)* تولید می‌شود. بهینگی این مدل توسط دو پارامتر تضمین می‌شود به شرح زیر:

- مقدار n کمینه است: مدل به نحوی پیاده‌سازی شده است که تعداد زیر توابع *F(x)* کمترین تعداد ممکن خود را داشته باشد.
- طول تابع *F(x)* کمینه است: اگر تعداد کاراکترهای عبارات، طول تابع *F(x)* در نظر گرفته شود، طول تابع کمترین مقدار خود را خواهد داشت. $|f_i|$ طول کاراکترهای تابع f_i را نشان می‌دهد و مجموع تعداد کاراکترهای زیر توابع، طول تابع *F(x)* می‌باشد که با FTS(*F(x)*) نمایش داده می‌شود.

$$FTS(F(x)) = \sum_{i=1}^{n} |f_i| \quad (۲)$$

فلوچارت ایجاد یک مدل سازنده PPG مصنوعی با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک، در شکل ۱ ارائه شده‌است. در ابتدا یک نمونه از سیگنال PPG انتخاب می‌شود. سپس به جهت افزایش دقت و کارکرد مدل سازنده، بر روی داده‌های PPG پیش‌پردازش‌های لازم انجام می‌شود. بخش مهم این روش ایجاد مدل سازنده با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک است که مراحل آن در ادامه شرح داده می‌شود. به صورت جزئی‌تر، مراحل تولید سیگنال PPG مصنوعی با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک در الگوریتم ۱ نمایش داده‌شده است. ورودی الگوریتم پیشنهادی، یک سیگنال PPG طبیعی از یک شخص است (خط ۱) و خروجی این الگوریتم، یک سیگنال PPG تولیدشده توسط مدل *F(x)* می‌باشد (خط ۲). در ابتدا، تمام پیش‌پردازش‌های لازم بر سیگنال PPG اعمال می‌شود (خط ۳). همان‌طور که بحث شد، تابع F یک تابع تکه‌ای است که از n زیر تابع تشکیل‌شده است که در خط چهارم تعداد زیر توابع مشخص می‌شود (خط ۴). سپس سیگنال PPG به n قسمت مجزا تقسیم می‌شود (خط ۵). نقاط شروع و پایان نواحی سیگنال در دو مجموعهٔ StartingPoints و EndingPoints قرار می‌گیرند (خطوط ۶ و ۷). الگوریتم GP به تعداد بخش‌های سیگنال و با بهره‌گیری از سیگنال اصلی اجرا می‌شود. نتیجهٔ اجرای هر GP یک عبارت ریاضی است که در ResultSet قرار می‌گیرد (خطوط ۹ تا ۱۱) سپس عبارات موجود در ResultSet در تابع F(x) ذخیره می‌شوند (خط ۱۳). نهایتا تابع F(x) قادر به ایجاد یک سیگنال مصنوعی PPG می‌باشد.



شکل ۱. . فلوچارت ایجاد یک مدل سازنده PPG با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک

الگوریتم ۱. شبه کد روش پیشنهادی

```
Input: PPG Signal(data)
Output: Near Optimal Generated Model(F(x))
data' ← Preprocessing(data)
N ← Number Of Partitions
Splited_Data ← Split_Data(data', N)
StartingPoints= {s1,s2,...,sn}
EndingPoints= {e1,e2,...,en}
ResultSet ← ∅
 for j=1, ⋯,N do.
      Exp=GP(Splited_Data[j],sj,ej)
      ResultSet=ResultSet ∪Exp
end for
F(x) ← ResultSet
```

۲-۱- پیش‌پردازش سیگنال PPG

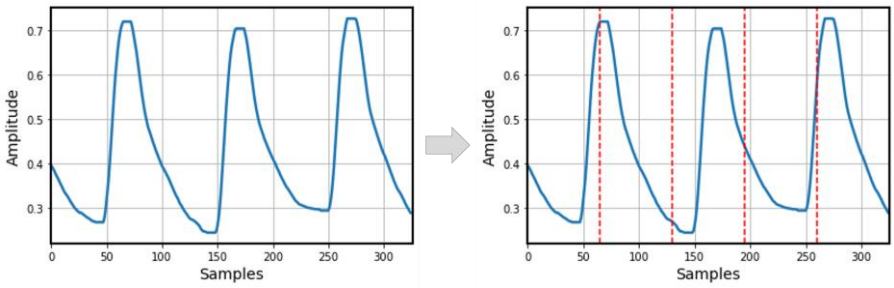
پس از انتخاب سیگنال PPG، قسمتی از سیگنال که شامل سه پیک سیستولیک[1] است، انتخاب‌شده و بر روی آن یک فیلتر میانه به جهت کاهش نویز اعمال می‌شود. فیلتر میانه یک فیلتر غیرخطی است که در حذف نویزهای سیگنال بسیار مؤثر عمل می‌کند [۳۰]. با تعیین طول پنجره، فیلتر، میانه اعداد در آن مجموعه را می‌یابد و عدد میانه را جایگزین کل مجموعه می‌کند. این فرایند سبب بهبود کیفیت سیگنال PPG برای استفاده در مراحل بعدی می‌شود. پس از اعمال فیلتر بر روی سیگنال PPG، سیگنال به n ناحیهٔ مجزا تقسیم می‌شود (شکل ۲**Error! Reference source not found.**). این تقسیم‌بندی به جهت افزایش دقت مدل سازنده، بر روی سیگنال اصلی PPG اعمال می‌شود. سپس، به ازای هر یک از نواحی سیگنال، GP صورت مجزا اجرا خواهد شد.

۲-۲- ایجاد سیگنال PPG مصنوعی با استفاده از GP

برنامه‌نویسی ژنتیک، به جهت تولید عبارات با استفاده از رویکردهای تکاملی ایجادشده است[۳۱]. در GP برنامه‌های کامپیوتری برای حل مسئله، به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شوند. هر فرد در GP نشانگر یک برنامه است. این برنامه‌ها از ۳ عمل تکاملی انتخاب، جهش و ترکیب ایجاد می‌شوند و توسط تابع برازشی که تعریف‌شده است سنجیده می‌شوند. معمولاً از برنامه‌هایی با سطح سازگاری بیشتر با مسئله، برای ایجاد نسل‌های بعدی استفاده می‌شود. درنهایت بهترین راه‌حل تولیدشده توسط GP، در حقیقت بهترین فرد سازگار در طی نسل‌های مختلف هست.

در روش پیشنهادی تمرکز بر ایجاد یک مدل سازندهٔ PPG با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک بر مبنای درخت است تا با ایجاد درخت‌های گوناگون، عبارت مطلوب یافت شود [۳۲, ۳۳]. در الگوریتم ۲، شبه کد برنامه‌نویسی ژنتیک با جزییات بیشتری شرح داده‌شده است. ورودی این الگوریتم، یک ناحیهٔ خاص از سیگنال PPG ($splited\_data_j$) با نقاط شروع و پایان مشخص s_j و e_j می‌باشد (خط ۱). خروجی این الگوریتم نیز یک عبارت ریاضی (exp_j) است که بهترین پاسخ در کل نسل‌های GP می‌باشد و قابلیت ایجاد ناحیه‌ای از سیگنال PPG را خواهد داشت(خط ۲).

[1] systolic



شکل ۲. تقسیم‌بندی سیگنال اصلی PPG به نواحی مختلف، مبنای ایجاد یک مدل سازنده با دقت بیشتر در روش پیشنهادی است.

در GP، ابتدا یک جمعیت اولیه از افراد به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود که می‌توان آن را به‌صورت $\mathcal{P} = \{\mathcal{X}_1, \mathcal{X}_2, \dots, \mathcal{X}_i, \dots, \mathcal{X}_N\}, \forall_i \in \{1, \dots, N\}$ نمایش داد. هر $\mathcal{X}_i$ نشان‌دهنده یک فرد در جمعیت است. در این قسمت، N تعداد افراد در جمعیت را نشان می‌دهد که اغلب، این تعداد از طریق آزمایشات متعدد به دست می‌آید (خط ۳). سپس برای هر فرد در جمعیت تابع برازش محاسبه می‌گردد. این تابع به‌صورت $\mathcal{H}: \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ نشان داده می‌شود که $\mathcal{H}(\mathcal{X}_i)$ نشان‌دهندهٔ میزان سازگاری فرد $\mathcal{X}_i$ در جمعیت $\mathcal{P}$ با مسئله است. در این روش جهت ارزیابی میزان سازگاری هر یک از افراد با مسئله، از یک تابع ترکیبی به نام تخمین خطای منفی‌گرا[1](PLE) استفاده می‌شود(معادله ۳). در این تابع $e(g_\hbar^i)$ میزان خطای ژن $g_\hbar^i$ فرد $\mathcal{X}_i$ را در مقایسه با مسئله می‌یابد. به عبارت دیگر این خطا نشان دهنده میزان انحراف خروجی تولید شده توسط ژن از سیگنال هدف است که به عنوان یک شاخص برای سنجش عملکرد ژن در حل مسئله مورد نظر به کار می رود. $\Omega(g_\hbar^i)$، یک معیار کمی برای سنجش میزان پیچیدگی ژن $g_\hbar^i$ است که می‌تواند به صورت تابعی از تعریف شود. تابع $\mathcal{T}(g_\hbar^i)$ تعداد گره‌های درخت در هر ژن $g_\hbar^i$ در نمونه $\mathcal{X}_i$ را محاسبه می‌کند که این معیار، اندازه و پیچیدگی ساختاری ژن را نشان می دهد. درنهایت متغیر L نشان دهنده مجموع کل تعداد کل گره‌های فرد $\mathcal{X}_i$ می‌باشد.

$$\mathcal{H}(\mathcal{X}_i) = \frac{\sum_{\hbar=1}^{N_{model}} \left[e(g_\hbar^i) + \Omega(g_\hbar^i) \right]}{\sum_{\hbar=1}^{N_{model}} \mathcal{T}(g_\hbar^i)} = \frac{e(\mathcal{X}_i) + \Omega(\mathcal{X}_i)}{L} \quad (۳)$$

پس از محاسبهٔ تابع برازش به ازای تمام افراد جمعیت، افراد سازگارتر توسط به‌ازای انتخاب با استفاده از روش تورنمنت انتخاب خواهند شد (خط ۶). در این فرایند، یک تورنمنت با اندازهٔ k ایجاد می‌شود که به‌صورت $T = \{\mathcal{X}_{i_1}, \mathcal{X}_{i_2}, \dots, \mathcal{X}_{i_k}\}$ نشان داده می‌شود. $\mathcal{X}_{i_j}$ نشان‌دهنده فرد انتخاب‌شده در تورنمنت است. در عبارت ۴ خواهیم دید که از میان افراد انتخاب‌شده، فردی که عملکرد بهتری دارد به‌عنوان فرد منتخب در نظر گرفته می‌شود. به‌این‌ترتیب، با استفاده از این روش، افراد با عملکرد بهتر احتمال بیشتری برای مشارکت در ایجاد نسل بعدی خواهند داشت.

$$\mathcal{X}_{\text{selected}} = \arg\max_{x_{i_j} \in T} \mathcal{H}\left(\mathcal{X}_{i_j}\right) \quad (۴)$$

پس از انتخاب نمونه‌هایی با سطح سازگاری بیشتر در جمعیت فعلی، دو فرایند تکاملی ترکیب و جهش بر روی آن نمونه‌ها اعمال می‌شود (خط ۷). استفاده درست از عملیات تکاملی سبب بهبود سازگاری افراد در نسل‌های بعدی خواهد شد. نسل جدید ایجادشده توسط فرایندهای تکاملی، جایگزین افراد در نسل قبلی می‌شود (خط ۸). پس از ارزیابی میزان سازگاری افراد در نسل جدید، سازگارترین فرد در نسل کنونی با بهترین فرد در نسل‌های گذشته مقایسه می‌شود و در صورت برتری، به‌عنوان بهترین پاسخ در نظر گرفته خواهد شد (خط ۹). تا زمانی که تمامی نسل‌ها ایجاد شوند، این مراحل تکرار خواهند شد و درنهایت بهترین فرد در میان نسل‌ها به‌عنوان پاسخ نهایی GP در نظر گرفته می‌شود (خط ۱۱).

الگوریتم ۲: الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک (GP)

1. Input: splited_data$_j$, s$_j \in$ StartingPoints, e$_j \in$ EndingPoints
2. Output: exp $_j$ (mathematical expression)
3. $\mathcal{P}_0 \leftarrow$ Choose an initial random population of individuals
4. for $i = 1$ to Generation No do
5. $\mathcal{H}(\mathcal{X}_i) \leftarrow$ Evaluate the fitness of the individuals in $\mathcal{P}_i$
6. $\mathcal{S} \leftarrow$ Select the best individuals in $\mathcal{P}_i$ to be used by the genetic operators
7. $\mathcal{U} \leftarrow$ Create new individuals via crossover and mutation in $\mathcal{S}$ until the population is complete
8. $\mathcal{P}_{i+1} \leftarrow \mathcal{U}$
9. Update Best_individual
10. end for
11. exp $_j \leftarrow$ Best_individual

۲-۳- بازنمایی خروجی توابع GP

مدل سازنده PPG با بهره‌گیری از توابع مختلفی که توسط GP ایجادشده است، ساخته می‌شود. این توابع به‌صورت عبارت ۵

[1] Pessimistic Error Estimate

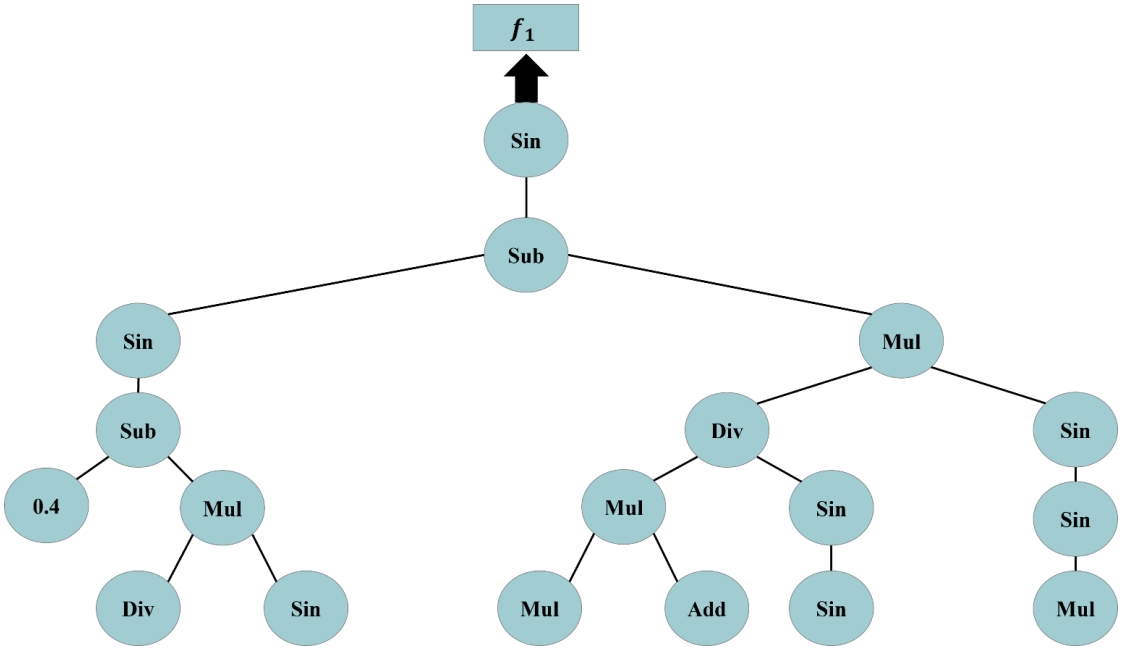
قابل‌بیان است که در آن f_i تابع سازنده ناحیه i سیگنال PPG می‌باشد. هر یک از توابع f_i در حقیقت بهترین فرد در کل نسل‌های ایجادشده توسط برنامه‌نویسی ژنتیک به ازای آن ناحیه می‌باشد. استفاده از این شیوه، منجر به ساخت یک سیگنال PPG با دقت و بهینگی بیشتر توسط GP خواهد شد.

$$Synthetic\ PPG = \{f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_n\} \quad (۵)$$

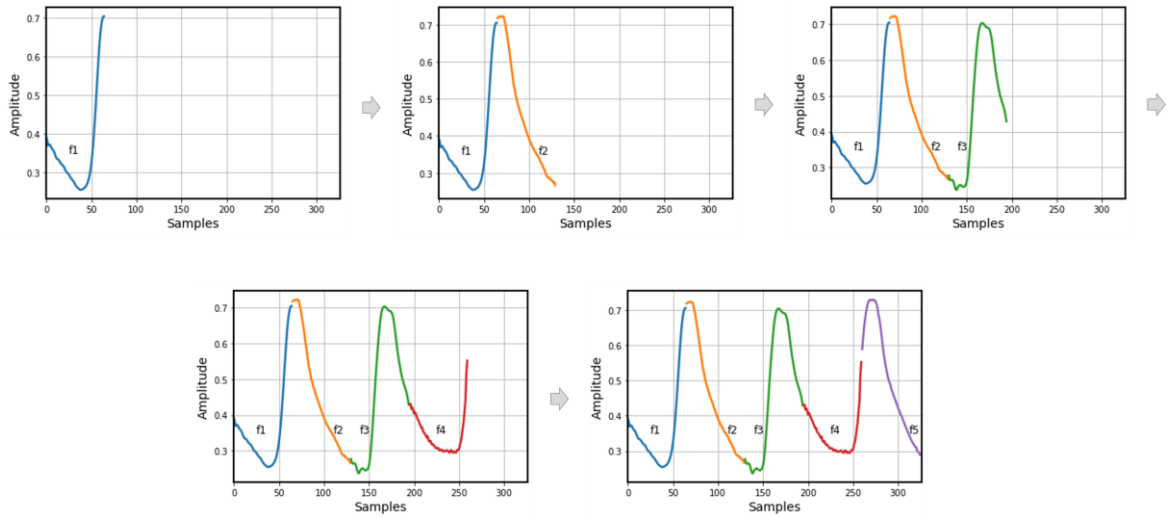
به‌عنوان نمونه، عبارت f_1، بهترین فرد در اجرای GP به ازای بخش اول سیگنال PPG اصلی می‌باشد که ترکیبی از عملگرهای حسابی و هندسی است و به‌طور مختصر به‌صورت عبارت ۶ تعریف می‌شود. برای درک بیشتر از شیوهٔ عملکرد توابع ایجادشده توسط GP، یک نمایش از درخت GP توسط تابع f_1 در شکل ۳ نشان داده‌شده است.

$$f_1 = \sin(\sin(0.4 - ((0.38 \times (x - (\cos(\dots \cos((-0.74 \times x) + 0.49 \dots \quad (۶)$$

در این روش، هر زیر تابع f_i بر اساس بخشی از سیگنال واقعی PPG که به صورت مجزا مشخص شده است، ایجاد می شود. فرایند GP تضمین می‌کند که هر تابع به صورت اختصاصی برای تولید بخش تعیین شده از سیگنال PPG آموزش داده می‌شود و با بخش‌های دیگر همپوشانی نخواهد داشت. هر یک از توابع به‌دست‌آمده به‌صورت مجزا اجرا می‌شوند و درنهایت خروجی آن‌ها جمع‌آوری‌شده و یک سیگنال مصنوعی PPG مشابه با سیگنال اصلی را تولید می‌کنند. در شکل ۴ فرایند تولید گام‌به‌گام سیگنال مصنوعی PPG نمایش داده‌شده است.



شکل ۳. مثالی از درخت GP برای تابع f_1 که متشکل از عملگرهای (+,−,*,/) و (sin, cos) می‌باشد.



شکل ۴. ایجاد گام‌به‌گام یک سیگنال PPG مصنوعی با بهره‌گیری از توابع بهینه‌سازی شده تولیدشده توسط برنامه‌نویسی ژنتیک

۳- بحث و نتایج

در این بخش، مدل پیشنهادی، به‌طور کامل موردبررسی و ارزیابی قرارگرفته است. در این روش به جهت ایجاد مدل سازنده، از قسمتی از سیگنال PPG که شامل سه پیک سیستولیک است استفاده می‌شود. دادهٔ PPG مورداستفاده در این روش از مجموعه داده MIMIC-III [۳۴] می‌باشد. این مجموعه داده شامل سیگنال‌های حیاتی فرد اعم از ECG و PPG از ۳۰۰۰۰ بیمار با نرخ نمونه‌برداری ۱۲۵ کیلوهرتز می‌باشد. به جهت افزایش دقت مدل، سیگنال به ۵ ناحیه مساوی حاوی ۶۵ نمونه تقسیم می‌شود. GP بر روی نواحی سیگنال با نقاط شروع ($startingPoint_j$) و پایان ($endingPoint_j$) اجرا می‌شود. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، خروجی هر فرایند GP یک عبارت ریاضی (exp) است که این عبارت ریاضی در حقیقت سازگارترین برنامه در طی نسل‌های مختلف GP در بین دیگر برنامه‌های ایجادشده می‌باشد و قادر به ایجاد آن بخش از سیگنال PPG با کمترین خطا است. در جدول ۱ تنظیمات اولیه GP در جهت تحقق این مدل نمایش داده‌شده است که این مقادیر بر اساس آزمایشات متعدد به‌دست‌آمده است. پس از اجرای کامل GP به ازای تمامی نواحی سیگنال PPG، مدل‌ها به‌صورت $\mathcal{F} = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$ قرار خواهند گرفت. در جدول ۲ جزییات اجرای هر یک از توابع f شرح داده‌شده است. تمام پیاده‌سازی‌ها در سیستمی با مشخصات 11th Gen Intel Core i7 11800H، رم 32G انجام‌شده است. برای پیاده‌سازی برنامه‌نویسی ژنتیک، از پکیج DEAP[۱] در پایتون استفاده‌شده است [۳۵]. میزان دقت مدل سازنده ایجادشده توسط برنامه‌نویسی ژنتیک توسط پارامترهای تابع میانگین مربعات خطا (MSE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون برای کل بازه سیگنال مورد ارزیابی قرارگرفته شده است.

تابع MSE یکی از پرکاربردترین توابع برای ارزیابی میزان دقت نتایج تولیدشده در مدل‌های رگرسیونی است. کمینه‌بودن MSE و RMSE به معنای دقت بیشتر مدل در حل مسئله می‌باشد. در عبارت ۷ فرمول MSE نشان‌داده‌شده است. n طول سیگنال PPG می‌باشد. $F_r(n)$ و $F_s(n)$ به ترتیب سیگنال اصلی PPG و سیگنال تولیدشده PPG است. همین‌طور با اندازه‌گیری جذر تابع MSE، مقدار RMSE به دست خواهد آمد (عبارت ۸). ضریب همبستگی پیرسون نیز یک معیار آماری است که میزان رابطه خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند که در عبارت ۹ نمایش داده‌شده است [۳۶].

جدول ۱. تنظیمات اعمال‌شده بر پارامترهای GP در جهت ایجاد مدل سازنده PPG

پارامتر	مقدار
تعداد جمعیت (Population size)	۴۰۰
تعداد نسل‌ها (No. of Generation)	۱۷۰۰
توابع استفاده‌شده (Function set)	Add-Sub-Mul-Div-Cos-Sin
بیشترین عمق درخت‌ها (Max depth of trees)	۴
انتخاب (Selection)	تورنمنت با سایز ۳
جهش (Mutation)	۰٫۲ (یکنواخت (Uniform))
ترکیب (Crossover)	۰٫۷۸ (تک نقطه (one point))

جدول ۲. جزییات مدل‌های ایجادشده توسط GP به ازای مجموعه $\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$

نام زیر تابع	زمان اجرای GP(ثانیه)	طول تابع
f_1	۳۲۹٫۰۶	۱۴۱۳
f_2	۷۶۱٫۱۷	۱۶۱۸
f_3	۶۳۵٫۴۶	۱۶۸۵
f_4	۶۲۵٫۶۲	۱۸۵۸
f_5	۸۴۱٫۹۹	۱۹۶۹

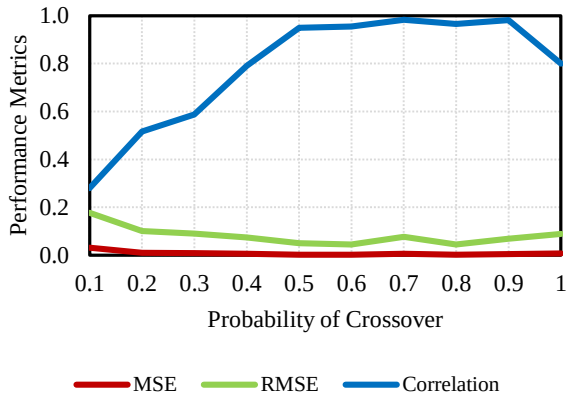
$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(F_r(i) - F_s(i)\right)^2 \quad (۷)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (۸)$$

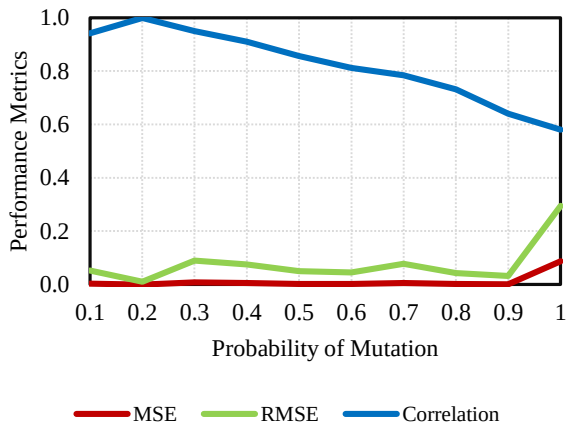
$$Corr(F_r, F_s) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(F_{r_i} - \overline{F_r})(F_{s_i} - \overline{F_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(F_{r_i} - \overline{F_r})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(F_{s_i} - \overline{F_s})^2}} \quad (۹)$$

در فرایند ایجاد یک مدل سازنده PPG با بهینگی و دقت مناسب توسط برنامه‌نویسی ژنتیک، تنظیمات مختلفی بر روی پارامترهای کلیدی GP اعمال‌شده است تا به عملکرد قابل‌قبول توسط مدل سازنده ایجادشده دست‌یافت. با آزمایش مقادیر مختلف احتمال وقوع فرآیند ترکیب، مقدار بهینهٔ آن به‌عنوان ۰٫۷۸ تعیین‌شده است (شکل ۵). سپس برای یافتن بهترین احتمال وقوع فرایند جهش، مقادیر مختلفی از ۰٫۱ تا ۱ با گام ۰٫۱ مورد بررسی قرارگرفته شده است. برای ارزیابی این آزمایشات از معیارهای MSE، RMSE و ضریب همبستگی استفاده‌شده است (شکل ۶).

[۱] Distributed Evolutionary Algorithm Package



شکل ۵. تغییرات ارزیابی در پارامتر احتمال در فرایند تکاملی ترکیب در بازهٔ ۰٫۱ تا ۱. نمودار نشان می‌دهد که مقدار احتمال فرایند ترکیب ۰٫۷۸، بهترین نتیجه را به دست آورده است.



شکل ۶. تغییرات ارزیابی در پارامتر احتمال در فرایند تکاملی جهش در بازهٔ ۰٫۱ تا ۱. نمودار نشان می‌دهد که مقدار احتمال جهش ۰٫۲، بهترین نتیجه را به دست آورده است.

در برنامه‌نویسی ژنتیک تعداد نسل‌ها و اندازه جمعیت نیز به‌عنوان پارامترهای مهم در نظر گرفته می‌شوند. در این روش GP با تعداد نسل‌های مختلف از ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ اجراشده و نتایج ارزیابی در جدول ۳ ثبت‌گردیده است. همین‌طور در جدول ۴ نتایج تغییرات در تعداد افراد در جمعیت نشان داده‌شده است. تحلیل این آزمایشات این امکان را می‌دهد تا در بهترین تنظیمات برای GP اعمال شود.

پس از تجزیه‌وتحلیل گام‌به‌گام نتایج بالا و انتخاب مناسب‌ترین تنظیمات، مدل نهایی سازنده سیگنال PPG مصنوعی به MSE ۰٫۰۰۰۱، RMSE ۰٫۰۱ و ضریب همبستگی ۰٫۹۹۹ دست‌یافته است. در شکل ۷ میزان همبستگی $F_r(n)$ و $F_s(n)$ مشاهده می‌شود و در شکل ۸ میزان شباهت سیگنال تولیدشده PPG با سیگنال اصلی نشان داده‌شده است.

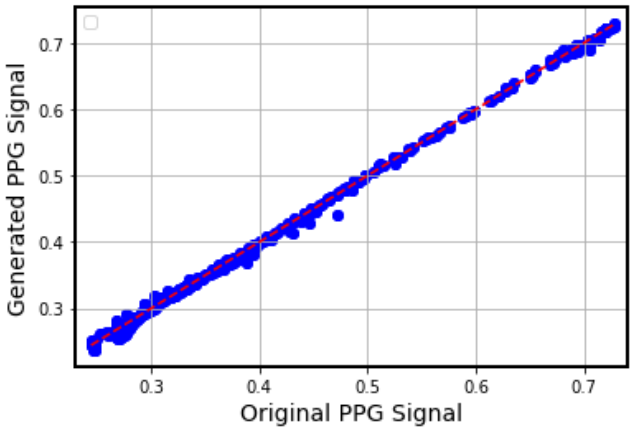
جدول ۳. تغییرات در تعداد نسل‌ها در برنامه‌نویسی ژنتیک: پس از گذشت ۱۷۰۰ نسل، بهترین نتیجه حاصل‌شده است.

تعداد نسل‌ها	MSE	RMSE	Correlation
۱۰۰	۰٫۰۰۸۴۰	۰٫۰۹۱۶۵	۰٫۶۱۸۱۰
۲۰۰	۰٫۰۰۶۵۰	۰٫۰۸۰۶۲	۰٫۷۳۶۰۱
۳۰۰	۰٫۰۰۵۱۰	۰٫۰۷۱۴۱	۰٫۸۱۲۹۶
۴۰۰	۰٫۰۰۳۰۰	۰٫۰۵۴۷۷	۰٫۹۳۵۰۰
۵۰۰	۰٫۰۰۲۸۰	۰٫۰۵۳۰۰	۰٫۹۳۸۹۲
۶۰۰	۰٫۰۰۲۷۰	۰٫۰۵۲۹۱	۰٫۹۴۰۴۲
۷۰۰	۰٫۰۰۳۱۰	۰٫۰۵۵۶۷	۰٫۹۲۷۲۱
۸۰۰	۰٫۰۰۳۵۰	۰٫۰۵۹۱۶	۰٫۹۱۴۷۹
۹۰۰	۰٫۰۰۳۰۱	۰٫۰۵۴۸۶	۰٫۹۳۷۴۹
۱۰۰۰	۰٫۰۰۲۶۵	۰٫۰۵۱۴۷	۰٫۹۴۸۰۰
۱۱۰۰	۰٫۰۰۲۵۵	۰٫۰۵۰۴۹	۰٫۹۵۷۸۷
۱۲۰۰	۰٫۰۰۲۳۴	۰٫۰۴۳۷۳	۰٫۹۶۵۰۵
۱۳۰۰	۰٫۰۰۲۰۰	۰٫۰۴۴۷۲	۰٫۹۸۰۰۰
۱۴۰۰	۰٫۰۰۱۹۰	۰٫۰۴۳۵۸	۰٫۹۸۵۰۶
۱۵۰۰	۰٫۰۰۰۹۱	۰٫۰۳۰۱۶	۰٫۶۹۷۳۴
۱۶۰۰	۰٫۰۰۰۷۳	۰٫۰۲۷۰۱	۰٫۷۴۱۹۷
۱۷۰۰	**۰٫۰۰۰۱۰**	**۰٫۰۱۰۰۰**	**۰٫۹۹۹۹۸**
۱۸۰۰	۰٫۰۰۰۳۵	۰٫۰۱۸۷۰	۰٫۹۱۴۰۶
۱۹۰۰	۰٫۰۰۰۲۵	۰٫۰۱۵۸۱	۰٫۹۶۸۰۱
۲۰۰۰	۰٫۰۰۰۲۴	۰٫۰۱۵۴۹	۰٫۹۸۰۶۵

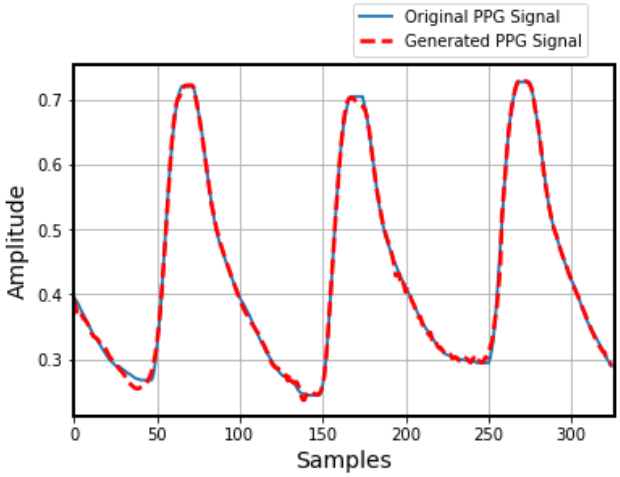
جدول ۴. تغییرات در تعداد افراد در جمعیت: تعداد ۴۰۰ فرد در جمعیت، بهترین نتایج را در میان دیگر تعدادها ارائه می‌دهد.

تعداد جمعیت	MSE	RMSE	Correlation
۱۰۰	۰٫۰۰۴۵۱	۰٫۰۶۷۱۵	۰٫۸۸۳۵۱
۲۰۰	۰٫۰۰۳۴۵	۰٫۰۵۸۷۳	۰٫۹۳۵۵۵
۳۰۰	۰٫۰۰۲۵۰	۰٫۰۵۰۰۰	۰٫۹۴۵۰۳
۴۰۰	**۰٫۰۰۰۱۰**	**۰٫۰۱۰۰۰**	**۰٫۹۹۹۹۸**
۵۰۰	۰٫۰۰۲۰۱	۰٫۰۴۴۸۳	۰٫۹۵۶۴۱
۶۰۰	۰٫۰۰۳۰۱	۰٫۰۵۴۸۶	۰٫۹۳۶۶۸
۷۰۰	۰٫۰۰۳۸۲	۰٫۰۶۱۸۰	۰٫۹۰۱۰۰
۸۰۰	۰٫۰۰۴۶۲	۰٫۰۶۷۹۹	۰٫۸۹۱۲۲
۹۰۰	۰٫۰۰۲۲۰	۰٫۰۴۶۹۰	۰٫۹۴۰۰۰
۱۰۰۰	۰٫۰۰۳۲۴	۰٫۰۵۶۹۹	۰٫۹۱۸۸۸

مدل سازندهٔ PPG تولیدشده توسط برنامه‌نویسی ژنتیک در روش پیشنهادی در مدت‌زمان ۵۳ دقیقه ایجادشده است. با توجه به تعداد پارامترهای مدل درمجموع اندازهٔ مدل سازنده تنها ۰٫۰۶۵ مگابایت می‌باشد. مدل حاصل برخلاف مدل‌های سازندهٔ ایجادشده توسط شبکه‌های عصبی به دلیل پیچیدگی و تعداد پارامترهای کمتر، برای دستگاه‌هایی با منابع محدود ازجمله دستگاه‌های پوشیدنی بسیار مناسب است. همان‌طور که گفته شد هدف از ارائه این روش، ایجاد یک مدل سازنده سیگنال PPG مصنوعی با بهینگی مناسب می‌باشد که متعاقباً بایستی مدل دارای مقدار MSE و RMSE حداقل و ضریب همبستگی حداکثر باشد. یک سیگنال PPG مصنوعی ایده آل دارای MSE و RMSE صفر و ضریب همبستگی ۱ می‌باشد.



شکل ۷. میزان همبستگی سیگنال تولیدشده توسط GP با سیگنال اصلی PPG در این تصویر نشان داده‌شده است.



شکل ۸. موج سیگنال PPG مصنوعی و موج اصلی سیگنال که مدل بر اساس آن ایجادشده است. در این تصویر میزان شباهت بالای سیگنال PPG تولیدشده توسط GP با سیگنال اصلی نشان داده‌شده است.

تاکنون روش مشابه‌ای در جهت ایجاد مدل سازنده سیگنال PPG توسط برنامه‌نویسی ژنتیک ارائه نشده است لذا برای ایجاد دیدگاه بهتر، روش پیشنهادی با دیگر روش‌های مشابه رگرسیونی در جدول ۵، با استفاده از مجموعه‌داده‌های گوناگون مقایسه شده است. به عنوان نمونه در مجموعه‌داده MIMIC-III مقادیر MSE، RMSE و ضریب همبستگی در روش پیشنهادی توسط تانگ و همکاران به ترتیب، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۳۱۶ و ۰٫۹۸۸ است [۱۷]. این نتایج برای روش سالوشنکو و همکاران، ۰٫۰۰۰۱۸، ۰٫۰۱۳۶ و ۰٫۹۳۰ می‌باشد [۳۷]. ۰٫۰۰۰۱۳، ۰٫۰۱۱۵ و ۰٫۹۴۲ برای روش ارائه‌شده توسط لو و همکاران [۱۶] و ۰٫۰۰۰۲۵، ۰٫۰۱۵۹ و ۰٫۹۲۶ نیز برای روش پیشنهادی وانگ و همکاران می‌باشد [۱۵].

نتایج نشان می‌دهد که به دلیل آنکه مدل‌های ارائه‌شده در روش‌های موجود، با استفاده از صفات هندسی سیگنال و وابسته به دانش ریاضی افراد تخمین زده شده‌اند، تنها در یک نمونه خاص از سیگنال PPG بهتر عمل می‌کنند؛ اما با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک، به‌صورت پویا امکان ایجاد سیگنال‌های PPG در تنوع بالا با ترکیب توابع ساده ریاضی و بدون هیچ‌گونه وابستگی امکان‌پذیر است [۳۸]. به نظر می‌رسد که به دلیل ویژگی‌های ذکرشده، سیگنال تولیدشده در روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها دارای کمترین MSE و RMSE و بیشترین مقدار ضریب همبستگی می‌باشد.

۴- جمع‌بندی

در این مقاله، باتوجه‌به کمبود داده‌های سیگنال PPG و عدم تنوع آن‌ها در پایگاه‌های داده مرتبط، یک راهکار مبتنی بر مدل‌سازی سیگنال PPG ارائه‌شده است که با بهره‌گیری از برنامه‌نویسی ژنتیک، تعدادی مدل با استفاده از یک سیگنال PPG اصلی ساخته شود. درنهایت، اجرای این مدل‌ها منجر به تولید یک سیگنال PPG مصنوعی خواهد شد. استفاده از GP در این روش امکان تولید مدل‌هایی بادقت قابل‌قبول و بهینگی مناسب را فراهم می‌کند. مدل سازنده ارائه‌شده در این مقاله، قابلیت اجرا بر روی دستگاه‌هایی با منابع محاسباتی محدود را خواهد داشت. در این روش دو پارامتر مهم مقیاس‌پذیری و دقت، به طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. به جهت ارزیابی مدل ارائه‌شده، از معیارهای MSE، RMSE و ضریب همبستگی استفاده‌شده است. این روش نه‌تنها منجر به افزایش دقت مدل سازنده شده به دلیل استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک و ساختار درختی، حجم محاسباتی نیز بهبودیافته است. این پژوهش یک روش نوآورانه را برای تولید سیگنال PPG مشابه با سیگنال‌های واقعی ارائه می‌دهد که با بهینه‌ترین پارامترها، سیگنالی بادقت مطلوب تولید کند.

جدول ۵. بررسی و ارزیابی سیگنال‌های PPG در مجموعه داده‌های گوناگون با استفاده از روش‌های رگرسیونی موجود.

مجموعه‌داده	نویسنده	روش	MSE	RMSE	Correlation
MIMIC III	روش پیشنهادی	مبتنی بر GP	۰,۰۰۰۱۰	۰,۰۱۰۰۰	۰,۹۹۹۹۸
	تانگ و همکاران [۱۷]	مبتنی بر توابع گاوسی	۰,۰۰۱۰۰	۰,۰۳۱۶۰	۰,۹۸۸۳۱
	سالوشنکو و همکاران [۳۷]	مبتنی بر توابع گاوسی و لگاریتم نرمال	۰,۰۰۰۱۸	۰,۰۱۳۶۰	۰,۹۳۰۲۲
	لو و همکاران [۱۶]	مبتنی بر توابع گاوسی و لگاریتم نرمال	۰,۰۰۰۱۳	۰,۰۱۱۵۰	۰,۹۴۲۰۰
	وانگ و همکاران [۱۵]	مبتنی بر توابع گاوسی	۰,۰۰۰۲۵	۰,۰۱۵۹۰	۰,۹۲۶۰۰
WristPPG	روش پیشنهادی	مبتنی بر GP	۰,۰۰۰۱۴	۰,۰۱۱۸۰	۰,۹۸۹۷۰
	تانگ و همکاران [۱۷]	مبتنی بر توابع گاوسی	۰,۰۰۴۸۱	۰,۰۶۳۰۰	۰,۸۷۱۲۱
	سالوشنکو و همکاران [۳۷]	مبتنی بر توابع گاوسی و لگاریتم نرمال	۰,۰۰۵۱۱	۰,۰۷۱۴۰	۰,۷۹۳۳۳
	لو و همکاران [۱۶]	مبتنی بر توابع گاوسی و لگاریتم نرمال	۰,۰۰۴۴۳	۰,۰۶۶۳۰	۰,۸۷۷۸۸
	وانگ و همکاران [۱۵]	مبتنی بر توابع گاوسی	۰,۰۰۵۹۰	۰,۰۷۶۸۰	۰,۷۱۳۰۰
BioSec.Lab	روش پیشنهادی	مبتنی بر GP	۰,۰۰۰۲۱	۰,۰۱۴۴۰	۰,۹۵۲۰۰
	تانگ و همکاران [۱۷]	مبتنی بر توابع گاوسی	۰,۰۰۴۹۰	۰,۰۷۰۰۰	۰,۸۵۵۳۳
	سالوشنکو و همکاران [۳۷]	مبتنی بر توابع گاوسی و لگاریتم نرمال	۰,۰۰۴۷۵	۰,۰۶۸۹۲	۰,۸۶۱۲۶
	لو و همکاران [۱۶]	مبتنی بر توابع گاوسی و لگاریتم نرمال	۰,۰۰۴۶۳	۰,۰۶۸۰۴	۰,۸۶۶۰۰
	وانگ و همکاران [۱۵]	مبتنی بر توابع گاوسی	۰,۰۰۵۰۹	۰,۰۷۱۳۴	۰,۸۱۱۱۲
PPG-BP	روش پیشنهادی	مبتنی بر GP	۰,۰۰۰۱۶	۰,۰۴۰۰۰	۰,۹۷۴۳۲
	تانگ و همکاران [۱۷]	مبتنی بر توابع گاوسی	۰,۰۰۲۴۳	۰,۰۴۹۲۹	۰,۹۰۱۱۱
	سالوشنکو و همکاران [۳۷]	مبتنی بر توابع گاوسی و لگاریتم نرمال	۰,۰۰۴۹۱	۰,۰۷۰۰	۰,۸۵۲۲۵
	لو و همکاران [۱۶]	مبتنی بر توابع گاوسی و لگاریتم نرمال	۰,۰۰۴۳۴	۰,۰۶۵۵۸	۰,۸۸۷۰۱
	وانگ و همکاران [۱۵]	مبتنی بر توابع گاوسی	۰,۰۰۵۴۰	۰,۰۷۳۴۸	۰,۷۶۳۳۳

در حال حاضر، استفاده از عملگرهای ساده در مدل‌های GP، ازجمله + ، -، *، /، sin و cos، محدودیت‌هایی در ایجاد مدل‌های پیچیده‌تر و بادقت بالا ایجاد می‌کند. در پژوهش‌های آتی، تلاش بر این است تا این دست از محدودیت‌ها را کاهش داده و مدل‌های پیچیده‌تر و مؤثرتری را ایجاد نمود. علی‌رغم ویژگی‌های مثبت برنامه‌نویسی ژنتیک در این روش، ضعف‌هایی در دقت مدل همچنان مشهود است؛ بنابراین، تلاش برای افزایش دقت این روش از اهمیت بسیاری برخوردار خواهد بود. در آینده، با استفاده از این روش می‌توان به شبیه‌سازی مدل‌های آریتمی دار نیز پرداخت. وجود انواع مدل‌های سازنده PPG منجر به ارتقای حجم و کیفیت پایگاه‌های داده مرتبط خواهد شد که همین مسئله می‌تواند اطلاعات بیشتری را در اختیار پژوهشگران قرار دهد و همچنین توانایی عملکرد مدل‌های یادگیری عمیق را افزایش دهد.

مراجع

[1] M. Nardelli and R. Bailón, "Advances in Wearable Photoplethysmography Applications in Health Monitoring," (in eng), *Sensors (Basel)*, vol. 23, no. 16, Aug 10 2023, doi: https://doi.org/10.3390/s23167064.

[2] K. B. Kim and H. J. Baek, "Photoplethysmography in Wearable Devices: A Comprehensive Review of Technological Advances, Current Challenges, and Future Directions," *Electronics*, vol. 12, no. 13, p. 2923, 2023, doi: https://doi.org/10.3390/electronics12132923.

[3] B. Tarifi, A. Fainman, A. Pantanowitz, and D. M. Rubin, "A Machine Learning Approach to the Non-Invasive Estimation of Continuous Blood Pressure Using Photoplethysmography," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 6, p. 3955, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/13/6/3955.

[4] M. A. Noor Faris Ali, "An efficient hybrid LSTM-ANN joint classification-regression model for PPG based blood pressure monitoring," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 84, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.104782.

[5] H. a. S. Asgharnezhad, Afshar and Bakhshayeshi, Ivan and Alizadehsani, Roohallah and Chamaani, Somayyeh and Alinejad-Rokny, Hamid, "Improving PPG Signal Classification with Machine Learning: The Power of a Second Opinion," 2023, pp. 1-5, doi: https://doi.org/10.1109/DSP58604.2023.10167869.

[6] D. a. C. Jarchi, Alex, "Description of a Database Containing Wrist PPG Signals Recorded during Physical Exercise with Both Accelerometer and Gyroscope Measures of Motion," *Data*, vol. 2, 2016, doi: 10.3390/data2010001.

[7] U. Yadav, S. N. Abbas, and D. Hatzinakos, "Evaluation of PPG Biometrics for Authentication in Different States," *2018 International Conference on Biometrics (ICB)*, pp. 277-282, 2017, doi: https://doi.org/10.1109/ICB2018.2018.00049.

[8] Y. a. C. Liang, Zhencheng and Liu, Guiyong and Elgendi, Mohamed, "A new, short-recorded photoplethysmogram dataset for blood pressure monitoring in China," *Scientific Data*, vol. 5, p. 180020, 2018, doi: https://doi.org/10.1038/sdata.2018.20.

[9] A. a. I. Reiss, Ina and Schmidt, Philip and Van Laerhoven, Kristof, "Deep PPG: Large-Scale Heart Rate Estimation with Convolutional Neural Networks," *Sensors*, vol. 19, p. 3079, 2019, doi: https://doi.org/10.3390/s19143079.

[10] O. a. R. Mazumder, Dibyendu and Bhattacharya, Sakyajit and Sinha, Aniruddha and Pal, Arpan, "Synthetic PPG generation from haemodynamic model with baroreflex autoregulation: a Digital twin of cardiovascular system," in *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*

Computing, vol. 60, pp. 447-469, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.050.

[25] F. A.-M. Majid Sepahvand, "A novel multi-lead ECG personal recognition based on signals functional and structural dependencies using time-frequency representation and evolutionary morphological CNN," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 68, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102766.

[26] m. amintoosi and H. Ezzati, "The aware genetic algorithm of the best member, applied to graph coloring and metric-dimension of the graph problems," *Journal of Information and Communication Technology*, vol. 12, no. 43, pp. 143-154, 2020. [Online]. Available: http://rimag.ir/fa/Article/13601.

[27] S. Katoch, Chauhan, S.S. & Kumar, V, "A review on genetic algorithm: past, present, and future," *Multimed Tools Appl*, vol. 80, pp. 8091–8126 2021, doi: https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6.

[28] S. Bakhtiari and M. Khosroshahi, "A Multi-Objective Differential Evolutionary Algorithm-based Approach for Resource Allocation in Cloud Computing Environment," *Journal of Information and Communication Technology*, vol. 14, no. 51, pp. 113-128, 2022. [Online]. Available: http://rimag.ir/fa/Article/39235.

[29] F. A.-M. Majid Sepahvand, "A novel representation in genetic programming for ensemble classification of human motions based on inertial signals," *Expert Systems with Applications*, vol. 185, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115624.

[30] L. a. J. Tan, Jean, *Image Processing Basics*. 2019.

[31] m. nikseresht and M. Raji, "A Task Mapping and Scheduling Algorithm based on Genetic Algorithm for Embedded System Design," *Journal of Information and Communication Technology*, vol. 13, no. 47, pp. 186-197, 2021. [Online]. Available: http://rimag.ir/fa/Article/16369.

[32] W. K. W. Pauline Wong, Filbert H. Juwono, Basil Andy Lease, Lenin Gopal, I.M. Chew, "Sensor abnormality detection in multistage compressor units: A "white box" approach using tree-based genetic programming," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 5, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100209.

[33] M. P. Aghababa and a. b. baghbaderani, "Routing of Multipartite Computer Networks Using Ant Genetic Algorithm," *Journal of Information and Communication Technology*, vol. 9, no. 31, pp. 1-12, 2017. [Online]. Available: http://rimag.ir/fa/Article/8199.

[34] A. E. Johnson *et al.*, "MIMIC-III, a freely accessible critical care database," (in eng), *Sci Data*, vol. 3, p. 160035, May 24 2016, doi: https://doi.org/10.1038/sdata.2016.35.

[35] B. F. Jernej Zupančič, Matjaž Gams, "Genetic-programming-based multi-objective optimization of strategies for home energy-management systems," *Energy*, vol. 203, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117769.

[36] A. Kianimajd *et al.*, "Comparison of different methods of measuring similarity in physiologic time series," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, pp. 11005-11010, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2479.

[37] A. a. P. Sološenko, Andrius and Marozas, Vaidotas and Sörnmo, Leif, "Photoplethysmogram Modeling During Paroxysmal Atrial Fibrillation," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 81, 2017, doi: 10.22489/CinC.2017.049-011.

[38] M. a. A.-M. Feli, Fardin, "12 lead Electrocardiography signals compression by a new genetic programming based mathematical modeling algorithm," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 54, pp. 1-20, 2019, doi: 10.1016/j.bspc.2019.101596.

Society (EMBC), 2019, pp. 5024-5029, doi: https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856691.

[11] T. W. C. Fanny, "Deep Learning for Imbalance Data Classification using Class Expert Generative Adversarial Network," *Procedia Computer Science*, vol. 135, pp. 60-67, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.150.

[12] J. M. Johnson, Khoshgoftaar, T.M, "Survey on deep learning with class imbalance," *Journal of Big Data*, vol. 6, 2019, doi: https://doi.org/10.1186/s40537-019-0192-5.

[13] O. a. C. Sayadi, Gari, "Synthetic ECG Generation and Bayesian Filtering Using a Gaussian Wave-Based Dynamical Model," *Physiological measurement*, vol. 31, pp. 1309-29, 2010, doi: https://doi.org/10.1088/0967-3334/31/10/002.

[14] D. Martin-Martinez, P. Casaseca-de-la-Higuera, M. Martin-Fernandez, and C. Alberola-Lopez, "Stochastic modeling of the PPG signal: a synthesis-by-analysis approach with applications," (in eng), *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 60, no. 9, pp. 2432-41, Sep 2013, doi: https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2257770.

[15] L. Wang, L. Xu, S. Feng, M. Q. Meng, and K. Wang, "Multi-Gaussian fitting for pulse waveform using Weighted Least Squares and multi-criteria decision making method," (in eng), *Comput Biol Med*, vol. 43, no. 11, pp. 1661-72, Nov 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2013.08.004.

[16] Y. Luo, W. Li, W. Rao, X. Fu, L. Yang, and Y. Zhang, "A New Modeling Method of Photoplethysmography Signal Based on Lognormal Basis," in *International Conference on Internet and Distributed Computing Systems*, 2016.

[17] Q. Tang, Z. Chen, R. Ward, and M. Elgendi, "Synthetic photoplethysmogram generation using two Gaussian functions," (in eng), *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 13883, Aug 17 2020, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-020-69076-x.

[18] M. M. Alankrita Aggarwal, Gopi Battineni, "Generative adversarial network: An overview of theory and applications," *International Journal of Information Management Data Insights*, vol. 1, no. 1, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2020.100004.

[19] E. Brophy, Z. Wang, and T. E. Ward, "Quick and Easy Time Series Generation with Established Image-based GANs," *ArXiv*, vol. abs/1902.05624, 2019, doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.05624.

[20] D. a. T. Kiyasseh, Girmaw Abebe and Le Nguyen Thanh, Nhan and Van, Tan and Thwaites, Louise and Zhu, Tingting and Clifton, David, "PlethAugment: GAN-Based PPG Augmentation for Medical Diagnosis in Low-Resource Settings," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. PP, pp. 1-1, 2020, doi: 10.1109/JBHI.2020.2979608.

[21] J. M. L. Alcaraz and N. Strodthoff, "Diffusion-based conditional ECG generation with structured state space models," (in eng), *Comput Biol Med*, vol. 163, p. 107115, Sep 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.107115.

[22] M. A. Quiroz-Juárez, O. Jiménez-Ramírez, R. Vázquez-Medina, V. F. Breña-medina, J. L. Aragón, and R. A. Barrio, "Generation of ECG signals from a reaction-diffusion model spatially discretized," *Scientific Reports*, vol. 9, 2019, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-019-55448-5.

[23] Q. Zhang, D. Zhou, and X. Zeng, "Highly wearable cuff-less blood pressure and heart rate monitoring with single-arm electrocardiogram and photoplethysmogram signals," (in eng), *Biomed Eng Online*, vol. 16, no. 1, p. 23, Feb 6 2017, doi: https://doi.org/10.1186/s12938-017-0317-z.

[24] M. M. E. Maryam Amir Haeri, Gianluigi Folino, "Statistical genetic programming for symbolic regression," *Applied Soft*

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 55-66

Analysis and Evaluation of the Impact of Sub-Indicators of e-Government Development Index (EGDI) and e-Participation Index (EPI) Using Time Series Data of the Middle East Countries During the Years 2003 to 2022

Atefeh Farazmand[1], Farshad Hakamizadeh[2*]

[1] Head of Department of Digital Transformation Planning Studies, ICT Research Institute (ITRC), Tehran, Iran
[2] Faculty Member, Department of Digital Transformation Planning Studies, ICT Research Institute (ITRC), Tehran, Iran

Received: 07 February 2024, Revised: 27 July 2024, Accepted: 14 December 2024
Paper type: Research

Abstract

Electronic and intelligent government aims to connect citizens with various public institutions to provide automated services that reduce cost and time while improving service delivery performance and effectiveness. As a result, measuring e-government performance has become increasingly important to monitor progress and identify opportunities for enhancement across different aspects of citizens' lives. This study analyzes the performance of the e-government index in the Middle East to explore ways to improve the country's standing. Specifically, it examines the relationship between the main sub-indices of e-government and e-participation using Pearson correlation analysis and the Kolmogorov-Smirnov test to assess data normality, conducted via SPSS software. The findings indicate a significant relationship between the e-government development index and the e-participation index. Among the e-government sub-indices, online services and communication infrastructure are strongly correlated, while the human capital sub-index shows no significant relationship with online services and only a weak correlation with communication infrastructure. Moreover, an analysis of the performance of Middle Eastern countries in these indices from 2003 to 2022 reveals that the United Arab Emirates had the highest overall performance, whereas Libya showed the weakest.

Keywords: e-government index (EGDI), e-participation (EPI), online services sub-index (OSI), communication infrastructure sub-index (TII), human resources sub-index (HCI).

* Corresponding Author's email: hakami@itrc.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۵۵ الی ۶۶

ارزیابی تاثیر متقابل زیرشاخص‌های توسعه دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک با بهره‌گیری از داده‌های سری زمانی کشورهای خاورمیانه طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲

عاطفه فرازمند[۱]، فرشاد حکمی‌زاده[۲*]

[۱] مدیر گروه مطالعات برنامه‌ریزی تحول دیجیتال، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

[۲] عضو هیئت علمی گروه مطالعات برنامه‌ریزی تحول دیجیتال، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

دولت الکترونیک و هوشمند چشم‌اندازی است که برای پیونددادن شهروندان به سازمان‌های مختلف دولتی برای دریافت انواع خدمات به‌صورت خودکار با کمک شبکه‌های اطلاعاتی و ارتباطی به‌منظور کاهش هزینه و زمان، بهبود عملکرد و سرعت تحویل و اثربخشی ایجاد شده است. بنابراین اهمیت سنجش عملکرد دولت الکترونیک به‌منظور پایش فعالیت‌ها و یافتن راهکار بهبود روزافزون آن در جنبه‌های مختلف زندگی شهروندان دوچندان می‌شود. در این مقاله به‌منظور بررسی راهکار ارتقا جایگاه کشور به ارزیابی عملکرد شاخص دولت الکترونیک در منطقه خاورمیانه پرداخته شده است. در این راستا ارتباط بین زیرشاخص‌های اصلی دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیکی مدنظر بوده است که با استفاده از آزمون ضریب همبستگی پیرسون و اجرای آزمون کولموگروف- اسمیرنف برای اطمینان از نرمال بودن داده‌ها با کمک نرم‌افزار spss انجام گردیده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد دو شاخص توسعه دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک با یکدیگر رابطه معنادار دارند. در بررسی زیرشاخص‌های توسعه دولت الکترونیک، دو زیرشاخص خدمات برخط و زیرساخت ارتباطی با یکدیگر دارای رابطه مستقیم بوده؛ اما زیرشاخص نیروی انسانی با زیرشاخص خدمات برخط رابطه معنادار نداشته و با زیرشاخص زیرساخت ارتباطی نیز رابطه بسیار ضعیفی دارد. همچنین بررسی کشورهای خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ نشان می‌دهد کشور امارت بهترین عملکرد و کشور لیبی ضعیف‌ترین عملکرد را در این دو شاخص داشته است.

کلیدواژگان: شاخص دولت الکترونیک، مشارکت الکترونیکی، زیرشاخص خدمات برخط، زیرشاخص زیرساخت ارتباطی، زیرشاخص نیروی انسانی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: hakami@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

دولت الکترونیک دیگر تنها یک گزینه نیست، بلکه یک ضرورت برای کشورهایی است که به دنبال حکمرانی بهتر هستند. افراد و سیاست‌ها نقش اصلی را در موفقیت دولت الکترونیک ایفا می‌کنند و فناوری نقش حمایتی، اما حائز اهمیتی دارد؛ ولی بااین‌حال، نمی‌تواند به‌تنهایی مؤثر واقع شود [1]. بسیاری از بخش‌های دولتی در سراسر جهان وقوع انقلاب دیجیتال را پذیرفته‌اند و طیف گسترده‌ای از داده‌ها و اطلاعات را در پورتال‌ها و وب‌سایت‌ها داده قرار داده‌اند تا خدمات واقعی دولت برخط را برای استفاده شهروندان به ارمغان بیاورند. در چنین شرایطی مهندسی مجدد سازمان‌های دولتی اجتناب‌ناپذیر است، اما سازمان‌ها باید تجزیه‌وتحلیل کنند که در این راه به چه نوع مهندسی مجدد فرایندی نیاز دارند. همچنین ارزیابی عملکرد دولت الکترونیک و انجام اقدامات لازم بر اساس این ارزیابی‌ها ضروری است. سازمان‌های موفق، فرهنگ اندازه‌گیری را توسعه می‌دهند، و کارکنان را در مورد معیارهای عملکرد و استفاده از آنها در مدیریت سازمان خود از طریق فرایندهایی که دولت الکترونیک ارائه می‌کند، آموزش می‌دهد [۱]. سازمان‌هایی که دولت الکترونیک را با موفقیت پیاده‌سازی کرده‌اند، دریافته‌اند که اگر سازمان اهداف قابل اندازه‌گیری را تعیین کند در رسیدن به اهداف شتاب بیشتری خواهند داشت. با گسترده تر شدن پیاده سازی دولت الکترونیک در سراسر جهان و بکارگیری افراد، ارزیابی آن در سطح بین‌المللی نیز مطرح گردید و دو مفهوم دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک به طور همزمان بعنوان شاخص‌هایی از پیشرفت این حوزه در بخش سازمانی و فردی بکار گرفته شد. در اوایل دهه ۲۰۰۰، سازمان‌هایی با ماهیت بین‌المللی شروع به انتشار رتبه‌بندی‌ها و گزارش‌های مقایسه‌ای درباره توسعه دولت الکترونیکی ("e-") و مشارکت الکترونیکی کشورها کردند. این گزارش‌ها بیشتر بر آمادگی کشورهای مطرح برای استفاده از جدیدترین فناوری‌های ارتباطاتی و اطلاعاتی در حوزه مدیریت دولتی تمرکز کردند. شناخته شده ترین و گسترده ترین ، گزارش ارائه شده مربوط به سازمان ملل متحد است که هر دوسال یک بار منتشر می‌گردد و حاوی دو شاخص اصلی است: EGDI که سطح توسعه دولت الکترونیک یک کشور را نشان می‌دهد و EPI که تلاش‌های یک کشور برای دستیابی به سطح بالاتری از مشارکت الکترونیک را نشان می‌دهد [۲]. سوال اساسی این است که آیا بین زیرشاخص‌های اندازه‌گیری توسعه دولت الکترونیک رابطه وجود دارد؟ و آیا تغییرات در زیر شاخص‌های اندازه‌گیری دولت الکترونیک بر مشارکت الکترونیک موثر است؟ در این مقاله پس از ارائه برخی از تعاریف اساسی که برای بررسی دقیق تر موضوع ضروری است نگاهی به اثر ابزارهای دولت الکترونیک بر زندگی شهروندان در کشورهای در حال توسعه خواهد داشت. سپس روند پیشرفت کشورهای خاورمیانه در بکارگیری ابزارهای دولت الکترونیک و افزایش مشارکت الکترونیک در سالهای ارائه شده بررسی و مقایسه می‌گردد. همچنین نگاهی به نحوه عملکرد کشور ایران در شاخص‌ها و زیرشاخص‌های مورد مطالعه خواهد داشت و با بررسی ارتباط بین شاخص‌های دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک به سوالات پژوهش پاسخ داده می‌شود.

۱-۱- تعریف دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک

یکی از قدیمی‌ترین تعاریف دولت الکترونیک در سال ۲۰۰۳ توسط سازمان ملل متحد ارائه شده و استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات و به ویژه اینترنت را به عنوان ابزاری برای دستیابی به دولت بهتر می‌داند [۲]. کمیسیون اروپا اصطلاح دولت الکترونیک را تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر بازار مشترک تعریف می‌نماید و معتقد است دولت الکترونیک از فرآیندها و رویه‌های اداری حمایت می‌کند، کیفیت خدمات را بهبود می‌بخشد و کارایی داخلی ادارات دولتی و بخش عمومی را افزایش می‌دهد و خدمات عمومی دیجیتال با تسریع، شفاف سازی، ارزان سازی و کارآمدتر کردن تعاملات مردم با ادارات دولتی، بار اداری را بر مشاغل و شهروندان کاهش می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های دیجیتال به عنوان بخشی از راهبردهای مدرن‌سازی دولت‌ها می‌تواند مزایای اقتصادی و اجتماعی بیشتری را برای جامعه به‌عنوان یک کل ایجاد کند. تحول دیجیتالی دولت یک عنصر کلیدی برای موفقیت بازار است [۳]. دولت الکترونیک به استفاده سازمان‌های دولتی از فناوری‌های اطلاعاتی اشاره دارد که توانایی تغییر و بهبود روابط با شهروندان، کسب‌وکارها و سایر اجزای دولت را دارند. این فناوری‌ها می‌توانند اهداف مختلفی را از قبیل ارائه بهتر خدمات دولتی به شهروندان، بهبود تعاملات با مشاغل و صنعت، توانمندسازی شهروندان از طریق دسترسی به اطلاعات، یا مدیریت کارآمدتر دنبال کنند. منافع دیگری نظیر فساد کمتر، افزایش شفافیت، راحتی بیشتر، رشد درآمد و/یا کاهش هزینه‌ها می‌تواند محصول بکارگیری دولت الکترونیک باشد [۴].

طبق تعریف سازمان ملل متحد، مشارکت الکترونیکی به عنوان یک فرآیند مشارکتی، فراگیر و مشورتی برای تصمیم‌گیری تعریف می‌شود. این نوع تصمیم‌گیری مشتمل بر سه مرحله و اقدام است:

- الف) استفاده از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات به منظور افزایش دسترسی به اطلاعات مفید در راستای بکارگیری در

فرآیندهای مشاوره و تصمیم‌گیری؛

- ب) استفاده از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات برای تقویت و گسترش مشاوره و
- ج) استفاده از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات برای حمایت از تصمیم‌گیری در تعاملات دولت با حکومت (G۲G) و دولت با شهروندان (G۲C).

در تعریف دیگری که سال ۲۰۰۸ مطرح گردید، مشارکت الکترونیکی را می‌توان به عنوان کمکی به فرآیندهای تصمیم‌گیری سیاسی و اداری اشخاص حقیقی و حقوقی و گروه‌های مرتبط با آنها با کمک فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات معرفی کرد [۲]. کمیسیون اروپا معتقد است که مشارکت الکترونیکی به مردم کمک می‌کند تا در سیاست و سیاست‌گذاری مشارکت کنند و به لطف فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات، فرآیندهای تصمیم‌گیری را آسان‌تر درک کنند [۳]. بنابراین مشارکت الکترونیکی شامل «توسعه و دگرگونی مشارکت در فرآیندهای دموکراتیک اجتماعی و مشورتی با میانجی‌گری فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات و اینترنت به عنوان اصلی‌ترین بستر ارتباطی است [۵]. دیگر اهداف مشارکت الکترونیکی استفاده از فناوری‌های موجود برای حمایت از شهروندی فعال، امکان مشارکت گسترده‌تر و دستیابی به مخاطبان در جغرافیای گسترده‌تر و امکان افزایش مشارکت شهروندان آگاه از طریق ارائه اطلاعات قابل دسترس و قابل درک برای مخاطبان هدف است [۶]. با توجه به مولفه‌های مطرح شده در تعاریف فوق، مشارکت الکترونیکی را می‌توان در دو جنبه کلی تعریف کرد: جنبه اول مشارکت دولت محور است که در آن مشارکت بر عهده دولت بوده و توسط دولت‌ها تصویب می‌شود. جنبه دوم مشارکت شهروند محور است به این معنی که انطباق و توسعه فناوری نه تنها برعهده دولت است، بلکه نیازمند یک جنبش اجتماعی است که توسط شهروندان ایجاد و با استفاده از شبکه فعال می‌شود [۵].

۱-۲- مولفه‌های ارزیابی دولت الکترونیک

سازمان ملل متحد برای اندازه‌گیری میزان توسعه ظرفیت‌های دولت الکترونیکی ملی، شاخص توسعه دولت الکترونیک سازمان ملل متحد (EGDI) را تعریف کرده است. EGDI یک شاخص ترکیبی است که از سه زیرشاخص با عناوین خدمت برخط، زیرساخت ارتباطی و سرمایه انسانی با وزن برابر تشکیل شده است. سه زیرشاخصی که EGDI را تشکیل می‌دهند، طیف وسیعی از موضوعات مرتبط با دولت الکترونیک را پوشش می‌دهند:

- زیرشاخص خدمت برخط یا OSI: OSI یک زیر شاخص ترکیبی است که استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات توسط دولت‌ها را برای ارائه خدمات عمومی در سطح ملی اندازه‌گیری می‌کند. این زیرشاخص، دسترسی برخط را در چهار مرحله اندازه‌گیری می‌کند [۷]. مرحله اول با عنوان سرویس اطلاعاتی نوظهور، بررسی می‌کند که آیا وب‌سایت دولت اطلاعات را به شیوه‌ای کاربرپسند در اختیار شهروندان قرار می‌دهد و آیا پیوندهای لازم را به وزارتخانه‌ها و سایر دستگاه‌های دولتی برقرار می‌کند؟ مرحله دوم با عنوان سرویس اطلاعاتی پیشرفته، بررسی می‌کند آیا وب‌سایت دولتی ارتباط دو طرفه با یک طرفه را بین مقامات و شهروندان امکان‌پذیر می‌سازد؟ مرحله سوم با عنوان خدمات تراکنشی، میزان امکان ارتباط دو طرفه بین ادارات ملی و شهروندان را می‌سنجد. همچنین در مرحله امکان رسیدگی به طیف گسترده‌ای از خدمات عمومی به صورت آنلاین، و همچنین درخواست و دریافت ورودی‌ها در مورد سیاست‌های دولت مورد بررسی قرار می‌گیرد. مرحله چهارم با عنوان خدمات متصل، توانایی دولت برای فعال بودن در برنامه‌های وب و اینکه آیا دولت طیف گسترده‌ای از خدمات الکترونیکی سفارشی را برای بخش‌های مختلف شهروندان ارائه می‌دهد را اندازه‌گیری می‌کند.

- زیرشاخص زیرساخت ارتباطی: درحالی‌که زیرشاخص خدمات آنلاین، حضور دیجیتالی و توانایی دولت‌ها را توصیف می‌کند، این زیرشاخص توانایی زیرساخت‌های ملی ارتباطی را برای توانمندسازی شهروندان در راستای مشارکت در همه اشکال دولت الکترونیکی اندازه‌گیری می‌کند. این زیرشاخص شامل تعداد تخمینی کاربران اینترنت، تعداد خطوط اصلی تلفن ثابت، تعداد مشترکین تلفن همراه، تعداد اشتراک اینترنت ثابت و تعداد امکانات پهن باند ثابت به‌ازای هر ۱۰۰ نفر می‌باشد.

- زیرشاخص سرمایه انسانی برای سنجش توانایی شهروندان در استفاده از خدمات دولت الکترونیک استفاده می‌شود. این زیرشاخص ترکیبی از نرخ باسوادی، نسبت ثبت‌نام ناخالص ابتدایی، متوسطه و سوم است.

۱-۳- مولفه‌های ارزیابی مشارکت الکترونیک

شاخص مشارکت الکترونیکی[1] یا EPI به‌عنوان یک شاخص تکمیلی برای شاخص توسعه دولت الکترونیکی باهدف بهبود دسترسی شهروندان به اطلاعات و خدمات عمومی تعریف شده است. بر اساس گزارش دولت الکترونیک سازمان ملل، بین شاخص مشارکت الکترونیکی و شاخص توسعه دولت الکترونیکی در جامعه آماری

[1] E-Participation Index

مربوطه که کلیه کشورهای جهان می‌باشد، یک رابطه مستقیم و خطی وجود دارد. بدین معنی که کشورهای دارای امتیاز بالاتر در شاخص توسعه دولت الکترونیک، در شاخص مشارکت الکترونیک نیز دارای امتیاز بالاتر هستند [۷]. تمرکز این شاخص بر استفاده از قابلیت‌های خدمات برخط برای تسهیل ارائه اطلاعات توسط دولت به مردم «به اشتراک گذاری اطلاعات الکترونیکی[1]»، تعامل دولت با ذینفعان «مشاوره الکترونیکی[2]» و مشارکت در فرایندهای تصمیم‌گیری توسط شهروندان «تصمیم‌گیری الکترونیکی[3]» است. در زیرشاخص اطلاعات الکترونیکی، امکان مشارکت با ارائه اطلاعات عمومی به شهروندان و دسترسی به اطلاعات در صورت تقاضا و یا بدون تقاضا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در زیرشاخص مشاوره الکترونیکی، میزان مشارکت دادن شهروندان و مشورت با آنها در امور مربوط به شهروندان در تنظیم سیاست‌های عمومی و ارائه خدمات به آنها بررسی می‌گردد. و در زیرشاخص تصمیم‌گیری الکترونیکی توانمندسازی شهروندان از طریق طراحی مشترک سیاست‌ها و تولید مشترک اجزای خدمات و روش‌های ارائه آن ارزیابی می‌شود.

۱-۴- دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک در کشورهای در حال توسعه

با توجه به تغییرات اقتصادی و فناوری‌های نوظهور، کشورهایی که به ثبات اقتصادی و سیاسی نسبی دست یافته‌اند اما همچنان برای توسعه تلاش می‌کنند، بعنوان کشورهای در حال توسعه طبقه‌بندی می‌شوند. کشورهای در حال توسعه در مسیر رقابت و رسیدن به کشورهای پیشرفته تر، تلاش می‌کنند تا با استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات ظرفیت‌های دولت را افزایش دهند [۸]. پیاده سازی دولت الکترونیک در کشورهای در حال توسعه دارای مزایای بی شماری است که برخی از آنها عبارتند از: مدیریت کارآتر، خدمات دولتی بهتر به شهروندان، تعامل بیشتر با شهروندان و بخش‌های بازرگانی و صنعتی، دسترسی به اطلاعات بیشتر، شفافیت امور، مسئولیت پذیری، کاهش بوروکراسی و فساد اداری و غیره. برای مردم کشورهای توسعه یافته تصور شرایطی که در آن تمام تعاملات با دولت می‌تواند از طریق یک پیشخوان در ۲۴ ساعت شبانه روز و ۷ روز هفته و بدون انتظار در صف انجام شود، دشوار نیست. با این حال، دستیابی به همین سطح از کارایی و انعطاف‌پذیری برای کشورهای در حال توسعه دشوار است. تجربه در کشورهای توسعه یافته نشان می‌دهد که این امر در صورتی امکان پذیر است که دولت‌ها تمایل به تمرکززدایی از مسئولیت‌ها و فرآیندها داشته باشند و گام در استفاده از وسایل الکترونیکی بگذارند [۹]. مطالعه ایاد 2021 نشان می‌دهد که در کشورهای منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا بین سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸، توسعه دولت الکترونیک به رشد پایدار اقتصادی و بهره‌وری و همچنین دیجیتالی سازی کنترل فساد و اثربخشی دولت و تا حدودی نیز عوامل تولید انجامیده است؛ بعلاوه کیفیت نظارتی (بهره‌وری ناظران) را بهبود بخشیده است [۱۰]. مطالعه کبار[4] ۲۰۲۱ نتایج گزارشات دولت الکترونیک (۲۰۲۰-۲۰۱۸) را با نتایج (۲۰۱۰-۲۰۰۸) با استفاده از تحلیل همبستگی و خوشه‌ای مقایسه نموده است و نشان می‌دهد که بین امتیازات EGDI در طول دوره مطالعه همبستگی قوی وجود دارد و همچنین علی رغم بهبودهای کلی EGDI در هر کشور عضو سازمان ملل، تغییرات چندانی ایجاد نشده است [۱۱]. وزارت مخابرات و ارتباطات روسیه در سال ۲۰۱۷ با استفاده از گزارش‌های سازمان ملل به ارزیابی توسعه دولت الکترونیک روسیه در مقایسه با سایر کشورهای منطقه پرداخته است [۱۲]. زافیرو[5] نیز با بکارگیری گزارش سال ۲۰۱۲ به ارزیابی موقعیت کشور یونان پرداخته و نشان داده که کشور یونان در این شاخص نسبت به سایر کشورهای اروپایی عقب مانده و پیشرفت خوبی نداشته است. ایشان هدف از این رتبه‌بندی‌ها را تعیین موقعیت‌هایی برای رسیدن به جایگاه بهتر بیان نموده است [۱۳]. در ادامه این مطالعه رتبه کشورهای خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ لغایت ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار می‌گیرد و روند رتبه‌بندی هریک از زیرشاخص‌ها در سطح بین‌المللی و در منطقه خاورمیانه مشاهده می‌گردد. سپس به بررسی جایگاه ایران و شاخص‌های موثر بر پیشرفت آن پرداخته می‌شود.

۱-۵- روش تحقیق

به‌منظور اجرای پژوهش، اطلاعات ارائه شده در گزارش‌های بین‌المللی مربوط به شاخص دولت الکترونیک و زیرشاخص‌های آن و همچنین شاخص مشارکت الکترونیک مربوط به ۱۷ کشور خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ لغایت ۲۰۲۲ از سایت دولت الکترونیک سازمان ملل [۱۴]. بعنوان جامعه آماری پژوهش جمع آوری و در نرم افزار اکسل دسته‌بندی شده است. سپس با استفاده از این نرم افزار نمودارها، پارامترهای آماری (ماکسیمم، مینیمم) به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها تعیین گردید. از آنجا که هدف این تحقیق

[1] E-information
[2] E-consultation
[3] E-decision-making
[4] Kabbar
[5] Zafiropoulos

کشف روابط متغیرها به صورت دو به دو بوده است، از آزمون ضریب همبستگی پیرسون به بررسی رابطه بین متغیرها پرداخته شده است. به منظور بررسی رابطه بین شاخص‌ها و زیر شاخص‌ها داده‌های جمع آوری شده به نرم افزار SPSS وارد شده و پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها از طریق اجرای آزمون کولموگروف- اسمیرنف (K-S)، با استفاده از آزمون ضریب همبستگی پیرسون به بررسی رابطه بین متغیرها پرداخته شده است [۱۵].

برای اثبات یا رد فرضیه‌ها و همچنین به دست آوردن ارتباطی منطقی و معنادار بین زیرشاخص‌ها می‌توان از روش‌ها و ابزارهای علمی و آمار استنباطی استفاده نمود. به منظور استفاده از برخی روشهای علمی و آماری برای بررسی داده‌ها و ارتباطات بین آنها باید پارامتریک و نرمال بودن داده‌ها مورد آزمون قرار گیرد. در این خصوص، به جهت بررسی پارامتریک و نرمال بودن داده‌های مربوط به شاخص‌های دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک از آزمون کولموگروف-اسمیرنف (K-S) استفاده شد [۱۵] و بعداز آن در صورت نرمال بودن داده‌ها، بررسی وابستگی داده و محاسبه میزان همبستگی داده از ضریب همبستگی پیرسون به شرح ذیل استفاده گردید [۱۶].

$$\text{ضریب همبستگی پیرسون} = \frac{n\sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum(X^2) - (\sum X)^2][\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

مقدار ضریب همبستگی پیرسون(r) بین ۱- و ۱ تغییر می‌کند. اگر r = ۱- باشد، به معنای همبستگی کامل منفی بین دو متغیر است، اگر r = ۰ باشد، به معنای نبود همبستگی بین دو متغیر و اگر r = ۱ باشد، به معنای همبستگی کامل مثبت بین دو متغیر است. به‌عنوان مقادیر بینابینی اگر ضریب بین ۰ تا ۰٫۲۹ نشان‌دهنده همبستگی ضعیف، ضریب بین ۰٫۳۰ تا ۰٫۶۹ نشان‌دهنده همبستگی متوسط و ضریب بین ۰٫۷۰ تا ۱ نشان‌دهنده همبستگی قوی است. همچنین در این آزمون مقدار Sig که نشان‌دهنده سطح معناداری یا P-Value هست نیز ارائه می‌گردد که اگر مقدار آن کمتر از ۰٫۰۵ باشد نشان‌دهنده معنی‌دار بودن رابطه بین دو متغیر است.

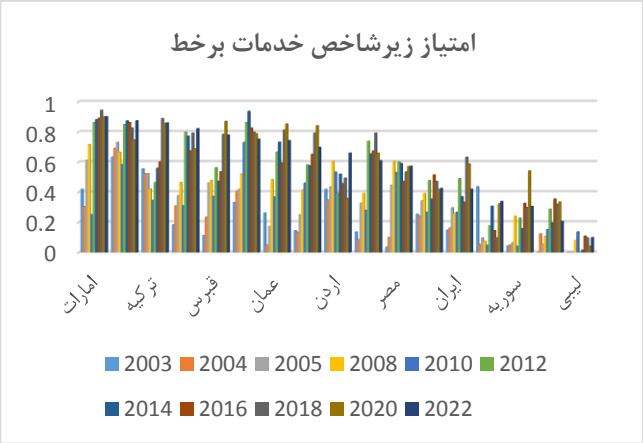
۲- ارزیابی و مقایسه شاخص‌های اندازه‌گیری دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک در منطقه

همان‌طور که پیش‌تر مطرح گردید در اندازه‌گیری شاخص توسعه دولت الکترونیک سه زیر شاخص خدمت برخط، زیر ساخت ارتباطی و سرمایه انسانی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد که در ادامه با ارائه نمودارها و جداول مربوطه به تجزیه‌وتحلیل آنها پرداخته می‌شود. در ارزیابی زیرشاخص خدمات برخط مطابق با جدول ۱ مشاهده می‌گردد که کشورهای امارات از سال ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۲ (چهار دوره متوالی)، بحرین از سال ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۴ (سه دوره متوالی)، امارات در سال ۲۰۰۸، رژیم اشغالگر قدس در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ و عراق در سال ۲۰۰۴ دارای بیشترین امتیاز در زیر شاخص ارزش خدمات بر خط بوده‌اند و نسبت به کشورهای دیگر در رتبه بالاتری قرارگرفته‌اند. کشور لیبی ضعیف ترین عملکرد در این شاخص را در بین کشورهای منطقه داشته است.

باتوجه‌به نمودار ۱ مشاهده می‌گردد که همه کشورها در جهت افزایش و بهبود فناوری‌های خود برنامه‌ریزی کرده‌اند و در بین سال‌های ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ تا حدودی روند افزایش را نشان می‌دهند به جز کشور لیبی که روند افول و ثبات را داشته است. کشور ایران در ارزیابی ۱۷ کشور خاورمیانه رتبه‌های بین ۱۰ الی ۱۳ را در سالهای مختلف کسب کرده است که به نسبت منطقه در جایگاه خوبی قرار ندارد و نیازمند تلاش بیشتر در جهت ارتقاء و رتبه‌بندی منطقه‌ای و در نهایت رتبه جهانی است.

جدول ۱. امتیازبندی سه کشور برتر و آخرین رتبه خدمات برخط در منطقه طی سال‌های ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲

	۲۰۰۳	۲۰۰۵	۲۰۰۸	۲۰۱۲	۲۰۱۶	۲۰۲۰	۲۰۲۲
حداکثر	0.633	0.730	0.715	0.862	0.891	0.9	0.901
	رژیم اشغالگر قدس		امارات	بحرین	امارات	امارات	امارات
دوم	0.554	0.611	0.665	0.862	0.862	0.870	0.874
	ترکیه	امارات	رژیم اشغالگر	امارات	رژیم اشغالگر	قبرس	رژیم اشغالگر
سوم	0.436	0.523	0.605	0.849	0.826	0.858	0.86
	یمن	ترکیه	مصر	رژیم اشغالگر	بحرین	ترکیه	ترکیه
حداقل	0	0	0.073	0	0.108	0.041	0.099
	لیبی	لیبی	یمن	لیبی	لیبی	لیبی	لیبی

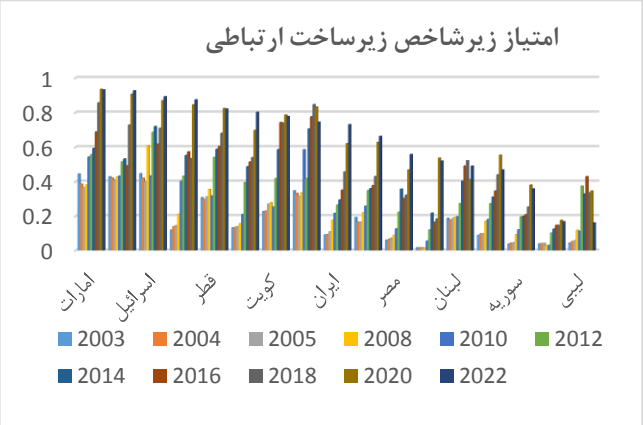


نمودار ۱: امتیازبندی خدمات بر خط از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ در منطقه خاورمیانه

باتوجه‌به جدول ۲ و نمودار ۲ مشاهده می‌گردد در بین کشورهای منطقه خاورمیانه تلاش، برنامه‌ریزی و تعیین استراتژی‌های بهبود به منظور ارتقاء زیرساخت‌های ارتباطی از سال ۲۰۱۶ نسبت به سال‌های قبل افزایش بیشتری یافته است و شیب رشد آنها سیر صعودی داشته است به گونه‌ای که از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۱۰ می‌توان تا حدودی ثبات و رشد اندک را در بین آنها مشاهده نمود اما پس از آن سرعت پیشرفت و بالارفتن امتیاز بسیار بیشتر شده است.

جدول ۲. امتیازبندی سه کشور برتر و آخرین رتبه زیرساخت ارتباطی در منطقه خاورمیانه طی سال‌های ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲

	۲۰۰۳	۲۰۰۵	۲۰۰۸	۲۰۱۲	۲۰۱۶	۲۰۲۰	۲۰۲۲
حداکثر	0.446	0.410	0.608	0.685	0.776	0.934	0.930
	رژیم اشغالگر	قبرس	رژیم اشغالگر قدس		بحرین	امارات	امارات
دوم	0.444	0.400	0.427	0.556	0.743	0.905	0.925
	امارات	رژیم اشغالگر	قبرس	امارات	کویت	قبرس	قبرس
سوم	0.428	0.363	0.381	0.541	0.688	0.868	0.891
	قبرس	امارات	امارات	قطر	امارات	رژیم اشغالگر قدس	
حداقل	0.015	0.016	0.012	0.101	0.146	0.175	0.160
	عراق	عراق	عراق	یمن	یمن	یمن	لیبی



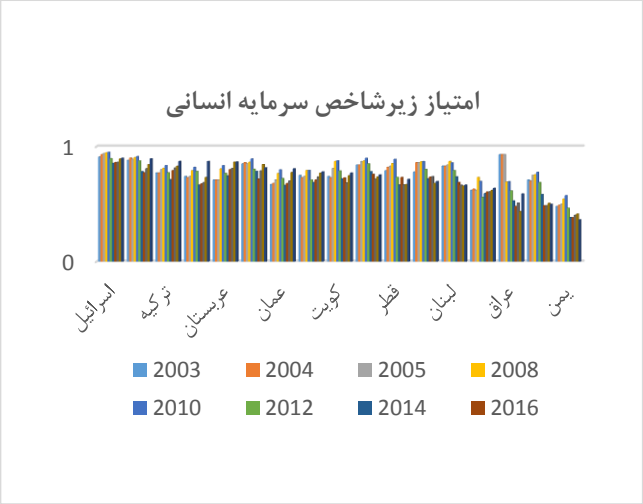
نمودار ۲: امتیازبندی زیرساخت ارتباطی از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ در منطقه خاورمیانه

در امتیازبندی این زیرشاخص کشورهای امارات در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲، بحرین در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶، رژیم اشغالگر قدس در سال‌های ۲۰۱۴، ۲۰۱۲، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۳ و قبرس در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵، در راس رتبه‌بندی زیرشاخص زیرساخت ارتباطی در بین ۱۷ کشور خاورمیانه قراردارند. کشورهای عراق ، یمن و لیبی نیز در رتبه‌بندی ضعیف ترین عملکرد را نشان می‌دهند. کشور ایران در سالهای ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ تقریبا روند ثابت و بدون رشدی را در این زیرشاخص داشته است اما از سال ۲۰۰۸ به بعد رشد صعودی خود را آغاز نموده است و این رشد از سال ۲۰۱۸ بسیار بیشتر شده است.

در ارزیابی زیرشاخص سرمایه انسانی مشاهده می‌گردد امتیازات کسب شده کشورها بسیار به یکدیگر نزدیک هست، اما از سال ۲۰۱۰ همه کشورها افول در ارزش گذاری سرمایه نیروی انسانی را نشان می‌دهند که در برخی از سال ۲۰۱۴ همانند (رژیم اشغالگر قدس، قبرس، ترکیه، امارات، عربستان،عمان،ایران و مصر) مجددا با برنامه‌ریزی و اجرای استراتژی‌های سازنده در مسیر رشد و پیشرفت قرار گرفته‌اند، اما کشورهایی مانند لیبی، قطر، اردن، لبنان، عراق، سوریه و یمن در مقایسه با سال‌های گذشته عملکرد خود کاهش را نشان می‌دهند. در این میان یمن ضعیف ترین عملکرد را نشان داده است. لازم به ذکر است کشور امارات با رتبه ۱۳ جهانی در زیر شاخص سرمایه نیروی انسانی در سال ۲۰۲۲ بهترین جایگاه را در سطح خاورمیانه دارا می‌باشد.

جدول ۳. امتیازبندی سه کشور برتر و آخرین رتبه زیر شاخص سرمایه انسانی در منطقه خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲

	۲۰۰۳	۲۰۰۵	۲۰۰۸	۲۰۱۲	۲۰۱۶	۲۰۲۰	۲۰۲۲
حداکثر	0.93	0.94	0.94	0.89	0.86	0.89	0.89
	عراق	رژیم اشغالگر قدس					
دوم	0.91	0.93	0.90	0.87	0.79	0.86	0.89
	رژیم اشغالگر	عراق	قبرس	قبرس	عربستان	عربستان	قبرس
سوم	0.88	0.89	0.87	0.85	0.79	0.84	0.87
	قبرس	قبرس	لیبی	لیبی	ترکیه	بحرین	ترکیه
حداقل	0.48	0.5	0.54	0.46	0.38	0.41	0.36
	یمن	یمن	یمن	یمن	یمن	یمن	یمن

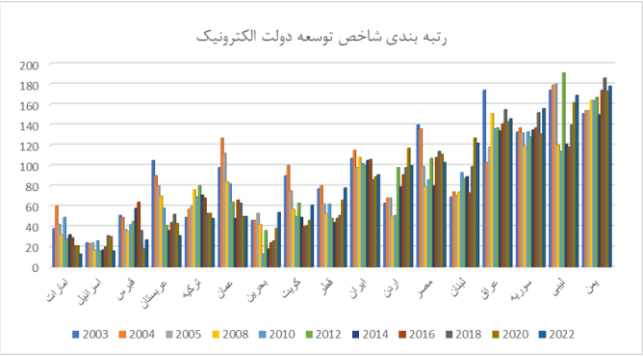


نمودار ۳: امتیازبندی زیر شاخص سرمایه انسانی از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ در منطقه خاورمیانه

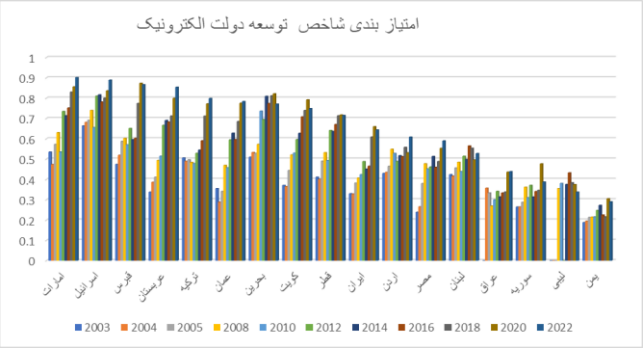
از میان سه زیر شاخص خدمات برخط، زیرساخت ارتباطی و سرمایه انسانی، کشور ایران بهترین عملکرد و رتبه را در زیر شاخص سرمایه انسانی نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۱۶ رتبه ۱۰ را کسب کرده است و در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ جایگاه خود را به

رتبه ۷ ارتقاء داده است. همچنین در بررسی جهانی در میان ۱۹۳ کشور جهان جایگاه ایران در زیر شاخص ارزش خدمات برخط در سطح متوسط، زیر ساخت ارتباطی در سطح بالا و سرمایه نیروی انسانی در سطح بسیار بالا قرار گرفته است.

باتوجه‌به نمودارهای ۴ و ۵ و جدول شماره ۴ مشاهده می‌گردد کشور امارات با دارا بودن رتبه ۱ منطقه‌ای و همچنین رتبه ۱۳ جهانی سال ۲۰۲۲ در ارزیابی جمعی شاخص توسعه دولت الکترونیک بهترین عملکرد و جایگاه را از خود به نمایش گذاشته است.



نمودار ۴: رتبه‌بندی شاخص توسعه دولت الکترونیک از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ در منطقه خاورمیانه



نمودار ۵: امتیازبندی شاخص توسعه دولت الکترونیک از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ در منطقه خاورمیانه

همچنین لازم به ذکر است از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۲ بهترین رتبه کسب شده در ارزیابی جهانی رتبه ۱۳ در سال ۲۰۱۰ توسط بحرین و ۲۰۲۲ توسط امارات بوده است و کشورهای یمن و لیبی ضعیف ترین عملکرد را از خود نشان داده‌اند.

بررسی نمودارها نشان می‌دهد کشورهای امارات، عربستان، عمان، کویت و ایران از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ بطور مداوم در مسیر توسعه دولت الکترونیک و بهبود جایگاه خود بوده‌اند، اما کشورهای همچون اردن، لبنان، سوریه، لیبی و یمن عملکرد ضعیف تری نسبت به سال‌های گذشته خود داشته‌اند. کشور ایران در سال ۲۰۲۲ با کسب رتبه ۹۱ در میان ۱۹۳ کشور جهان قرار گرفته است و این امر نشان دهنده قرارگیری آن در دسته EGDI بالا با امتیاز کلی ۰,۶۴۳۳ و سطح درآمدی کمتر از متوسط است.

جدول ۴. رتبه‌بندی سه کشور برتر و آخرین رتبه شاخص توسعه دولت الکترونیک در منطقه خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲

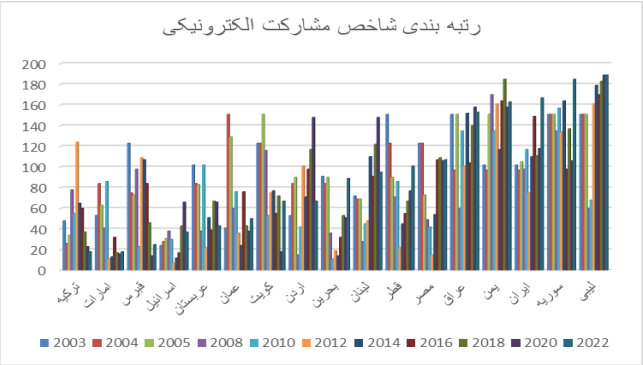
	۲۰۰۳	۲۰۰۵	۲۰۰۸	۲۰۱۲	۲۰۱۶	۲۰۲۰	۲۰۲۲
حداکثر	24	24	17	16	20	18	13
	رژیم اشغالگر قدس					قبرس	امارت
دوم	38	34	32	28	24	21	16
	امارات	قبرس	امارات	امارات	بحرین	امارات	رژیم اشغالگر
سوم	46	42	35	36	29	30	27
	بحرین	امارات	قبرس	بحرین	امارات	رژیم اشغالگر	قبرس
حداقل	174	180	164	191	174	173	178
	لیبی	لیبی	یمن	لیبی	یمن	یمن	یمن

بررسی شاخص مشارکت الکترونیک مطابق با جدول شماره ۶ نشان می‌دهد بهترین رتبه کسب شده در این زمینه رتبه ۷ جهانی متعلق به رژیم اشغالگر قدس در سال ۲۰۱۲ بوده است. در سال ۲۰۲۲ کشور ترکیه و امارات با کسب رتبه ۱۸ جهانی به طور همزمان بهترین عملکرد را نشان داده و رتبه ۱ منطقه‌ای را کسب نموده‌اند. لازم به ذکر است کشور ترکیه در سال ۲۰۱۲ عملکرد ضعیفی ارائه کرده و پس از آن در روند بهبود عملکرد خود قرار گرفته است و کشور امارات در ۲۰۱۰ عملکرد بهتری نسبت به سال‌های قبل نشان داده و پس از آن در مسیر تقریبا ثابتی خود را حفظ نموده است.

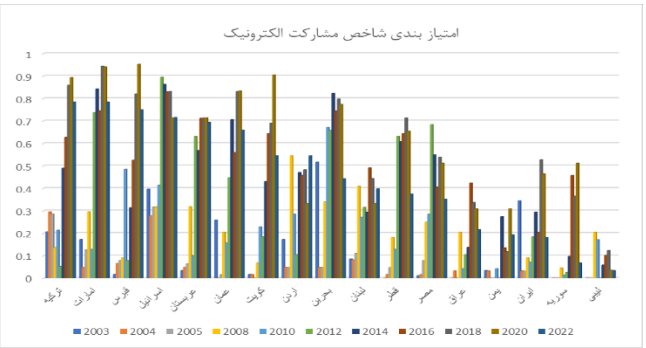
جدول ۵. امتیازبندی سه کشور برتر و آخرین رتبه شاخص مشارکت الکترونیکی در منطقه خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲

	۲۰۰۳	۲۰۰۵	۲۰۰۸	۲۰۱۲	۲۰۱۶	۲۰۲۰	۲۰۲۲
حداکثر	24	31	15	7	17	14	18
	رژیم اشغالگر قدس		اردن	رژیم اشغالگر قدس		قبرس	امارات
دوم	41	34	28	11	32	16	25
	عمان	ترکیه	لبنان	امارات	امارات	امارات	قبرس
سوم	48	63	36	15	36	18	37
	ترکیه	امارات	بحرین	مصر	عربستان	کویت	رژیم اشغالگر
حداقل	151	151	170	161	170	189	189
	قطر	لیبی	یمن	لیبی	لیبی	لیبی	لیبی

ایران در سال ۲۰۲۲ عملکرد خوبی نداشته است و از رتبه ۱۲ در سال ۲۰۲۰ به رتبه ۱۵ در منطقه خاورمیانه افول کرده است که این امر نشان دهنده عدم تمرکز بر برنامه‌ها و استراتژی‌های رشد در این شاخص می‌باشد. همچنین وضعیت ایران در بین ۱۹۳ کشور جهان در رتبه ۱۶۷ قرار گرفته است و در دسته‌بندی سطح پایین مشارکت الکترونیک EPI است. امارات، ترکیه، رژیم اشغالگر قدس و عربستان کشورهای هستند که براساس این شاخص دارای وضعیت بهتری نسبت به کشورهای جهان هستند و کشور ایران دارای وضعیت نامناسب در مقایسه با کشورهای منتخب جهانی است.



نمودار ۶: رتبه‌بندی شاخص مشارکت الکترونیکی از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ در منطقه خاورمیانه



نمودار ۷: امتیازبندی شاخص توسعه مشارکت الکترونیکی از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۲۲ در منطقه خاورمیانه

۳- بررسی رابطه معناداری بین شاخص توسعه دولت الکترونیک و شاخص مشارکت الکترونیک

باتوجه‌به اطلاعات و گزارش‌های جهانی و روند نمودارهای تحلیلی مشاهده شده در بررسی وضعیت کشورها سؤالی که مطرح شد این است که آیا بین زیرشاخص‌های توسعه دولت الکترونیک (خدمات بر خط، زیرساخت‌های ارتباطی و نیروی انسانی) می‌توان رابطه معناداری مشاهده کرد؟ به‌منظور پاسخگویی به این سؤالات با استفاده از اطلاعات ارائه شده در آخرین گزارش‌های منتشر شده از سوی سازمان ملل و نتایج ارزیابی کشورها در هر زیر شاخص با استفاده از نرم‌افزار SPSS پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون تحلیل همبستگی پیرسون جهت شناسایی روابط استفاده شده است

باتوجه‌به نتایج آزمون همبستگی پیرسون در جدول ۶ که ضریب همبستگی ۰٫۸۰۹ را نشان می‌دهد، همبستگی قوی بین دو متغیرشاخص توسعه دولت الکترونیک و شاخص مشارکت الکترونیک وجود دارد، یعنی با افزایش امتیاز که ناشی از توسعه دولت الکترونیک در کشورها بوده، نرخ مشارکت الکترونیک نیز بالا می‌رود. همچنین با توجه به مقدار Sig<0.05 که برابر با ۰٫۰۰۰ می‌باشد رابطه معنادار بین این دو متغیر مورد تایید است. این رابطه تاییدی بر این موضوع است که شاخص مشارکت الکترونیکی (EPI) به عنوان یک شاخص تکمیلی برای شاخص توسعه دولت الکترونیکی (EGDI) با هدف بهبود دسترسی شهروندان به اطلاعات و خدمات عمومی تعریف شده است.

جدول ۶. بررسی رابطه معناداری شاخص توسعه دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیکی

Correlations

		toseedolat	mosharekat eelectronic
Toseedolat	Pearson Correlation	1	**.809****
	Sig. (2-tailed)		**.000**
	N	187	**187**
Mosharekat eelectronic	Pearson Correlation	.809**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	187	187

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

۳-۱- رابطه بین خدمات برخط و زیر ساخت ارتباطی

مقدار ضریب همبستگی پیرسون ۰٫۷۵۸ در جدول ۷ نشان می‌دهد که دو زیر شاخص ارزش خدمات بر خط و زیرساخت‌های ارتباطی، همبستگی قوی با یکدیگر دارند و همچنین مقدار Sig برابر با ۰٫۰۰۰ بیان‌کننده رابطه معنادار بین این دو زیر شاخص می‌باشد. وجود چنین همبستگی قوی بیان‌کننده این است که با افزایش و توسعه زیرساخت‌های ارتباطی، وضعیت خدمات برخط بهبود یافته و امتیاز مربوطه نیز افزایش می‌یابد و برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های بهبود هر یک از این زیرشاخص‌ها می‌بایست با توجه به شاخص دیگر و اثر پذیری آن باشد چرا که در صورت نادیده گرفتن هریک می‌تواند نتایج مطلوب مد نظر را برای سیاستگذاران نداشته باشد.

جدول ۷. رابطه معناداری متغیرهای خدمات برخط و زیرساخت ارتباطی

Correlations

		Arzeshkhad atbarkhat	Zirsakhtertb ati
arzeshkhada tbarkhat	Pearson Correlation	1	**.758****
	Sig. (2-tailed)		**.000**
	N	187	**187**
zirsakhtertb ati	Pearson Correlation	.758**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	187	187

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

۳-۲- رابطه بین خدمات برخط و سرمایه انسانی

باتوجه‌به نتایج بررسی امتیاز زیرشاخص خدمات برخط و نیروی

انسانی ارائه شده در جدول ۸ مشاهده می‌گردد که مقدار همبستگی پیرسون این دو متغیر برابر با ۰٫۰۴۷ محاسبه شده است که نشان دهنده همبستگی بسیار ضعیف (نزدیک به صفر که نشان دهنده عدم همبستگی است) دارند. همچنین مقدار Sig برابر با ۰٫۵۲۷ که بزرگتر از ۰٫۰۵ به دست آمده، نشان می‌دهد که این دو متغیر هیچ رابطه معناداری با یکدیگر ندارند.

جدول ۸. رابطه معناداری متغیرهای خدمات برخط و سرمایه انسانی

Correlations

		arzeshkhadatbarkhat	niroiensani
arzeshkhadatbarkhat	Pearson Correlation	1	**.047**
	Sig. (2-tailed)		**.527**
	N	187	**187**
niroiensani	Pearson Correlation	.047	1
	Sig. (2-tailed)	.527	
	N	187	187

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

۳-۳- رابطه بین زیرساخت ارتباطی و سرمایه انسانی

براساس نتایج آزمون ارائه شده در جدول ۹ مشاهده می‌گردد که بین دو متغیر زیرساخت ارتباطی و نیروی انسانی همبستگی مستقیم وجود دارد؛ اما مقدار ۰٫۱۶۵ نشان‌دهنده همبستگی ضعیف بین این دو متغیر است. همچنین مقدار Sig برابر با ۰٫۰۲۴ که کمتر از مقدار معیار ۰٫۰۵ هست نشان‌دهنده معناداری این رابطه است. وجود همبستگی ضعیف بین این دو متغیر بدین معنی است که با کاهش یا افزایش زیرشاخص زیرساخت ارتباطی، کاهش یا افزایش اندکی را می‌توان در زیرشاخص نیروی انسانی مشاهده نمود.

جدول ۹. رابطه معناداری متغیرهای زیرساخت ارتباطی و سرمایه انسانی

Correlations

		zirsakhtertbati	Niroiensani
zirsakhtertbati	Pearson Correlation	1	**.165***
	Sig. (2-tailed)		**.024**
	N	187	**187**
niroiensani	Pearson Correlation	.165*	1
	Sig. (2-tailed)	.024	
	N	187	187

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

۳-۴- رابطه بین شاخص مشارکت الکترونیک و زیر شاخص‌های دولت الکترونیک

ضریب همبستگی پیرسون ۰٫۶۲۸ در جدول ۱۰ نشان می‌دهد که شاخص مشارکت الکترونیک با زیرشاخص خدمات برخط همبستگی متوسط با یکدیگر دارند و همچنین مقدار Sig برابر با ۰٫۰۰۰ بیان‌کننده رابطه معنادار بین آنها است. وجود همبستگی قوی بین این دو متغیر بدین معنی است که با توسعه خدمات برخط و افزایش بهره مندی مردم از خدمات الکترونیکی و نرخ بهره وری خدمات برخط می‌توان انتظار داشت که میزان مشارکت الکترونیک نیز افزایش یابد. بنابراین برنامه‌ریزی و دنبال کردن استراتژی‌های کوتاه مدت و بلند مدت در راستای بهبود ارزش خدمات برخط علاوه بر منجرشدن به پیشرفت و ارتقاء شاخص توسعه دولت الکترونیک، در نهایت باعث ارتقاء شاخص مشارکت الکترونیک می‌شود.

جدول ۱۰. رابطه معناداری مشارکت الکترونیک و ارزش خدمات برخط

Correlations

		mosharekateelectronic	arzeshkhadatbarkhat
mosharekateelectronic	Pearson Correlation	1	**.628****
	Sig. (2-tailed)		**.000**
	N	187	**187**
arzeshkhadatbarkhat	Pearson Correlation	.628**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	187	187

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

در بررسی آزمون پیرسون رابطه بین مشارکت الکترونیک و زیرساخت ارتباطی مشاهده می‌گردد که بین این دو متغیر همبستگی متوسط (۰٫۶۵۲) وجود دارد و همچنین Sig برابر با ۰٫۰۰۰ تاییدکننده رابطه معنادار آنها است. بنابراین انتظار می‌رود تغییرات صعودی یا نزولی در امتیاز زیرساخت‌های ارتباطی بر امتیاز مشارکت الکترونیک تاثیر گذاشته و منجر به رشد یا تنزل آن گردد.

جدول ۱۱. رابطه معناداری مشارکت الکترونیک و زیرساخت ارتباطی

Correlations

		mosharekateelectronic	zirsakhtertbati
mosharekateelectronic	Pearson Correlation	1	**.652****
	Sig. (2-tailed)		**.000**
	N	187	**187**
zirsakhtertbati	Pearson Correlation	.652**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	187	187

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

علی‌رغم وجود رابطه بین شاخص مشارکت الکترونیک و زیرشاخص‌های خدمات برخط و زیرساخت ارتباطی در جدول ۱۲ مشاهده می‌گردد که همبستگی بسیار ضعیفی (۰,۰۹۵) بین این شاخص و زیرشاخص نیروی انسانی وجود دارد و همچنین مقدار Sig برابر با ۰,۱۹۸ عدم وجود رابطه معنادار بین این دو متغیر را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲. رابطه معناداری مشارکت الکترونیک و ارزش نیروی انسانی

Correlations

		mosharekat eelectronic	niroiensani
mosharekate electronic	Pearson Correlation	1	**.095**
	Sig. (2-tailed)		**.198**
	N	187	**187**
niroiensani	Pearson Correlation	.095	1
	Sig. (2-tailed)	.198	
	N	187	187

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ارزیابی شاخص‌های دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک نتایج معنی‌داری به همراه دارد که می‌توان از آن در تجزیه‌وتحلیل کشوری و منطقه‌ای، بررسی برنامه‌های کشوری، سیاست‌گذاری‌های کشورهای منطقه‌ای، فناوری‌های بکار گرفته شده در کشورهای برتر، نحوه بودجه‌بندی‌ها و ارتقا دانش به‌روز استفاده نمود. به‌عنوان نمونه می‌توان بررسی نمود که در سه کشور برتر در هر یک از شاخص‌ها چه رویکردها و استراتژی‌هایی اتخاذ شده است. نتایج حاصل از بررسی زیرشاخص‌های توسعه دولت الکترونیک نشان می‌دهد که دو زیرشاخص خدمات برخط و زیر ساخت ارتباطی با یکدیگر همبستگی قوی و رابطه معنادار دارند؛ بنابراین اختصاص برنامه‌های توسعه‌ای به هریک از این دو زیرشاخص منجر به بهبود هر دو زیرشاخص به طور هم‌زمان می‌گردد. اما در بررسی زیرشاخص خدمات بر خط و نیروی انسانی نشان داده شد که همبستگی بین این دو زیرشاخص نزدیک به صفر و تقریباً هیچ رابطه معناداری با یکدیگر ندارند. همچنین در بررسی زیرشاخص‌های زیرساخت ارتباطی و نیروی انسانی نیز همبستگی ضعیف بین این دو زیرشاخص و رابطه معنادار بین آن دو تأیید گردید که در نتیجه ارتباط ضعیف انتظار می‌رود افزایش عملکرد در هریک از زیرشاخص‌ها تا حدودی بر بهبود عملکرد زیرشاخص دیگر اثر بگذارد. باتوجه‌به وجود رابطه معنادار بین شاخص‌های توسعه دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک و به‌تبع آن در بررسی تأثیرگذاری و رابطه زیرشاخص‌های توسعه دولت الکترونیک با شاخص مشارکت الکترونیک مشاهده گردید که دو زیرشاخص خدمات برخط و زیرساخت ارتباطی با شاخص مشارکت الکترونیک همبستگی متوسط و رابطه معنادار داشته و بهبود عملکرد این دو زیرشاخص بر شاخص مشارکت الکترونیک نیز مؤثر هست؛ اما زیرشاخص نیروی انسانی رابطه معناداری با شاخص مشارکت الکترونیک ندارد و اثرگذاری آن بر شاخص مشارکت الکترونیک به‌صورت غیرمستقیم و تنها از طریق شاخص توسعه دولت الکترونیک می‌باشد. براساس تحلیل نمودارها و باتوجه‌به اینکه کشور ایران یک نقطه استراتژیک در منطقه است نیازمند برنامه‌ریزی‌های دقیق و اجرای پروژه‌های توسعه دولت الکترونیک با سرعت و گستردگی بیشتر است تا اثربخشی و بهبود عملکرد خود را افزایش دهد و همچنین زمینه‌های افزایش دانش و به‌کارگیری از آن را در میان شهروندان ایجاد نماید. به طور خلاصه، نتایج این پژوهش جنبه‌های کلیدی را ارائه می‌کند که می‌تواند برای تصمیم‌گیری‌های راهبردی آینده در مورد بهبود پذیرش و اجرای دولت الکترونیک در کشورهای منطقه خاورمیانه، و از نظر دانش تأثیرگذارترین عوامل بر تصمیمات دولت الکترونیک و مشارکت الکترونیک در دنیای امروزی که به طور مداوم در حال تغییر و پیشرفت است بگذارد. همچنین می‌تواند چشم‌اندازی برای سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان کشور ایران در این حوزه جهت تخصیص منابع و برنامه‌ریزی و پیشرفت با تمرکز بر تأثیرگذاری شاخص‌ها و عملکردهای متفاوت ایران در سال‌های مختلف ارائه نماید.

مراجع

[1] M. P. Gupta and D. Jana, "E-government evaluation: A framework and case study," *Government information quarterly, 20(4)*, pp. 365-387, 2003.

[2] P. Molnár, "Measuring e-government and e-participation.," *Budapest*, pp. 175-182, 2020.

[3] E. Parliament, Potential and Challenges of E-Participation in the European Union, p. 16., European Parliament, PE 556.949, 2016.

[4] TheWorldBankGroup, "Definition of E-government," The World Bank Group, 2011.

[5] D. Raya & S. Emad, "E-participation levels and technologies," in *Sixth International Conference on Information Technology, ICIT 2013*, May 2013. pp. 8-10.

[6] M. Z. Sobaci, "What the Turkish parliamentary web site offers to citizens in terms of e-participation: A content analysis," The International Journal of Government & Democracy in the Information Age, 15(3), pp. 227–241, August 2010.

[7] U. Nations, "E-Government Survey 2022," United Nations, 2022. [Online]. Available: https://publicadministration.un.org/egovkb/en-us/Reports/UN-E-Government-Survey-2022.

[8] I. Palaco, M. J. Park, S. K. Kim, and J. J. Rho, "Public–private partnerships for e-government in developing countries: An early stage assessment framework," *Evaluation and program planning*, vol. 72, pp. 205-218, 2019.

[9] S. Basu, "E-government and developing countries: an overview.," *International Review of Law, Computers & Technology*, vol. 18(1), pp. 109-132, 2004.

[10] I. Dhaoui, "E -Government for Sustainable Development: Evidence from MENA Countries," *Journal of the Knowledge Economy, vol. 13,* 2070–2099, September 2022.

[11] E. F. Kabbar, "A comparative analysis of the e-government development index (EGDI)," in *14th International Conference on ICT, Society, and Human Beings 2021, pp. 23-29*, 2021.

[12] M. o. C. o. Russia, Ministry of Communications of Russia, 2017. [Online]. Available: http://minsvyaz.ru/en/activity/statistic/rating/index-razvitiya-elektronnogo-pravitelstva/#tabs|Compare:Place. [Accessed 25 May 2021].

[13] K. Zafiropoulos, I. Karavasilis, V. Vrana, "Assessing the adoption of e-government services by teachers in Greece," *Future Internet*, vol. 4(2), pp. 528-544, May 2012.

[14] U. Nations, "E-Government Development Index," United Nations, 2022. [Online]. Available: https://publicadministration.un.org/egovkb/en-us/Data-Center. [Accessed 10 1 2024].

[15] N. M. Razali, Y. B. Wah, "Power comparisons of Shapiro–Wilk, Kolmogorov– Smirnov, Lilliefors and Anderson–Darling tests," *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, vol. 2(1), p. 21–33, 2011.

[۱۶] نیک آریا مهران، مازوچی مجتبی، منتظری علی محمد، ایازی فتانه، "بررسی ارتباط بین شاخص‌های ارتقای رگولاتوری و شاخص توسعه فاوا، " *مدیریت اطلاعات*، دوره ۶، شماره۲، اسفند ۱۳۹۹.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 67-78

Reducing Energy Consumption in Tracking the Red Palm Weevil Using Wireless Sensor Networks and Nature-Inspired Evolutionary Algorithms (Fruit Fly Optimization Algorithm and Lion Swarm Optimization Algorithm)

Shayesteh Tabatabaei[1], Hassan Nosrati Nahook[2*]

[1]Department of Computer Engineering, University of Saravan, Saravan, Iran
[2]Department of Computer Engineering, University of Saravan, Saravan, Iran

Received: 29 February 2024, Revised: 13 December 2024, Accepted: 15 December 2024
Paper type: Research

Abstract

The red palm weevil is one of the most serious pests threatening date palm groves worldwide, causing significant damage and even the destruction of palm trees. Early detection and tracking of this pest are critical to preventing its spread and minimizing the associated damage. Wireless Sensor Networks (WSNs) have emerged as a promising technology for monitoring and identifying this pest in date palm plantations. However, WSNs face various challenges, including limited energy, bandwidth, and computational resources. Therefore, efficient and intelligent methods are required to optimize WSN performance in detecting and tracking this pest. This paper proposes a novel approach that combines two intelligent algorithms—namely, the Fruit Fly Optimization Algorithm (FOA) and the Lion Swarm Optimization (LSO) algorithm—for node clustering in WSNs. The proposed method enhances energy efficiency by reducing the battery consumption of sensor nodes. Simulation results demonstrate that, compared to the LPOBC protocol, the proposed protocol outperforms in terms of energy consumption, end-to-end delay, and throughput. Specifically, end-to-end delay is reduced by 28.286%, throughput is improved by 13.80%, and average battery energy consumption is decreased by 11.86%.

Keywords: Clustering, Wireless Sensor Networks, Red Palm Weevil, Target Tracking, Fruit Fly Optimization Algorithm, Lion Swarm Optimization Algorithm.

* Corresponding Author's email: hsn.nosrati@gmail.com

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۶۷ الی ۷۸

کاهش مصرف انرژی در ردیابی سوسک حنایی خرما با شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر طبیعت (الگوریتم مگس میوه و الگوریتم بهینه‌سازی گله شیرها)

شایسته طباطبایی[۱]، حسن نصرتی ناهوک[۲]*

[۱]دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه سراوان، سراوان، ایران
[۲]دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه سراوان، سراوان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵
نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

سوسک سرخرطومی خرما یکی از آفات جدی نخلستان‌ها است که به درختان خرما در سراسر جهان حمله کرده و موجب نابودی آن‌ها می‌شود. تشخیص و ردیابی اولیه این آفت برای جلوگیری از گسترش و کاهش آسیب‌های ناشی از آن بسیار حیاتی است. شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN) به عنوان فناوری نویدبخش برای نظارت و شناسایی این آفت در مزارع خرما مطرح هستند. با این حال، WSNها با چالش‌های مختلفی از جمله محدودیت‌های انرژی، پهنای باند و منابع محاسباتی روبرو هستند. از این رو، نیاز به روش‌های کارآمد و هوشمند برای بهینه‌سازی عملکرد WSN در تشخیص و ردیابی این آفت احساس می‌شود. در این مقاله، روشی نوین برای ردیابی این آفت در شبکه‌های حسگر ارائه شده است که با ترکیب دو الگوریتم هوشمند، شامل الگوریتم مگس میوه و الگوریتم بهینه‌سازی گله شیرها، به خوشه‌بندی گره‌ها می‌پردازد و بدین ترتیب در مصرف انرژی باتری گره‌ها صرفه‌جویی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی این روش نشان می‌دهد که در مقایسه با پروتکلLPOBC ، پروتکل پیشنهادی عملکرد بهتری از نظر مصرف انرژی، تأخیر انتها به انتها و نرخ گذردهی دارد. به طور خاص، تأخیر انتها به انتها به میزان ۲۸,۲۸۶ درصد، نرخ گذردهی به میزان ۱۳,۸۰ درصد و میانگین انرژی مصرفی باتری به میزان ۱۱,۸۶ درصد بهبود یافته است.

کلیدواژگان: خوشه‌بندی، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، سوسک سرخرطومی، ردیابی هدف، الگوریتم مگس میوه، الگوریتم گله شیرها.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: hsn.nosrati@gmail.com

۱- مقدمه

سوسک سرخرطومی خرما یک آفت مخرب است که درختان خرما را در بسیاری از نقاط جهان آلوده و نابود می‌کند. این آفت به خانواده Curculionidaeتعلق دارد که بزرگ‌ترین گروه سوسک‌ها با بیش از ۶۰،۰۰۰ گونه را تشکیل می‌دهد. سوسک سرخرطومی خرما بومی مناطق گرمسیری آسیا است و به خاورمیانه، آفریقا، منطقه مدیترانه، آمریکای شمالی و استرالیا نفوذ کرده است[۱]. این آفت می‌تواند به گونه‌های مختلف نخل، از جمله نخل نارگیل، نخل روغنی، نخل خرما و نخل ساگو حمله کند. لاروهای سوسک سرخرطومی به بافت‌های نرم نخل نفوذ کرده و آسیب‌های شدیدی به گیاه میزبان وارد می‌کنند که در نهایت منجر به مرگ آن می‌شود [۲].تشخیص و ردیابی اولیه این آفت برای جلوگیری از گسترش آن و کاهش آثار مخرب بر نخل و محیط زیست ضروری است. WSN فناوری نوظهوری هستند که می‌توانند برای نظارت و شناسایی سوسک سرخرطومی در نخلستان‌ها استفاده شوند. WSN شامل تعداد زیادی دستگاه کوچک، کم‌هزینه و کم‌مصرف است که قادرند داده‌ها را به صورت بی‌سیم حس، پردازش کرده و با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. این شبکه‌ها اطلاعات لحظه‌ای و دقیقی درباره وضعیت نخل‌ها، از جمله دما، رطوبت، سیگنال‌های صوتی، اندازه درخت و آلودگی ناشی از آفت را ارائه می‌دهند. با این حال، WSNها با چالش‌هایی نظیر محدودیت انرژی، پهنای باند و منابع محاسباتی روبرو هستند. بنابراین، نیاز به روش‌های مؤثر و هوشمند برای بهینه‌سازی عملکرد WSNها در تشخیص و ردیابی سوسک سرخرطومی احساس می‌شود.

در نخلستان‌های متراکم، گره‌های حسگر به دلیل شرایط محیطی به راحتی در دسترس نیستند و بنابراین نمی‌توانند به آسانی شارژ شوند. به همین دلیل، حفاظت از انرژی در گره‌های حسگر اهمیت بالایی دارد و به حداکثر رساندن طول عمر شبکه یکی از چالش‌های اصلی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم محسوب می‌شود [۳].

ردیابی هدف یکی از کاربردهای مهم WSN است که شامل تعداد زیادی دستگاه کوچک، کم‌هزینه و کم‌مصرف است که قادر به حس، پردازش و ارتباط داده‌ها به‌صورت بی‌سیم هستند. هدف ردیابی، نظارت و تعیین موقعیت و حرکت یک شیء مانند وسیله نقلیه، حیوان یا انسان با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط WSN است. این فناوری کاربردهای بالقوه فراوانی در زمینه‌های مختلف مانند نظارت نظامی، مشاهده حیات وحش، مدیریت ترافیک و مراقبت‌های بهداشتی دارد. با این حال، ردیابی هدف در شبکه‌های بی‌سیم با چالش‌های متعددی مواجه است، از جمله محدودیت‌های انرژی، پهنای باند و منابع محاسباتی گره‌های حسگر، ماهیت غیرقابل پیش‌بینی هدف، وجود نویز و توپولوژی پیچیده و پویا شبکه. بنابراین، نیاز به روش‌های مؤثر و هوشمند برای بهینه‌سازی عملکرد WSNها در ردیابی هدف احساس می‌شود. این روش‌ها باید به دقت بالا، تأخیر کم، مصرف انرژی پایین، مقیاس‌پذیری بالا و استحکام در ردیابی هدف دست یابند.

یکی از چالش‌های اصلی در زمینه ردیابی هدف، بهینه‌سازی مصرف انرژی است. خوشه‌بندی به عنوان یک روش مؤثر برای مدیریت و کاهش مصرف انرژی در WSN شناخته می‌شود. در این رویکرد، گره‌های حسگر به گروه‌های کوچک‌تر و قابل مدیریت تقسیم می‌شوند که به آن‌ها خوشه یا کلاستر گفته می‌شود. هر خوشه شامل یک گره مرکزی (معروف به گره مرکز خوشه یا سرخوشه) و تعدادی گره عضو (که به آن‌ها گره‌های فرعی یا حسگرهای فرعی می‌گویند) است. استفاده از خوشه‌بندی در WSN به کاهش مصرف انرژی، افزایش عمر باتری گره‌ها و بهبود کارایی شبکه کمک می‌کند. در شبکه‌های بزرگ، ارتباط مستقیم بین تمام گره‌ها می‌تواند به افزایش مصرف انرژی و کاهش عمر باتری منجر شود. با پیاده‌سازی خوشه‌بندی، ترافیک داده‌ها به صورت محلی از طریق گره‌های فرعی انجام می‌شود، به جای اینکه به طور مستقیم به سایر گره‌ها ارسال گردد. این رویکرد موجب کاهش تعداد ارتباطات بین گره‌ها و بهبود قابل توجهی در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های انتقال داده خواهد شد. علاوه بر این، خوشه‌بندی امکاناتی نظیر مدیریت انرژی، تعمیرات محلی، تشخیص خطا، روشنایی و زمان‌بندی وظایف مختلف را در شبکه فراهم می‌آورد. همچنین، در صورت خرابی یک گره فرعی، تنها سایر گره‌های فرعی تحت تأثیر قرار می‌گیرند و تمام شبکه آسیب نمی‌بینند. روش‌های مختلفی برای خوشه‌بندی در WSN وجود دارد، از جمله روش‌های مبتنی بر انتخاب تصادفی، تابع هدف و مبتنی بر مساحت. انتخاب مناسب‌ترین روش خوشه‌بندی بستگی به شرایط محیطی و نیازهای خاص شبکه حسگر بی‌سیم دارد. مزیت‌های خوشه‌بندی در WSN شامل: ۱. کاهش مصرف انرژی: خوشه‌بندی موجب برقراری ارتباطات محلی درون خوشه و بین خوشه‌ها می‌شود که این امر به کاهش مصرف انرژی برای انتقال داده‌ها و پیام‌ها کمک می‌کند.

۲. افزایش عمر باتری: با کاهش مصرف انرژی، عمر باتری گره‌ها افزایش یافته و نیاز به تعویض مکرر باتری کاهش می‌یابد.

۳. بهبود کارایی شبکه: تقسیم شبکه به خوشه‌ها باعث بهبود کارایی می‌شود. هر خوشه می‌تواند به‌طور مستقل وظایف خود را انجام دهد،

از جمله جمع‌آوری داده‌ها و ارسال آن‌ها به گره مرکزی یا گره‌های متصل به سیستم بیرونی.

۴. مقیاس‌پذیری: خوشه‌بندی به بهبود مقیاس‌پذیری شبکه کمک می‌کند. با افزایش تعداد گره‌ها، می‌توان تعداد خوشه‌ها را افزایش داد و توانایی پردازش و انتقال داده‌ها را متناسب با تعداد گره‌ها افزایش داد.

۵. اطمینان: در صورت خرابی یک گره فرعی، تنها گره‌های فرعی تحت تأثیر قرار می‌گیرند و سایر خوشه‌ها به‌طور مستقل به فعالیت خود ادامه می‌دهند. این امر باعث افزایش اطمینان و قابلیت اطمینان شبکه می‌شود.

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در خوشه‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، انتخاب سرخوشه مناسب است. این گره باید دارای توان محاسباتی و انرژی کافی برای جمع‌آوری و پردازش داده‌ها باشد. در این مقاله، یک روش جدید برای ردیابی هدف در شبکه‌های WSN پیشنهاد می‌شود که بر مبنای ترکیب الگوریتم مگس میوه و الگوریتم گله شیرها طراحی شده است.

روش پیشنهادی یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه است که قادر به شناسایی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه برای اهداف مختلف نظیر مصرف بهینه انرژی، انتقال امن داده و متعادل‌سازی بار است. در این راستا، از الگوریتم گله شیرها برای بهینه‌سازی پارامترهای شبکه، از جمله اندازه خوشه و انتخاب سرخوشه استفاده می‌شود. همچنین، الگوریتم مگس میوه به منظور ردیابی هدف متحرک (به‌ویژه سوسک سرخرطومی خرما) به کار گرفته می‌شود.

ترکیب این دو الگوریتم پیش‌بینی می‌شود که به بهبود قابل توجهی در مصرف انرژی شبکه‌های حسگر بی‌سیم منجر گردد.

ساختار مقاله حاضر به صورت زیر است:

در بخش دوم پیشینه تحقیق بیان می‌شود که به موضوع و مطالعات انجام یافته قبلی در زمینه بهبود مصرف انرژی در شبکه WSN می‌پردازد، در بخش سوم الگوریتم مگس میوه و الگوریتم بهینه سازی گله شیرها که برای خوشه‌بندی و ردیابی هدف استفاده می‌شوند بررسی خواهند شد، نتایج حاصل از شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی در بخش چهارم مطرح می‌شود. در نهایت بخش پنجم به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- کارهای مرتبط

در [۴]، یک روش آنلاین برای ردیابی هدف در WSN پیشنهاد شده است که به بررسی قابلیت اعتماد و میزان پوشش شبکه می‌پردازد. هدف اصلی این روش، بهبود دقت و قابلیت اعتماد در پیگیری هدف در محیط‌های پویا است. این روش از الگوریتم‌های آنلاین برای مدیریت عدم قطعیت‌ها، نظیر حرکت هدف و تغییرات محیطی استفاده می‌کند. این الگوریتم‌ها به‌طور تطبیقی اندازه‌گیری‌های حسگرها را تنظیم کرده و فرآیند پیگیری را بهینه می‌سازند. روش پیشنهادی شامل ترکیب فیلتر ذره (PF) و فیلتر کالمن توزیع شده (DKF) برای تخمین حالت هدف و قابلیت اطمینان حسگر است. PF به منظور مقابله با غیرخطی بودن و غیرگوسی بودن مدل حرکت هدف به کار می‌رود، در حالی که DKF برای ادغام تخمین‌های محلی از حسگرهای مختلف و به‌روزرسانی قابلیت اطمینان حسگر بر اساس خطای نوآوری استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش آنلاین در دستیابی به ردیابی دقیق و قابل اعتماد هدف مؤثر است.

در [۵]، برای حل مشکل مصرف نامتقارن انرژی در WSN که منجر به «مشکل نقطه داغ» و کاهش عمر شبکه می‌شود، روش خوشه‌بندی نامتقارن و متعادل انرژی با چرخش سرخوشه‌های بهینه از نظر انرژی پیشنهاد شده است. هدف این روش افزایش عمر شبکه و کاهش مصرف انرژی است. نویسندگان با استفاده از مفهوم گرادیان، تعداد سرخوشه بهینه را تعیین کرده‌اند. همچنین، یک مکانیزم مبتنی بر منطق فازی برای چرخش سرخوشه‌ها ارائه داده‌اند تا توزیع انرژی را بین سرخوشه‌های مختلف متعادل کنند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش مؤثر طول عمر شبکه شده است.

در [۶]، یک روش ردیابی هدف بهبود یافته مبتنی بر MC-MPMC (Monte Carlo-Multi-Population Monte Carlo) ارائه شده است. این روش با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و تکنیک‌های تکاملی، عملکرد ردیابی هدف را ارتقا می‌دهد. در این مقاله، چندین تکنیک نوآورانه معرفی شده است، از جمله یک مدل ترکیب PMC (Population Monte Carlo) تطبیق‌پذیر که پیشنهادات متنوعی را در هر تکرار تولید می‌کند و به افزایش تنوع نمونه‌برداری کمک می‌کند. همچنین، یک روش تولید اندازه‌گیری اضافی برای جبران مکان‌های پیش‌بینی شده از دست رفته یا برآوردهای نادرست معرفی شده که از کاهش عملکرد ردیابی جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، یک الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (HTC) با روش MC-MPMC ترکیب شده است که به کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم کمک می‌کند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که روش MC-MPMC توانایی ردیابی هدف را در محیط‌های پویا و با نویز افزایش می‌دهد. با توجه به حرکت گره‌های شبکه و چالش‌هایی

نظیر تغییر مکان هدف و از بین رفتن سیگنال، استفاده از این روش بهبود پیش‌بینی موقعیت هدف و افزایش دقت پیگیری را فراهم می‌آورد و به‌طور مؤثری خطای ردیابی، تأخیر و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد.

در [۷]، یک روش خوشه‌بندی بهینه از نظر انرژی برای ردیابی هدف در WSN پیشنهاد شده است. هدف این روش کاهش مصرف انرژی و افزایش دقت ردیابی است. نویسندگان، چارچوب‌های ردیابی را به عنوان فعال‌سازهای حسگرها معرفی کرده‌اند که بر اساس مکان هدف، حسگرها را فعال می‌کنند.

آن‌ها از الگوریتم C-means فازی (RFCM[1]) برای تعیین مکان چارچوب‌ها و از جدول عضویت برای فعال‌سازی حسگرها و تشکیل خوشه استفاده کرده‌اند. با توجه به اینکه چارچوب‌ها وظیفه ارسال، دریافت و تلفیق داده‌ها را ندارند، بار آن‌ها کم است و می‌توانند فرکانس چرخش را کاهش دهند. علاوه بر این، وضعیت اعضای خوشه (CMs) با استفاده از برنامه‌ریزی خطی ۰-۱ زمان‌بندی شده تعیین می‌شود تا انتقال داده‌های اضافی کاهش یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهاد شده، تحت عنوان TACM[2] (روش خوشه‌بندی مبتنی بر چارچوب ردیابی)، نسبت به برخی روش‌های خوشه‌بندی موجود، به‌طور مؤثر مصرف انرژی را در حین ردیابی هدف متحرک کاهش داده و عمر شبکه را افزایش می‌دهد.

در [۸]، الگوریتم جدیدی به نام NGEKF[3] برای ردیابی هدف در شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی شده است. این الگوریتم از یک مدل دینامیکی غیرخطی برای پیش‌بینی موقعیت هدف و یک مدل اندازه‌گیری خطی برای به‌روزرسانی تخمین استفاده می‌کند. هدف اصلی این تحقیق، دستیابی به ردیابی دقیق و مؤثر هدف، کاهش خطای ردیابی و افزایش کارایی شبکه است. این روش بر پایه فیلتر کالمن گوسی توسعه‌یافته (Extended Kalman Filter) عمل می‌کند و با به کارگیری آن، دقت و کارایی ردیابی هدف در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، با استفاده از تکنیک نرمال‌سازی، اثر نویز و عدم قطعیت در داده‌های حسگر کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم NGEKF می‌تواند به طور مؤثری خطای ردیابی را کاهش دهد و به بهبود طول عمر شبکه کمک کند.

در [۹] به بررسی ردیابی اشیا در شهرهای هوشمند پرداخته شده است. این مقاله شامل یک طبقه‌بندی، معماری، کاربردها، چالش‌های پژوهشی و جهت‌گیری‌های آینده برای این نوع شبکه‌ها می‌باشد. با توجه به نقش حیاتی و متنوع WSN در ردیابی اشیا، مقاله به تحلیل وضعیت فعلی، چالش‌ها و راهکارهای موجود در این حوزه می‌پردازد. از طریق چارچوب تحلیل SWOT[4]، نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای این شبکه‌ها شناسایی شده است. همچنین، با بررسی موردی برخی پروژه‌های عملی در این زمینه، کاربردها و مزایای شبکه‌های حسگر برای ردیابی اشیا به تصویر کشیده شده است. در پایان، با ارائه چشم‌انداز آینده و جهت‌گیری‌های پژوهشی، پتانسیل رشد و توسعه این شبکه‌ها برجسته شده است.

در [۱۰]، دو الگوریتم خوشه‌بندی جدید برای WSN به نام‌های SAHC (تقسیم‌بندی مبتنی بر سرگروه‌های انتخابی) و AHC (خوشه‌بندی مبتنی بر سرگروه‌های تطبیقی) پیشنهاد شده است. این الگوریتم‌ها با استفاده از چندین معیار از جمله تعادل بار، تعادل انرژی، پایداری و پوشش، سرخوشه‌های مناسب را برای خوشه‌ها انتخاب می‌کنند. برای متعادل کردن مصرف انرژی، سرخوشه‌ها به‌صورت دوره‌ای با استفاده از یک الگوریتم چرخش پویا تغییر می‌کنند. همچنین، به منظور بهبود عملکرد ردیابی، چندین الگوریتم بهینه‌سازی برای تعیین پارامترهای شبکه مانند فاصله حسگر تا سرخوشه، تعداد حسگرها، تعداد خوشه‌ها و فاصله حسگرها از یکدیگر پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم‌های SAHC و AHC قادر به بهبود مؤثر عملکرد شبکه در زمینه‌های مختلفی مانند طول عمر شبکه، تعادل انرژی و تعادل بار هستند.

در [۱۱]، پروتکلی برای مسیریابی مبتنی بر کیفیت سرویس و توازن بار در WSN پیشنهاد شده است که با استفاده از مدل مارکوف و الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی (ABC) عمل می‌کند. هدف این پروتکل بهبود عملکرد شبکه در زمینه‌هایی چون تاخیر، از دست رفتن بسته، گذردهی و مصرف انرژی است. این پروتکل شامل دو فاز، فاز تقسیم‌بندی شبکه (در این مرحله، شبکه به چندین خوشه تقسیم می‌شود و از الگوریتم ABC برای تعیین سرخوشه‌ها و اعضای خوشه‌ها استفاده می‌شود. هر حسگر بر اساس پارامترهایی مانند انرژی باقیمانده، فاصله تا پایگاه و تعداد همسایگان نمره‌گذاری می‌شود) و فاز مسیریابی بسته‌ها (در این مرحله، بسته‌ها از سرخوشه‌ها به سینک منتقل می‌شوند) است. هر سرخوشه چندین

[1] Rough Fuzzy C-Means

[2] Tracking-anchor-based Clustering Method

[3] Normalized Gaussian Extended Kalman Filter

[4] Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats

مسیر برای هر سینک شناسایی کرده و با توجه به کیفیت سرویس، بهترین مسیر را انتخاب می‌کند. همچنین، برای جلوگیری از ازدحام شبکه، الگوریتم توازن بار برای تخصیص منابع به سرخوشه‌ها پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پروتکل پیشنهادی توانسته است به طور قابل توجهی کیفیت سرویس شبکه را در زمینه‌های مختلف بهبود بخشد.

در [۱۲]، روشی برای خوشه‌بندی در WSN ارائه شده است که هدف اصلی آن کاهش مصرف انرژی است. این روش از الگوریتم بهینه‌سازی گروه شیر، الهام‌گرفته از رفتار طبیعی گله شیرها، بهره می‌برد و با استفاده از رفتار شکار و تعاملات گروهی، به بهینه‌سازی در شبکه حسگر می‌پردازد. همچنین، منطق فازی در این روش مورد استفاده قرار گرفته است. در این رویکرد، پارامترهای مختلفی نظیر میزان انرژی باتری، فاصله و تعداد همسایگان در نظر گرفته می‌شود و بر اساس قوانین فازی، تصمیمات بهینه برای تخصیص منابع انرژی در شبکه اتخاذ می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی گروه شیر و منطق فازی، بهبود قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی شبکه حسگر بی‌سیم به همراه دارد.

در [۱۳]، برای بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، روشی نوین مبتنی بر الگوریتم مگس میوه و منطق فازی برای خوشه‌بندی گره‌های حسگر پیشنهاد شده است. در این روش، گره‌های سرخوشه با توجه به سه معیار شامل فاصله تا سینک، میزان انرژی باقی‌مانده باتری و فاصله تا مرکز خوشه به عنوان ورودی‌های منطق فازی انتخاب می‌شوند تا شدت بو را در الگوریتم مگس میوه محاسبه کنند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش پیشنهادی در مقایسه با پروتکل‌های شناخته‌شده AFSRP وDCRRP، عملکرد بهتری در زمینه مصرف انرژی، تأخیر ارسال داده و نسبت سیگنال به نویز دارد.

شایان ذکر است که اکثر مطالعات اشاره‌شده در این بخش تنها قادر به ردیابی یک هدف هستند. با افزایش تعداد اهداف، دقت ردیابی کاهش می‌یابد و همچنین به دلیل عدم یکپارچگی در روش‌های مطرح‌شده (بعضی از رویکردها به‌طور مستقل به ردیابی هدف در شبکه‌های حسگر پرداخته و ترکیبی از روش‌های مختلف برای بهینه‌سازی به کار نگرفته‌اند)، خطاهای زیادی در شناسایی موقعیت هدف به وجود می‌آید. بنابراین، در این مقاله برای حل این چالش‌ها از ترکیب دو الگوریتم مگس میوه و الگوریتم بهینه‌سازی گله شیرها استفاده می‌شود تا مصرف انرژی کاهش یابد و دقت ردیابی افزایش یابد. الگوریتم مگس میوه دارای ساختار ساده و قابلیت پیاده‌سازی آسان است و به‌خوبی می‌تواند در جستجوی راه‌حل‌های بهینه در فضای چندبعدی عمل کند. این الگوریتم همچنین به تغییرات محیطی پاسخ مناسبی می‌دهد و در شرایط متغیر عملکرد خوبی دارد. از سوی دیگر، الگوریتم بهینه‌سازی گله شیرها به دلیل زمان محاسباتی کم، سرعت همگرایی بالا، احتمال کمتر برای افتادن در حداقل‌های محلی و توانایی در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، برای محیط‌هایی با ردیابی چند هدف مناسب است. در این مقاله تلاش می‌شود تا با ترکیب هر دو الگوریتم بهینه‌سازی گله شیرها و مگس میوه، به بهینه‌سازی بهتری دست یافته و از مزایای هر دو الگوریتم بهره‌مند شود. این ترکیب می‌تواند به جستجوی بهتر و پوشش وسیع‌تری از فضای جست‌وجو منجر شود، که در نهایت شانس یافتن راه‌حل‌های بهینه را افزایش داده و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد.

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی شامل دو مرحله اصلی است: خوشه‌بندی و ردیابی هدف (سوسک سرخرطومی خرما). در مرحله خوشه‌بندی، از الگوریتم گله شیرها استفاده می‌شود، در حالی که مرحله ردیابی هدف با بهره‌گیری از الگوریتم مگس میوه پیاده‌سازی می‌گردد. در ادامه، جزئیات این روش به تفصیل بررسی خواهد شد.

این فاز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گله شیرها (Lion Pride Optimizer Algorithm) انجام می‌شود، که از رفتار جمعی شیرها الهام گرفته است. این الگوریتم جستجوی فرامکاشفه ای در سال ۲۰۱۲ توسط ونگ[1] و همکارانش معرفی شد [۱۴]. در این فاز مراحل زیر اجرا می‌شود:

مرحله ۱: سینک ابتدا یک درخواست به تمامی گره‌های حسگر ارسال می‌کند که در آن موقعیت فیزیکی سینک درج شده است. هر گره حسگر که این پیام را دریافت می‌کند، فاصله خود را تا سینک محاسبه کرده و اطلاعاتی از قبیل میزان انرژی باقی‌مانده، شناسه منحصر به فرد و تعداد گره‌های همسایه خود را در قالب یک بسته پاسخ به سینک ارسال می‌کند. پس از دریافت این اطلاعات، سینک آنها را در جدول خود ثبت کرده و فرآیند انتخاب سرخوشه‌ها را به صورت متمرکز با استفاده از الگوریتم گله شیرها آغاز می‌کند.

در این مرحله، جمعیتی اولیه متشکل از ۵۰ شیر (یا گره حسگر) ایجاد می‌شود. هر راه‌حل شامل مجموعه‌ای از گره‌ها است که

[1] Wang

کاندیدای سرخوشه شدن هستند. به منظور تشکیل ۵ خوشه از ۵۰ گره حسگر، ۱۰ راه‌حل تصادفی تولید می‌شود. هر راه‌حل به صورت یک آرایه پنج‌تایی در نظر گرفته می‌شود که عناصر آن همان شناسه‌های گره‌های حسگر هستند. شکل ۱ نمونه‌ای از یک راه‌حل را نشان می‌دهد که در آن گره‌های حسگر با شناسه‌های ۱۰، ۲۸، ۱۵، ۲۴ و ۵۰ به‌طور تصادفی به‌عنوان سرخوشه انتخاب شده‌اند.

راه حل ۱	۱۰	۲۸	۱۵	۲۴	۵۰

شکل ۱. نمونه‌ای از یک راه‌حل در روش پیشنهادی

جمعیت اولیه شامل ۱۰ راه‌حل است که هر یک از آن‌ها شامل شناسه‌های گره‌های حسگر یا شیرهای کاندید سرخوشه است و به‌طور تصادفی ایجاد می‌شوند.

مرحله ۲ :به ازای هر راه‌حل، مقدار برازندگی طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$Fit = R_e + N + \frac{1}{(D^2)} \qquad (۱)$$

بطوریکه R_e انرژی باقی مانده گره حسگر، N تعداد همسایه و D . فاصله گره حسگر تا سینک است.

با توجه به این تعریف، مجموعه شیرهایی که بهترین پاسخ به مسئله را ارائه می‌دهند، شامل گره‌هایی با میزان انرژی باقی‌مانده بیشتر، تعداد همسایه‌های بیشتر و فاصله کمتری تا سینک هستند.

مرحله ۳: در این مرحله، راه‌حل‌ها بر اساس برازندگی‌شان به صورت نزولی مرتب می‌شوند.

مرحله ۴: دو راه‌حل با بالاترین برازندگی به عنوان دو شیر نر برتر (PBL1 و PBL2) انتخاب می‌شوند. شناسه‌های گره‌هایی که در PBL1 قرار ندارند، به عنوان نر اول در نظر گرفته می‌شوند. سایر راه‌حل‌های جمعیت اولیه به جز PBL1 به عنوان ماده‌های گله محسوب می‌شوند. برای هر یک از دو نر برتر و هر یک از ماده‌ها، دو فرزند تولید می‌شود که این فرزندان از طریق عمل جهش به دست می‌آیند. برای تعیین نقطه جهش، از رابطه ۲ استفاده می‌شود.

(۲)

$$mc_i^K = mc_0\left(rand\left(0,1\right) - 0.5\right), \quad i = 1,2,3,\ldots M$$

بطوریکه mc_i^K . ضریب بازترکیب X_i^K، iامین عضو در نسل Kام می‌باشد (X همان عضو است) و $rand\left(0,1\right)$. یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ تولید می‌کند و mc_0 ضریب باز ترکیب اولیه با مقداردهی اولیه 0.1 است.

مرحله ۵: در این مرحله، برازندگی چهار فرزند تولیدشده برای هر ماده در گله محاسبه می‌شود. از بین این چهار فرزند، آن که بالاترین برازندگی را دارد انتخاب می‌شود. با توجه به این‌که جمعیت اولیه شامل ۱۰ راه‌حل است، برای هر دو نر برتر، ۱۶ فرزند تولید خواهد شد و به طور کلی ۳۲ فرزند به دست می‌آید. برازندگی این ۳۲ فرزند طبق رابطه ۱ محاسبه شده و از هر ماده، تنها یکی از فرزندان با بالاترین برازندگی انتخاب می‌شود. در نهایت، از میان این ۳۲ فرزند، تنها ۹ فرزند برتر باقی می‌ماند. سپس این فرزندان بر اساس برازندگی مرتب شده و دو فرزند با بالاترین برازندگی به عنوان دو فرزند برتر(CBL1 و CBL2)انتخاب می‌شوند.

مرحله ۶: در این مرحله، دو فرزند برتر (CBL1 و CBL2) به جای نرهای برتر قبلی (PBL1 و PBL2) در جمعیت اولیه جایگزین می‌شوند و الگوریتم با جمعیت نسل جدید (K+1) تکرار می‌شود. برای تبادل اطلاعات به صورت سراسری، تمام راه‌حل‌ها ترکیب می‌شوند و جمعیت جدید به ترتیب نزولی مرتب می‌گردد. این فرایند به تعداد ۱۰۰ بار تکرار می‌شود. جستجوی محلی و فرآیند ترکیب تا پایان دور ۱۰۰ ادامه دارد. پس از اتمام دور ۱۰۰، راه‌حل‌ها بر اساس برازندگی مجدداً مرتب می‌شوند و راه‌حلی که بالاترین برازندگی را دارد و شامل شناسه گره‌های برتر است به عنوان سرخوشه‌ها انتخاب می‌گردد. پس از ۱۰۰ تکرار، اعضای آرایه با بالاترین برازندگی به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. سینک با توجه به شناسه گره‌های داخل آرایه، پیغام سرخوشه شدن را ارسال کرده و به آن‌ها اعلام می‌کند که سرخوشه هستند. سپس هر سرخوشه پیغام درخواست اتصال شامل اطلاعات موقعیت فیزیکی و شناسه‌اش را تولید کرده و در محدوده خود پخش می‌کند. گره‌هایی که این پیغام را دریافت می‌کنند، در صورتی که خود سرخوشه نباشند، فاصله‌شان را تا سرخوشه محاسبه کرده و با توجه به این فاصله، به نزدیک‌ترین سرخوشه متصل می‌شوند. به این ترتیب، خوشه‌ها شکل می‌گیرند.

در الگوریتم بهینه‌سازی گله شیرها، با افزایش تعداد تکرارها، زمان محاسباتی افزایش می‌یابد، زیرا در هر تکرار موقعیت‌های جدید برای هر عضو گله محاسبه و به‌روز رسانی می‌شود. این مسئله به ویژه برای مسائل بزرگ و پیچیده زمان‌بر است. همچنین، با افزایش تعداد اعضای گله و ابعاد مسئله، نیاز به حافظه بیشتری برای ذخیره‌سازی اطلاعات هر عضو وجود دارد.

فاز ۲- ردیابی هدف

در این مرحله از الگوریتم مگس میوه برای ردیابی سوسک سرخرطومی خرما در شبکه حسگر استفاده می‌شود تا مصرف انرژی در کاربرد ردیابی اهداف متحرک بهینه‌سازی شود. الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه (FOA[1]) توسط پن در سال ۲۰۱۱ معرفی گردید. این الگوریتم، روشی نوین برای یافتن بهینه سراسری است که بر اساس رفتار غذایابی مگس میوه طراحی شده است. مگس میوه به‌دلیل داشتن حس بویایی و بینایی قوی‌تر نسبت به سایر حشرات، می‌تواند بوی انواع میوه‌ها را در هوا تشخیص دهد و حتی از فاصله ۴۰ کیلومتری بوی میوه را حس کند. پس از نزدیک شدن به میوه، این حشره با استفاده از حس بینایی خود و همکاری با دیگر مگس‌ها، موقعیت دقیق میوه را پیدا می‌کند.

این فاز از چندین مرحله تشکیل شده است که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

۱. تعریف حسگرها و اهداف: در ابتدا، هر حسگر به عنوان یک مگس میوه و سوسک سرخرطومی به عنوان میوه معرفی می‌شود.

۲. مقداردهی اولیه موقعیت: موقعیت مگس‌های میوه به صورت تصادفی تعیین می‌شود (طبق روابط (۳) و (۴)). در اینجا، یک فضای دو بعدی با محورهای x و y در نظر گرفته شده و جهت و مسافت جستجوی غذا با استفاده از حس بویایی مگس میوه به طور تصادفی تعریف می‌شود.

$$X_i = X_{axis} + RandomValue \quad (۳)$$

$$Y_i = Y_{axis} + RandomValue \quad (۴)$$

۳. محاسبه شدت بو: از آنجا که موقعیت میوه مشخص نیست، در ابتدا فاصله تا مبدا (Dist) محاسبه می‌شود. سپس، شدت بو (S) طبق رابطه (۵) محاسبه می‌گردد. این مقدار رابطه‌ای معکوس با فاصله دارد، به‌طوری که هرچه شدت بو بیشتر باشد، فاصله کمتر است. محاسبات بر اساس معادلات (۵) و (۶) انجام می‌شود.

$$Dist_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (۵)$$

$$S_i = \frac{1}{Dist_i} \quad (۶)$$

۴. مقدار شدت بو در تابع شدت بو (یا تابع برازش) جایگزین می‌شود. سپس شدت بوی (smell) برای موقعیت موجود طبق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$smelli = function\left(S_i\right) \quad (۷)$$

۵. مگس میوه با بالاترین شدت بو از میان سایر مگس‌ها شناسایی می‌شود. این فرآیند با استفاده از رطه (۸) برای یافتن بیشترین مقدار شدت بو انجام می‌گیرد.

$$\{bestsmellbestindex\} = \mathrm{m}max\left(smell\right) \quad (۸)$$

۶. اگر شدت بو در هر تکرار بهتر از مقدار کنونی باشد، بهترین مقدار شدت بو و مختصات xy ذخیره می‌شود. در این زمان، ازدحام مگس‌های میوه با استفاده از حس بینایی خود می‌توانند به سمت موقعیت میوه یا هدف حرکت کنند، طبق روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱).

$$Smellbest = bestsmell \quad (۹)$$

$$X_{axis} = X\left(bestindex\right) \quad (۱۰)$$

$$Y_{axis} = Y\left(bestindex\right) \quad (۱۱)$$

۷. مراحل ۲ تا ۶ از فرآیند بهینه‌سازی به طور مکرر تکرار می‌شوند تا به شرایط توقف (پس از ۱۰۰ دور) برسند.

لازم به ذکر است هر تکرار از الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه شامل محاسبات مربوط به موقعیت‌یابی، به‌روزرسانی موقعیت‌ها و محاسبه مقدار تابع هدف برای هر موقعیت است. این محاسبات، به ویژه برای مسائل با ابعاد بزرگ، می‌تواند حجم محاسباتی زیادی را به همراه داشته باشد. در این الگوریتم، با افزایش تعداد مگس‌های میوه و ابعاد مسئله، نیاز به حافظه بیشتری برای ذخیره‌سازی موقعیت‌ها و مقادیر تابع هدف وجود دارد. این عملیات، به‌ویژه در مسائل با توابع هدف پیچیده، می‌تواند منجر به حجم محاسباتی قابل توجهی شود.

از طرفی نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که در تکرارهای اولیه، تعداد مگس‌های میوه تأثیری بر یافتن نقاط بهینه ندارد. ازدحام‌های کوچک‌تر ممکن است با مشکل عدم تثبیت مسیر جستجو و همگرایی کندتر مواجه شوند، اما پیچیدگی محاسباتی کمتری دارند و بنابراین سرعت اجرای بیشتری ارائه می‌دهند. از سوی دیگر، ازدحام‌های بزرگ‌تر در جستجوهای پایدارتر عمل کرده و سریع‌تر همگرا می‌شوند، اما سرعت اجرای کمتری در مقایسه با ازدحام‌های کوچک‌تر دارند. بنابراین، انتخاب تعداد مناسب مگس‌ها بسته به مسئله اهمیت دارد. در این تحقیق، از ۵۰ گره حسگر به عنوان مگس

[1] fruit fly optimization algorithm

میوه برای ردیابی هدف استفاده شده است. شکل شبه کد (۱) شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه را نشان می‌دهد.

Function FOA (problem) **returns** a state that is a local maximum
Input: $Population_{size}$, $Problem_{size}$
Output: S_{best}
Population ←0;
F_{gbest} ← CreateHeuristicSolution ($Problem_{size}$);
while ~StopCondition () **do**
foreach $F_i \in$ Population **do**
$F_{iposition}$ ← UpdatePosition ($F_{iposition}$, $F_{gbestposition}$);
end
EvaluatePopulation (Population);
F_{gbest} ← GetBestSolution (Population);
end
S_{best} ← F_{gbest};
return S_{best};

شبه کد (۱). شبه کد الگوریتم بهینه سازی مگس میوه.

هزینه محاسباتی الگوریتم پیشنهادی به شرح زیر است:

۱. هزینه محاسباتی مرحله خوشه‌بندی که شامل موارد زیر می‌باشد:

ایجاد جمعیت اولیه: O(n·d)

که در آن n تعداد گره‌ها و d تعداد خوشه‌ها است.

محاسبه برازندگی: O(n)

شامل محاسبه انرژی، تعداد همسایه‌ها و فاصله هر گره تا سینک برای هر راه‌حل.

مرتب‌سازی بر اساس برازندگی: O(n·log(n))

هزینه محاسباتی تولید فرزندان (جهش): O(n·m)

که در آن m تعداد فرزندان تولید شده و n هزینه محاسباتی مربوط به برازندگی فرزندان است.

به‌روزرسانی نسل (انتخاب فرزندان برتر و جایگزینی آن‌ها): O(n)

تعداد تکرارها: O(iter)

هزینه کلی مرحله خوشه‌بندی:

O(iter·(n·d+n+n·log(n)+n·m)

۲.هزینه محاسباتی مرحله ردیابی هدف که شامل موارد زیر می‌باشد:

مقداردهی اولیه موقعیت: O(p)

که در آن p تعداد حسگرها (یا مگس‌ها) است.

محاسبه شدت بو: O(p)

شامل محاسبه شدت بو و فاصله برای p حسگر.

به‌روزرسانی موقعیت‌ها: O(p)

محاسبه مختصات جدید برای هر حسگر.

محاسبه تابع هدف: O(p·d)

ارزیابی شدت بو و مرتب‌سازی برای d هدف.

تعداد تکرارها: O(iter)

هزینه کلی مرحله ردیابی:O(iter·(p+p+p·d)

۳. هزینه محاسباتی کل الگوریتم پیشنهادی:

جمع هزینه‌های دو مرحله:

O(iter·(n·d+n+n·log(n)+n·m))+O(iter·(p+p+p·d)

۴- شبیه‌سازی روش پیشنهادی

۴-۱- محیط شبیه‌سازی

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی و مقایسه آن با پروتکل LPOBC[1] [۱۲] از شبیه‌ساز OPNET[2] نسخه ۱۱,۵ استفاده شده است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۱) ارائه شده است. در روش پیشنهادی، پیکربندی شبکه شامل ۵۰ گره در نظر گرفته شده است. دو سناریو بررسی شده است: در سناریوی اول، گره‌های حسگر به صورت تصادفی در محیط پراکنده شده‌اند و بر اساس LPOBC مسیر یابی می‌شوند. در سناریوی دوم، گره‌ها به صورت تصادفی در محیط پخش شده و مسیر یابی بر اساس پروتکل پیشنهادی (LPCFFTT[3]) انجام می‌شود. برای هر دو سناریو، پیکربندی یکسانی در نظر گرفته شده است.

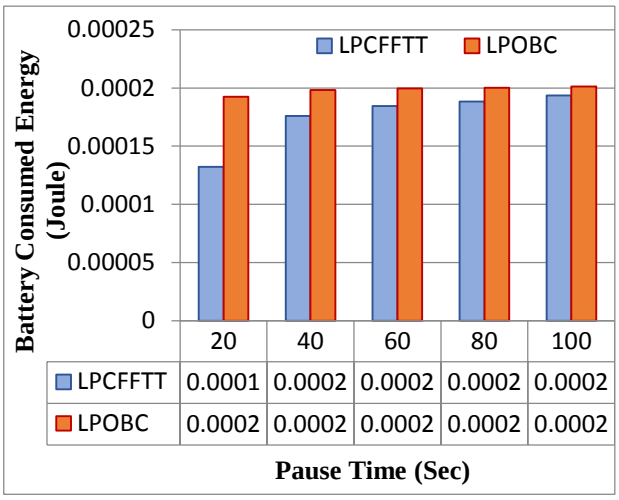
جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

پارمتر	مقدار
روش پخش گره ها در محیط	تصادفی
اندازه محیط شبیه سازی	۱۰۰۰m*۱۰۰۰m*۱۰۰۰m
نوع ارسال	نرخ داده بیت ثابت
اندازه بسته	۱۰۲۴ بایت
مدل باتری	پیوسته
زمان شبیه سازی	۱۰۰ ثانیه
پروتکل لایه Mac	IEE802.15.4
مقدار اولیه انرژی باتری	۲۰۰ میکروژول
تعداد سینک	۱
تعداد گره‌ها	۵۰
تعداد هدف	۱
نرخ ارسال داده	۲۵۰۰۰۰بیت بر ثانیه

[1] Lion Pride Optimization Based Clustering
[2] Optimized Network Engineering Tool
[3] Lion Pride Clustering Fruit Fly Target Tracking

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی

نمودار شکل (۲) به مقایسه میانگین انرژی مصرفی باتری برای سناریوهای الگوریتم پیشنهادی و پروتکل LPOBC می‌پردازد. محور افقی نشان‌دهنده زمان توقف یا pause time و محور عمودی میزان انرژی مصرفی است. لازم به ذکر است که Pause Time به بازه‌های زمانی مشخصی در طول شبیه‌سازی اشاره دارد که در آن‌ها مقادیر مرتبط با انرژی یا سایر پارامترهای سیستم ثبت و ارزیابی می‌شوند. این بازه‌ها به‌عنوان نقاط داده‌ای از پیش تعیین‌شده برای تحلیل رفتار سیستم انتخاب شده‌اند و به‌هیچ‌وجه به معنای توقف کامل شبیه‌سازی نیستند. شبیه‌سازی به‌طور پیوسته اجرا می‌شود، اما در این زمان‌های مشخص، خروجی‌ها به‌صورت لحظه‌ای استخراج و ذخیره می‌گردند. به عنوان نمونه، اگر مقدار Pause Time برابر با ۲۰، ۴۰ یا ۶۰ ثانیه باشد، این به معنای آن است که مقادیر انرژی یا سایر پارامترهای سیستم در این لحظات خاص از زمان شبیه‌سازی ثبت شده‌اند. این بازه‌های زمانی این امکان را می‌دهند تا بتوان رفتار سیستم را در نقاط زمانی مختلف بررسی کرده و الگوهای عملکردی آن را تحلیل نمود. بنابراین، محور افقی نمودارها نمایانگر این بازه‌های زمانی است که به‌طور ویژه برای تحلیل خروجی‌های شبیه‌سازی تعیین شده‌اند. این روش به درک بهتر روند تغییرات پارامترهای کلیدی در طول زمان کمک می‌کند و شناسایی نقاط بحرانی یا بهینه را تسهیل می‌نماید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از پروتکل پیشنهادی منجر به بهبود ۱۱,۸۶ درصدی در میانگین انرژی مصرفی باتری برای توپولوژی شبکه با ۵۰ گره نسبت به سناریو LPOBC شده است. در پروتکل LPOBC، با وجود استفاده از خوشه‌بندی به وسیله الگوریتم گله شیرها برای انتخاب سرخوشه‌ها در دور ۱۰۰، که انرژی بیشتری دارند و فاصله کمتری به سینک دارند، معیارهای مهمی مانند تعداد همسایه‌های هر گره در انتخاب مسیر نادیده گرفته شده است. این موضوع می‌تواند منجر به ایجاد ازدحام در شبکه شود، که خود باعث افزایش مصرف انرژی به دلیل نیاز به ارسال مجدد داده‌ها و از دست رفتن بسته‌ها خواهد شد. در مقابل، در روش LPCFFTT، خوشه‌بندی به کمک الگوریتم گله شیرها و ردیابی با استفاده از الگوریتم مگس میوه، گره‌هایی را به عنوان سرخوشه انتخاب می‌کند که انرژی بیشتری دارند، فاصله کمتری تا سینک دارند و تعداد همسایه‌های بیشتری برای ارتباطات بیشتر با سایر گره‌ها دارند. به علاوه، گره‌های عضو نیز با توجه به فاصله‌شان به سرخوشه متصل می‌شوند، که این امر باعث کاهش مصرف انرژی برای ارسال داده‌ها از گره‌های عضو به سرخوشه می‌شود.

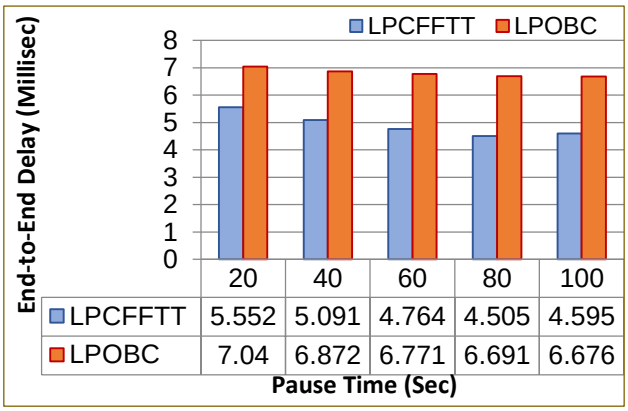


شکل ۲. میانگین انرژی مصرفی شبکه

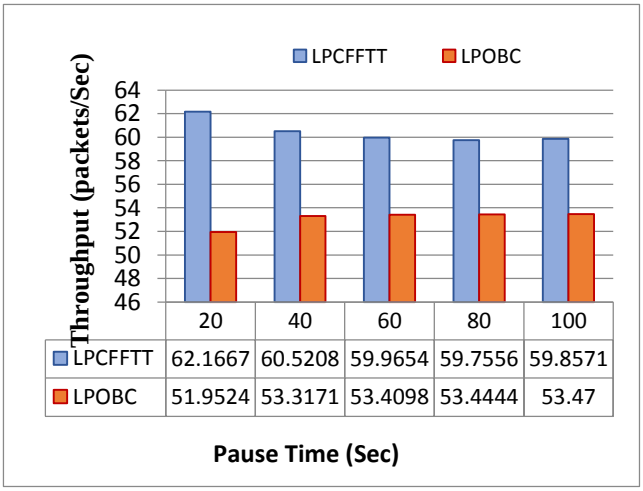
نمودار شکل (۳) به مقایسه تأخیر انتها به انتها برای سناریوهای روش پیشنهادی LPCFFTT و پروتکل LPOBC می‌پردازد. محور عمودی تأخیر انتها به انتها بر حسب میلی ثانیه و محور افقی pause time را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سناریوی پروتکل LPOBC تأخیر افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که برخی از سرخوشه‌ها ممکن است بخشی از داده‌ها را ارسال کنند، اما به دلیل کمبود انرژی، قادر به ادامه ارسال نخواهند بود و از آنجا که معیاری برای تعداد همسایه‌ها در نظر گرفته نشده، نمی‌توانند عمل انتقال اطلاعات را تکمیل کنند. در نتیجه، گره سرخوشه به دلیل انتقال زیاد داده‌ها انرژی خود را تمام کرده و خاموش می‌شود، که این باعث تأخیر در ارسال داده و بروز خطا در شبکه می‌گردد. در مقابل، در پروتکل پیشنهادی (LPCFFTT)، سرخوشه‌ها در مرحله خوشه‌بندی از میان گره‌هایی با فاصله کمتر تا سینک، انرژی بالا و تعداد همسایه زیاد انتخاب می‌شوند. اعضای خوشه نیز بر اساس فاصله به سرخوشه می‌پیوندند. بنابراین، اگر فاصله سرخوشه تا سینک زیاد باشد، انتقال داده از طریق گره‌های همسایه که نزدیک‌تر هستند و مسیر به سینک را دارند، انجام می‌شود. این امر منجر به کاهش تأخیر ارسال داده می‌گردد و در مقایسه با سناریوی پروتکل LPOBC، ۲۸,۲۸۶ درصد بهبود نشان می‌دهد.

نمودار شکل (۴) نرخ گذردهی را برای سناریوهای روش پیشنهادی LPCFFTT و پروتکل LPOBC نمایش می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده pause time و محور عمودی تعداد بسته‌های تحویل داده شده در واحد زمان یا نرخ گذر دهی است. نرخ گذر دهی به معنای نسبت کل بسته‌های دریافت شده توسط گیرنده‌ها به زمان

بین دریافت اولین و آخرین بسته است و به صورت اندازه فایل در آن زمان، بر حسب مگابیت بر ثانیه محاسبه می‌شود. طبق شکل (۴)، پروتکل LPOBC در مقایسه با روش پیشنهادی LPCFFTT تعداد بسته‌هایی که با موفقیت به سینک تحویل داده شده‌اند نسبت به کل بسته‌های انتقالی توسط گره‌های حسگر، به دلیل کمبود انرژی و خاموش شدن احتمالی گره‌ها، کمتر است. در روش پیشنهادی LPCFFTT، به دلیل خوشه‌بندی مناسب و در نظر گرفتن پارامترهای متعدد مانند تعداد همسایه‌ها، مسیرهای متعددی به سینک ایجاد می‌شود. بنابراین، در صورت خرابی یک مسیر، از مسیر جایگزین استفاده می‌شود که باعث افزایش تعداد بسته‌های تحویل داده شده به سینک می‌گردد. این روش نسبت به سناریوی پروتکل LPOBC، ۱۳٫۸۰ درصد بهبود نشان می‌دهد.



شکل ۳. تأخیر انتها به انتها



شکل ۴. نرخ گذردهی

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، برای بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر، از الگوریتم گله شیرها برای خوشه‌بندی حسگرها و از الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه برای ردیابی اهداف متحرک استفاده شده است. الگوریتم گله شیرها، که از رفتار و سازماندهی گله شیرها در طبیعت الهام گرفته شده، یک روش بهینه‌سازی است که می‌تواند مسائل پیچیده را حل کرده و به راه‌حل‌های بهینه نزدیک شود. این الگوریتم به دلیل ساختار سلسله‌مراتبی خود، انعطاف‌پذیری و توانایی تطبیق با محیط‌های متنوع را داراست. الگوریتم گله شیرها به صورت موازی عمل می‌کند، یعنی هر عضو جمعیت به طور مستقل و همزمان موقعیت خود را بهبود می‌بخشد که این ویژگی باعث افزایش سرعت و کارایی آن در حل مسائل می‌شود. الگوریتم مگس میوه نیز یک روش بهینه‌سازی است که از رفتار مگس‌های میوه در جستجوی منابع غذایی الهام گرفته شده است. این الگوریتم با حرکات تصادفی و تعامل بین مگس‌ها در جمعیت، بهبود و بهینه‌سازی جستجوی موقعیت‌ها را فراهم می‌کند. از ویژگی‌های این الگوریتم می‌توان به سادگی، سرعت بالا و قابلیت تطبیق با محیط‌های مختلف اشاره کرد.

برای سنجش کارایی روش پیشنهادی، از شبیه‌ساز OPNET استفاده شده و نمودارهای میزان انرژی مصرفی شبکه، تاخیر انتها به انتها و نرخ گذردهی استخراج شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهادی به دلیل انتخاب مسیرهای مطمئن شامل گره‌های سرخوشه با انرژی بالا، فاصله کم تا سینک و تعداد همسایه بیشتر، کارایی کلی شبکه را بهبود بخشیده و قابلیت اطمینان تحویل بسته و نرخ گذردهی شبکه را نسبت به پروتکل LPOBC افزایش داده است.

مراجع

[1] Rhynchophorus ferrugineus - Wikipedia.

[2] W. A. Azmi et al., "The red palm weevil, Rhynchophorus ferrugineus: Current issues and challenges in Malaysia," Oil Palm Bulletin, vol. 74, no. May, pp. 17-24, 2017.

[3] S. Roy, N. Mazumdar, and R. Pamula, "An energy and coverage sensitive approach to hierarchical data collection for mobile sink based wireless sensor networks," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 12, no. 1, pp. 1267-1291, 2021.

[4] F. Delavernhe, A. Rossi, and M. Sevaux, "An online method for robust target tracking using a wireless sensor network," Expert Systems with Applications, vol. 230, p. 120549, 2023.

[5] C. Zhao et al., "An energy-balanced unequal clustering approach for circular wireless sensor networks," Ad Hoc Networks, vol. 132, p. 102872, 2022.

[6] C. Lv, J. Zhu, Z. Tao, and Y. Pi, "An improved target tracking scheme based on MC-MPMC method for mobile wireless sensor networks," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2022, no. 1, p. 74, 2022.

[7] Z. Qu and B. Li, "An energy-efficient clustering method for target tracking based on tracking anchors in wireless sensor networks," Sensors, vol. 22, no. 15, p. 5675, 2022.

[8] E. FayaziBarjini, D. Gharavian, and M. Shahgholian, "Target tracking in wireless sensor networks using NGEKF algorithm," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 11, pp. 3417-3429, 2020.

[9] M. S. Adam, M. H. Anisi, and I. Ali, "Object tracking sensor networks in smart cities: Taxonomy, architecture, applications, research challenges and future directions," Future Generation Computer Systems, vol. 107, pp. 909-923, 2020.

[10] K. A. Darabkh, S. S. Ismail, M. Al-Shurman, I. F. Jafar, E. Alkhader, and M. F. Al-Mistarihi, "Performance evaluation of selective and adaptive heads clustering algorithms over wireless sensor networks," Journal of Network and Computer Applications, vol. 35, no. 6, pp. 2068-2080, 2012.

[11] S. S. Sefati, M. Abdi, and A. Ghaffari, "QoS-based routing protocol and load balancing in wireless sensor networks using the markov model and the artificial bee colony algorithm," Peer-to-Peer Networking and Applications, vol. 16, no. 3, pp. 1499-1512, 2023.

[12] S. Tabatabaei, A. Rajaei, and A. M. Rigi, "A novel energy-aware clustering method via Lion Pride Optimizer Algorithm (LPO) and fuzzy logic in wireless sensor networks (WSNs)," Wireless Personal Communications, vol. 108, pp. 1803-1825, 2019.

[۱۳] حامد شهرکی و شایسته طباطبائی،"بهبود مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم مگس میوه و منطق فازی. "، سیستم های فازی و کاربردها, ۶ ۱ (۱۴۰۲): ۱۹۵-۲۲۲، doi: 10.22034/jfsa.2023.379555.1157

[14] B. Wang, X. Jin, and B. Cheng, "Lion pride optimizer: An optimization algorithm inspired by lion pride behavior," Science China Information Sciences, vol. 55, pp. 2369-2389, 2012.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 79-92

Analysis of Scenarios for the Use of Cryptocurrencies in the Islamic Republic of Iran

Ali Rostami[1], Abouzar Arabsorkhi[2*], Mohsen Aghae[3], Mohammadali Sakhaie[4]

[1]PhD Student in Strategic Management of Cyber Space in University of National Defense and Strategic Research, Tehran, Iran

[2] Faculty Member of ICT Research Institute (ITRC), Tehran, Iran

[3]Faculty Member of University and Higher Research Institute of National Defense and Strategic Research, Tehran, Iran

[4]PhD Graduate of National Security Management University of National Defense and Strategic Research, Tehran, Iran

Received: 12 May 2024, Revised: 26 December 2024, Accepted: 04 January 2025

Paper type: Research

Abstract

Blockchain is one of the new and transformative technologies that in recent years has created many opportunities in various fields, including financial issues, one of the most important of which has been formed in the field of cryptocurrencies. The emergence of the phenomenon of cryptocurrencies has brought with it ideas that have been able to create great changes in the economic system as a value-carrying element. The attitude of the countries of the world towards the use of cryptocurrencies has led to the adoption of different scenarios in the face of this phenomenon, such that these positions have varied from the recognition of cryptocurrencies to a complete ban. The purpose of this applied research, which is of a mixed type (quantitative/qualitative), is conceptualization and also to help decision makers and policy makers to understand the scenarios of using cryptocurrencies in the Islamic Republic of Iran. For this purpose, in addition to collecting the required information through the library and field method, the key goals and approaches that can be proposed regarding cryptocurrencies in various political, economic, social, technological, legal and environmental dimensions from the collection of upstream documents, approvals and published requirements. It has been extracted and while paying attention to the concerns of the country and obtaining the opinions of experts through semi-structured interviews, different scenarios of the use of cryptocurrencies have been determined based on the aforementioned goals, and finally, the requirements and suggested solutions for their success have also been presented. It is worth noting that the proposed framework is merely a presentation of a set of goal-oriented scenarios and any technical and implementation details have been avoided. It should also be mentioned that the sampling method for conducting this research was a purposeful, judgmental and snowball type, which continued until theoretical saturation and reached fifteen participants.

Keywords: Block chain, Cryptocurrency, Scenario, Fintech

* Corresponding Author's email: abouzar_arab@itrc.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۷۹ الی ۹۲

تحلیل سناریوهای بکارگیری رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران

علی رستمی[۱]، ابوذر عرب سرخی[۲*]، محسن آقایی[۳]، محمدعلی سخایی[۴]

[۱]دانشجوی مقطع دکتری مدیریت راهبردی فضای سایبری دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی وتحقیقات راهبردی، تهران، ایران

[۲]استادیار پژوهشی پژوهشکده امنیت، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

[۳]دبیرو پژوهشگر ارشد گروه مدیریت راهبردی فضای سایبری دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی وتحقیقات راهبردی، تهران، ایران

[۴]دانش آموخته مقطع دکتری امنیت ملی دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی وتحقیقات راهبردی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

زنجیره بلوکی از جمله فناوری‌های نوین و تحول آفرینی بوده که در سال‌های اخیر فرصت‌های متعددی را در عرصه‌های مختلف از جمله مباحث مالی ایجاد نموده که یکی از مهمترین آنها در زمینه رمزارزها شکل گرفته است. ظهور پدیده رمزارز با خود ایده‌هایی را به همراه داشته که توانسته به عنوان یک عنصر حامل ارزش در نظام اقتصادی تغییرات بزرگی ایجاد نماید. نگرش کشورهای جهان به نحوه بهره‌گیری از رمزارزها باعث شده سناریوهای مختلفی در مواجهه با این پدیده اتخاذ گردد به گونه‌ای که این مواضع از به رسمیت شناختن رمزارزها تا ممنوعیت کامل متغیر بوده است. هدف این تحقیق کاربردی که از نوع آمیخته (کمی/کیفی) بوده، مفهوم‌شناسی و همچنین کمک به تصمیم‌سازان و سیاستگذاران جهت شناخت سناریوهای بکارگیری رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران می‌باشد. بدین منظور ضمن جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز به روش کتابخانه‌ای و میدانی، اهداف ورویکردهای کلیدی قابل طرح در خصوص رمزارزها در ابعاد مختلف سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، قانونی و زیست محیطی از مجموعه اسناد بالادستی، مصوبات و الزامات منتشر شده استخراج و ضمن مورد توجه قرار دادن دغدغه‌های کشور و اخذ نظرات خبرگان از طریق مصاحبه نیمه ساختار یافته، سناریوهای مختلف بکارگیری رمزارزها بر اساس اهداف مذکور تعیین و نهایتاً الزامات و راهکارهای پیشنهادی موفقیت آنها نیز ارایه گردیده است. شایان ذکر است که چارچوب پیشنهادی صرفاً ارائه گر مجموعه‌ای از سناریوهای هدف‌گرا بوده و از ورود به هرگونه جزئیات فنی و پیاده‌سازی اجتناب گردیده است. همچنین لازم به ذکر است روش نمونه‌گیری برای انجام این تحقیق، از نوع هدفمند قضاوتی و گلوله برفی بوده که تا اشباع نظری ادامه پیدا کرده و به پانزده نفر حجم نمونه رسیده است.

کلیدواژگان: زنجیره بلوکی، رمزارز، سناریو، فین‌تک

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: abouzar_arab@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

روند فزاینده پیشرفت‌های فناورانه در حوزه‌های مختلف به ویژه در حوزه فناوری‌های مالی (فین‌تک[1]) در سنوات اخیر ضمن ایجاد تحول در نظام پولی کشورها، شئون مختلف عملکردی دولت‌ها،کسب وکارها وزندگی مردم را دستخوش تغییرات زیادی نموده است. یکی از این پیشرفت‌ها، پیدایش ارزهای رمزنگاری[2] شده مبتنی بر فناوری زنجیره بلوکی[3] می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های منحصربه فرد رمزارزها همانند غیرمتمرکز بودن، عدم نیاز به نهاد مرکزی و ناظر برای انتقال پول (انتقال نظیر به نظیر) و مشخص نبودن هویت واقعی فرستنده و گیرنده، امکان دور زدن مقررات تطبیقی بدون شناسایی کاربران را فراهم نموده و تنظیم‌گران را در مواجه با این فناوری تحول آفرین با مشکلاتی مواجه ساخته است از طرفی ویژگی‌های متمایز و منحصربه فرد رمزارزها باعث شده است که استفاده از این موجودیت‌های حامل ارزش در مبادلات بین‌المللی افزایش یابد. بطوریکه بر اساس گزارش ۲۰۲۴ موسسه تریپل ای[4] انتظار می‌رود اندازه بازار رمزارزها از ۱/۶میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱ به ۲/۲ میلیارد دلار تا سال ۲۰۲۶ افزایش یابد که این موضوع نشان دهنده روند فزآینده اقبال از این فناوری و بالطبع افزایش تصمیم گیران(اعم از افراد و نهادهای غیر دولتی) در این حوزه می‌باشد.

جامعه ایران نیز طی سال‌های اخیر ویژگی‌های یک جامعه با سبک زندگی مدرن را در زمینه رفتارهای مالی و پولی از قبیل عادت به پرداخت و خریدهای برخط، استفاده از برنامک‌های پرداخت مبتنی بر تلفن همراه[5] و تمایل به انواع گزینه‌های در حال رشد سرمایه‌گذاری را هر روز بیش از پیش از خود نشان داده است. یکی از قابل توجه ترین تغییرات رفتاری درگزینه‌های سرمایه‌گذاری مردم کشور ما، اقبال عمومی به گزینه‌های سرمایه‌گذاری در حوزه فناوری‌های تازه و نوظهور مانند رمزدارایی‌ها و یا رمزارزها بوده است بطوریکه در حال حاضر۱۲ میلیون نفر ، معادل۱۳/۴۶درصد از جمعیت کشور در بازار رمزارزها دارای فعالیت می‌باشند، یعنی رتبه دهم از لحاظ تعداد کاربران در دنیا.

با افزایش مشارکت از سوی افراد و نهادها، در حال حاضر شاهد ایجاد تغییر الگوواره‌های[6] قدرت از سلسله مراتبی، عمودی و سخت به شبکه‌ای و نرم می‌باشیم به گونه‌ای که بازیگران و رقبای جدیدی از بخش‌های غیر دولتی و حتی افراد پا به عرصه خط مشی‌گذاری، قانون‌گذاری و تنظیم مقررات گذاشته‌اند که این موضوعات به خودی خود مباحث حکمرانی را با چالش‌هایی روبرو می‌سازد و کاهش وکنترل این چالش‌ها نیز بدون کسب تصویری واقعی از تحولات و تاثیرات حاصل از این فناوری در عرصه‌های مختلف ملی و بین‌المللی با تکلفات اساسی روبرو خواهد بود. با استناد به این حقیقت که ماهیت و ذات رمزارزها بر ویژگی توزیع پذیری آن بوده و برخلاف سایر دارایی‌ها به صورت غیر متمرکز و بدون دخالت دولت‌ها و نهادهای پولی و اعتباری مدیریت وکنترل می‌شوند. از اینرو رویکردها و سناریوهای متفاوتی توسط کشورهای مختلف دنیا در مورد این پدیده اتخاذ گردیده است؛ برخی رمزارزها را یک خطر جدی پنداشتند و استفاده از آن را غیرقانونی اعلام کردند، برخی آن را دارایی محسوب و قوانین مالیاتی برای آن وضع کردند. گروه آخر هیچگونه عکس العمل رسمی در قبال این پدیده نشان نداده‌اند. اکثر کشورهای توسعه یافته نیز با رویکردی مثبت و تنظیم‌گرانه (نه ممنوع کننده) به قانونگذاری در این حوزه پرداخته‌اند[۱]

اهمیت ملاحظات ایجابی تحلیل سناریوهای بکارگیری رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران به جهت شناسایی و رفع خلاءهای نظارتی، قانونی، تعارضات و همپوشانی‌های سیاست‌ها و قوانین فعلی درکنار سایر الزامات سلبی (چالش‌ها) می‌تواند ضمن حفظ منافع ملی در خصوص کاهش دغدغه‌های کشور نیز موثر باشد. لذا هدف اصلی در این پژوهش«تدوین سناریوهای بکارگیری رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران» و سه زیر هدف ذیل نیز به عنوان اهداف فرعی مورد نظر قرار گرفته است:

- تعیین اهداف کلیدی قابل طرح در خصوص رمزارزها (مستخرج از اسناد بالادستی) در ابعاد مختلف سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، قانونی و زیست محیطی
- تعیین سناریوهای بکارگیری رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران مبتنی بر اهداف فوق
- ارایه راه کارها و الزامات پیشنهادی موفقیت سناریوها

بر همین اساس سوال«سناریوهای توسعه رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران چگونه می‌باشد؟» به عنوان سوال اصلی پژوهش تعیین گرده و در روند پژوهش به سوالات فرعی ذیل نیز پاسخ داده می‌شود:

- اهداف کلیدی جمهوری اسلامی ایران در حوزه رمزارزها در ابعاد مختلف سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، قانونی و زیست محیطی چه می‌باشند؟
- سناریوهای بکارگیری رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران مبتنی بر اهداف فوق چه می‌باشند؟
- راه‌کارها و الزامات موفقیت سناریوهای فوق چه هستند؟

سناریوهای بکارگیری رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران با توجه به اینکه بر اساس اقتضائات زمینه‌ای و جهت‌گیری‌های حاکمیتی در

[1] Fintech
[2] Cryptocurrencies
[3] Blockchain
[4] Triple-a.io
[5] Mobile application
[6] Paradigm

جمهوری اسلامی ایران تعیین گردیده‌اند از اینرو شامل نوآوری از منظر تبیین راهبردی می‌باشد.

شایان ذکر است در این تحقیق مجموعه اسناد بالادستی والزامات حاکمیتی منتشر شده در حوزه رمزارزها مورد مطالعه وبررسی قرار گرفته وسعی گردیده سناریوهای بکارگیری رمزارز در کشور از ابعاد مختلف سیاسی، اجتماعی، اقتصادی، امنیتی، فنی و...صرفاً از دید اهداف راهبردی و با استناد به ملاحظات حاکمیتی مورد تاکید در مصوبات و اسناد بالادستی کشور ارایه گردد.

۲- روش شناسی تحقیق

۲-۱- خلاصه مراحل و چگونگی انجام تحقیق

در این پژوهش که در دو مرحله اصلی و به شرح جدول ۱ تنظیم گردیده است؛ در مرحله نخست به ادبیات موضوع(شامل بررسی مفاهیم و مضامین رمزارزها ، قوانین، دستور العمل‌ها ومصوبات موجود) پرداخته شده، درمرحله دوم مهمترین اهداف و رویکردهای کلیدی و راهبردی در خصوص رمزارزها (مستخرج از اسناد بالادستی در ابعاد مختلف سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، قانونی و زیست محیطی) تعیین و مورد داوری خبرگان قرار گرفته است و در ادامه سناریوهای مختلف توسعه و بکارگیری رمزارزها در کشور بر اساس اهداف کلیدی مذکور ارایه گردیده و متعاقباً الزامات و راهکارهای پیشنهادی برای موفقیت سناریوهای تعیین شده نیز بیان گردیده است.

چون این تحقیق به موضوع سناریوهای بکارگیری رمزارز در جمهوری اسلامی ایران پرداخته و نتایج آن برای تصمیم‌سازی وتصمیم‌گیری کاربرد خواهد داشت، به لحاظ هدف کاربردی می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه در قسمت‌های مختلف تدوین رساله، از روش‌های مختلف کیفی مانند مصاحبه با خبرگان، نشست خبرگی، تحلیل محتوا و نگاشت نهادی استفاده شده لذا روش تحقیق، کمی و کیفی (آمیخته) انتخاب گردیده است.

۲-۲- روش‌های گردآوری داده‌ها

- انجام مطالعات کتابخانه‌ای و گردآوری اطلاعات از طریق مطالعه‌ی کتب و مقالات با استفاده از روش فیش‌برداری.
- انجام مصاحبه با صاحب‌نظران و خبرگان مرتبط و تکمیل پرسش‌نامه محقق‌ساخته.

۲-۳- جامعه آماری

جامعه آماری این تحقیق که به عنوان خبرگان تلقی می‌گردند حداقل دارای مدرک تحصیلی کارشناسی ارشد بوده و تجربه حضور در پروژه‌های اجرایی، تدوین مقالات علمی و پژوهشی و همچنین تالیف کتب مرتبط در حوزه‌هایی همانند زنجیره بلوکی،رمزارزها، اقتصاد رقومی و مطالعات راهبردی را داشته و به طور مستقیم ویا غیر مستقیم با موضوع این پژوهش آشنایی داشته‌اند (جدول ۲).

۲-۴- روش نمونه‌گیری و حجم نمونه

برای دست‌یابی به اهداف تحقیق اگر جامعه موردنظر کوچک و تعداد افراد کم باشد می‌توان از روش تمام شماری استفاده نمود که نتایجی به‌مراتب متقن‌تر و دقیق‌تر به دست می‌دهد اما اگر جامعه بزرگ باشد و امکانات و مقدورات اجازه ندهد ناچار باید درصد کمتری از بین افراد جامعه را به‌عنوان نمونه برگزید[۲]. با توجه به ویژگی‌ها و مشخصه‌های ذکرشده برای جامعه آماری این تحقیق و بر اساس شاخص‌های تعیین شده، تعداد جامعه آماری در این پژوهش نیز محدود بوده وبه عبارتی جامعه آماری بر جامعه نمونه منطبق است لذا برای توزیع پرسشنامه انتخاب نمونه آماری به صورت تمام شمار انجام شده است. ضمن اینکه روش نمونه گیری برای انجام مصاحبه، از نوع هدفمند قضاوتی و گلوله برفی بوده لذا حجم آن تا اشباع نظری ادامه پیدا کرده و بر این اساس حجم نمونه به ۱۵ نفر رسید.

جدول ۱. خلاصه مراحل و چگونگی انجام تحقیق

ردیف	مراحل انجام پژوهش		
	مرحله اول	مرحله دوم	
عنوان مرحله	بررسی ادبیات موضوعی	شناسایی و تحلیل اهداف کلیدی و راهبردی قابل طرح در خصوص رمزارزها (مستخرج از ا سناد بالاد ستی) در ابعاد مختلف سیا سی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، قانونی و زیست محیطی، کسب نظر خبرگان و ارایه الزامات و راهکارهای پیشنهادی برای موفقیت سناریوها	
نوع پژوهش	کیفی	کیفی	کمی
روش پژوهش	مرور و پیمایش سامان‌مند ادبیات موضوعی	مطالعه موردی چند گانه	پنل خبرگی
جامعه و نمونه آماری	بررسی مقالات، گزارش‌ها کتب تخصصی و مرجع منتخب بصورت نمونه‌گیری هدفمند		صاحب نظران حوزه رمزارز
تعداد نمونه	۱۴	۳۰	۱۵
روش گردآوری اطلاعات	مطالعه کتابخانه‌ای		مصاحبه نیمه ساختار یافته
روش تحلیل اطلاعات	تحلیل محتوا	تحلیل درون موردی / بین موردی	بررسی نسبت و شاخص روایی محتوا

جدول ۲. آمار توصیفی پرسش شوندگان(پنل خبرگی)

میزان تحصیلات			سابقه کار	
کارشناسی ارشد	دانشجوی دکتری	دکتری	بالای۲۰ سال	بین ۱۰ تا۲۰ سال
۲	۵	۸	۱۰	۵

۳- مبانی نظری و پیشینه شناسی پژوهش

۳-۱- پیشینه تحقیق

موضوع بررسی رویکردها، سناریوها، قانون‌گذاری و تنظیم گری حول محور رمزارزها در سنوات اخیر دستمایه تحقیقات متنوعی از سوی پژوهشگران و موسسات پژوهشی در سرتاسر دنیا گردیده که با بررسی و تعمق در نتایج آنها می‌توان به پیشبرد اهداف مورد نظر در این تحقیق کمک کرد. در این راستا به چند عنوان از منابعی که از نتایج و دستاوردهای آنها در این تحقیق و به جهت شناخت اهداف وتدوین سناریوها استفاده شده، اشاره می‌گردد (جدول ۳).

۳-۲- تجارب ورویکرد کشورهای مختلف

هر چند موضوع رمزارزها در حال حاضر بر اساس نمودار چرخه فناوری گارتنر[1] در مرحله سراشیبی روشنگری[2] قرار داشته و مردم شروع به درک سودمندی و فواید آن نموده‌اند، با این وجود نگرش کشورهای جهان به بهره‌گیری از رمزارزها متفاوت و در حال تغییر است. به گونه‌ای که مواضع کشورهای مختلف از به رسمیت شناختن آن‌ها تا ممنوعیت کامل متغیر است. بسیاری از کشورها در پی تغییر سیاست‌های قانون‌گذاری خود برای همگام شدن با استقبال گسترده از بازار رمزارزها بوده و از طرفی نمی‌توانند نگرانی‌های خود را از خصوصیات حاکمیت گریز این فناوری پنهان نموده و یا حداقل دارای ملاحظات تقنینی و یا تنظیم گری در این مقوله می‌باشند. در ارتباط با پذیرش و مقررات‌گذاری در این حوزه، در کشورهای مختلف اقدامات متنوعی انجام شده است؛ برای مثال، کشورهای توسعه یافته برای مقررات‌گذاری رمزارزها به سوی قوانین شفاف رفته‌اند تا بستر را برای فعالیت شرکت‌های فعال در حوزه رمزارز ایجاد کنند و این در حالی است که مقررات‌گذاری رمزارزها در کشورهای درحال توسعه همچنان با کندی و بررسی همه جانبه شرایط برای وضع قوانین سختگیرانه و دستوری درحال انجام است تا از این طریق علاوه بر استفاده از مزایای رمزارزها، بتوانند قدرت تولید و انتشار پول خود را حفظ کنند.

گزارش سال ۲۰۲۲ تامسون رویترز[3] درخصوص بررسی جهت‌گیری کشورهای مختلف پیرامون نحوه بکارگیری رمزارزها نشان دهنده رویکردهای متفاوتی است که توسط دولت‌های مختلف در خصوص تنظیم گری و همچنین رویکردهای استفاده آنها از رمزارزها اتخاذ گردیده است . برآیند بررسی‌های انجام شده موید آن است که با وجود قوانین و ضوابط تنظیم‌گری و نیز بکارگیری غیررسمی، در اغلب کشورهای دنیا رمزارزها بصورت رسمی مجوز بکارگیری ندارند.

جدول ۳. عناوین برخی از منابع مورد استفاده در انجام تحقیق

ردیف	عنوان	رویکردها (نتایج پژوهش)
۱	PwC Global Crypto Regulation Report (2023) [۳]	بررسی و ارایه گزارش در خصوص تجارب، رویکردها و ملاحظات تقنینی و تنظیم گری رمزارزها در کشورهای مختلف
۲	The Global Crypto asset Regulatory Landscape Study Blandin .at.el(2023)[۴]	
۳	Cryptocurrency Regulations by country Hammond and Todd(2023)[۵]	
۴	Regulation of Cryptocurrencies and Blockchain Technologies National and International Perspective Girasa(2023)[۶]	
۵	Blockchain & Cryptocurrency Regulation N. Dewey (2023) [۷]	
۶	تجربیات کشورها در تنظیم‌گری رمزدارایی‌ها، مهدوی(۱۴۰۲) [۸]	
۷	Cryptocurrency Investing Antia.at.el(2022) [۹]	بررسی وتحلیل جشم‌انداز سرمایه‌گذاری وبکارگیری رمزارزها
۸	Stakeholder Viewpoints on Cryptocurrencies Zekarias(2022) [۱۰]	نحلیل ذینفعان رمزارزها
۹	سناریوهای فراروی حکومتها با ورود رمزارزها به جریانات مالی و پولی آنها، متقی دستنایی وهمکاران (۱۴۰۲) [۱۱]	شناسایی کنشگران مهم و اثرگذار بر رمزارزها و نقش آنها بر سیاستهای مالی و اعتباری حکومت‌ها، پیشران‌های مؤثر و عدم قطعیت‌های مرتبط
۱۰	چارچوب حکمرانی زیستبوم رمزدارایی‌ها، عابدینی(۱۴۰۲) [۱۲]	بررسی نحوه نظیم گری و حکمرانی دولتها بر فضای رمزدارایی‌ها
۱۱	بررسی جایگاه رمزارزها در تجارت جهانی با نگاهی بر رویکرد سازمان‌های بین‌المللی و ایران زارع (۱۴۰۱) [۱۳]	بررسی وارایه گزارش در خصوص تجارب، رویکردها و ملاحظات تقنینی وتنظیم گری رمزارزها در کشورهای مختلف
۱۲	چهارچوب مقررات‌گذاری رمزارزها در ایران: بررسی رویکردهای بین‌المللی و ارائه پیشنهاد شاهچرا وهمکاران:۱۴۰۰ [۱۴]	تعیین چهارچوب پیشنهادی مقررات‌گذاری رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران به فرآخور نوع وکارکرد رمزارز
۱۳	شناسایی سناریوهای آینده رمزارزها در ایران نظیفی و بایرام زاده(۱۴۰۰) [۱۵]	بررسی و ارایه سناریوهای محتمل آینده بر اساس سه عدم قطعیت قانون‌گذاری، فناوری و جذابیت بازار رمزارزها
۱۴	رمزارزها وفرصت تاریخی کشور ما ایلیا (۱۴۰۰) [۱۶]	ارایه سناریوهای پیشنهادی بکارگیری رمزارزها در سه حوزه مردم،کسب وکارها و دولت و مولفه‌های مربوطه

[1] Gartner Hype Cycle

[2] Slope of Enlightenment

[3] Thomson Reuters

لازم به ذکر است این موضوع در نتایج منتشره در گزارش سال۲۰۲۳ موسسه پی‌دبلیوسی[1] مبنی بر بررسی ۳۵ کشور از منظر «وجود چارچوب تنظیم‌گری» و همچنین «امکان استفاده از رمزارزها در معاملات» به نحو دیگری مورد تایید قرار گرفته است. در ایران نیز تا دیماه ۱۳۹۶ در زمینه رمزارزها وضعیت خاکستری بود که تحت آن نه محدودیتی حاکم بود و نه مقرراتی وجود داشت، اما با اعمال محدودیت‌ها توسط شورای عالی مبارزه با پولشویی در زمینه معامله رمزارزها، استخراج و معامله رمزارزها با محدودیت مواجه شد. با وجود تحریم‌ها، جریان سیاست‌گذاری این حوزه با توجه به اهمیت و قابلیت کمک به نقل وانتقالات مالی در زمان تحریم، مورد توجه ویژه قرار گرفته و با وجود توجه ویژه به رمزارزها به خصوص از ۱۳۹۶ به بعد باید دانست که اقدامات صورت گرفته در حوزه مقررات‌گذاری در این حوزه همچنان نوپا و بدیع است و جای کار بسیار جهت توسعه رمزارزها در کشور وجود دارد [۱۷]. در این مدت نیز بر اساس مصوبات و دستورالعمل‌های صادره، برخی از نهادهای کشور در حوزه رمزارز دارای مسئولیت گردیده‌اند [۱۸] الی [۲۵]، طبق جدول ۴. البته این نکته نیز قابل ذکر است که تغییر و تنوع رویکردها و سناریوهای بکارگیری رمزارزها در کشورهای مختلف بیانگر پیچیدگی ابعاد تصمیم‌سازی و شرایط حاکم بر آن است. بنابراین انتخاب رویکرد و سناریوی توسعه و بکارگیری رمزارز از یک کشور به کشور دیگر بسته به نیازها و شرایط دستخوش تغییر می‌شود.

جدول ۴. نهادهای حاکمیتی/غیرحاکمیتی مرتبط با زیست‌بوم رمزارز در جمهوری اسلامی ایران

وزارت امور اقتصاد ودارایی	سازمان اداری واستخدامی
قوه قضائیه	وزارت اطلاعات
وزارت فرهنگ وارشاد اسلامی	فراجا
سازمان اطلاعات سپاه پاسداران انقلاب اسلامی	وزارت کشور
وزارت ارتباطات وفناوری اطلاعات	معاونت حقوقی ریاست جمهوری
وزارت صمت	توسعه‌دهندگان
معاون علمی و فناوری رئیس جمهور	وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی
وزارت نیرو	معاونت اقتصادی ریاست جمهوری
وزارت نفت	استانداری‌ها و فرمانداری‌ها
سازمان انرژی اتمی	سرمایه‌گذاران حقیقی وحقوقی
پلیس فتا	بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران
وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح	کسب و کارهای متوسط و کوچک
اشخاص حقیقی وحقوقی	صنایع
صرافی‌ها	سازمان بورس واوراق بهادار
استخراج کنندگان	سازمان ملی استاندارد ایران
دفتر بازرسی ویژه ریاست جمهوری	بانک‌های دارای مجوز از بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران

همچنین موضوعاتی همانند نرخ مشارکت اقتصادی، تورم، ارزش ریال، تهاجم سایبری، ارائه محصولات و خدمات نوآورانه، سهم ایران از تولید علم،گسترش فناوری بلاکچین، توسعه فین‌تک‌ها، جمعیت جوان کشور، ضریب نفوذ اینترنت، ضریب نفوذ گوشی هوشمند، قیمت رمزارز، روابط بین‌المللی، ضریب نفوذ شبکه‌های اجتماعی، سرمایه اجتماعی، شکاف طبقاتی، تمایل جامعه به پلتفرم‌های بدون واسطه، تمایل به سرمایه‌گذاری، رشد بازار سرمایه، پذیرش خدمات غیرحضوری، سرعت واکنش قانون گذار به پدیده‌های نوظهور، توسعه ابزارهای نظارتی مبتنی بر فناوری(بر پایه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین)، کاهش کارکرد پول نقد، داروینیسم رقومی[2]، تحریم (روابط بین‌الملل) از روندهای موثر بر زیست‌بوم رمزارز ایران[۲۶] شناخته شده‌اند.

با توجه به اینکه موضوع رمزارزها از ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و... قابل تأمل و تحلیل است، برای تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری درست در مواجه با این موضوعات باید زیست‌بوم رمزارزها را به درستی بشناسیم و بدانیم چه هویت‌هایی در ابعاد مذکور حضور دارند، کدام هویت‌ها در این زیست‌بوم قدرتمند هستند و قدرت آنها به چه دلیل است. تنها در این حالت است که می‌توان با تجمیع هویت‌های تصمیم‌ساز در خصوص آینده این موضوع تصمیم‌گیری کرد [۲۷].

کاربران، مشتریان، دلالان وسفته بازان، تجار و بازرگانان، سرمایه گذاران، حامیان وپشتیبان‌ها، فعالان بازار،تامین کنندگان، نوآوران، مخترعان سکه، پیشنهاد دهندگان سکه، طراحان، تنظیم کنندگان استاندارد، توسعه‌دهندگان (نرم‌افزار و..)، ترویج دهندگان، نهادهای پژوهش وتوسعه/دانشگاه‌ها، ماینرها/گروه‌های اپراتور، صراقی‌ها، خرده فروشان، ارایه کنندگان پردازنده‌های پرداخت،ارایه‌دهندگان زیرساخت، اتحادیه/انجمن‌ها، ارایه‌دهندگان کیف پول، سکوهای مبادله، رسانه‌ها، بانک و موسسات مالی، تنظیم کنندگان مقررات، دولت‌ها، تنظیم کننده‌های مالی، دوایر مالیاتی، تنظیم کنندگان گزارشات مالی، استانداردسازی، قانون گذاران وتنظیم کنندگان حریم خصوصی داده‌ها، ضابطین و مجریان قانون، کسب وکارها، مردم، حاکمیت، بانک مرکزی از جمله واژگانی هستند که در مقالات و پژوهش‌های مختلف از آنها به عنوان عناصر زیست‌بوم رمزارز نامبرده شده است.

۳-۳- مفاهیم و اصطلاحات تحقیق

زنجیره بلوکی

کار بر روی زنجیره امن بلوک‌ها برای اولین بار در سال۱۹۹۱ توسط

[1] PwC Global Crypto Regulation Report

[2] Digital Darwinism

استوارت هابر[1] و اسکات استورنتا[2] انجام شد. آنها در تلاش بودند تا سیستمی را پیاده‌سازی نموده که در آن امکان تغییر بر چسب زمانی فایل‌ها وجود نداشته باشد. در سال۱۹۹۲ بود که بایر[3]، هابرواستورنتا درخت مرکل[4] یا همان درهم‌سازی[5] را برای این سیستم به کار بردند وتوانستند چندین مستند را در بلوکی قرارداده و از این طریق کارایی سیستم خود را افزایش دهند [۲۸].

زنجیره بلوکی اولین فناوری همتا به همتا از ساختار داده ای است که از دفتر کل توزیع شده[6] استفاده می کند تا داده‌ها را در بسته‌هایی به نام (بلوک) که در یک (زنجیره) دیجیتال به یکدیگر متصل هستند ذخیره کند [۲۹]. در واقع زنجیره بلوکی پایگاه داده ای است که به جای نگهداری در سرور مرکزی، در سطح دنیا توزیع شده است. همه گره[7]های موجود در زنجیره بلوکی، هر تراکنشی که به یک بلوک داده می شود را اعتبار سنجی کرده و با ایجاد امکان راستی آزمایی، نیاز به اعتماد کردن را از بین می برد لذا وقتی بلوکی در زنجیره بلوکی ایجاد شود وبه زنجیره عمومی اضافه شود، ایجاد تغییردر آن غیر ممکن است، در نتیجه برای فریب زنجیره بلوکی باید کنترل بیش از ۵۱ درصد از گره‌ها را در دست گرفت.کار بزرگی که از نظر فنی شدنی است اما هزینه هنگفتی دارد[۳۰].

بطور کلی می توان زنجیره بلوکی را تلفیقی از فناوری، اینترنت، رمزنگاری خصوصی وپروتکل ترویجی(اختصاصی) وخصوصیاتی دانست که در آن، انتقال دارایی بدون هیچ واسطه ای در عرض چندین دهم ثانیه انجام می شود. مضافاً اینکه که بواسطه آن کاهش هزینه‌های اجرایی، افزایش بازدهی وبهره مندی سیستم‌ها، سرعت و امنیت بخشیدن به تبادلات داده‌ها و... نهایتاً ارتقاء و بهبود زندگی مردم محقق خواهد شد و به عنوان یک ابر فناوری، فناوری‌های دیگر را تحت تاثیر قرار خواهد داد[۳۱]

رمزارز

رمزارز، آخرین مرحله در سیر تکوین پول است که در پی بی اعتمادی به دولت‌ها شکل گرفت و باید آن را انقلابی در تاریخ پول دانست؛ چراکه پشتوانهٔ آن، نه کالای خاصی است و نه دولتی که آن را ضمانت کرده است؛ بلکه این نوع پول کاملاً خصوصی با پشتوانهٔ حل الگوریتم‌های ریاضی هست و تولید و نقل وانتقالات آن همه در بستر شبکه‌های رایانه‌ای و به صورت الکترونیکی و مجازی رخ می‌دهد[۱۷].

ایده رمزینه ارزها به تحقیقات دیوید چام[8] و استفان برندز[9] در سال ۱۹۸۳ بازگشته و محققان دیگری همانند آدام بک[10] ، آن را توسعه دادند. تا آنکه ویدای[11] الگوریتم درهم‌سازی (هش) پروتکل ارز رمزگذاری شده را پیشنهاد کرد. ویدای که یک متخصص حوزه فناوری اطلاعات بود، اولین بار در سال ۱۹۹۸ مفهوم ارز مجازی را به معنای رمزینه ارز در تارنمای شخصی خود به عنوان یک ایده طرح کرد. مقصود او از این پیشنهاد، تسهیل امور مالی و ایجاد پولی بدون حضور واسطه‌ها بود [۳۲]. این فناوری به دو موضوع دست یافته است: یکی عدم تمرکز و دومی ازهم گسیختگی. عدم تمرکز به معنای این است که واسطه را از معامله خارج می‌کند؛ و ازهم گسیختگی به معنای این است که این فناوری راه حل معتبری برای خرج مجدد ارائه می‌دهد [۱۷]. ظهور پدیده رمزارز با خود ایده‌هایی را به همراه داشته است که می‌تواند به زودی نظام اقتصادی و حتی روابط اجتماعی را دستخوش تغییرات بزرگی کند؛ تغییراتی که میتوان تمامی آنها را در عبارت «دگرگونی نظام انتقال ارزش» خلاصه کرد. این « ارزش» ممکن است پول، دارایی، اطلاعات، قرارداد، اختیار قانونی و یا حتی ترکیبی از این موارد باشد [۳۳].

رمزارزها به طور کلی در قالب سه بخش جهان روا (رمزارزی که استفاده، مبادله و بهره برداری از آن محدود به هیچ حوزه جغرافیایی خاصی نبوده و توسط عموم مردم دنیا در سطح اینترنت قابل دسترس است)، منطقه‌ای (رمزارزی که بین دو یا چند کشور و باهدف تسهیل و تسریع تبادلات تجاری مابین آن کشورها صادر و به رسمیت شناخته می شود) و ملی (رمزارزی که با پشتوانه ریال وتوسط بانک مرکزی تحت کنترل ونظارت بانک مرکزی است ومنطبق با اصول رمزنگاری و به شکلی بی‌واسطه و غیرمتمرکز مبادله می‌گردد) دسته بندی می‌گردند[۳۴] . بر اساس تعریف بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران رمزارزها نوعی دارایی مالی هستند که در بستری دیجیتال، غیر متمرکز وشفاف به نام زنجیره بلوکی موجودیت یافته‌اند. این دارایی‌ها در شرایطی می‌توانند کارکرد پولی به خود بگیرند. در این تعریف که در سند الزامات و ضوابط فعالیت در حوزه رمزارزها [۲۰] در کشور آمده ، رمزارزها به انواع جهان روا، بانک مرکزی (ملی)، منطقه‌ای، رمزارزهای حاصل از عرصه اولیه سکه[12]/ بهامهر[13]) فرآیندی اشاره می‌کند که طی آن، شخصی حقیقی یا حقوقی در داخل کشور اقدام به صدوررمزارز یا بهامهر دیجیتال جدید نموده و چندین واحد از آن را با اهدافی مانند تامین سرمایه،

[1] Stuart Haber
[2] Scutt Stornetta
[3] Bayer
[4] Merkle Tree
[5] Hash Tree
[6] Distributed ledger technology
[7] Node
[8] David Chaum
[9] Stefan Brands
[10] Adam Back
[11] Wei Dai
[12] Initial Coin Offering(ICO)
[13] Token

در اختیار سرمایه‌گذاران می‌گذارد. این نوع رمزارز می‌تواند به دو صورت بدون پشتوانه دارایی یا با پشتوانه صادرشود. و بهامهر (یک موجودیت دیجیتال که یک ارزش مجازی یا واقعی را نمایندگی می‌کند.) تقسیم‌بندی گردیده‌اند لازم به ذکر است در این تحقیق سناریوهای مورد نظر در قالب تقسیم‌بندی مذکور مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

سناریو

سناریونویسی بخشی از علم «آینده پژوهی» تلقی می‌شود که هدف آن پیشگیری از غافلگیری، تقویت وحدت رویه در برنامه ریزی ، تهیهٔ ابزاری برای مدیریت علمی رخدادها و تاب آوری جامعهٔ هدف در صورت وقوع آن شرایط و تعیین جهت گیری و اولویت‌بندی تخصیص منابع می‌باشد. تاکنون، تعاریف مختلفی از سناریونویسی ارایه شده است. پیتر شوارتز[1] در کتاب هنر دورنگری، سناریو را اینگونه تعریف می‌کند «ابزاری برای نظم بخشیدن به ادراکات فرد در محیط‌های متفاوت آینده، که در آن، تصمیم فرد می‌تواند به درستی اجرا شود». مایکل پورتر[2] سناریو را «اجماع داخلی در مورد آنچه آینده ممکن است پیشرو بگذارد» و بالاخره، پاول شومیکر[3] سناریو را روشی عملی برای تجسم آینده‌های ممکن که در آن تصمیم‌های سازمان می‌تواند اجرا شود، تعریف می‌کند[۳۵]. سناریوها را طبق پارامترهای محیطی(سیاست، اقتصاد، جامعه و فناوری و....) طبقه بندی می‌کنند. شرکتهای تجاری عمدتاً علاقمند هستند تا رابطهٔ متقابل میان پارامترهای اقتصادی و فناوری را بررسی و تحلیل نمایند. در حالیکه پارامترهای سیاسی و اجتماعی اغلب در حاشیه قرار می‌گیرد [۳۵]. از اینرو در این پژوهش سعی شده سناریوهای مختلف توسعه و بکارگیری رمزارزها بر اساس مهمترین اهداف کلیدی(سناریوهای هدف‌گرا) و رویکردهای مستخرج از اسناد بالادستی کشور در ابعاد مختلف سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، قانونی و محیطی تعیین گردند لذا لازم است در ابتدا اهداف فوق تعیین و ارزیابی شوند که در ادامه به این موضوع پرداخته شده است.

۴- اهداف کلیدی بکارگیری رمزارزها در ج.ا.ا

اهداف و رویکردها، نخستین موضوعاتی هستند که در یک سند سیاستی راهبردی می‌بایست به شکل درست و دقیق تعیین و تبیین گردند در این بخش اهداف مورد نظر در موضوعات حوزه فضای مجازی بطور عام و رمزارزها که بطور خاص در اغلب اسناد بالادستی کشور از جمله سند راهبردی جمهوری اسلامی ایران در فضای مجازی، سند تحول دولت مردمی، طرح کلان شبکه ملی اطلاعات، سیاست‌های کلی اصل ۴۴ قانون اساسی و... مورد توجه قرار گرفته‌اند که مهمترین آنها در ابعاد مختلف سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، قانونی و محیطی به شرح جدول ۵ گردآوری گردیده است.

جدول ۵. اهداف و رویکردهای کلیدی بکارگیری رمزارزها در ابعاد مختلف

ابعاد/اهداف	مهمترین اهداف رویکردهای کلیدی بکارگیری رمزارزها (متناسب با ابعاد تعیین شده)
سیاسی	مدیریت تحریم[۳۶] [۴۱] نفی سلطه خارجی[۳۶] [۳۷] [۴۱]
اقتصادی	کنترل تورم[۳۹] درآمدزایی[۳۹] مدیریت نقدینگی[۳۹] افزایش سهم بازار[۴۱] [۴۰] [۳۹] [۳۸]سهولت در مبادلات وتجارت بین‌الملل[۴۱] [۳۹] [۳۸] [۳۷] حفظ ارزش پول ملی[۳۹] [۳۷]مشارکت اقتصادی[۴۱][۴۰]افزایش رقابت پذیری[۴۰] [۳۹]
فناورانه	امنیت فناورانه[۳۶] [۴۱] روزآمدی[۳۶]نوآوری[۴۱] [۳۹] [۳۶] رصد ،کنترل و هوشمندی [۳۸]
قانونی	شفافیت و مسئولیت پذیری [۳۹] [۳۸] [۳۷]
زیست محیطی	حفظ محیط زیست[۳۶] [۴۱] توسعه سبز و سلامت محور [۳۶] [۴۱]
اجتماعی	رضایتمندی عمومی[۴۱] [۴۰] [۳۸] ساماندهی کاربری[۴۱] [۳۸] [۳۷] مشارکت عمومی[۴۱] [۴۰] [۳۸] سواد فضای مجازی[۴۱]

منبع: یافته‌های پژوهش

با توجه به اینکه اهداف کلیدی مندرج در جدول مذکور بر اساس منابع مختلف استخراج گردیده‌اند لذا در تایید و وجود آنها «غیرضروری بودن آنها» اختلافی نیست و رجوع به نظرات خبرگانی صرفاً جهت تعیین دو گویه «ضروری بودن» و «مفید بودن ولی ضروری نیست» صورت پذیرفته است. از اینرو انجام بررسی روایی محتوایی جهت تعیین این دو گویه لازم و ضروری است.

۴-۱- نسبت روایی محتوایی[4]

نسبت روایی محتوایی یک روش سنجش روایی پرسشنامه است. این نسبت توسط لاوشه[5] [۴۲] طراحی شده است. روایی محتوایی نشان می‌دهد یک مقیاس یا پرسشنامه تا چه میزان همه جنبه‌های سازه مورد نظر را مورد سنجش قرار می‌دهد. به‌طور کلی روایی پرسشنامه به این سوال پاسخ می‌دهد که ابزار اندازه‌گیری تا چه حد خصیصه مورد نظر را می‌سنجد. روش‌های متعددی برای سنجش روایی وجود دارد که روایی محتوایی از طریق محاسبه نسبت روایی محتوایی و شاخص روایی محتوایی مرسوم ترین آنها است.

جهت محاسبه این نسبت از نظرات متخصصین در زمینه محتوای آزمون مورد نظر استفاده می‌شود. ابتدا اهداف آزمون برای خبرگان توضیح داده می‌شود و تعاریف عملیاتی مربوط به محتوای سؤالات

[1] Peter Schwartz
[2] Michael porter
[3] Paul Shoemaker
[4] CVR(Content Validity Ratio)
[5] Lawshe

بیان می‌شود. سپس از آنها خواسته می‌شود تا هریک از سؤالات را بر اساس طیف سه بخشی لیکرت (گویه ضروری است، گویه مفید است ولی ضروری نیست و گویه ضرورتی ندارد) طبقه‌بندی کنند:

Ne: تعداد متخصصینی که گزینه ضروری را انتخاب کرده‌اند

N: تعداد کل متخصصین

CVR=(Ne/N/2)N/2

طبق نظر لاواشی حداقل نسبت روایی محتوایی قابل قبول بر اساس تعداد خبرگان (۱۵نفر) ۰/۴۹ می‌باشد. به عبارت دیگر آیتم‌هایی که نسبت روایی محتوایی آنها بالاتر از۰/۴۹ بیشتر است مستقیماً مورد پذیرش قرار گرفته‌اند. سوالاتی که نسبت روایی محتوایی محاسبه شده برای آن‌ها کمتر از میزان مورد نظر با توجه به تعداد خبرگان ارزیابی کننده سؤال باشد، باید از آزمون کنار گذاشته شوند. به علت اینکه بر اساس نسبت روایی محتوایی بدست آمده، روایی قابل قبولی ندارند.

همچنین با اختصاص عدد دو به گویه «ضروری است»، عدد یک به گویه «مفید است ولی ضروری نیست» و عدد صفر به گویه «ضرورتی ندارد» مقدار میانگین قضاوت‌ها محاسبه گردیده است.

لذا نتایج برآورد نسبت روایی محتوا و میانگین عددی قضاوت‌ها که بر اساس معیارهای فوق مورد بررسی قرار گرفته‌اند (جدول ۶):

- پذیرش مستقیم آیتم‌هایی که حداقل نسبت روایی محتوایی آنها طبق نظر لاواشی از۰/۴۹ بیشتر است. این آیتم‌ها به عنوان اهداف کلیدی اصلی درچارچوب پیشنهادی لحاظ گردیده‌اند.
- پذیرش آیتم‌هایی که نسبت روایی محتوایی آنها بین صفر و یک بوده و مقدار میانگین عددی قضاوت‌ها مساوی یا بیشتر از ۱/۵ می‌باشد. این آیتم‌ها به عنوان اهداف کلیدی فرعی درچارچوب پیشنهادی لحاظ گردیده‌اند. این وضعیت نشان می‌دهد که نیمی از خبرگان با ضرورت آیتم مورد نظر موافق بوده‌اند.

۴-۲- شاخص روایی محتوایی [1]

شاخص روایی محتوایی نیز برای سنجش روایی پرسشنامه استفاده می‌شود (جدول ۷). این شاخص توسط والتز و باسل[2] ارائه شده است. برای محاسبه این شاخص از خبرگان خواسته شده تا میزان مرتبط بودن هر گویه را با طیف چهار قسمت(غیر مرتبط، نیاز به بازبینی اساسی، مرتبط اما نیاز به بازبینی و کاملاً مرتبط) مشخص کنند.تعداد خبرگانی که گزینه ۳ و ۴ را انتخاب کرده‌اند را بر تعداد کل خبرگان تقسیم می‌کنیم. اگر مقدار حاصل از ۰/۷ کوچکتر بود گویه رد می‌شود اگر بین ۰/۷ تا ۰/۷۹بود باید بازبینی انجام شود و اگر از ۰/۷۹ بزرگتر بود قابل قبول است.

CVI=∑CVR/تعداد آیتم‌های تایید شده

جدول ۶. آمار توصیفی پرسش‌شوندگان در راستای محاسبه نسبت روایی محتوایی

اهداف و رویکردهای کلیدی	میزان پذیرش			نسبت روایی محتوایی	میانگین عددی قضاوت‌ها
	ضروری است	مفید است ولی ضروری نیست	ضرورتی ندارد		
حفظ محیط زیست	۸	۵	۲	۰/۰۶	۱/۴
افزایش سهم بازار	۱۴	۱	۰	۰/۸۶	۱/۹۳
رصد ،کنترل و هوشمندی	۱۵	۰	۰	۱	۲
کنترل تورم	۱۵	۰	۰	۱	۲
حفظ ارزش پول ملی	۸	۷	۰	۰/۰۶	۱/۵۳
توسعه سبز وسلامت محور	۱۴	۱	۰	۰/۸۶	۱/۹۳
نفی سلطه خارجی	۱۴	۱	۰	۰/۸۶	۱/۹۳
شفافیت و مسئولیت پذیری	۹	۵	۱	۰/۲	۱/۵۳
مشارکت عمومی	۸	۶	۱	۰/۰۶	۱/۴۶
سهولت در مبادلات و تجارت بین‌الملل	۱۵	۰	۰	۱	۲
درآمدزایی	۱۵	۰	۰	۱	۲
نوآوری	۱۲	۳	۰	۰/۶	۱/۸
روزآمدی	۱۳	۲	۰	۰/۷۳	۱/۸۶
امنیت فناورانه	۸	۵	۲	۰/۶	۱/۴
رضایتمندی عمومی	۱۵	۰	۰	۱	۲
مدیریت نقدینگی	۱۵	۰	۰	۱	۲
ساماندهی کاربری	۸	۱	۶	۰/۰۶	۱/۱۳
مدیریت تحریم	۱۵	۰	۰	۱	۲

۵- نتیجه‌گیری

در این بخش با توجه به تدارک نظری اندیشیده شده و نتایج حاصل از سنجش‌های روایی محتوایی، صحیح‌ترین اهداف و رویکردهای کلیدی بکارگیری رمزارزها در ابعاد مختلف شناسایی و سناریوهای مورد نظر متناسب با شرایط کشور در قالب نگاشت نوع رمزارز به

[1] Content Validity Index

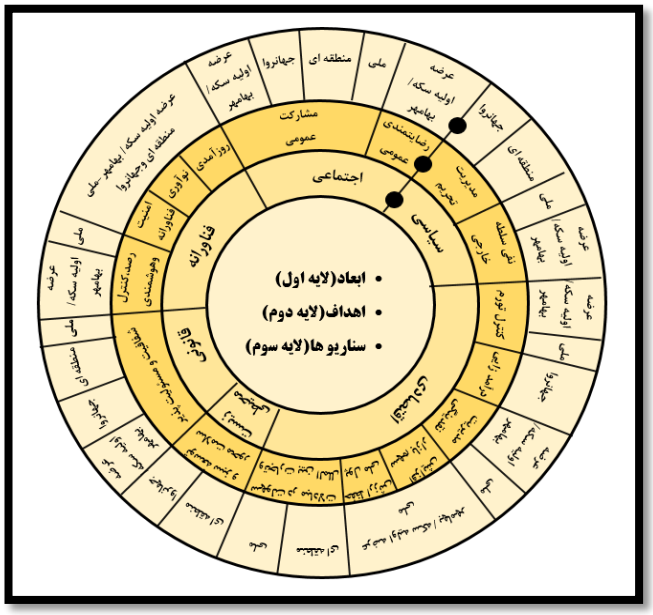
[2] Waltz & Bausell

ابعاد و اهداف مربوطه (شکل ۱) به شرح جدول ۸ ارایه گردید. مثلاً در بعد سیاسی و راستای مدیریت تحریم، سناریوهای استفاده از رمزارزهای منطقه‌ای و جهان‌روا پیشنهاد شده و در خصوص سایر ابعاد و اهداف مربوطه نیز سناریوهای پیشنهادی به همین ترتیب ارایه گردیده‌اند. لذا در این بخش از پژوهش، ضمن دستیابی به هدف در نظرگرفته شده مبنی بر تدوین سناریوهای توسعه رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران، به سوال اصلی تحقیق نیز پاسخ داده شده است.

همچنین از آنجایی که فناوری رمزارزها یک پدیده در حال تکوین و پویا می‌باشد، لذا امکان تغییر در سناریوهای پیشنهادی مبتنی بر شرایط سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و ... نیز وجود خواهد داشت. همچنین با توجه به اینکه سناریوهای پیشنهادی بر اساس اقتضاعات زمینه‌ای و جهت‌گیری اهداف حاکمیتی در جمهوری اسلامی ایران تعیین گردیده از این‌رو شامل نوآوری از منظر تبیین راهبردی می‌باشند.

جدول ۷. آمار توصیفی پرسش شوندگان در راستای محاسبه نسبت روایی محتوایی و میانگین عددی قضاوت‌ها

اهداف و رویکردهای کلیدی	کاملاً مرتبط	مرتبط اما نیاز به بازبینی	نیاز به بازبینی اساسی	غیر مرتبط	شاخص روایی محتوایی
حفظ محیط زیست	۳	۷	۵	۰	۰/۶۶
افزایش سهم بازار	۱۴	۱	۰	۰	۱
رصد ،کنترل و هوشمندی	۱۵	۰	۰	۰	۱
کنترل تورم	۱۵	۰	۰	۰	۱
حفظ ارزش پول ملی	۸	۷	۰	۰	۱
توسعه سبز وسلامت محور	۱۴	۱	۰	۰	۱
نفی سلطه خارجی	۱۴	۱	۰	۰	۱
شفافیت و مسئولیت پذیری	۹	۵	۱	۰	۰/۹۳
مشارکت عمومی	۸	۶	۱	۰	۰/۹۳
سهولت در مبادلات و تجارت بین‌الملل	۱۵	۰	۰	۰	۱
درآمدزایی	۱۵	۰	۰	۰	۱
نوآوری	۱۲	۳	۰	۰	۱
روزآمدی	۱۳	۲	۰	۰	۱
امنیت فناورانه	۸	۵	۲	۰	۰/۸۶
رضایتمندی عمومی	۱۵	۰	۰	۰	۱
مدیریت نقدینگی	۱۵	۰	۰	۰	۱
ساماندهی کاربری	۸	۱	۶	۰	۰/۶
مدیریت تحریم	۱۵	۰	۰	۰	۱



شکل ۱. نمای سناریوهای بکارگیری رمزارزها در جمهوری اسلامی ایران

جدول ۸. اهداف، رویکردهای کلیدی وسناریوهای بکارگیری رمزارزها در ابعاد مختلف

ابعاد	اهداف و رویکردهای کلیدی	سناریوها			
		بانک مرکزی (ملی[1])	منطقه‌ای	جهان روا	عرضه اولیه سکه/ بهامهر
سیاسی	مدیریت تحریم	-	*	*	-
	نفی سلطه خارجی	*			*
اقتصادی	کنترل تورم	*	-	-	*
	درآمدزایی	-	-	*	-
	مدیریت نقدینگی	*	-	-	*
	افزایش سهم بازار	*	-	-	*
	سهولت در مبادلات و تجارت بین‌الملل	*	*	-	-
	حفظ ارزش پول ملی	*	-	-	*
فناورانه	روزآمدی	*	*	*	*
	نوآوری	*	*	*	*
	امنیت فناورانه	*	*	*	*
	رصد ،کنترل و هوشمندی	*	-	-	*
قانونی	شفافیت و مسئولیت‌پذیری	*	*	*	*
زیست محیطی	توسعه سبز وسلامت محور	-	*	*	-
اجتماعی	رضایتمندی عمومی	-	-	-	*
	مشارکت عمومی	*	*	*	*

منبع: تحقیق یافته

[1] Central Bank Crypto-Currency

۶- جمع‌بندی و پیشنهادات

تجربه سالیان اخیر حاکی از آن است که جمهوری اسلامی ایران با اتکاء به سرمایه انسانی جوان، متخصص و تحصیلکرده، در خلق ارزش حوزه فناوری اطلاعات و ارتباطات دست آوردهای قابل‌توجهی را کسب نموده و در حال حاضر این مطلب به وضوح در شکل‌گیری ساختاری زیست‌بوم اقتصاد رقومی قابل رؤیت می‌باشد. پیشتازی کشور درحوزه پرداخت‌های الکترونیکی موید این موضوع است که طی سال‌های اخیر جامعه ایران در زمینه رفتارهای مالی و پولی از قبیل عادت به پرداخت و خریدهای برخط، استفاده از برنامک‌های پرداخت مبتنی بر تلفن همراه و تمایل به انواع گزینه‌های در حال رشد سرمایه‌گذاری در حوزه فناوری‌های تازه و نوظهور مانند رمزدارایی‌ها و یا رمزارزها را بیش از پیش از خود نشان داده است.

با این وجود، رمزارزها به عنوان یک موضوع مستحدثه و علیرغم اقبال فزآینده عمومی به آن در کشورمان فاقد قوانین جامع و مانع بوده هرچند مصوبات وآیین نامه‌هایی در این خصوص وجود دارد. از اینرو لازم است درمواجهه با این نظام جدید حکمرانی پولی و مالی، آمادگی لازم در قالب اقدامات پژوهشی، تنظیم‌گری و تقنینی متناسب با سناریوهای متصور و با یک نگاه کل نگر صورت پذیرد .

اولویت‌های پژوهشی پیشنهادی

بررسی اسناد، قوانین و مقررات کشورمان و حتی مجامع و مراجع منطقه‌ای و بین‌المللی در حال حاضر گویای این واقعیت است که هنوز رویکرد یگانه یا یکپارچه‌ای نسبت به چگونگی مواجهه با پدیده رمزارزها، آن هم در سطح کلان و راهبردی، نظم و نسج نیافته و هنوز بسیاری از کشورها مراحل مقدماتی امکان‌سنجی و نیازسنجی را می‌گذرانند. موضوع تدوین نظام مشخص و جامعی در سطح ملی و فرامنطقه‌ای برای تنظیم گری نحوه تعاملات ذینفعان در زیست‌بوم رمزارزها به جهت شناسایی و رفع خلاءهای نظارتی، قانونی، تعارضات و همپوشانی سیاست‌ها و قوانین فعلی و همچنین رفع یا مدیریت چالش‌های این پدیده از جمله مواردی است که می‌توان در قالب یک طرح کلان پژوهشی پیشنهاد نمود.

«رویکردها، راهبردها، رهیافت‌ها، اصول، ارکان و التزامات» نظام جامع تنظیم‌گری رمزارز در جمهوری اسلامی ایران از دیگر مولفه‌های راهبردی می‌باشند که هرکدام به عنوان یک موضوع پژوهشی قابل طرح و بررسی خواهند بود. هرچند در این پژوهش به دو موضوع اهداف والزامات به عنوان دو جزء راهبردی دیگر پرداخته شده است.

الزامات و راهکارهای اجرایی پیشنهادی برای موفقیت سناریوها

منظور از الزامات، مجموعه قواعد و راهکارهایی است که درصورت پیاده‌سازی و پایبندی به آنها، می‌توان قانون‌مندی، نظام‌مندی و ضابطه‌مندی موضوع موردنظر را در هر سطح، حوزه و شاخه‌ای تأمین و تضمین کرد. در این راستا و با توجه به سناریوهای تدوینی، الزامات و راهکارهای اجرایی پیشنهادی موفقیت به تفکیک هدف و خصوصیات سناریوهای مربوطه به شرح جدول ذیل ارایه گردیده است.

لازم به ذکر است؛ الزامات پیشنهادی مطروحه با مورد توجه قرار دادن این موضوع که نحوه مواجهه با پدیده رمزارزها نه صرفاً از جنس اقدامات سلبی بلکه مبتنی بر تفکرات ایجابی و با رویکرد تنظیم گری و حفظ منافع ملی کشور می‌بایست شکل گیرد بیان گردیده است.

جدول ۹. الزامات پیشنهادی برای موفقیت سناریوها

بعد	هدف/رویکرد	سناریوها	الزامات و راهکارهای اجرایی پیشنهادی برای موفقیت سناریوها
اجتماعی	رضایتمندی عمومی	عرضه اولیه سکه/ بهامهر	• جلب اعتماد و مشارکت فعالان اقتصادی و مردم برای استفاده از رمزارزها از جمله تدوین سازوکارهای تخصیص و تبدیل پاداش
	مشارکت عمومی	رمزارزهای جهان‌روا منطقه‌ای- ملی و عرضه اولیه سکه/ بهامهر	• ارتقاء سواد مالی واقتصادی و همچنین اطلاع رسانی و آموزش به شهروندان • توسعه بستر بهامهر با قابلیت اتصال سامانه‌های مختلف • پیش‌بینی و استقرار سازوکارهای مناسب مدیریت هویت مشتری
سیاسی	مدیریت تحریم	رمزارزهای جهان‌روا	• تدوین سازوکارهای پذیرش برای مبادله از طرف مقابل و مبادله پول و رمزارز بر اساس ضوابط تعیین شده • تعیین صرافی‌های قابل اعتماد و مجاز • پیشنهاد استفاده در مبادلات بین‌المللی با حجم محدود یا در سطح شرکت‌های کوچک/ متوسط
		رمزارز منطقه‌ای	• کنترل مراکز مبادله رمزارزها با پول رایج کشور • تدوین قوانین و مقررات حاکم بر عرضه کنندگان اولیه سکه/ بهامهر و فعالیت‌های آنها • اعتبارسنجی عرضه کنندگان اولیه سکه/توکن توسط نهاد نظارتی ذیربط • پیش‌بینی سازوکارهای مناسب مدیریت هویت مشتری • تعیین هم‌پیمان/هم‌پیمانان راهبردی • تعیین و تبیین قوانین لازم برای همکاری بین کشورهای عضو با درنظر گرفتن منافع هر یک

بعد	هدف/رویکرد	سناریوها	الزامات و راهکارهای اجرایی پیشنهادی برای موفقیت سناریوها
سیاسی	نفی سلطه خارجی	عرضه اولیه سکه/ بهامهر	• انتخاب و توسعه پلتفرم پایه مناسب • الزام مبادله پول و رمزارز بر اساس ضوابط تعیین شده • هماهنگی میان بخشی در حوزه رمزارزها واتخاذ سیاست‌های واحد • جذب سرمایه و سرمایه‌گذاری اولیه با انتخاب و توسعه سازوکار اجماع، فرایند تأیید و مبادله • جلب اعتماد و مشارکت فعالان اقتصادی و مردم
		رمزارزهای ملی	• ایجاد قطب‌های منطقه‌ای در کشور جهت توسعه فعالیت در زمینه رمزارزها • تبیین قوانین لازم برای همکاری بین کشورهای عضو با درنظر گرفتن منافع هر یک • تعیین هم‌پیمان/هم‌پیمانان راهبردی
اقتصادی	مدیریت نقدینگی	عرضه اولیه سکه/ بهامهر	• جلب اعتماد و مشارکت فعالان اقتصادی و مردم و جذب سرمایه و سرمایه‌گذاری اولیه • کنترل مراکز مبادله رمزارزها با پول رایج کشور • تدوین قوانین و مقررات حاکم بر عرضه کنندگان اولیه سکه/توکن و فعالیت‌های آنها • پیش‌بینی سازوکارهای مناسب مدیریت هویت وهمچنین اعتبارسنجی عرضه کنندگان اولیه سکه/بهامهر توسط نهاد نظارتی ذیربط
		رمزارزهای ملی	• تعیین نظام نظارتی دقیق ویکپارچه • تدوین ضوابط حاکم بر حفظ حریم خصوصی شهروندان
اقتصادی	افزایش سهم بازار	عرضه اولیه سکه/بهامهر	• تعیین و توسعه سازوکار اجماع، فرایند تأیید و مبادله • تبیین و توسعه سکوی نرم‌افزاری پایه مناسب • الزام مبادله پول و رمزارز بر اساس ضوابط تعیین شده • هماهنگی میان بخشی در حوزه رمزارزها واتخاذ سیاست‌های واحد • جلب اعتماد و مشارکت فعالان اقتصادی و مردم و جذب سرمایه و سرمایه‌گذاری اولیه
		رمزارزهای ملی	• ایجاد قطب‌های منطقه‌ای در کشور جهت توسعه فعالیت در زمینه رمزارزها • تبیین قوانین لازم برای همکاری بین کشورهای عضو با درنظر گرفتن منافع هر یک • تعیین هم‌پیمان/هم‌پیمانان راهبردی
اقتصادی	کنترل تورم	عرضه اولیه سکه/بهامهر	• جلب اعتماد و مشارکت فعالان اقتصادی و مردم و جذب سرمایه و سرمایه‌گذاری اولیه • تعیین صرافی‌های قابل اعتماد نظام نظارتی دقیق ویکپارچه بر صرافی‌ها • کنترل مراکز مبادله رمزارزها با پول رایج کشور • تدوین قوانین و مقررات حاکم بر عرضه کنندگان اولیه سکه/ بهامهر و فعالیت‌های آنها • پیش‌بینی سازوکارهای مناسب مدیریت هویت وهمچنین اعتبارسنجی عرضه کنندگان اولیه سکه/بهامهر توسط نهاد نظارتی ذیربط
		رمزارزهای ملی	• ایجاد زیرساخت‌های رصد هوشمند کسب وکارهای حوزه رمزارز • تعیین نظام نظارتی دقیق ویکپارچه • تدوین بسته‌های سیاستی پولی و مالی از سوی حاکمیت مبتنی بر رمزارزهای ملی
اقتصادی	درآمدزایی	رمزارزهای جهان‌روا	• لزوم استخراج محدود و کنترل شده در کشور • استانداردگذاری در حوزه صنعت استخراج مبتنی بر الزامات اقلیمی استخراج در کشور • هدایت وراهبری استخراج رمزارزها به سمت توسعه شبکه تولید،انتقال وتوزیع برق کشور • ایجاد ویا توسعه سامانه‌های رصد هوشمند وبرخط و بلادرنگ مصرف برق کشور • ایجاد زیرساخت‌های مجاز فنی لازم جهت استخراج • تعریف و رعایت الزامات مبادله پول و رمزارز بر اساس ضوابط تعیین شده • تعریف الزامات اقلیمی استخراج در کشور و در چارچوب ضوابط تعیین شده • تنظیم مقررات صدور جواز و پروانه بهره برداری شرکتهای فعال درزمینه استخراج ارایه حمایت‌های گسترش بازار استخراج رمزارز مبتنی بر تقویت بازار برق کشور
اقتصادی	سهولت در مبادلات بین‌المللی	رمزارز منطقه‌ای	• تعیین هم‌پیمان/هم‌پیمانان راهبردی • تبیین قوانین لازم برای همکاری بین کشورهای عضو با درنظر گرفتن منافع هر یک • انتخاب و توسعه سازوکار اجماع، تأیید و مبادله مورد نیاز • انتخاب و یا توسعه پلتفرم پایه مناسب • تعریف و رعایت الزامات مبادله پول و رمزارز بر اساس ضوابط تعیین شده • مشارکت در توسعه ابزارهای کاربردی
		رمزارزهای جهان‌روا	• رصد وآمایش محیطی رفتار و عملکرد شرکت‌های کوچک/متوسط در فضای مبادلاتی (شناسایی موارد سوءپیشینه) • تبیین قوانین ومقررات لازم برای همکاری بین کشورهای عضو با درنظر گرفتن منافع هر یک • مبادله پول و رمزارز بر اساس ضوابط تعیین شده و همچنین استفاده در مبادلات بین‌المللی در حجم محدود در سطح شرکت‌های کوچک/ متوسط [1] • مشارکت در توسعه سکوهای بین‌المللی • مشارکت در توسعه ابزارهای کاربردی • تعیین صرافی‌های قابل اعتماد

[1] Small Medium Enterprise (SME)

بعد	هدف/رویکرد	سناریوها	الزامات و راهکارهای اجرایی پیشنهادی برای موفقیت سناریوها
اقتصادی	حفظ ارزش پول ملی	عرضه اولیه سکه/بهامهر	• پیش‌بینی سازوکارهای مناسب مدیریت هویت وهمچنین اعتبارسنجی عرضه کنندگان اولیه سکه/بهامهر توسط نهاد نظارتی ذیربط • جلب اعتماد و مشارکت فعالان اقتصادی و مردم به جهت جذب سرمایه و سرمایه‌گذاری اولیه • تدوین قوانین و مقررات حاکم بر عرضه کنندگان اولیه سکه/بهامهر و فعالیت‌های آنها • کنترل مراکز مبادله رمزارزها با پول رایج کشور • تعیین صرافی‌های قابل اعتماد و همچنین نظام نظارتی دقیق ویکپارچه بر صرافی‌ها
		رمزارزهای ملی	• ایجاد زیرساخت‌های رصد هوشمند کسب وکارهای حوزه رمزارز • لزوم تعیین نظام نظارتی دقیق ویکپارچه • تدوین بسته‌های سیاستی پولی و مالی از سوی حاکمیت مبتنی بر رمزارزهای ملی
فنی	رصد و کنترل وهوشمندی	عرضه اولیه سکه/بهامهر	• پیش‌بینی سازوکارهای مناسب مدیریت هویت وهمچنین اعتبارسنجی عرضه کنندگان اولیه سکه/بهامهر توسط نهاد نظارتی ذیربط • جلب اعتماد و مشارکت فعالان اقتصادی و مردم به جهت جذب سرمایه و سرمایه‌گذاری اولیه • تدوین قوانین و مقررات حاکم بر عرضه کنندگان اولیه سکه/بهامهر و فعالیت‌های آنها
		رمزارزهای ملی	• پیش بینی سامانه‌های رصد هوشمند و تجزیه و تحلیل اطاعات مربوط به معاملات با استفاده از پروتکل‌های لایه‌ای جهت مدیریت معاملات • تربیت نیروی متخصص کارآزموده جهت توسعه زیرساخت‌ها و سکوهای بومی فناورانه
	روزآمدی	رمزارزهای جهان‌روا-منطقه‌ای-ملی و عرضه عرضه اولیه سکه/بهامهر	• تربیت نیروی متخصص کارآزموده جهت توسعه زیرساخت‌ها و سکوهای بومی فناورانه
	نوآوری		• حمایت از پارک‌های علم فناوری، شتابدهنده‌ها وشرکت‌های سرمایه‌گذاری برای توسعه فعالیت‌ها در زمینه رمزارزها
	امنیت فناورانه		• ایجاد زیرساخت‌ها و سکوهای بومی فنآورانه، یکپارچه و امن لازم
قانونی	شفافیت ومسئولیت پذیری	رمزارزهای جهان‌روا منطقه‌ای-ملی و عرضه عرضه اولیه سکه/بهامهر	• الزام همکاری سازمانها و نهادهای قانونگذار کشور در حوزه رمزارزها • تبیین قوانین لازم برای همکاری بین کشورهای عضو با درنظر گرفتن منافع هر یک • تعیین نظامات بکارگیری رمزارزها از منظر مصادیق اسلامی وفقه حکومتی • اعمال قوانین وقواعد حاکم بر انتقال پول وهمچنین خدمات رسانی مالی • لزوم هماهنگی میان بخشی در حوزه رمزارزها واتخاذ سیاست‌های واحد- تعیین نهادهای متولی قانونی برای هرکدام از رمزارزها بسته به حوزهایی که در آن اثرگذار می‌باشند. • تعیین نظامات طبقه‌بندی دارایی رمزنگاری شده(طبقه‌بندی دارایی‌های رمزنگاری شده و تعیین چهارچوب‌های تقنینی و نظارتی مربوطه) • پیش‌بینی سازوکارهای مناسب جهت مدیریت هویت مشتریان ومالکین • اعمال جرایم بازدارنده برای استخراج کنندگان بدون مجوز
زیست محیطی	توسعه سبز وسلامت محور	رمزارزهای جهان‌روا	• تعریف الزامات اقلیمی و استانداردگذاری صنعت استخراج رمزارز در کشور • هدایت وراهبری استخراج رمزارزها به سمت توسعه شبکه تولید،انتقال وتوزیع برق کشور • اصلاح تعرفه برق مصرفی به جهت ایجاد انگیزه مشارکت در تولید برق مورد نیاز استخراج رمزارزها • رصد مستمر و شناسایی استخرهای استخراج مستقر در کشور

مراجع

[۱] امامیان سیدمحمدصادق، ذوالفقاری امیراحمد، محمدزاده احسان، زمانیان مرتضی(۱۳۹۷) نظام ملی تنظیم گری، مفهوم تنظیم گری و ارتباط آن با نظام حکمرانی؛ دفتر مطالعات اقتصاد بخش عمومی (گروه مدیریت و تشکیلات) مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

[۲] خلیلی شورینی، سیاوش(۱۳۹۰) روش‌های پژوهش آمیخته (با تاکید بر بومی‌سازی)،تهران: انتشارات یادواره کتاب، صفحه ۲۰۴

[3] PwC Global Crypto Regulation Report (2023)

[4] Blandin Apolline, Sofie Cloots Ann, Hussain Hatim, Rauchs Michel, Saleuddin Rasheed, Grant Allen Jason, Zhang Bryan, Cloud Katherine (2020), The Global Cryptoasset Regulatory Landscape Study, Cambridge Centre for Alternative Finance, University Of Cambridge

[5] Hammond Susannah, Ehret Todd, Cryptocurrency Regulations by country(2022), Thomson Reuters

[6] Girasa Rosario, Regulation of Cryptocurrencies and Blockchain Technologies (National and International Perspective(2023), Second Edition, ISSN 2662-5083 ISSN 2662-5091 (electronic) Palgrave Studies in Financial Services Technology ISBN 978-3-031-21811-8 ISBN 978-3-031-21812-5 (eBook) https://doi.org/10.1007/978-3-031-21812-5 Pleasantville, USA

[7] N. Dewey Josias(2023), Blockchain & Cryptocurrency Regulation, Global Legal Groupe, Fifth Edition

[۸] مهدوی امیرحسین (۱۴۰۲) تجربیات کشورها در تنظیمگری رمزدارایی‌ها مرکز همکاری‌های تحول و پیشرفت ریاست جمهوری اندیشکده دینا

[9] Shehriyar Antia, Taimur Hyat, Jakob Wilhelmus(2022), Cryptocurrency Investing, Powerful Diversifier or Portfolio Kryptonite? Konrad-Adenauer-Stiftung. http://www.kas.de/web/rspa/home

[10] Zekarias Mathewos (2022), Stakeholder Viewpoints on Cryptocurrencies, Master's Thesis, International Business Management,ARCADA

[۱۱] متقی دستنایی افشین، کولیوند خلیل،گلثومیان حمیدرضا (۱۴۰۲) سناریوهای فراروی حکومتها با ورود رمزارزها به جریانات مالی و پولی آنها، تهران: فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای انسانی دانشگاه تهران

[۱۲] عابدینی وحید (۱۴۰۲) چارچوب حکمرانی زیست‌بوم رمزدارایی‌ها، قم: اندیشکده دینا و تهران: مرکز همکاریهای تحول و پیشرفت ریاست جمهوری

[۱۳] زارع علیرضا (۱۴۰۱) بررسی جایگاه رمزارزها در تجارت جهانی با نگاهی بر رویکرد سازمان‌های بین‌المللی و ایران، تهران: فصلنامه تحقیقات نوین میان‌رشته‌ای حقوق دوره دوم، شماره سوم، پاییز ،۸۸-۱۰۲

[۱۴] مهشید شاهچرا، ماندانا طاهری، مرجان فرجی (۱۴۰۲)چهارچوب مقررات‌گذاری رمزارزها در ایران: بررسی رویکردهای بین‌المللی و ارائه پیشنهاد، تهران: پژوهشکده پولی و بانکی بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، صفحه ۳

[۱۵] نظیفی چندرابی محمد و بایرام‌زاده سونا (۱۴۰۲) شناسایی سناریوهای آینده رمزارزها در ایران، نشریه تحقیقات نوین مدیریت خاتم، دانشگاه خاتم دوره ۲، شماره ۲، صفحات ۱ الی۱۲

[۱۶] ایبنا (۱۴۰۳) شبکه خبری اقتصاد و بانک ایران

[۱۷] شاهچرا مهشید ، طاهری ماندانا ، فرجی مرجان (۱۴۰۰) چهارچوب مقررات‌گذاری رمزارزها در ایران: بررسی رویکردهای بین‌المللی و ارائه پیشنهاد، تهران: پژوهشکده پولی وبانکی بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران

[۱۸] دبیرخانه شورای عالی و مرکز ملی فضای مجازی (۱۳۹۹)، سیاستها و تکالیف توسعه رمز پول بانک مرکزی ج.ا.ا و ساماندهی رمزارزها

[۱۹] تصویبنامه شماره ۱۵۱۴۵۵/ت۵۹۳۶۸ه مورخ۱۴۰۱/۸/۲۳ هیئت وزیران (۱۴۰۱)، آیین‌نامه استخراج رمزدارایی‌ها

[۲۰] بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران – معاونت فناوریهای نوین (۱۳۹۷) الزامات و ضوابط حوزه رمزارزها.

[۲۱] تصویب نامه شماره۵۸۱۴۴/ت۵۵۶۳۷ه مورخ۱۳۹۸/۵/۱۳ هیئت وزیران جمهوری اسلامی ایران

[۲۲] تصویب نامه شماره۵۸۱۴۵۵/ت۵۹۳۶۸ه مورخ۱۴۰۱/۸/۲۲ هیئت وزیران جمهوری اسلامی ایران

[۲۳] تصویب نامه شماره۹۰۵۰۲/ت۶۱۴۰۰ه مورخ۱۳۹۸/۵/۲۵ هیئت وزیران جمهوری اسلامی ایران

[۲۴] شورای عالی فضای مجازی (۱۴۰۳) پیش‌نویس نظام‌نامه رمزارز (اعم از رمزارز ملی و ساماندهی رمزارزهای جهان‌روا

[۲۵] تصویب نامه شماره۱۵۱۴۵۵/ت۵۹۳۶۸ه مورخ۱۴۰۱/۸/۲۳ هیئت وزیران جمهوری اسلامی ایران

[۲۶] شرکت مشاوره مدیریت ایلیا (۱۴۰۰)،رمزارزها و فرصت تاریخی کشور ما، ایران، تهران

[۲۷] فرازمند عاطفه، عرب‌سرخی ابوذر، آقایی محسن، آزادوار نجمه (۱۴۰۰) ارایه چارچوب مفهومی شناسایی وتحلیل ذی‌نفعان و بازیگران اکوسیستم رمزارز، فصلنامه امنیت دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی،سال یازدهم، شماره چهلم، صفحات ۲۴۵ الی۲۷۶

[۲۸] تفضلی، طلا؛ عرب‌سرخی، ابوذر؛ غفاری، فریبا؛ بحرالعلوم، مرجان (۱۳۹۹) زنجیره بلوکی-مفاهیم پایه،کاربردها، تهدیدها و مخاطرات امنیتی. تهران: انتشارات آوای قلم، صفحه ۲۱

[۲۹] مظفری‌فرد، مجتبی؛ حمزه، رها؛ شکاری، لیلا؛ پرورده، راضیه؛ دیهول، مریم (۱۳۹۷) مقدمه‌ای بر زنجیره بلوک، شرکت شبکه الکترونیکی پرداخت کارت(شاپرک) ، صفحه ۱۸

[۳۰] وان لین وانگ، آریس(۱۳۹۸). مترجمین (علیرضا نواب‌پور، محمدرضا قدوسی)، اقتصاد کریپتو بلاکچین، رمزارز و اقتصاد توکن چگونه دنیای مالی را دگرگون می‌کنند، انتشارات راه پرداخت، ایران، تهران، صفحه ۳۷

[۳۱] موگایار ویلیام (۱۳۹۷) کسب وکار بلاکچین استفاده از نسل بعدی فناوری اینترنت، از حرف تا عمل. ترجمه پیمان رحمانی. تهران: انتشارات راه پرداخت، صفحه ۴۲

[۳۲] نوری، مهدی؛ نواب پور، علیرضا(۱۳۹۷) مقدمه ای بر تنظیم گری رمزینه ارزها در اقتصاد ایران (ویرایش اول). تهران:گزارش دفتر مطالعات اقتصادی گروه بازارهای مالی مرکزپژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.

[۳۳] شاکری، محمد علی؛ خوشخو، مهدی (۱۳۹۸) پدیده رمزارز، مخاطرات، فرصتها و نحوه سیاستگذاری، گزارش معاونت علمی‌پژوهشی پژوهشکده تحقیقات راهبردی گروه پژوهش‌های اقتصادی دبیرخانه مجمع تشخیص مصلحت نظام، صفحه ۴

[۳۴] گل محمد، هومن (۱۳۹۹). رمزارزها در ایران؛ الزامات وضوابط حوزه رمزارز، نشریه الکترونیکی ویندا‌د

[۳۵] نپوری‌زاده بهنام (۱۳۸۸) سناریو ابزاری برای تصمیم گیری بلندمدت- آینده‌پژوهی مفاهیم، روشها- انتشارات: مؤسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاعی-مرکز آینده پژوهی علوم و فناوری دفاعی

[۳۶] شورایعالی فضای مجازی(۱۴۰۱) سند راهبردی جمهوری اسلامی ایران در فضای مجازی، اهداف واقدامات کلان، شماره۱۰۳۵۵۴

[۳۷] شورایعالی فضای مجازی(۱۳۹۸) طرح کلان و معماری شبکه ملی اطلاعات

[۳۸] ابلاغیه دولت سزدهم (۱۴۰۰) سند تحول دولت مردمی، شماره۱۵۸۴۸۳

[۳۹] ابلاغیه مقام معظم رهبری (۱۳۸۴) سیاستهای کلی اصل ۴۴ قانون اساسی

[۴۰] مصوبه هیئت محترم وزیران(۱۳۸۷) سند راهبردی نظام جامع فناوری اطلاعات کشور

[۴۱] مرکز ملی فضای مجازی(۱۴۰۳)پیش نویس سند نظام نامه رمزارز اعم از ایجاد رمزارز ملی وساماندهی رمزارزهای جهان روا، شماره۱۰۰۰۲۱

[42] C.h.lawashe (1975), A Quantitive Approach to Content Validity, Purdue Universit, 563-575.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 93-109

Adaptive Real-Time Decision-Making in the IoT-Based Supply Chain Considering Gradual Orders

Fatemeh Mohammadi Chinisaz[1], Alireza Hashemi Golpayegani[2×], Saeed Sharifian Khortoomi[3]

[1] M.Sc., Management Science and Technology Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
[2] Assistant Professor, APA Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
[3] Associate Professor, Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 09 September 2024, Revised: 05 February 2025, Accepted: 16 February 2025
Paper type: Research

Abstract

The advent of new technologies and global trade has intensified competition to produce high-quality products at lower costs and shorter timelines. This shift highlights the need for flexible, real-time responsive supply chains to adapt to environmental changes and customer demands. Given the dynamic nature of supply chains and their environments, the Internet of Things (IoT) emerges as an effective technology for gathering and transmitting information from internal and external environments, significantly enhancing supply chain management. A review of existing research reveals that most studies have focused on one or two layers of the supply chain, often neglecting the interconnectedness of these layers. Furthermore, prior research has predominantly considered static supply chain environments, disregarding the influence of internal and external changes and events. This research introduces a real-time decision-making system for supply chain management leveraging IoT technology. The proposed system identifies suitable components for each order across all supply chain layers (distribution, production, supply). It also monitors real-time events and provides optimal responses to mitigate the negative effects of disruptions on the order preparation process. Simulation of the supply chain utilizes Colored Petri nets, comprising a main Petri net and 10 subnets to model the distributed structure and dynamic processes of supply chain layers. Comparative analysis with the "Optimal method" indicates that the proposed solution achieves a 13.8% improvement in average cost indicators and a 70.5% enhancement in average time indicators, based on the MAPE criterion, demonstrating its effectiveness in managing dynamic supply chains.

Keywords- Supply Chain, Supply Chain Management, Supply Chain Events, Internet of Things, Petri Nets.

* Corresponding Author's email: sa.hashemi@aut.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۹۳ الی ۱۰۹

تصمیم‌گیری برخطِ تطبیق‌پذیر، در زنجیره تأمین مبتنی بر اینترنت اشیا (با فرض سفارش‌های تدریجی)

فاطمه محمدی چینی‌ساز[۱]، سید علیرضا هاشمی گلپایگانی[۲*]، سعید شریفیان خرطومی[۳]

[۱]کارشناس ارشد مهندسی فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت علم و فنآوری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

[۲]استادیار، پژوهشکده فنآوری‌های نو، مرکز پژوهشی آپا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

[۳]دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

ظهور فناوری‌های نوین و جهانی‌شدن تجارت، رقابت برای تولید محصولات باکیفیت، با حداقل هزینه و زمان را افزایش داده‌است. بنابراین نیاز به زنجیره‌های تأمین انعطاف‌پذیر که به‌صورت لحظه‌ای به تغییرات محیط و تقاضای مشتری پاسخ دهند، تشدید شده است. در این راستا، فناوری اینترنت اشیا، راه‌حلی مناسب برای انتقال اطلاعات درونی و بیرونی زنجیره تأمین می‌باشد که نقش مؤثری در مدیریت بهینه زنجیره دارد. مدیریت بهینه زنجیره تأمین، ملزوم نگرشی جامع به کل زنجیره و انتخاب همزمان اجزای انجام‌دهنده سفارش در هر سه لایه اصلی زنجیره است، ولی اکثر مطالعات تنها به تصمیم‌گیری در یک لایه از زنجیره پرداخته و ارتباط متقابل عملکرد لایه‌ها را نادیده گرفته‌اند. همچنین، اکثر تحقیقات، زنجیره تأمین را در محیطی ایستا و بدون توجه به ماهیت پویای آن و رویدادهای درونی و بیرونی زنجیره، مطالعه کرده‌اند. این پژوهش، با هدف توسعه سیستمی بلادرنگ برای مدیریت سفارشات و رویدادهای زنجیره تأمین، از فناوری اینترنت اشیا بهره می‌برد. راه‌حل پیشنهادی با بررسی لحظه‌ای رویدادهای داخلی و خارجی زنجیره، مناسب‌ترین اجزا از تمام لایه‌های (توزیع، تولید، تأمین) را برای انجام هر سفارش انتخاب می‌کند تا اثرات منفی رویدادهای پیش‌بینی‌نشده را به حداقل برساند. مدل زنجیره، با شبکه پتری توسعه‌یافته با رنگ و زمان شبیه‌سازی شده است. این مدل، شامل یک شبکه اصلی و ۱۰ زیرشبکه می‌باشد که انتخاب اجزا برای سفارشات تدریجی و پاسخدهی به رویدادهای لحظه‌ای را در کل لایه‌های زنجیره، پوشش می‌دهد. مقایسه نتایج راه‌حل پیشنهادی با "راه‌حل بهینه" نشان می‌دهد که این روش میانگین شاخص‌های هزینه را ۱۳٫۸ درصد و شاخص‌های زمان را ۷۰٫۵ درصد بهبود می‌دهد.

کلیدواژگان: زنجیره تأمین، مدیریت زنجیره تأمین، رویدادهای زنجیره تأمین، اینترنت اشیا، شبکه‌های پتری.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: sa.hashemi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

مطالعه پیرامون زنجیره تأمین نشان می‌دهد که مهمترین مسئله در مدیریت هر زنجیره تأمین، انتخاب و تخصیص اجزای مناسب از تمام لایه‌های زنجیره (لایه توزیع، تولید، تأمین و لایه‌های حمل‌ونقل) برای انجام هر سفارش ورودی به زنجیره است.[۱], [۲]

امروزه روش سنتی مدیریت زنجیره تأمین[1] با عنوان "روش تولید انبوه برای انبار[2]" جای خود را به روش جدیدی با عنوان "تولید براساس سفارش[3] یا شخصی‌سازی سفارش" داده است. این روش جدید، قابلیت انعطاف بالایی در برابر تغییرات محیط و انتظارات مشتریان دارد.[۲] همچنین پیشرفت‌های پرشتاب فناوری و فشارهای رقابت جهانی، کسب‌وکارها را وادار می‌کند که زنجیره تأمین خود را ساده، چابک، منعطف و پاسخگو بسازند تا هر زنجیره تأمین بتواند تعداد زیادی از رویدادهای پیش‌بینی‌شده و پیش‌بینی-نشده را مدیریت کند.[۳] چالش اصلی در مدیریت رویدادهای زنجیره تأمین از این واقعیت ناشی می‌شود که رویدادهای مختلف زنجیره، در عین حال که توزیع‌شده و پویا هستند، به یکدیگر مرتبط‌اند و عملکرد هم را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند [۴] ,[۵].

پیشرفت‌های فناوری اطلاعات، تغییرات عمده‌ای در شیوه مدیریت زنجیره تأمین ایجاد کرده است. به عنوان مثال، اینترنت اشیا[4] که یکی از پرکاربردترین دستاورهای فناوری اطلاعات است، مدیریت زنجیره تأمین را به سطوح جدیدی از ارتباطات منتقل می‌کند. بسیاری از مطالعات در زمینه زنجیره تامین و لجستیک، اذعان دارند که به کارگیری اینترنت اشیا در تمام فرآیندهای زنجیره تأمین تاثیر مثبت داشته است.[۶-۱۸] زیرا با جمع‌آوری و پردازش بلادرنگ داده‌ها و حداقل کردن تأخیر بین جمع‌آوری داده و تصمیم‌گیری برای انجام اقدامات لازم، توانسته است به خوبی انعطاف‌پذیری لازم برای پاسخگویی آنی و اقدام لحظه‌ای را در مقابل رویدادهای زنجیره تأمین فراهم سازد.

در همین راستا پرسش اصلی که تحقیق جاری قصد پرداختن به آن را دارد، به شرح زیر است:

چگونه برای هر سفارش ورودی به زنجیره تأمین، بهترین ترکیب از توزیع‌کننده/ ها، تولیدکننده/ ها و تأمین‌کننده/ ها، با توجه به وضعیت لحظه‌ای زنجیره و اجزای آن انتخاب شود تا سفارشات با حداقل هزینه و زمان ممکن انجام شوند؟

بنابرآنچه بیان شد، پژوهش جاری قصد دارد با استفاده از فناوری اینترنت اشیا، به دو موضوع مهم در مدیریت زنجیره تأمین بپردازد: اول تصمیم‌گیری در مورد انتخاب اجزای انجام‌دهنده‌ی هر سفارش در تمام لایه‌های زنجیره، با هدف دستیابی به بهترین مسیر انجام سفارش‌ها از نظر زمان و هزینه، و دوم پاسخ‌دهی بلادرنگ به رویدادهای زنجیره، با هدف حداقل کردن تاثیر منفی این رویدادها در عملکرد زنجیره.

نوآوری اصلی این پژوهش در دریافت و پاسخدهی بلادرنگ به رویدادهای پیش‌بینی‌نشده از محیط داخلی و پیرامونی زنجیره تأمین است، تا اثرات منفی این رویدادها در انجام سفارشات زنجیره را به حداقل برساند.

۱-۱- فرض‌های اولیه

مفروضات اولیه‌ای که در پیاده‌سازی روش پیشنهادی این مطالعه، درنظر گرفته شده‌اند عبارتند از:

- در این تحقیق یک زنجیره تأمین صنعتی با رویکرد تولید براساس سفارش، مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- این زنجیره، یک زنجیره تأمین کامل، شامل سه لایه اصلی (توزیع، تولید، تأمین) و سه لایه فرعی حمل‌ونقل است.
- این زنجیره، مبتنی بر سفارش های تدریجی می‌باشد.
- تمرکز زنجیره بر روی تولید یک نوع محصول است که این محصول از سه نوع ماده اولیه با سهم برابر تولید می‌شود.
- اطلاعات بلادرنگ از شرایط زنجیره، اجزای لایه‌ها، محیط و غیره از طریق اینترنت اشیا فراهم می‌شود که شامل:
  ۱. وضعیت لحظه‌ای هر یک از اجزای زنجیره در هر لایه
  ۲. وضعیت و موقعیت سفارش‌ها
  ۳. رویدادهای درونی و پیرامونی زنجیره
- اگر فاصله بین ورود سفارش به زنجیره و ثبت نهایی آن سفارش در زنجیره، بیش از ۱۵ روز طول بکشد، سفارش به دلیل تأخیر زیاد در ثبت، لغو خواهد شد.
- به ازای هر ۱۰ روز تأخیر در تأمین یا تولید یا توزیع سفارش، ۱۰٪ درصد از مبلغ پرداختی به جزئی که مسئول ایجاد تأخیر است، به عنوان جریمه کسر خواهد شد.

[1] Supply chain management
[2] Make to Stock (MTS)
[3] Build to Order (BTO)
[4] Internet of Things (IoT)

۲- مرور کارهای پیشین

بالاموروگان[1] و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۱، روشی را برای مدیریت و ردیابی موثر زنجیره تأمین مواد غذایی با استفاده از اینترنت اشیا، ارائه کردند که از مدل شبکه‌های پتری توسعه‌یافته برای ردیابی مواد غذایی با استفاده از داده‌های دوره‌ای استفاده می‌کند. مدل ارائه‌شده با تعداد ۴۹۱۴ نمونه داده‌ی واقعی، برای ارزیابی ۷ مورد از مهمترین ویژگی‌ها از نظر کیفیت، هزینه و زمان مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم شبکه پتری پیشنهادی در مقایسه با روش‌های K-means, SOM برای مدیریت زنجیره تأمین مواد غذایی، کارآمدتر است.

فیروآ[2] و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۲۰، از طریق ادغام چندین تکنیک، یک سیستم با توانایی حل مسئله ایجاد کردند که درواقع یک مدل مدیریت زنجیره تأمین با ساختار چندعاملی می‌باشد که با شبکه‌های پتری رنگی پیاده‌سازی شده است. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که عامل یکپارچه‌ساز به بهبود کلی سیستم تا ۴۲,۴۷ درصد کمک می‌کند و زمانی که دو عامل ادغام می شوند، عملکرد سیستم از بهینه محلی ۸۱,۳۴ درصد به ۹۱,۹۲ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده بهبود ۱۰,۵۸ درصدی نتایج است.

دراکاکی[3] و تزیوناس[4] [۱۱] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از فناوری اینترنت اشیا، یک روش مدل‌سازی سلسله‌مراتبی برای شبیه‌سازی مدیریت موجودی در یک زنجیره تأمین چند مرحله‌ای که در معرض عدم دقت موجودی است، ارائه کردند. شبیه‌سازی زنجیره مبتنی بر شبکه‌های پتری رنگی زمان‌بندی‌شده و با استفاده از ابزار CPN Tools انجام شده‌است. مدل شبیه‌سازی شده تحت ۳۰ سناریو مختلف، با تعداد ۷۰۰ داده آزمایشی و در ۷ پیکربندی مختلف، مورد ارزیابی قرارگرفته است. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که اثر شلاقی در زنجیره‌های تأمین دارای RFID در معرض عدم دقت موجودی، در مقایسه با زنجیره‌های تأمین بدون RFID افزایش می‌یابد.

در مقاله [۷] که در سال ۲۰۱۸ ارائه شد، یک وب سایت طراحی شد که در مدیریت زنجیره تأمین به تأمین‌کنندگان و مدیران کمک می‌کند. این سیستم امکان ردیابی جریان محصولات را از طریق فناوری RFID فراهم می‌سازد. در این تحقیق روش ارزیابی تصمیم‌گیری نوتروزفیک[5] با روند سلسله‌مراتبی تحلیلی[6] ادغام شده و از معیارهای مدل SCOR برای ارزیابی عملکرد سیستم پشنهادی استفاده شده است.

وانگ[7] و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۰ یک سیستم اعزام لجستیک هوشمند بر مبنای اینترنت اشیا ارائه کردند که هماهنگی پویا بین مشتریان، وسایل حمل‌ونقل و فن‌آوری ابری را ممکن می‌سازد. این سیستم در سه بخش اصلی و براساس روش شبکه و گراف MAKLINK طراحی شده‌است. الگوریتم به کار گرفته‌شده در این سیستم یک الگوریتم دو سطحی متشکل از الگوریتم Dijkstra و الگوریتم کلونی مورچه است که از عملیات ارسال هوشمند پشتیبانی می‌کند. بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی در یک مورد مطالعاتی با محصول و مشتریان واقعی نشان می‌دهد که این سیستم، کارایی عملیات اعزام را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد و همچنین منجر به افزایش سهم شرکت‌ها در بازار می‌شود.

در پژوهش [۲۲] که در سال ۲۰۱۹ منتشر شد، کاوالکانته[8] و همکاران، با ترکیب شبیه‌سازی و یادگیری ماشین و با استفاده از تصمیم‌گیری داده‌محور، یک روش برای انتخاب تأمین‌کننده انعطاف‌پذیر ارائه کردند. نتایج بدست‌آمده از این تحقیق ارتباط بین انحراف از مشخصات عملکرد زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر و ریسک عملکرد تأمین‌کننده را به طور موثر بیان می‌کند. در این مطالعه، شبیه‌سازی مدل با نرم افزار Anylogic انجام شد و مدل یادگیری ماشین با استفاده از بسته Scikit-Learn پیاده‌سازی شده‌است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین منجر به بهبود قابلیت اطمینان تحویل تأمین‌کنندگان از ۴۴,۰۳ به ۴۶,۱۶ درصد می‌شود.

جلالی و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۴ یک سیستم پیشنهاددهنده برای تعیین رویه انجام سفارش در زنجیره تأمین ارائه کردند. این سیستم با استفاده از الگوریتم K-means نشان می‌دهد که کدام‌یک از اجزای زنجیره در لایه‌ی تأمین، تولید و توزیع برای انجام سفارش مناسب‌تر است. از نقاط قوت این پژوهش می‌توان به این مورد اشاره کرد که با در دسترس بودن امتیازهای سفارش‌های قبلی در پایگاه داده سیستم، می‌توان از پیشنهادهای سایر مشتریان، برای انتخاب رویه مناسب استفاده کرد.

به منظور بررسی دقیق‌تر، در جدول ۱ راه‌حل پیشنهادی این تحقیق با ۱۱ مورد از مرتبط‌ترین پژوهش‌های این حوزه، مقایسه شده‌است.

[1] S. Balamurugan
[2] Luis H. Fierroa
[3] Maria Drakaki
[4] Panagiotis Tzionas
[5] Neutrosophic
[6] Analytic hierarchy process (AHP)
[7] Jianxin Wang
[8] Ian M. Cavalcante

جدول ۱. مقایسه مطالعات مرتبط

ردیف	شماره مقاله	نوع مسئله				ویژگیهای زنجیره تامین				رویکرد			ابزار			معیار تصمیمگیری		
		انتخاب تامینکننده	انتخاب تولیدکننده	انتخاب توزیعکننده	انتخاب حملکننده	اجزا با وضعیت متغییر	اعمال رویدادهای درونی	اعمال رویدادهای بیرونی	تغییر مسیر سفارشات	مدل هوشمند	مدل آماری یا ریاضی	مدل چند معیاره	ابزارهای اینترنت اشیا	ابزارهای مدل سازی	زبانهای برنامه نویسی	هزینه	زمان	نظر ذینفع یا مشتری
۱	[۱۹]	*	*	*		*	*	*				*		*			*	
۲	[۶]	*	*	*				*				*		*		*	*	
۳	[۴]	*		*		*				*				*			*	
۴	[۱۱]	*	*		*							*		*	*			*
۵	[۲۵]				*						*			*			*	
۶	[۲۱]	*				*		*				*	*	*				*
۷	[۲۶]				*			*		*			*		*	*	*	
۸	[۱۲]		*		*			*				*	*	*		*	*	
۹	[۲۸]	*					*					*		*	*			*
۱۰	[۲۹]	*	*	*						*					*	*	*	*
۱۱	[۳۱]	*								*				*	*	*		*
۱۲	روش پیشنهادی	*	*	*	*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	

۳- رویکرد پیشنهادی

در بخش اول بیان شد که این پژوهش قصد دارد با استفاده از فناوری اینترنت اشیا رویکردی برای مدیریت سفارش‌های ورودی و رویدادهای موجود در یک زنجیره تامین کامل، متشکل از سه لایه اصلی (توزیع، تولید، تأمین) و چند لایه فرعی حمل‌ونقل ارائه دهد. شکل ۱ معماری کلی رویکرد پیشنهادی این تحقیق را نشان می‌دهد که دارای سه بخش اصلی می‌باشد. همچنین چگونگی ارتباط این بخش‌ها با یکدیگر نیز، در شکل ۱ قابل مشاهده است.

۱. پایگاه اطلاعات لحظه‌ای: شامل اطلاعات وضعیتی زنجیره و اجزای آن که به وسیله زیرساخت‌های فناوری اینترنت اشیا، به صورت لحظه‌ای از محیط درونی و بیرونی زنجیره جمع‌آوری و مخابره می‌شوند.
۲. سیستم تصمیم‌گیری بلادرنگ: این سیستم، بر مبنای اطلاعات دریافتی از پایگاه اطلاعات لحظه‌ای، دو عملکرد اصلی را انجام می‌دهد:
   ۱) تعیین مسیر سفارش‌های زنجیره
   ۲) مدیریت رویدادهای زنجیره

   شکل ۲ نمودار گردش‌کار این دو عملکرد اصلی را نشان می‌دهد.
۳. لایه‌های اجرایی زنجیره تأمین: مجموعه‌ی کل اجزای زنجیره تأمین در قالب یک ساختار با سه لایه اصلی (توزیع، تولید، تأمین) و چند لایه فرعی (لایه‌های حمل‌ونقل)، که براساس دستورات دریافتی از سیستم تصمیم‌گیری، مراحل آماده‌سازی و تحویل سفارش را انجام می‌دهند.

۳-۱- فرآیند مسیریابی سفارش‌ها

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پس از ورود هر سفارش جدید به زنجیره، ابتدا به توجه به مقدار سفارش و موجودی انبارها در لایه توزیع، سفارش در یکی از دسته‌های سفارش فوری یا سفارش تولیدی قرار می‌گیرد.

پس از دسته‌بندی سفارش، فرآیند انتخاب اجزا برای آن سفارش آغاز می‌شود، این فرآیند از پایین‌ترین لایه (لایه توزیع) آغاز شده و تا رسیدن به بالاترین لایه (لایه تأمین) ادامه می‌یابد. در ادامه این بخش، چگونگی عملکرد سیستم پیشنهادی، برای انتخاب اجزای انجام‌دهنده‌ی سفارش‌های فوری و تولیدی، تشریح خواهد شد.

۳-۱-۱- تعیین مسیر سفارش‌های فوری

سفارش‌هایی که در دسته فوری قرار می‌گیرند، به طور مستقیم از محصولات موجود در انبارهای لایه‌ی توزیع به مشتری ارسال می‌شوند و دو مرحله‌ی تأمین مواد اولیه و تولید محصولات، از مسیر انجام سفارش‌های فوری حذف می‌شود. بنابراین برای تعیین مسیر هر سفارش فوری، کافیست که توزیع‌کننده‌های مناسب برای انجام آن سفارش انتخاب شوند.

شکل ۳ نمودار گردش‌کار فرآیند انتخاب توزیع‌کننده/ ها را، برای سفارش‌های فوری نشان می‌دهد که پارامترهای آن در جدول ۲ شرح داده‌شده‌اند:

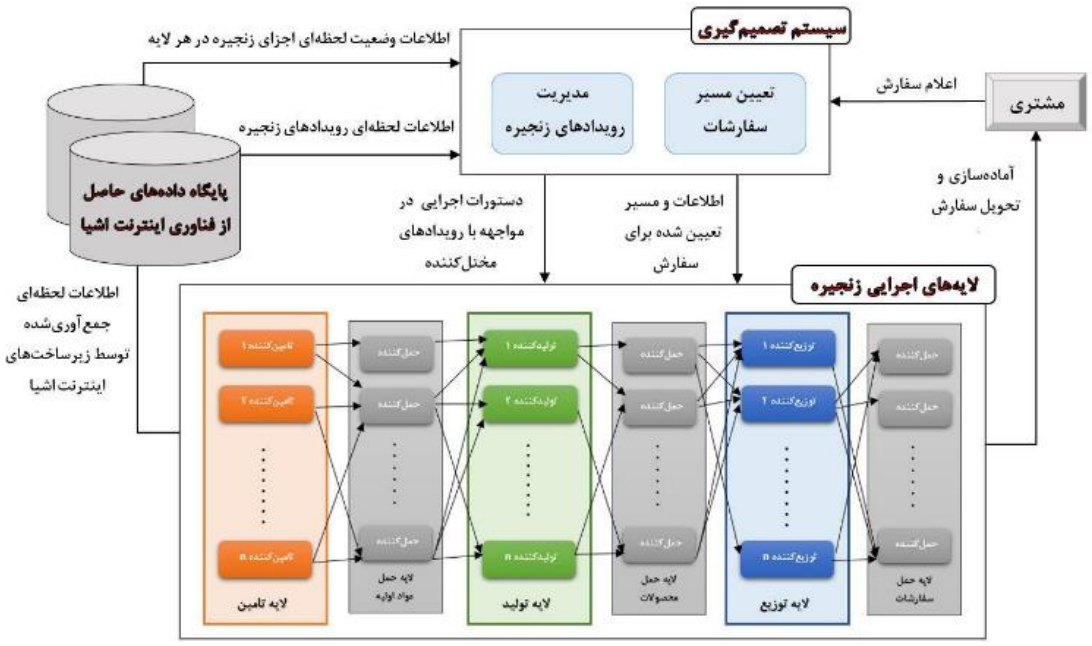
و برای محاسبه $\mathbf{ScoreD_i}$ از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$ScoreD_i = P.rateD_i + 2 * S.rateD_i \quad (۱)$$

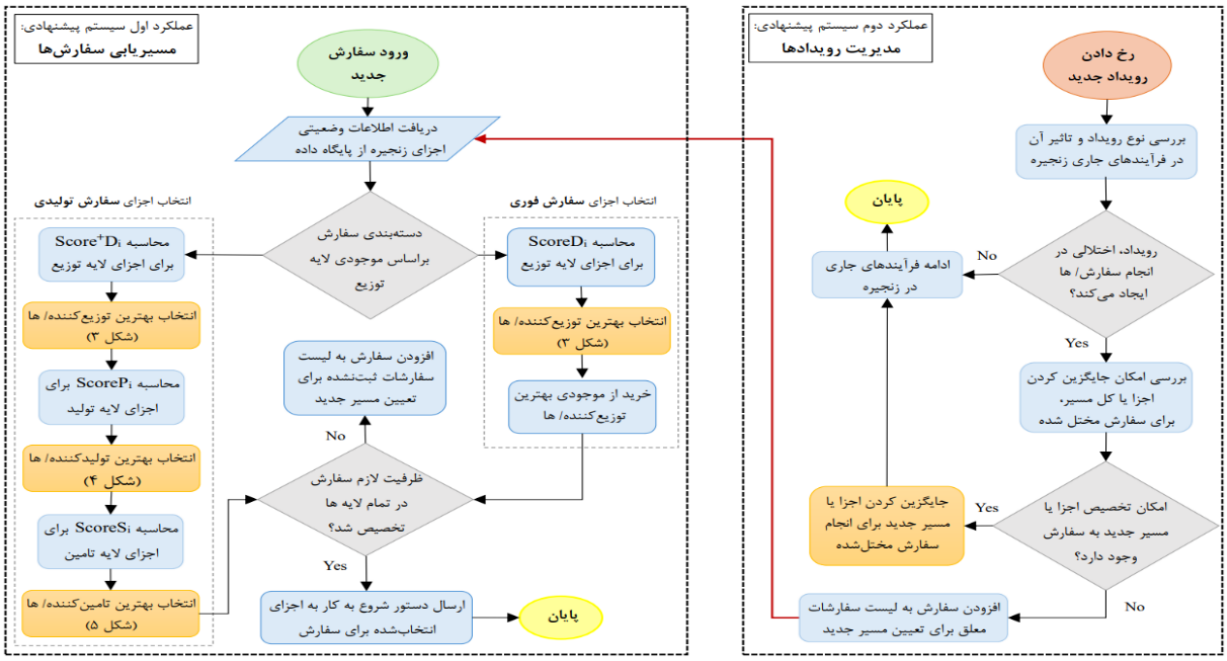
۳-۱-۲- تعیین مسیر سفارش‌های تولیدی

برای آماده‌سازی هر سفارش تولیدی، بایستی از هر لایه‌ی اصلی در زنجیره‌تأمین حداقل یک عضو، به سفارش تخصیص داده شود.

بنابراین تعیین مسیر یک سفارش تولیدی، شامل سه مرحله از انتخاب اجزا می‌باشد: ۱) انتخاب توزیع‌کننده/ ها ۲) انتخاب تولیدکننده/ ها ۳) انتخاب تأمین‌کننده/ ها



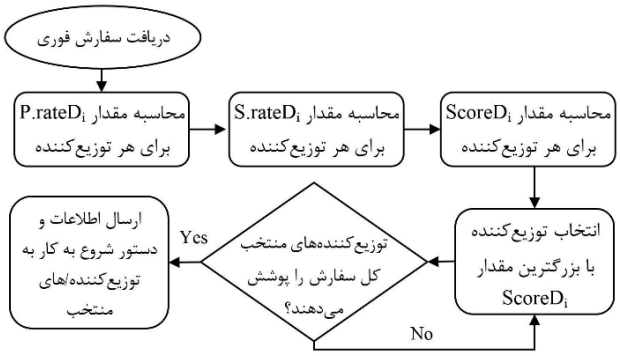
شکل ۱. معماری کلی سیستم پیشنهادی.



شکل ۲. نمودار گردش‌کار دو عملکرد اصلیِ سیستم تصمیم‌گیری در راه‌حل پیشنهادی

جدول ۲. پارامترهای فرآیند انتخاب توزیع‌کننده در سفارش فوری

نماد پارامتر	توضیح پارامتر
$P.rateD_i$	جایگاه توزیع‌کننده در ترتیب نزولی توزیع‌کنندگان براساس قیمت توزیع (Price)
$S.rateD_i$	جایگاه توزیع‌کننده در ترتیب صعودی توزیع‌کنندگان براساس درصد پوشش سفارش با توجه به مقدار موجودی انبار توزیع‌کننده (Stock).



شکل ۳. نمودار گردش‌کار انتخاب توزیع‌کننده/ها در سفارش فوری

انتخاب توزیع‌کننده/ها

در راه‌حل پیشنهادی این تحقیق، مراحل انتخاب توزیع‌کننده/ ها در سفارش‌های تولیدی و فوری دقیقا مطابق هم می‌باشد، با این تفاوت که در مرحله دوم از انتخاب توزیع‌کننده برای سفارش‌های تولیدی، به جای محاسبه $S.rateD_i$ مقدار $F.rateD_i$ برای هر توزیع‌کننده محاسبه شده و فرمول $Score^+D_i$ جایگزین فرمول $ScoreD_i$ می‌گردد. توضیح این پارامترها در جدول ۳ آورده شده‌است.

همچنین برای محاسبه $\mathbf{Score^+D_i}$ از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$Score^+D_i = P.rateD_i + 2 * F.rateD_i \qquad (۲)$$

انتخاب تولیدکننده/ ها

پس از انتخاب توزیع‌کننده/ ها، نوبت انتخاب اجزا در لایه‌ی تولید است. بدین منظور هر یک از توزیع‌کننده‌های منتخب در مرحله‌ی قبل، به اندازه‌ی سفارشی که متقبل شده‌است، از تولیدکننده/ ها، محصول خریداری می‌کند. شکل ۴ نمودار گردش‌کار فرآیند انتخاب تولیدکننده/ها را برای هر سفارش تولیدی نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای این فرآیند در جدول ۴ قابل مشاهده است. برای محاسبه $ScoreP_i$ نیز از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

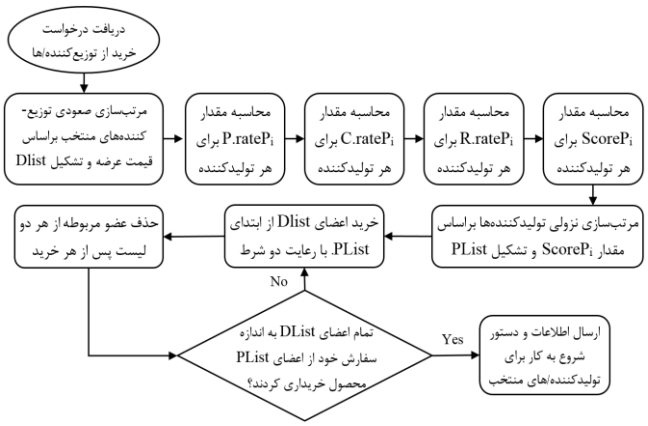
$$ScoreP_i = P.rateP_i + 2 * C.rateP_i + R.rateP_i \qquad (۳)$$

جدول ۳. پارامترهای فرآیند انتخاب توزیع‌کننده در سفارش تولیدی

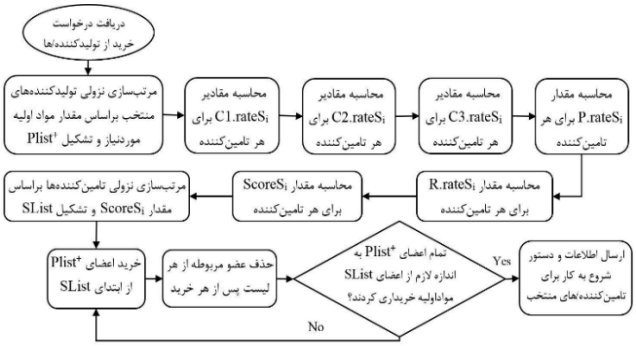
نماد پارامتر	توضیح پارامتر
$P.rateD_i$	جایگاه توزیع‌کننده در ترتیب نزولی توزیع‌کنندگان براساس قیمت توزیع (Price).
$F.rateD_i$	جایگاه توزیع‌کننده در ترتیب صعودی توزیع‌کنندگان براساس درصد پوشش سفارش با توجه به گنجایش انبار توزیع‌کننده و مقدار سفارش‌های رزروشده برای آن توزیع‌کننده (Free Capacity).

جدول ۴. پارامترهای فرآیند انتخاب تولیدکننده در سفارش تولیدی

نماد پارامتر	توضیح پارامتر
$P.rateP_i$	جایگاه تولیدکننده در ترتیب نزولی تولیدکنندگان براساس قیمت تولید (Price)
$C.rateP_i$	جایگاه تولیدکننده در ترتیب صعودی تولیدکنندگان براساس ظرفیت تولید در روز (Capacity)
$R.rateP_i$	جایگاه تولیدکننده در ترتیب نزولی تولیدکنندگان براساس تعداد روزهای کاری لازم برای تولید سفارش‌های رزروشده.
DList	لیست صعودی توزیع‌کنندگان منتخب براساس قیمت عرضه
PList	لیست صعودی تولیدکنندگان براساس مقدار $ScoreP_i$
شروط خرید از Dlist PList:	ظرفیت خالی رزرو در تولیدکننده، بیشتر از مقدار خرید توزیع‌کننده باشد. ظرفیت خالی انبار توزیع‌کننده، بیشتر از حداقل میزان فروش تولیدکننده باشد.



شکل ۴. نمودار گردش‌کار انتخاب تولیدکننده/ ها در سفارش تولیدی



شکل ۵. نمودار گردش‌کار انتخاب تأمین‌کننده/ ها در سفارش تولیدی

انتخاب تأمین‌کننده/ ها

در این مرحله، هر یک از تولیدکننده‌های منتخب مرحله‌ی قبل، به اندازه‌ی لازم برای تولید مقدار محصولی که به توزیع‌کننده/ها فروخته‌اند، از تأمین‌کننده/ها مواد اولیه خریداری می‌کند. با توجه به اینکه تولید هر محصول، به طور همزمان نیازمند سه نوع ماده اولیه می‌باشد، هر تولیدکننده برای تولید یک قلم محصول خود، بایستی سه قلم ماده اولیه خریداری کند. شکل ۵ نمودار گردش‌کار فرآیند انتخاب تأمین‌کننده/ ها را برای هر سفارش تولیدی نشان می‌دهد که لیست پارامترهای آن در جدول ۵ آورده‌شده است:

جدول ۵. پارامترهای فرآیند انتخاب تأمین‌کننده در سفارش تولیدی

نماد پارامتر	توضیح پارامتر
$C_1.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب صعودی تأمین‌کنندگان براساس ظرفیت تولید در روز، برای ماده اولیه نوع یک (Cap1)
$C_2.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب صعودی تأمین‌کنندگان براساس ظرفیت تولید در روز، برای ماده اولیه نوع دو (Cap2)
$C_3.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب صعودی تأمین‌کنندگان براساس ظرفیت تولید در روز، برای ماده اولیه نوع سه (Cap3)
$P.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب نزولی تأمین‌کنندگان براساس قیمت تأمین (Price)
$R.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب نزولی تأمین‌کنندگان براساس مقدار سفارش‌های رزروشده

و برای محاسبه $ScoreS_i$ از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$ScoreS_i = C_1.rateS_i + C_2.rateS_i + C_3.rateS_i + P.rateS_i + 2 * R.rateS_i \quad (۴)$$

۳-۱-۳- سفارش‌های ثبت‌نشده به دلیل عدم وجود ظرفیت آزاد در اجزای زنجیره

چنانچه در فرآیند انتخاب و تخصیص اجزای سفارش، در هریک از لایه‌های توزیع، تولید یا تأمین به دلیل عدم وجود ظرفیت آزاد در اجزای آن لایه، امکان تخصیص اجزای لازم برای انجام آن سفارش وجود نداشته باشد، سفارش موردنظر به لیست سفارش‌های ثبت نشده اضافه می‌شود و پس از آزاد شدن ظرفیت اجزای زنجیره، مجددا فرآیند انتخاب و تخصیص اجزا برای آن سفارش تکرار می‌شود. بنابراین ممکن است مسیر انجام یک سفارش، به محض ورود آن سفارش به زنجیره تعیین نشود و بین زمان ورود سفارش به زنجیره و زمان ثبت نهایی آن سفارش در زنجیره فاصله ۰ تا x روزه ایجاد شود. همانطور که در بخش فرضیات مسئله اشاره شد، در صورتیکه فاصله بین ورود سفارش و تخصیص کامل اجزا به آن سفارش (ثبت نهایی آن در زنجیره) بیش از ۱۵ روز باشد (x>۱۵) سفارش به دلیل تأخیر زیاد در ثبت، لغو خواهد شد.

در رویکرد پیشنهادی این تحقیق، تخصیص اجزا به سفارش‌هایی که در لیست سفارش‌های ثبت‌نشده قرار دارند، نسبت به سفارش‌هایی که به تازگی وارد زنجیره می‌شوند، اولویت دارد.

۳-۱-۴- محاسبه هزینه تأمین، تولید و توزیع سفارش‌ها

برای هر قلم سفارش تولیدی در زنجیره سه نوع هزینه وجود دارد که نحوه محاسبه هر یک از این هزینه‌ها در ادامه تشریح شده‌است.

هزینه توزیع هر قلم سفارش: هر سفارش ورودی به زنجیره تأمین، می‌تواند به یک یا چند توزیع‌کننده تخصیص داده شود. اگر سفارش فرضی O_k به M عدد توزیع‌کننده تخصیص شده باشد و مقدار محصول خریداری‌شده از هر توزیع‌کننده D_i برای این سفارش با متغییر NO_kD_i و قیمت فروش آن توزیع‌کننده با متغییر PD_i نشان داده شود، در این صورت کل هزینه توزیع این سفارش از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$TotalDistributionCost = \sum_{i=1}^{M} NO_kD_i * PD_i \quad (۵)$$

بنابراین هزینه توزیع هر قلم از سفارش O_k برابر است با:

$$\frac{TotalDistributionCost}{NO_k} = \frac{\sum_{i=1}^{M} NO_kD_i * PD_i}{NO_k} \quad (۶)$$

هزینه تولید هر قلم سفارش: هر سفارش تولیدی در زنجیره تأمین، می‌تواند به یک یا چند تولیدکننده تخصیص داده شود. اگر سفارش فرضی O_k به M عدد تولیدکننده تخصیص شده باشد و مقدار محصول خریداری‌شده از هر تولیدکننده P_i برای این سفارش با متغییر NO_kP_i و قیمت فروش آن تولیدکننده با متغییر PP_i نشان داده شود، در این صورت کل هزینه تولید این سفارش از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$TotalProductionCost = \sum_{i=1}^{M} NO_kP_i * PP_i \quad (۷)$$

بنابراین هزینه تولید هر قلم از سفارش O_k برابر است با:

$$\frac{TotalProductionCost}{NO_k} = \frac{\sum_{i=1}^{M} NO_kP_i * PP_i}{NO_k} \quad (۸)$$

هزینه تأمین هر قلم سفارش: همانطور که پیش‌تر بیان شد در زنجیره تأمین مفروض، برای تولید هر قلم سفارش سه نوع ماده اولیه، با سهم یکسان مصرف می‌شود. همچنین هر تولیدکننده می‌تواند مواد اولیه موردنیازش را از یک تا سه تأمین‌کننده خریداری کند. اگر فرض کنیم در سفارش O_k، تولیدکننده‌ها در مجموع از M تأمین‌کننده، مواد اولیه خریداری کرده باشند و مقدار مواد اولیه خریداری شده از هر تأمین‌کننده S_i برای این سفارش با متغیر NO_kS_i و قیمت فروش آن تأمین‌کننده با متغییر PS_i نشان داده شود. در این صورت کل هزینه تأمین این سفارش با رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$TotalSupplyCost = \sum_{i=1}^{M} NO_kS_i * PS_i \quad (۹)$$

بنابراین هزینه تأمین هر قلم از سفارش O_k برابر است با:

$$\frac{TotalSupplyCost}{NO_k} = \frac{\sum_{i=1}^{M} NO_kS_i * PS_i}{NO_k} \quad (۱۰)$$

۳-۲- مدیریت رویدادهای زنجیره

بیان شد که پژوهش حاضر دو هدف اصلی دارد: اول تعیین بهترین مسیر ممکن برای انجام هر سفارش ورودی به زنجیره (که به تفصیل شرح داده شد) و دوم مدیریت رویدادهای زنجیره.

با توجه به اینکه زنجیره شبیه‌سازی‌شده در این پژوهش، یک زنجیره تأمین پویا با قابلیت دریافت لحظه‌ای رویدادها می‌باشد، امکان تغییر وضعیت اجزا در تمامی لایه‌ها و در هر لحظه از فعالیت زنجیره وجود دارد. چنانچه این رویدادها باعث ایجاد تغییر در وضعیت جزء یا اجزایی که به آن‌ها سفارش تخصیص داده شده‌است شوند، امکان ایجاد اختلال در مسیر انجام سفارش‌ها و عملکرد زنجیره نیز وجود خواهد داشت. بنابراین برای جلوگیری از ایجاد چنین اختلال‌هایی، لازم و ضروریست که در صورت بروز هرگونه

تغییر در وضعیت اجزا، بلافاصله بررسی و اقدامات لازم برای به حداقل رساندن اثرات منفی احتمالی انجام شود.

هرگاه وضعیت یک جزء تخصیص‌داده‌شده به سفارش، بر اثر رویدادی در زنجیره تغییر کند، راه‌حل پیشنهادی این پژوهش، با توجه به نوع رویداد، یکی از سه اقدام زیر را انجام می‌دهد:

رویداد نوع اول: ظرفیت تأمین، تولید یا توزیع در جزء تخصیص داده‌شده به سفارش نسبت به ظرفیت قبلی آن جزء، بیشتر شود.

اقدام: در این‌صورت خللی در مسیر انجام سفارش‌های تخصیص یافته به آن جزء ایجاد نخواهد شد و نیاز به هیچ اقدامی نیست.

رویداد نوع دوم: ظرفیت تأمین، تولید یا توزیع در جزء تخصیص شده به سفارش نسبت به ظرفیت قبلی آن جزء، کمتر شود.

اقدام: در این‌صورت زمان آماده‌سازی سفارش‌های تخصیص‌یافته به این جزء افزایش می‌یابد و در نتیجه زمانبندی اولیه زنجیره برای آماده‌سازی و تحویل سفارش‌ها تغییر خواهد کرد. ولی خللی در مسیر تعیین‌شده برای انجام سفارش‌ها وجود نخواهد داشت. فقط بنابر آنچه در بخش فرض‌های اولیه مطرح شد، جزئی که مسئول ایجاد تأخیر می‌باشد، جریمه خواهد شد.

رویداد نوع سوم: ظرفیت تأمین، تولید یا توزیع در جزء تخصیص شده به سفارش، صفر شود. (از کارافتادن دائمی یا موقتی اجزا).

اقدام: در صورتیکه یکی از اجزای زنجیره تأمین از کار بیافتد، مسیر انجام تمام سفارش‌های تخصیص‌یافته به آن جزء تغییر خواهد کرد. در رویکرد پیشنهادی این تحقیق، به محض از کارافتادن یک جزء در یکی از لایه‌های زنجیره، کلیه سفارش‌های تخصیص‌یافته به آن جزء به حالت تعلیق در می‌آیند، سپس از میان اجزای فعال در لایه‌ی مربوطه، برای هریک از سفارش‌های معلق، یک جزء جایگزین تعیین شده و سفارش از حالت تعلیق خارج می‌شود. چنانچه هیچیک از اجزای لایه‌ی مربوطه، ظرفیت آزاد لازم برای برعهده گرفتن سفارش معلق را نداشته باشند، سفارش تا زمان آزاد شدن ظرفیت اجزا، معلق می‌ماند.

در این تحقیق، تخصیص اجزا به سفارش‌های معلق نسبت به سفارش‌های ثبت‌نشده و سفارش‌های ورودی اولویت بالاتری دارند.

۳-۳- پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی

۳-۳-۱- شبیه‌سازی زنجیره تأمین در قالب شبکه پتری

به طور کلی شبیه‌سازی، ابزاری برای ارزیابی رفتار دینامیکی فرآیندها در طول زمان می‌باشد که برای بررسی عملکرد فرآیندها و منابع در واکنش به تغییرات پارامترهای محیط و خود سازمان انجام می‌شود. هدف اصلی از شبیه‌سازی یک فرآیند تجاری، این است که دریابیم این فرآیند چگونه ممکن است در دنیای واقعی کار کند. مرور تحقیق‌های انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی، امکان تجزیه و تحلیل یک زنجیره تأمین را به خوبی فراهم می‌کند، منجر به مشاهدات دقیق در طول زمان شده و درک بهتر از رفتار یک زنجیره را در برآوردن درخواست‌های مشتریان فراهم می‌سازد. [۵], [۷], [۱۱], [۱۳], [۲۰], [۲۲], [۲۴], [۲۵]

نظر به ویژگی پویایی زنجیره تأمین، شبیه‌سازی جریان فرآیندهای آن می‌تواند به یک کار پیچیده تبدیل شود. به همین دلیل، استفاده از مدل‌های رسمی برای تحلیل کارکرد زنجیره تأمین، امکان تایید و اعتبارسنجی پویایی زنجیره را فراهم می‌کند.

شبکه‌های پتری

شبکه‌های پتری یک ابزار رسمی، تحلیلی و گرافیکی است که از زبان‌های برنامه‌نویسی سطح بالا برای مدل‌سازی سیستم‌های توزیع‌شده و به‌ویژه مفاهیمی مانند: عدم قطعیت، توازی و توالی، رویدادهای همزمان و غیرهمزمان، تضادها و اشتراک منابع، مدل‌سازی فواصل زمانی، همگام‌سازی و ... استفاده می‌کند.

به دلیل دارا بودن نمایش گرافیکی واضح و امکانات تفسیری گسترده، صلاحیت شبکه‌های پتری برای مدل‌سازی سیستم‌های کمی و کیفی، مدل‌سازی سیستم‌های همزمان یا غیرهمزمان، مدل‌سازی پروتکل‌های ارتباطی و سیستم‌های مقاوم به خطا و همچنین ارزیابی عملکرد سیستم‌ها، ثابت شده است. با استناد به مقالات [۱۱], [۱۹], [۲۰], [۲۲], [۲۴], [۳۵-۲۶] شبکه‌های پتری توسعه‌یافته با رنگ و زمان، موفقیت قابل توجهی را در شبیه‌سازی زنجیره‌های تأمین داشته‌اند.

۳-۳-۲- ابزار شبیه‌سازی زنجیره تأمین

امروزه ابزارهای متعددی برای شبیه‌سازی فرآیندهای کسب‌وکار وجود دارند. در مقاله‌های [۲۶], [۲۷] شش مورد از بهترین ابزارهایی که برای شبیه‌سازی فرآیندهای تجاری استفاده می‌شوند (Protos, ARIS, FileNet, FLOWer, Arena, CPN Tools) در سه دسته اصلی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند. براساس نتایج حاصل می‌توان گفت که ابزار CPN Tools [۲۸] از جهت اعتبار رسمی مدل خروجی، ثبت دقیق الگوهای جریان‌کار، نگهداری منابع و داده‌ها، ابعاد گسترده عملکرد، قابلیت تعمیم، میزان تحرکات،

گستردگی سناریوها، میزان و دقت آمار و ارقام و گزارشات خروجی، بهترین نتیجه را در شبیه‌سازی زنجیره‌های تأمین داشته است.[۱۹]

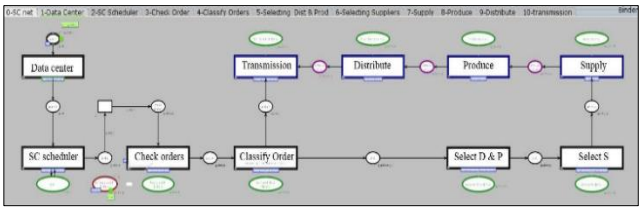
۳-۳-۳- مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره تأمین موردنظر

زنجیره تأمین موردنظر در این پژوهش، در قالب یک مدل ماژولار از شبکه‌های پتری، به صورت یک شبکه اصلی با ۱۰ زیرشبکه یا ماژول شبکه، شبیه‌سازی شده‌است. در جدول ۶ کارکرد هر یک از ماژول‌های موجود در شبکه پتری زنجیره شبیه‌سازی‌شده، به صورت خلاصه ذکر شده‌است.

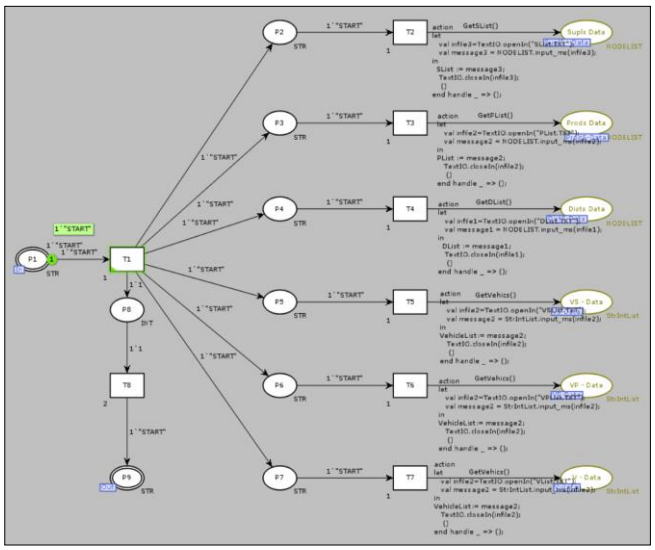
جدول ۶. ماژول‌های موجود در مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره

شماره ماژول	عنوان ماژول	توصیف کارکرد ماژول
ماژول ۱	Data Center	مدیریت اطلاعات وضعیتی اجزای زنجیره
ماژول ۲	SC Scheduler	مدیریت سیستم روزشمار - دریافت سفارش
ماژول ۳	Check Order	بررسی صحت و شناسه‌گذاری سفارش
ماژول ۴	Classify Orders	دسته‌بندی سفارش‌ها (فوری یا تولیدی)
ماژول ۵	Selecting D & P	انتخاب توزیع‌کننده و تولیدکننده
ماژول ۶	Selecting Supplier	انتخاب تأمین‌کننده
ماژول ۷	Supply	تامین مواد اولیه
ماژول ۸	Produce	تولید محصولات
ماژول ۹	Distribute	تجمیع کل محصولات سفارش
ماژول ۱۰	Transmission	تحویل سفارش به مشتری - ثبت اطلاعات

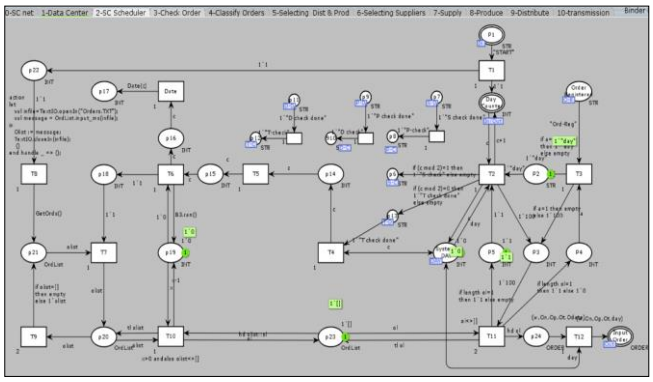
از دیدگاه علم طراحی شبکه، استفاده از این ساختار پیمانه‌ای (ماژولار) در طراحی مدل زنجیره، این امکان را فراهم می‌کند که در صورت نیاز، بخش‌های جدیدی را برای ایجاد کاربردهای مختلف به مدل زنجیره اضافه کنیم یا بخش‌هایی از مدل را به راحتی و بدون ایجاد خلل در کارکرد بخش‌های دیگر حذف کنیم. علاوه براین، با توجه به اینکه ایرادیابی در هر یک از ماژول‌های شبکه به صورت مستقل، انجام می‌شود، کشف و رفع ایرادات شبکه نیز با سرعت بالایی صورت می‌گیرد. در شکل‌های ۶-۱۲ نمای کلی شبکه اصلی و چند مورد از ماژول‌های شبکه پتری قابل مشاهده است (به منظور رعایت اختصار نوشتار، شکل شش زیرشبکه از ده زیرشبکه مدل به عنوان نمونه، در اینجا آورده شده‌است).



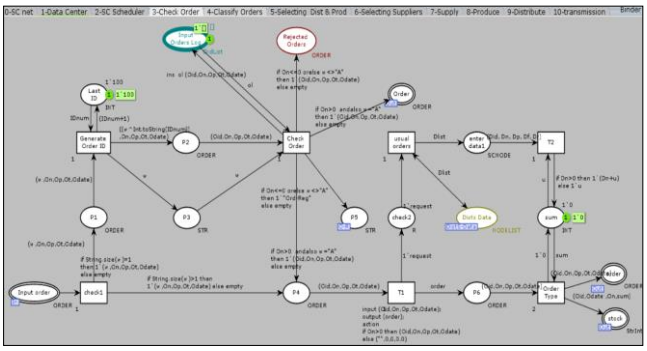
شکل ۶. شبکه اصلی شبیه‌سازی‌شده از زنجیره در محیط CPN Tool



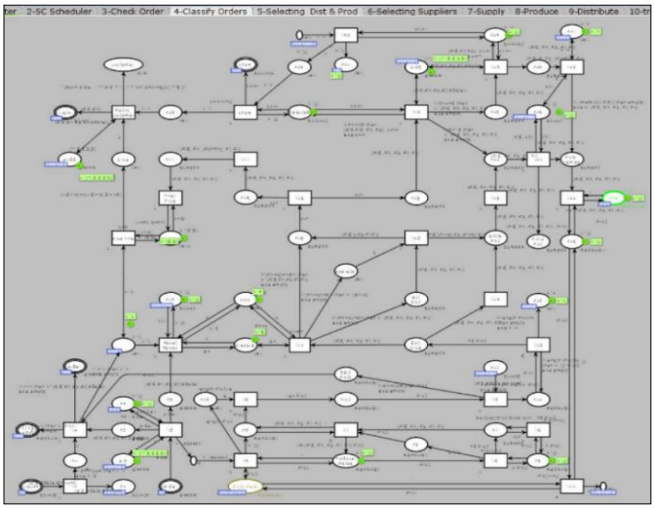
شکل ۷. ماژول شماره ۱ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



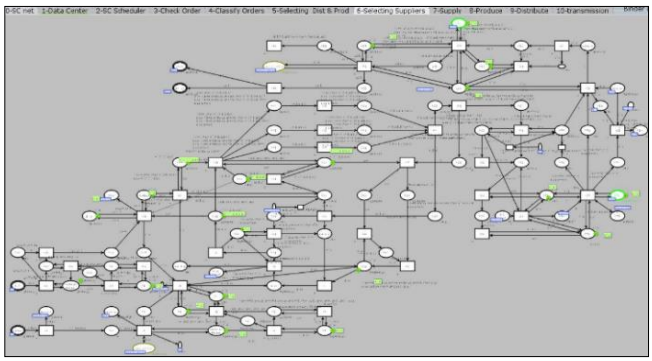
شکل ۸. ماژول شماره ۲ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



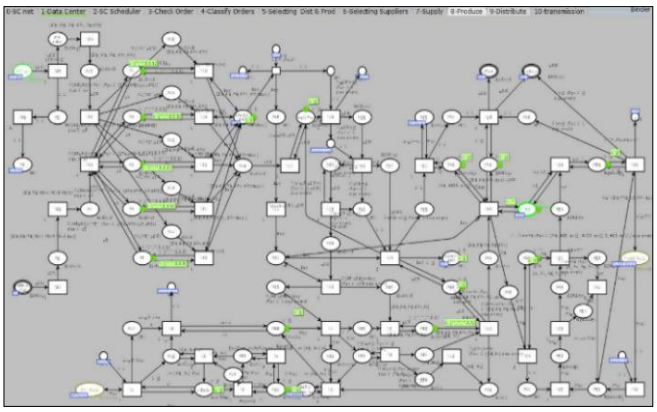
شکل ۹. ماژول شماره ۳ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



شکل ۱۰. ماژول شماره ۴ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



شکل ۱۱. ماژول شماره ۶ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



شکل ۱۲. ماژول شماره ۸ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره

۳-۴- ارزیابی و آزمایش

در این تحقیق برای بررسی عملکرد مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره موردنظر، روش طراحی آزمایش[1] (DOE) با استفاده از دو ابزار Matlab و Statgraphics بکار گرفته شده. [۳۱], [۳۶] با استفاده از روش طراحی آزمایش و با تغییر مقادیر ۲۵ مورد از مهمترین پارامترهای موجود در مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره، تعداد ۱۵ سناریو مختلف طراحی شدند. این پارامترها و بازه‌ی تغییرات آن‌ها برای طراحی سناریوهای مختلف، در جدول ۷ آورده شده‌است.

پس از طراحی سناریوها، به منظور ارزیابی عملکرد راه‌حل پیشنهادی، هر سناریو دوبار مورد آزمایش قرار گرفت، یک بار با راه‌حل پیشنهادی این تحقیق و یک بار هم با راه‌حل مشابهی، با عنوان "روش بهینه[2]" و در نهایت، نتایج حاصل از آزمایش‌های این دو راه‌حل با یکدیگر مقایسه شدند. برای پیاده‌سازی روش بهینه از مقاله [۳۷] استفاده شده است. این مقاله صرفا بر روی انتخاب اجزا در یک لایه از زنجیره تأمین تمرکز دارد ولی به منظور مقایسه نتایج در پژوهش حاضر، این روش به تمام لایه‌های زنجیره تعمیم داده شده است. بدین‌صورت که در هر یک از لایه‌های توزیع، تولید و تأمین اجزای انجام‌دهنده سفارش به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که هزینه در آن لایه به حداقل برسد.

جدول ۷. بازه تغییرات پارامترهای مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره

ردیف	پارامتر	محدوده مقداردهی
۱	تعداد توزیع‌کننده‌ها	۲ تا ۶ عدد
۲	ظرفیت انبار هر توزیع‌کننده	۵۰ تا ۲۵۰ قلم
۳	موجودی اولیه هر توزیع‌کننده	۰ تا ۱۰۰ قلم
۴	قیمت توزیع هر قلم محصول در هر توزیع‌کننده	۱۰۰ تا ۱۵۰
۵	تعداد حمل‌کننده‌های لایه توزیع	تعداد توزیع‌کننده‌ها
۶	ظرفیت حمل‌کننده‌های لایه توزیع	۱۰۰ تا ۳۰۰ قلم
۷	تعداد تولیدکننده‌ها	۲ تا ۵ عدد
۸	ظرفیت تولید در روز هر تولیدکننده	۴۰ تا ۸۰ قلم
۹	حداکثر مقدار رزرو هر تولیدکننده	۲۰۰ تا ۴۰۰ قلم
۱۰	قیمت تولید هر قلم محصول در هر تولیدکننده	۵۰ تا ۱۰۰
۱۱	تعداد حمل‌کننده‌های لایه تولید	تعداد تولیدکننده‌ها
۱۲	ظرفیت حمل‌کننده‌های لایه تولید	۱۰۰ تا ۴۰۰ قلم
۱۳	تعداد تأمین‌کننده‌ها	بین ۲ تا ۷ عدد
۱۴	ظرفیت تأمین روزانه هر تأمین‌کننده برای ماده ۱	۰ تا ۲۰۰ قلم ماده
۱۵	ظرفیت تأمین روزانه هر تأمین‌کننده برای ماده ۲	۰ تا ۲۰۰ قلم ماده
۱۶	ظرفیت تأمین روزانه هر تأمین‌کننده برای ماده ۳	۰ تا ۲۰۰ قلم ماده
۱۷	قیمت تأمین هر قلم ماده در هر تأمین‌کننده	بین ۱ تا ۵
۱۸	تعداد حمل‌کننده‌های لایه تأمین	تعداد تأمین‌کننده‌ها
۱۹	ظرفیت حمل‌کننده‌های لایه تأمین	۲۰۰ تا ۵۰۰ قلم
۲۰	تعداد رویدادهای بلادرنگ لایه توزیع	۰ تا ۵ رویداد
۲۱	تعداد رویدادهای بلادرنگ لایه تولید	۰ تا ۵ رویداد
۲۲	تعداد رویدادهای بلادرنگ لایه تأمین	۰ تا ۵ رویداد
۲۳	تعداد رویدادهای بلادرنگ حمل‌کننده‌ها	۰ تا ۵ رویداد
۲۴	تعداد محصول در هر سفارش مشتری	۱ تا ۱۰۰ قلم
۲۵	تعداد سفارش‌های ورودی به زنجیره	۱۵ تا ۶۰ سفارش

[1] Design of experiment

[2] Optimal method

پس از طراحی سناریوهای مختلف، راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه بر روی هر یک از سناریوها آزمایش شدند و ۳ شاخص هزینه و ۳ شاخص زمان به عنوان شاخص‌های خروجی هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شدند. این شاخص‌های خروجی عبارت‌اند از:

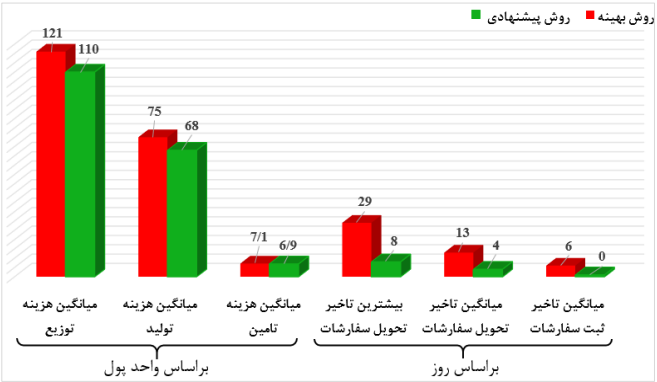
شاخص‌های زمانی

۱. میانگین تأخیر ثبت سفارش‌های ورودی(MRD[1])
۲. میانگین تأخیر تحویل سفارش‌های ثبت‌شده (MDD[2])
۳. بیشترین فاصله ورود و تحویل سفارش (MD[3])

شاخص‌های هزینه

۱. میانگین هزینه توزیع (MDC۴)
۲. میانگین هزینه تولید (MPC۵)
۳. میانگین هزینه تأمین (MSC۶)

به عنوان نمونه، مقادیر شاخص‌های خروجی حاصل از آزمایش سناریو اول، با روش پیشنهادی و روش بهینه در شکل ۱۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۳. نمودار مقایسه شاخص‌های خروجی حاصل از روش پیشنهادی و روش بهینه در آزمایش سناریو اول

همانطور که در شکل فوق قابل مشاهده است، مثلا در آزمایش سناریو اول میانگین تأخیر تحویل سفارشات، با راه‌حل پیشنهادی برابر ۴ روز است در حالیکه با راه‌حل بهینه برابر ۱۳ روز می‌باشد. همچنین جدول ۸ مقادیر شش شاخص خروجی حاصل از آزمایشات راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه را در ۱۵ سناریو مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۸. مقادیر شاخص های خروجی حاصل از آزمایشات سناریوها

سناریو	روش	MRD	MDD	MD	MDC	MPC	MSC
۱	بهینه	۶	۱۳	۲۹	۱۲۱	۷۵	۷,۱
	پیشنهادی	۰	۴	۸	۱۱۰	۶۸	۶,۹
۲	بهینه	۷	۱۴	۴۹	۱۵۲	۷۳	۸,۴
	پیشنهادی	۰	۹	۳۳	۱۲۱	۷۰	۹
۳	بهینه	۴	۱۰	۲۵	۹۹	۵۰	۱۰,۲
	پیشنهادی	۰	۴	۷	۹۸	۴۶	۹,۹
۴	بهینه	۱	۷	۲۳	۱۲۳	۶۳	۷,۵
	پیشنهادی	۰	۳	۷	۱۰۶	۶۱	۴,۵
۵	بهینه	۵	۹	۲۱	۹۶	۷۱	۱۱,۱
	پیشنهادی	۰	۳	۶	۹۱	۵۷	۱۰,۲
۶	بهینه	۵	۹	۱۶	۱۳۵	۸۰	۶,۶
	پیشنهادی	۰	۳	۵	۱۳۰	۵۵	۶,۷
۷	بهینه	۹	۲۷	۴۴	۱۵۰	۸۶	۶,۹
	پیشنهادی	۰	۱۳	۳۶	۱۲۷	۷۱	۷,۵
۸	بهینه	۱	۵	۱۷	۱۱۲	۶۴	۵,۱
	پیشنهادی	۰	۳	۵	۱۰۵	۵۹	۳
۹	بهینه	۲	۷	۳۰	۱۲۰	۸۰	۶,۹
	پیشنهادی	۰	۳	۶	۱۰۸	۶۹	۳,۹
۱۰	بهینه	۱۱	۹	۲۲	۱۱۱	۷۱	۷,۵
	پیشنهادی	۰	۴	۷	۹۸	۶۸	۷,۲
۱۱	بهینه	۳	۵	۱۳	۱۲۲	۷۵	۵,۷
	پیشنهادی	۰	۳	۶	۱۱۰	۵۸	۵,۴
۱۲	بهینه	۱۲	۳۲	۵۲	۱۶۸	۸۷	۹,۳
	پیشنهادی	۲	۱۶	۴۳	۱۳۵	۸۱	۱۰,۸
۱۳	بهینه	۴	۷	۲۱	۱۱۲	۷۰	۶,۳
	پیشنهادی	۰	۳	۶	۹۵	۵۹	۳,۹
۱۴	بهینه	۰,۵	۴	۱۲	۱۱۸	۶۱	۳,۶
	پیشنهادی	۰	۱,۵	۵	۱۱۱	۵۵	۳
۱۵	بهینه	۱	۶	۲۱	۱۲۸	۷۶	۸,۴
	پیشنهادی	۰	۳	۸	۱۰۷	۶۲	۶,۹

[1] Mean registration delay
[2] Mean delivery delay
[3] Max delay
[4] Mean distribution cost
[5] Mean Production cost
[6] Mean supply cost

۴- بررسی نتایج

۴-۱- بررسی نتایج مقایسه عملکرد راه‌حل بهینه و راه‌حل پیشنهادی از نظر شاخص‌های خروجی

نتایج موجود در جدول ۴ نشان می‌دهند که راه‌حل پیشنهادی هم از نظر شاخص‌های هزینه هم از نظر شاخص‌های زمانی، عملکرد بهتری را نسبت به راه‌حل بهینه ارائه می‌دهد. به منظور ارزیابی دقیق‌تر نتایج، با استفاده از معیار MAPE[1] (میانگین درصد خطای مطلق) میزان بهبود نتایج راه‌حل پیشنهادی نسبت به راه‌حل بهینه، در هریک از شش شاخص خروجی محاسبه شده و مقادیر آن‌ها در جدول ۹ آورده شده‌است.

جدول ۹. مقادیر بهبود شاخص‌های خروجی، در راه‌حل پیشنهادی نسبت به راه‌حل بهینه با توجه به معیار MAPE

شاخص خروجی	MAPE
میانگین هزینه توزیع	۱۰,۹
میانگین هزینه تولید	۱۲,۸
میانگین هزینه تأمین	۱۷,۷
میانگین تأخیر در ثبت	۹۸,۸
میانگین تأخیر در تحویل	۵۳,۸
بیشترین تأخیر در تحویل	۵۹,۱

بنابراین، با استناد به مقادیر موجود در جدول ۹، می‌توان گفت که براساس معیار MAPE، عملکرد راه‌حل پیشنهادی به طور میانگین، از نظر شاخص‌های هزینه حدود ۱۳,۸ درصد و از نظر شاخص‌های زمانی حدود ۷۰,۵ درصد نسبت به راه‌حل بهینه، بهبود داشته است. با توجه به اینکه وجه تمایز اصلی این تحقیق با تحقیقات گذشته از جمله راه‌حل بهینه، ارائه یک رویکرد موثر و بلادرنگ در تقلیل اثرات منفی رویدادهای مختل‌کننده سفارش‌های زنجیره می‌باشد که در کنار یک رویکرد مسیریابی چندمعیاره برای سفارش‌های زنجیره ارائه شده‌است، نتایج حاصله از دو جهت قابل توجیه هستند:

۱. همانطور که بیان شد، راه‌حل بهینه در تخصیص اجزا به سفارش‌ها، تنها قیمت اجزا را مدنظر قرار می‌دهد. در صورتیکه ویژگی‌هایی مانند ظرفیت رزرو شده و توان کارکرد روزانه اجزای انتخابی برای هر سفارش، مستقیما در سرعت و زمان انجام سفارش توسط آن جزء موثر است. به همین دلیل راه‌حل پیشنهادی این پژوهش، با درنظر گرفتن همزمان چندین معیار در انتخاب اجزا، از جمله: هزینه تأمین، تولید یا توزیع، توان عملیاتی روزانه اجزا، حجم سفارش‌های رزروشده برای اجزا و ...، توانسته است در عین عدم افزایش چشم‌گیری در پیچیدگی محاسباتی، نتایج بهتری را نسبت به راه‌حل بهینه بدست آورد.

۲. همچنین راه‌حل بهینه در مواجهه با رویدادهای مختل‌کننده، هیچگونه اقدام اصلاح‌کننده‌ای را در جهت کاهش اثرات مخرب این رویدادها، انجام نمی‌دهد و در صورتیکه فرآیند آماده‌سازی یک سفارش بر اثر یکی از این رویدادها مختل شود، راه‌حل بهینه، کل فرآیند تخصیص اجزا و آماده‌سازی سفارش مورد نظر را مجددا از ابتدا تکرار می‌کند. روشن است که چنین رویکردی، منجر به اتلاف زمان زیادی می‌شود و در نتیجه باعث افزایش تأخیر و هزینه در انجام سفارش‌های زنجیره خواهد شد. در صورتیکه راه‌حل پیشنهادی این تحقیق، رویکرد کاملا متفاوت و کارآمدی را در مواجهه با رویدادهای مختل‌کننده سفارش‌ها، اجرا می‌کند که در بخش قبل به تفصیل بیان شد.

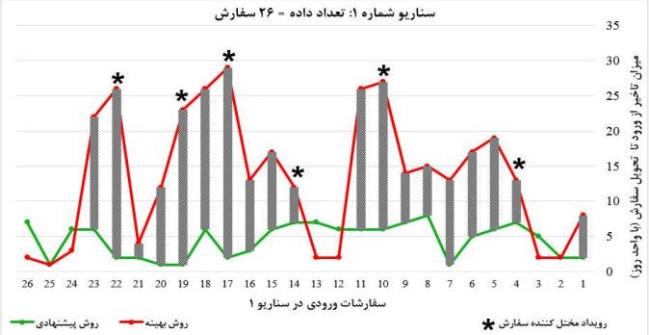
۴-۲- بررسی نتایج مقایسه عملکرد راه‌حل بهینه و راه-حل پیشنهادی در مواجه با رویدادهای مخرب

نمودارهای موجود در شکل‌های ۱۴-۱۶ میزان تأخیر از ورود تا تحویل سفارش‌ها را در آزمایش سناریوهای اول، دوم و سوم، با دو راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهنیه، نشان می‌دهند. به منظور بررسی تاثیر رویدادهای مخرب در میزان تأخیر تحویل سفارش‌ها، تمام سفارش‌هایی که در فرآیند آماده‌سازی آن‌ها، رویداد مخربی رخ داده‌است، با علامت (*) مشخص شده‌اند. نتایج مشابه این نمودارها از تمام ۱۵ سناریو بدست آمده است و نتایج سناریوهای ۱-۳ به عنوان نمونه در اینجا ذکر شده‌اند.

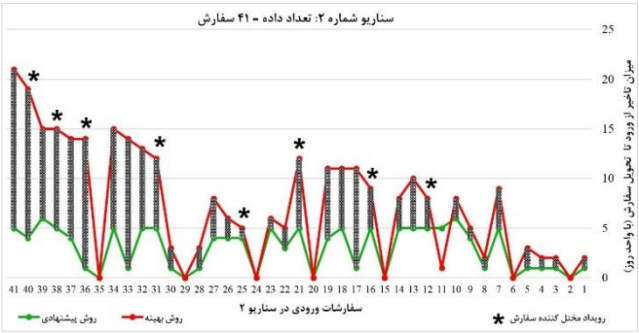
همانطور که در نمودارها مشهود است، در راه‌حل بهینه، هنگام بروز رویداد/های مخرب در فرآیند آماده‌سازی یک سفارش، میزان تأخیر تحویل آن سفارش و چند سفارش بعد از آن، نسبت به سفارش‌های قبلی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. درحالی‌که در راه‌حل پیشنهادی، وقوع رویداد/های مخرب در فرآیند آماده‌سازی یک سفارش، افزایش جزئی در میزان تأخیر تحویل آن سفارش و سفارش‌های بعدی، ایجاد می‌کند. به بیان دیگر، نمودارهای مربوط به راه‌حل پیشنهادی روند نسبتا یکنواختی را در تمامی سفارش‌ها دارند، چه در سفارش‌هایی که مشکلی در مسیر آماده‌سازی آنها وجود نداشته و چه در سفارش‌هایی که با رویداد مختل‌کننده‌ای مواجه شده‌اند. از مشاهده این روند می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد راه‌حل پیشنهادی، در مواجهه با رویدادهای مخرب به میزان قابل توجهی موثر هستند و تا حد زیادی اثرات منفی این رویدادها را کاهش داده‌است. در صورتیکه در نمودارهای مربوط به راه‌حل بهینه،

[1] Mean absolute percentage error

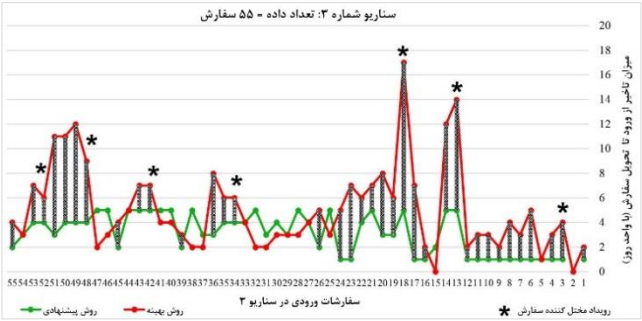
این رویدادها تاثیر زیادی در افزایش تأخیر تحویل سفارش‌ها دارند.



شکل ۱۴. نمودار مقایسه تاثیر رویدادها در تأخیر۱ تحویل سفارش‌های سناریو شماره ۱

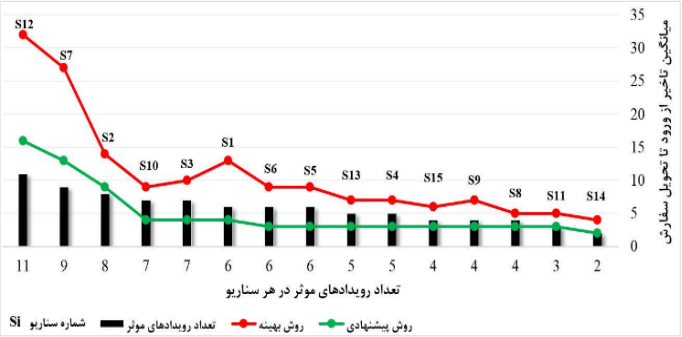


شکل ۱۵. نمودار مقایسه تاثیر رویدادها در تأخیر تحویل سفارش‌های سناریو شماره ۲



شکل ۱۶. نمودار مقایسه تاثیر رویدادها در تأخیر تحویل سفارش‌های سناریو شماره ۳

به منظور مقایسه دقیق‌تر عملکرد راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه، در شکل ۱۷ نمودار تغییر شاخص "میانگین تأخیر تحویل سفارش‌ها" با افزایش "تعداد رویدادهای مخرب" با توجه به نتایج حاصل از آزمایش کل سناریوها، رسم شده است.



شکل ۱۷. نمودار مقایسه تغییرات میانگین تأخیر تحویل سفارش‌ها، با افزایش تعداد رویدادهای مخرب

همانطور که از تغییرات نمودار فوق مشهود است، با افزایش تعداد رویدادهای مخرب، میانگین تأخیر تحویل سفارش‌ها، هم در راه‌حل بهینه هم در راه‌حل پیشنهادی، روندی صعودی داشته و افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که در راه‌حل بهینه با افزایش تعداد رویدادهای مخرب، تأخیر تحویل سفارش‌ها نسب به راه‌حل پیشنهادی، مقدار بسیار بیشتری افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در راه‌حل بهینه، میزان تأخیر تحویل، در سناریو ۱۴ (با ۲ رویداد مخرب)، برابر با ۴ روز و در سناریو ۱۲ (با ۱۱ رویداد مخرب) برابر با ۳۲ روز می‌باشد، یعنی با افزایش تعداد رویدادهای مخرب از تعداد ۲ به ۱۱ ، شاخص میانگین تأخیر تحویل سفارش‌ها در راه‌حل بهینه، ۲۸ روز و در راه‌حل پیشنهادی، فقط ۱۴ روز افزایش می‌یابد. یعنی در راه‌حل پیشنهادی میزان افزایش تأخیر به اندازه نصف راه‌حل بهینه بوده است.

علت حصول این نتایج را می‌توان در تفاوت عملکرد دو راه‌حل در مواجهه با رویدادهای مخرب جستجو کرد. همانطور که بیان شد، عملکرد راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه در مواجهه با رویدادهای بلادرنگ نوع سوم که منجر به از کار افتادن جزء یا اجزای تخصیص‌یافته به یک سفارش، در حین فرآیند آماده‌سازی آن سفارش می‌شوند، به صورت زیر می‌باشد:

راه‌حل بهینه:

۱. اطلاع از وقوع رویداد پس از بروز تاثیرات مخرب آن در عملکرد زنجیره (در فاصله یک تا چند روزه از وقوع رویداد)
۲. متوقف‌شدن فرآیند آماده‌سازی سفارش
۳. لغو رزرو اجزای تخصیص‌یافته به سفارش از هر سه لایه
۴. افزودن سفارش، به لیست سفارشاهای ثبت‌نشده
۵. انتظار برای آزادشدن ظرفیت لازم در هر سه لایه از زنجیره
۶. اجرای مجدد مراحل مسیریابی و تخصیص اجزا به سفارش با الگوریتم بهینه
۷. شروع مجدد مراحل آماده‌سازی سفارش از ابتدا

راه‌حل پیشنهادی:

۱. اطلاع از وقوع رویداد به صورت بلادرنگ در همان لحظه‌ی رخداد، به وسیله فناوری اینترنت اشیا
۲. تعلیق سفارش‌های متاثر از رویداد
۳. قراردادن سفارش‌های معلق در اولویت اول تخصیص اجزا
۴. انتظار برای آزادشدن ظرفیت در لایه‌ی موردنظر (لایه‌ی مربوط به جزء یا اجزای از کارافتاده در اثر رویداد)
۵. تخصیص جزء جایگزین به جای جزء از کار افتاده
۶. ادامه روند آماده‌سازی سفارش از لایه‌ای که اختلال در آن لایه رخ داده بود

با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها، ملاحظه می‌شود که رویکرد پیشنهادی این تحقیق، در مواجهه با رویدادهای مخرب بسیار موثرتر از رویکرد راه‌حل بهینه است. زیرا راه‌حل پیشنهادی، با به کارگیری و استفاده از فناوری اینترنت اشیا در جمع‌آوری و انتقال بلادرنگ داده‌ها، رویدادهای مخرب را دقیقا به محض وقوع، شناسایی کرده و در سریع‌ترین زمان ممکن اقدامات لازم را جهت کاهش اثرات منفی این رویدادها انجام می‌دهد. این در حالی است که در راه حل بهینه، رویدادهای مخرب نه تنها در زمان وقوع و ورود به زنجیره شناسایی نمی‌شوند بلکه پس از اینکه در فرآیندهای جاری زنجیره اختلال ایجاد کردند، شناسایی خواهند شد. در واقع امکان دارد یک رویداد مخرب چندین روز پس از وقوعش شناسایی شود که همین تأخیر در شناسایی رویدادهای مخرب، اثرات منفی آن‌ها را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. علاوه براین در راه‌حل بهینه، با از کار افتادن یک جزء از اجزای تخصیص‌یافته به سفارش، کل فرآیند انجام‌شده برای مسیریابی و آماده‌سازی آن سفارش مجددا از ابتدا تکرار می‌شود و این امر باعث اتلاف زمان و منابع به کارگرفته‌شده برای آن سفارش (منابعی که قبل از بروز اختلال در اجزای آن سفارش، برای آماده‌سازی آن به کار گرفته شده‌اند) خواهد شد. ولی راه‌حل پیشنهادی، با اولویت قراردادن سفارش‌های مختل‌شده (معلق) در تخصیص اجزا، فرآیند آماده‌سازی سفارش‌های مختل‌شده را از همان لایه‌ای که اختلال در آن رخ داده‌بود ادامه می‌دهد، بنابراین در راه‌حل پیشنهادی از اتلاف زمان و منابع صرف‌شده برای سفارش جلوگیری می‌شود.

۵- جمع‌بندی

بیان شد که با توجه به پویایی ذاتی زنجیره تأمین و محیط آن، لازمه مدیریت بهینه در راه‌حل تولید براساس سفارش، منعطف بودن زنجیره تأمین است. بدین معنی که زنجیره تأمین قابلیت دریافت رویدادهایی را که در محیط درونی و پیرامونی آن رخ می‌دهند، به صورت آنی و لحظه‌ای داشته باشد و همچنین بتواند به صورت بلادرنگ در رابطه با این رویدادها تصمیم‌گیری کرده و پاسخ مناسب ارائه دهد. لذا با توجه به هدف اصلی مدیریت زنجیره تأمین، که تصمیم‌گیری برای انتخاب مسیر انجام سفارش‌ها و تعیین اجزای انجام‌دهنده آن‌هاست، این مطالعه به ارائه یک سیستم تصمیم‌گیری بلادرنگ در مدیریت زنجیره تأمین با راه‌حل تولید براساس سفارش می‌پردازد، و برای دریافت و انتقال اطلاعات محیط درونی و بیرونی زنجیره، از فناوری اینترنت اشیا بهره می‌برد که کاملا منطبق بر ماهیت پویای زنجیره تأمین است. به منظور شبیه‌سازی زنجیره تأمین موردنظر، از شبکه‌های پتری توسعه‌یافته با رنگ و زمان استفاده شده‌است که امکان ایجاد یک مدل گرافیکی از زنجیره تأمین را فراهم می‌کند. مدل طراحی‌شده از زنجیره، دارای ۳ لایه‌ی اصلی شامل: لایه‌ی تأمین، لایه‌ی تولید، لایه‌ی توزیع و سه لایه‌ی فرعی حمل‌ونقل می‌باشد، که در قالب یک شبکه‌ی پتری ماژولار با ۱۰ زیر شبکه پیاده‌سازی شده‌اند.

عملکرد مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره بدین صورت است که انتخاب اجزا برای هر سفارش ورودی، در هریک از لایه‌ها، با استفاده از یک تصمیم‌گیری چندمعیاره براساس معیارهای ۱-ظرفیت تأمین یا تولید یا توزیع روزانه ۲-قیمت و ۳-ظرفیت آزاد اجزای آن لایه انجام می‌شود. پس از انتخاب و تخصیص اجزا و مشخص شدن مسیر آماده‌سازی هر سفارش، سفارش موردنظر وارد فرآیند آماده-سازی شده و در نهایت توسط لایه‌ی حمل‌ونقل به مشتری تحویل داده می‌شود. همچنین در طول فعالیت مدل زنجیره تأمین، علاوه بر ورود سفارش‌ها، اطلاعات رویدادهای محیطی زنجیره نیز به صورت لحظه‌ای مخابره می‌شوند. در این مطالعه سه نوع از رویدادهای زنجیره تأمین، مدلسازی شده‌اند که نوع سوم آن‌ها رویدادهای مختل‌کننده می‌باشند. بروز هر رویداد مختل‌کننده، منجر به از کارافتادن یک یا چند جزء از اجزای فعال زنجیره می‌شود که در نتیجه، باعث ایجاد خلل در فرآیند آماده‌سازی سفارش‌های تخصیص‌یافته به آن جزء خواهدشد. در این وضعیت، راه‌حل پیشنهادی این تحقیق، به کمک فناوری اینترنت اشیا، در سریع‌ترین زمان ممکن با یک رویکرد موثر اقدام به جایگزین کردن جزء یا اجزای از کارافتاده می‌کند تا اثرات منفی این رویدادهای مختل‌کننده را تا حد امکان کاهش دهد.

در نهایت به منظور ارزیابی راه‌حل پیشنهادی، تعداد ۱۵ سناریو با استفاده از روش DOE طراحی شدند و هر سناریو یکبار با راه‌حل پیشنهادی این پژوهش و یکبار با روش یک مقاله مشابه (روش بهینه) مورد آزمایش قرار گرفت و میزان بهبود نتایج در راه‌حل

پیشنهادی با استفاده از معیار MAPE محاسبه شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها، راه‌حل پیشنهادی، تأخیر زمانی کمتری در ثبت و تحویل سفارش‌ها داشته است، همچنین در راه‌حل پیشنهادی، هزینه توزیع و تولید سفارش‌ها در تمامی سناریوها و هزینه تأمین سفارش‌ها در اکثر سناریوها، نسبت به راه‌حل بهینه کمتر است. حصول این نتیجه به این دلیل است که در راه‌حل پیشنهادی این مطالعه، برخلاف راه‌حل بهنیه که تنها براساس معیار هزینه تصمیم‌گیری می‌کند، تصمیم‌گیری به صورت چندمعیاره انجام می‌شود. همچنین راه‌حل پیشنهادی در برخورد با رویداهای مختل‌کننده، اقدامات بلادرنگی را برای جایگزینی اجزا و از سرگیری فرآیند انجام سفارش‌های مختل‌شده اجرا می‌کند. در صورتیکه راه‌حل بهنیه هیچگونه اقدامات تصحیح‌کننده‌ای در مقابل این رویدادها انجام نمی‌دهد.

۵-۱- کارهای آتی

به منظور توسعه‌ی این تحقیق، پیشنهادات زیر ارائه می‌شوند:

- به منظور دستیابی بیشتر، به پویایی محیط واقعی می‌توان انواع بیشتری از رویدادهای احتمالی (علاوه بر رویدادهای موجود در این مطالعه) را از محیط درونی و پیرامونی زنجیره شناسایی و در مدل زنجیره شبیه‌سازی کرد.
- می‌توان یک سیستم امتیازدهی طراحی کرد که عملکرد هر یک از اجزای زنجیره را از نظر هزینه و زمان انجام سفارش ارزیابی کرده و با ایجاد یک محیط رقابتی بین اجزای زنجیره، اجزایی که دارای امتیاز کمتری هستند از زنجیره حذف و اجزای جدید جایگزین آن‌ها شوند. در این صورت بهره‌وری و کارایی زنجیره همواره بهبود می‌یابد.
- برای سرعت بخشیدن به آزمایش‌ها و ایجاد امکان آزمایشِ تعداد بالایی از سفارش‌های ورودی با راه‌حل پیشنهادی، می‌توان کدهای دستوری مدل ارائه‌شده را با پلتفرم‌های برنامه‌نویسی مانند زبان پایتون نیز پیاده‌سازی کرد.
- در زنجیره تأمین مدل‌شده در این تحقیق، فرض بر این است که تنها یک نوع محصول و صرفا از سه نوع ماده اولیه، تأمین و تولید می‌شود. به منظور شبیه‌سازی زنجیره‌های پیچیده‌تر، می‌توان تعداد محصولات تولیدی زنجیره، همچنین تعداد مواد اولیه‌ی لازم برای تولید محصولات را افزایش داد.
- می‌توان یک سیستم برای شخصی‌سازی سفارش نیز به مدل زنجیره افزود. بدین صورت که مشتری در هنگام سفارش‌دهی، قیمت و زمان مورد نظر خود را برای سفارشش اعلام کند و زنجیره نزدیکترین مسیر ممکن را به شرایط مورد نظر مشتری برای آن سفارش انتخاب کند.
- نظر به اینکه عملکرد بخش حمل‌ونقل در بین لایه‌های مختلف زنجیره تأمین، نقش بسیاری مهمی در بهروه‌وری نهایی زنجیره دارد، می‌توان با ترکیب مدل ارائه‌شده با یکی از مدل‌های شبیه‌سازی دقیق لجستیک، بخش حمل‌ونقل بین لایه‌های زنجیره تأمین را که به صورت جزئی در این تحقیق به آن‌ها پرداخته شده‌است، تا حد زیادی بهبود بخشید.

مراجع

[1] Lambert, D.M. and M.C. Cooper, "*Issues in supply chain management.* Industrial marketing management," 29(1): p. 65-83, 2000.

[2] Christopher, M. and M. Holweg, *"Supply Chain 2.0": Managing supply chains in the era of turbulence."* International journal of physical distribution & logistics management, 41(1): p. 63-82, 2011.

[3] S. Chopra, *Supply chain management: strategy, planning, and operation*, 7th ed. Pearson, 2019.

[4] Liu, R., A. Kumar, and W. Van Der Aalst, "*A formal modeling approach for supply chain event management."* Decision Support Systems, 43(3): p. 761-778, 2007.

[5] Xu, L., et al., *Towards autonomous supply chains: Definition, characteristics, conceptual framework, and autonomy levels.* Journal of Industrial Information Integration, 2024. 42: p. 100698.

[6] Ben-Daya, M., E. Hassini, and Z. Bahroun, "*Internet of things and supply chain management." a literature review.* International journal of production research, 57(15-16): p. 4719-4742, 2019.

[7] Abdel-Basset, M., G. Manogaran, and M. Mohamed, "*Internet of Things (IoT) and its impact on supply chain: A framework for building smart, secure and efficient systems."* Future generation computer systems, 86(9): p. 614-628, 2018.

[8] Mims, C, "*Here's the one thing someone needs to invent before the internet of things can take off."* Backbone Magazine, February–March, p. 12-13, 2013.

[9] Gubbi, J., et al., "*Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions."* Future generation computer systems, 29(7): p. 1645-1660, 2013.

[10] Ellis, S., H.D. Morris, and J. Santagate, "*IoT-enabled analytic applications revolutionize supply chain planning and execution."* International Data Corporation (IDC) White Paper, 13: p. 259697, 2015.

[11] Drakaki, M. and P. Tzionas, "*Investigating the impact of inventory inaccuracy on the bullwhip effect in RFID-enabled supply chains using colored petri nets."* Journal of Modelling in Management, 14(2): p. 360-384, 2019.

[12] Wang, J., et al., "*An intelligent logistics service system for enhancing dispatching operations in an IoT environment."* Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 135: p. 101886, 2020.

[13] Al-Rakhami, M.S. and M. Al-Mashari, "*A blockchain-based trust model for the internet of things supply chain management."* Sensors, 21(5): p. 1759, 2021.

[14] Nachet, B., M. Frendi, and A. Adla, *Physical Internet Enabled Traceability Systems for Sustainable Supply Chain Management.* Journal of Information and Organizational Sciences, 2024. 48(1): p. 99–116.

[15] Kayvanfar, V., et al., *A review of decision support systems in the internet of things and supply chain and logistics using web content mining.* Supply Chain Analytics, 2024: p. 100063.

[16] Serpanos, D., *Industrial internet of things: Trends and challenges.* Computer, 2024. 57(1): p. 124–128.

[17] Ehteshami, M., et al., *Identifying and ranking factors affecting the digital transformation strategy in Iran's road freight transportation industry focusing on the Internet of Things and data analytics.* Journal of Information and Communication Technology, 2024. 16(59): p. 33–46.

[18] Monfared, N.T., A. Shayan, and a.r. ghotri, *The effect of Internet of Things (IOT) implementation on the Rail Freight Industry; A futures study approach.* Journal of Information and Communication Technology, 2023. 15(55): p. 191–207.

[19] Balamurugan, S., A. Ayyasamy, and K.S. Joseph, "*Enhanced petri nets for traceability of food management using internet of things."* Peer-to-Peer Networking and Applications, 14. p. 30-43, 2021.

[20] Fierro, L.H., R.E. Cano, and J.I. García, "*Modelling of a multi-agent supply chain management system using Colored Petri Nets."* Procedia Manufacturing, 42: p. 288-295, 2020.

[21] Van der Aalst, W., "*Putting high-level Petri nets to work in industry.* Computers in industry," 25(1): p. 45-54, 1994.

[22] Cavalcante, I.M., et al., "*A supervised machine learning approach to data-driven simulation of resilient supplier selection in digital manufacturing."* International Journal of Information Management, 49: p. 86-97, 2019.

[23] Jalali, S., S.A.H. Golpayegani, and H. Ghavamipoor. "*Designing a model of decision making in layers of supply, manufacturing, and distribution of the supply chain: A recommender-based system.*" in *8th International Conference on e-Commerce in Developing Countries: With Focus on e-Trust*. IEEE, 2014.

[24] Mazzuto, G., M. Bevilacqua, and F.E. Ciarapica, "*Supply chain modelling and managing, using timed coloured Petri nets: a case study."* International Journal of Production Research, 50(16): p. 4718-4733, 2012.

[25] Li, Z., et al. "*Supplier selection decision-making in supply chain risk scenario using agent based simulation*." in *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE, 2015.

[26] Jensen, K., "*Seventh Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools,"* Aarhus, Denmark, October 24-26, 2006(579). DAIMI Report Series, 2006.

[27] Santana-Robles, F., et al., "*Modeling and simulation of textile supply chain through colored Petri nets."* Intelligent Information Management, 4(5A): p. 261, 2012.

[28] Tools, C., *A tool for editing, simulating, and analyzing Colored Petri nets.*: http://www.cpntools.org/ 20. 2018.

[29] Ballman, K., "*Coloured petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use," volume 3.* The American Mathematical Monthly, 105(5): p. 493, 1998.

[30] Jensen, K. and L.M. Kristensen, "*Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems."* Aarhus, Denmark: Springer-Verlag, 2009.

[31] DOE with MATLAB 1. Available from: https://icme.hpc.msstate.edu/mediawiki/index.php/DOE_with_MATLAB_1.html.

[32] Saif, O.M., et al., Analyzing Supply Chain Structures with Petri Nets: A Composition-Based Approach, in Future Directions in Energy Engineering: Challenges, Opportunities, and Sustainability. 2024, Springer. p. 133–140.

[33] Cao, E.-Z., et al., *Hybrid Modeling and Fuzzy Control Via Petri Nets for Supply Chain Networks Under Disruptions.* IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2025.

[34] Skorupski, J., et al., *Petri nets-based method for operational risk analysis in supply chains based on timeliness and recovery time.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2024. 238(3): p. 523–539.

[35] Kaiyandra, D.R., F. Farizal, and N. Rakoto, *Colored Petri Nets for Modeling and Simulation of a Green Supply Chain System.* IFAC-PapersOnLine, 2024. 58(1): p. 306–311.

[36] Statgraphics Technologies, I. 2023 [cited 2023; Available from: www.statgraphics.com.

[37] GHEYDAR, K.J., S. GHODSIPOUR, and G.S. FATEMI, "*Supply chain optimization policy for a supplier selection problem: a mathematical programming approach.*" 2010.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 110-122

Detecting Distributed Denial of Service Attacks in Software-Defined Networks with a Deep Learning Approach

Younes Mehdizadeh[1*], Mehdi sadegh zadeh[2]

[1] Department of Information Technology Management, Faculty of Management and Economics, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

[2] Department of Computer Science, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Received: 27 January 2024, Revised: 6 January 2025, Accepted: 29 January 2025

Paper type: Research

Abstract

The growth of cloud computing has led to the development of software-defined networks. These networks enable dynamic management and performance improvement. Security threats in this type of network are a growing concern. Especially, the controller of these networks is an attractive target for hackers and distributed denial of service attacks. Many researchers have proposed different methods to detect these attacks, whose false detection rate is very high and has led to a decrease in detection accuracy. For this purpose, in this research, the focus is on detecting distributed denial of service attacks through deep learning using prominent features of packets. After pre-processing and preparing the data, the proposed method separates the salient and important features of the packages through the support vector machine method and finally by using an innovative hybrid neural network consisting of convolutional neural network, sample recurrent neural network and Long-term short-term memory neural network separates attack packets from normal packets. A standard data set has been used to evaluate the proposed method through standard evaluation criteria such as detection accuracy, precision, false detection rate and harmonic mean accuracy. The findings show that the proposed method detects distributed denial of service attacks with 95.2% detection accuracy, 92.09% precision, 5.1% false alarm rate, and 93.87% F1_measure.

Keywords: Software-Defined Networks, Distributed Denial of Service Attacks, Cloud Computing, Deep Learning, Neural Networks.

[*] Corresponding Author's email: ymz.info1989@gmail.com

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۱۰ الی ۱۲۲

تشخیص حملات انکار سرویس توزیع شده در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار با رویکرد یادگیری عمیق

یونس مهدی‌زاده[1]*، مهدی صادق‌زاده[2]

[1] گروه مدیریت فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران،ایران

[2] دانشیار، گروه کامپیوتر، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

رشد محاسبات ابری منجر به توسعه شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار شده است. تهدیدات امنیتی در این نوع شبکه یک نگرانی است. کنترل‌کننده این شبکه‌ها، هدف جذابی برای حملات انکار سرویس توزیع شده است. پژوهشگران روش‌های مختلفی را برای شناسایی این حملات ارائه کرده‌اند که آمار تشخیص اشتباه آنها بسیار بالا است. به همین منظور این پژوهش، روشی برای تشخیص حملات انکار سرویس توزیع شده از طریق یادگیری عمیق با استفاده از ویژگی‌های برجسته بسته‌ها، پیشنهاد می‌کند. روش پیشنهادی پس از پیش پردازش و آماده‌سازی داده‌ها، ویژگی‌های با اهمیت بسته‌ها را از طریق روش ماشین بردار پشتیبان، جدا می‌کند و نهایتا با یک شبکه عصبی ترکیبی ابتکاری متشکل از یک شبکه عصبی کانولوشنال، دو نوع شبکه بازگشتی ساده و حافظه کوتاه و بلند مدت، بسته‌های حمله را از بسته‌های عادی جدا می‌کند. ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از طریق معیارهای استاندارد روی یک مجموعه داده استاندارد انجام می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد روش پیشنهادی حملات انکار سرویس توزیع شده را با دقت تشخیص ۹۵,۲ درصد، حساسیت ۹۲,۰۹درصد، نرخ تشخیص اشتباه ۲,۷درصد ومیانگین هارمونیک دقت ۹۳,۸۷درصد تشخیص می‌دهد.

کلیدواژگان: شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار، حملات انکار سرویس توزیع شده، محاسبات ابری، یادگیری عمیق، شبکه‌های عصبی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: ymz.info1989@gmail.com

۱- مقدمه

شبکه مبتنی بر نرم‌افزار[1] یک رویکرد انقلابی برای مدیریت شبکه است که به مدیران شبکه اجازه می‌دهد تا کل زیرساخت شبکه را از طریق برنامه‌های کاربردی نرم‌افزاری و سیاست‌های قابل برنامه‌ریزی، کنترل و مدیریت کنند. این تغییر پارادایم در شبکه، انعطاف‌پذیری، مقیاس‌پذیری و کارایی بیشتری را در مقایسه با مدل‌های شبکه سنتی سخت‌افزارمحور ارائه می‌دهد [۱].

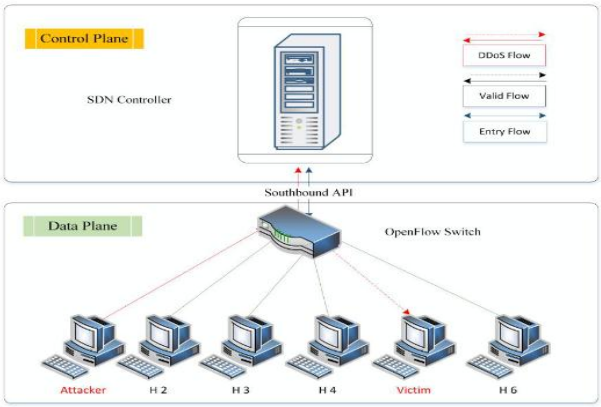
شبکه مبتنی بر نرم‌افزار به مدیران شبکه اجازه می‌دهد تا رفتار شبکه را از طریق نرم‌افزار، برنامه‌ریزی کنند. این قابلیت برنامه‌ریزی، تغییرات سریع پیکربندی، سازگاری با شرایط مختلف و توانایی اجرای سیاست‌ها به صورت پویا را امکان‌پذیر می‌کند.

شبکه مبتنی بر نرم‌افزار، استانداردهای باز را ترویج و رابط‌های برنامه‌نویسی کاربردی[2] را فراهم می‌کند که به برنامه‌های شخص ثالث اجازه می‌دهد با زیرساخت شبکه تعامل داشته باشند. قابلیت بازبودن، باعث تقویت نوآوری، تشویق توسعه برنامه‌های کاربردی جدید و تسهیل همکاری بین فروشندگان تجهیزات مختلف می‌شود [۱].

شبکه مبتنی بر نرم‌افزار، امکان ایجاد چندین شبکه مجازی را روی یک زیرساخت فیزیکی فراهم می‌کند. این قابلیت برای محیط‌های ابری، مراکز داده و سناریوهایی که استفاده بهینه از منابع ضروری است، بسیار مفید می‌باشد.

در معماری‌های شبکه سنتی، سطح کنترل که تصمیم‌گیری در مورد نحوه ارسال داده‌ها و سطح داده که به ارسال بسته‌های داده اشاره دارد، در دستگاه‌های شبکه مانند سوئیچ‌ها و روترها ادغام می‌شوند. شبکه مبتنی بر نرم‌افزار این دو سطح را جدا می‌کند و کنترل را در یک کنترل‌کننده[3] مبتنی بر نرم‌افزار متمرکز می‌کند. کنترل‌کننده متمرکز به عنوان مغز شبکه عمل می‌کند. این کنترل‌کننده با سوئیچ‌ها و مسیریاب‌ها در شبکه ارتباط برقرار می‌کند و دیدی جامع از شبکه ارائه می‌دهد تا بر اساس سیاست‌های تعریف شده در مورد نحوه مدیریت ترافیک تصمیم‌گیری شود.[۲]

حملات انکار سرویس توزیع شده[4] از ماشین‌های در معرض خطر متعدد برای هجوم ترافیک به کنترل‌کننده استفاده می‌کند و باعث افزایش بار روی آن می‌شود . با توجه به اینکه کنترل‌کننده قادر به تشخیص تمایز بین ترافیک عادی و غیر عادی شبکه نیست [۳] و [۴]، حملات انکار سرویس توزیع شده، به مرور زمان باعث از کار افتادن کنترل‌کننده می‌شوند. شکل ۱ نحوه حملات انکار سرویس توزیع شده را به به شبکه مبتنی بر نرم‌افزار نشان می‌دهد.



شکل ۱. حمله انکار سرویس توزیع شده به کنترل‌کننده شبکه مبتنی بر نرم‌افزار[۱۰]

پژوهشگران بسیاری پیشنهادات مختلفی را برای تشخیص حملات انکار سرویس به کنترل‌کننده شبکه مبتنی بر نرم‌افزار ارائه کرده‌اند [۵]تا[۹] با وجود کارایی این پیشنهادات، شناسایی حملات انکار سرویس توزیع شده به کنترل‌کننده‌های شبکه مبتنی بر نرم‌افزار همچنان یک مشکل چالش بر انگیز است[۱۰]. زیرا اکثر این پیشنهادات از مشکل مثبت کاذب[5] بالا رنج می‌برند. منظور از مثبت کاذب تعداد تشخیص اشتباه بسته‌های عادی شبکه به عنوان بسته غیر عادی یا حمله است. این دقت پایین را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد: الف- اتکا به ویژگی‌های غیر مرتبط بسته‌ها[۶] ب- ارزیابی با استفاده از داده‌های غیر واقعی[۷].

منصور و همکاران[۱۰] استفاده از دو مکانیزم نرخ گین اطلاعات و انتخاب ویژگی مبتنی بر خی-دو را برای انتخاب ویژگی‌های برجسته برای تشخیص بسته‌های عادی و حمله استفاده می‌کنند. این مقاله استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان[6] را برای انتخاب ویژگی‌های برجسته پیشنهاد می‌کند. این روش تاثیر بالایی بر افزایش قدرت تشخیص، در مقایسه با مکانیزم‌های قبلی از خود نشان می‌دهد.

استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق مختلف می‌تواند دقت تشخیص[7] حملات را افزایش دهد. پژوهش‌های فراوانی با استفاده از انواع شبکه‌های عصبی مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی ساده[8]،

[1] Software Defined network[SDN]
[2] Application Programming Interface [API]
[3] Controller
[4] Distribute denial of service (DDOS)
[5] False Positive [FP]
[6] Support Vector Machine (SVM)
[7] Detection Accuracy (DA)
[8] Sample Recurrent Neural Networks (S_RNNs)

شبکه‌های عصبی کانولوشنال[1] و شبکه‌های با حافظه کوتاه‌مدت و بلندمدت[2] به صورت جداگانه برای افزایش قدرت تشخیص حملات انجام شده است [۱۱].روش پیشنهادی از ترکیب هر سه نوع شبکه عصبی برای ایجاد مدل استفاده می‌کند. ارزیابی مدل نشان می‌دهد که روش پیشنهادی باعث بهبود معیارها می‌شود.

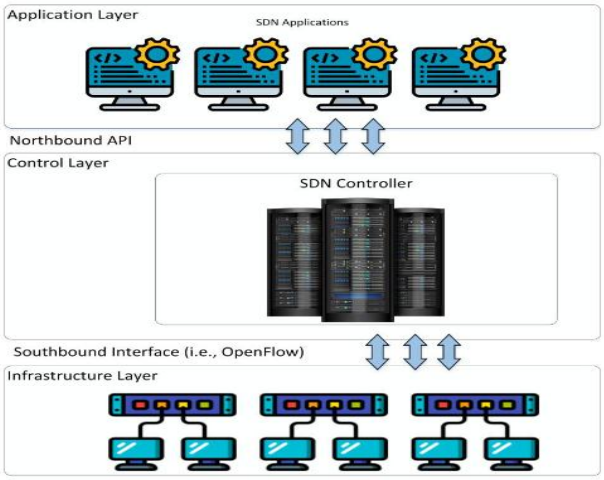
در ادامه مقاله ابتدا در بخش ۲ پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۳ کارهای مرتبط مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش ۴ روش پیشنهادی معرفی می‌شود، در بخش ۵ نتایج آزمایش نشان داده می‌شود . بخش ۶ بحث و نتیجه‌گیری صورت می‌پذیرد و در بخش ۷ جهت‌گیری تحقیقات آینده ارئه می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

در این بخش نمای کلی معماری شبکه مبتنی بر نرم‌افزار ارائه می‌شود.نقش کنترل‌کننده‌ها و پروتکل جریان باز[3] مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین اهمیت رویکردهای مبتنی بر یادگیری عمیق در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار بیان می‌شود.

۲-۱- شبکه مبتنی بر نرم‌افزار

شبکه‌های سنتی به دلیل عدم انعطاف پذیری کافی مقرون به صرفه نیستند و برای پاسخگویی به نیازهای اینترنت فعلی مناسب نخواهند بود [۱۲]. بنابراین ظهور نسل جدیدی از شبکه که بتواند پاسخگوی نیازها و دارای قابلیت انعطاف پذیری باشد، مطرح می‌شود. شبکه مبتنی بر نرم‌افزار امکان دست یافتن به یک شبکه قابل برنامه ریزی با جدا کردن سطح کنترل از سطح داده، برای بهبود کارایی شبکه را فراهم می‌کند [۱۳]. این جداسازی مزایایی همچون مدیریت ساده شبکه، بهبود کارایی شبکه و ایجاد نوآوری در شبکه را فراهم می‌کند. سطح کنترل، اطلاعات لازم برای مسیریابی در شبکه را فراهم می‌کند. سطح داده نیز وظیفه انتقال بسته‌ها از درگاه ورودی به درگاه خروجی بر اساس اطلاعات درج شده در جدول مسیریابی خود را بر عهده دارد[۱۰]. در شبکه مبتنی بر نرم‌افزار سطح جداشده کنترل در سرور یا برنامه‌ای به نام کنترل‌کننده قرار می‌گیرد[۱۰]. سطح داده نیز در سوئیچ یا مسیریاب به عنوان ارسال‌کننده باقی می‌ماند[۱۰]. پیدایش شبکه مبتنی بر نرم‌افزار توجه تعداد زیادی از دانشگاه‌ها و صنایع را به پیاده‌سازی آن در زیرساخت‌های ارتباطی خود معطوف ساخته است[۱۴]. روش‌های پیکربندی این شبکه‌ها ساده‌تر و دقیق‌تر است و امکان بهره‌گیری بیشتر از زیرساخت‌های فیزیکی را فراهم کرده است [۱۵]. گروهی از اپراتورهای شبکه، ارائه دهندگان خدمات شبکه و تولیدکنندگان تجهیزات شبکه، سازمانی به نام بنیاد شبکه باز[4] [۱۶] ایجاد کردند تا به ترویج شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار و ارائه یک پروتکل ارتباطی استاندارد برای این شبکه بپردازند[۱۹].



شکل ۲. معماری شبکه مبتنی بر نرم‌افزار[۱۰]

در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار، کنترل‌کننده مسئول انتشار هر جریان در شبکه است که این عمل را با تخصیص جریان‌های ورودی به سوئیچ‌ها انجام می‌دهد[۱۷]. این وظیفه، نقشی محوری به کنترل‌کننده بخشیده است؛ چراکه به واسطه آن می‌توان دانش کاملی از شبکه را در بهینه‌سازی مدیریت جریان و پشتیبانی از نیاز کاربر به خدمت گرفت[۱۸]. یکی از معایب این نوع شبکه وابستگی شدید در دسترس بودن[5] شبکه به عملکرد کنترل‌کننده است. از این رو حفاظت از کنترل‌کننده در برابر حملات امنیتی بسیار حائز اهمیت است. شکل ۲ معماری شبکه مبتنی بر نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

۲-۲- پروتکل جریان باز

جریان باز یک پروتکل ارتباطی است که کنترل‌کننده شبکه مبتنی بر نرم‌افزار را قادر می‌سازد تا با عناصر ارسال و دریافت در یک شبکه مانند سوئیچ‌ها و روترها تعامل داشته باشد. این پروتکل امکان کنترل متمرکز روی شبکه را فراهم می‌کند و پیکربندی پویا و مدیریت دستگاه‌های شبکه را ممکن می‌سازد[۳]. عملیات بین کنترل‌کننده و سوئیچ‌ها به این صورت است که سوئیچ پس از راه‌اندازی، اتصالی

[1] Convolutional Neural Networks (CNNs)
[2] Long Short-Term Memory (LSTM) Networks
[3] Open Flow
[4] Open Network Foundation
[5] Availability

با کنترل‌کننده برقرار می‌کند که به آن کانال جریان باز می‌گویند. بسته به اینکه چه کسی اولین حرکت را انجام دهد حالت کنشی[1] و واکنشی[2] به وجود می‌آید [۱۹].

ورودی‌های جریان از پیش نصب شده کنترل‌کننده در سوئیچ‌ها حالت کنشی نامیده می‌شوند. این حالت می‌تواند در کل زمان کار رخ دهد و مستلزم ارسال ورودی جریان مستقیم پس از ایجاد کانال جریان باز نیست. حالت واکنشی بالعکس است[۱۹]. هنگامی که سوئیچ‌های جریان باز یک بسته جدید دریافت می‌کنند که با هیچ ورودی جریانی مطابقت ندارد، آن را در یک پیام بسته_ ورودی[3] کپسوله می‌کنند و آن را از طریق کانال جریال باز به کنترل‌کننده ارسال می‌کنند. کنترل‌کننده با یک جدول جریان[4] و یک بسته اصلی [5] پاسخ می‌دهد[۲۰].

۲-۳- رویکرد یادگیری عمیق[6]

هوش مصنوعی یکی از زمینه‌های علمی درحال توسعه است که کاربردهای عملی آن باعث ایجاد انگیزه برای تدوام پژوهش شده است[۱۰]. توسعه نرم‌افزارهای هوشمند باعث خودکارسازی وظایف، تجزیه و تحلیل تصاویر، درک مکالمات، انجام تشخیص‌های پزشکی، ایجاد زیرساخت‌های هوشمند، توانمندسازی افراد دارای معلولیت جسمی و حمایت از تحقیقات علمی شده است [۱۰]. یادگیری ماشین[7] پایه و اساس اکثر راه حل‌های هوش مصنوعی است. با حجم وسیعی از داده‌های موجود امروزه، می‌توانیم از آن برای آموزش مدل‌هایی استفاده کنیم که می‌توانند بر اساس الگوها و ارتباط‌های موجود در داده‌ها، پیش‌بینی و استنتاج کنند. هوش مصنوعی ،یادگیری ماشین و یادگیری عمیق رابطه‌ای مشترک دارند که در آن یادگیری عمیق نوعی یادگیری بازنمایی[8] است، و یادگیری ماشین در بسیاری از سیستم‌های هوش مصنوعی، استفاده می‌شود [۱۰].

یادگیری عمیق قابلیت‌های یادگیری ماشین کلاسیک را با افزایش پیچیدگی مدل و اصلاح عملیات داده برای فعال‌سازی نمایش سلسله مراتبی داده از طریق چندین لایه انتزاعی افزایش می‌دهد [۲۱، ۲۲]. یکی از مزایای کلیدی یادگیری عمیق، یادگیری ویژگی است، که در آن ویژگی‌های داده خام به طور خودکار استخراج می‌شوند و ویژگی‌های سطح بالاتر از طریق ترکیب ویژگی‌های سطح پایین شکل می‌گیرند [۲۳]. یادگیری عمیق در رسیدگی به مسائل و مدل‌های پیچیده برتری دارد و امکان موازی‌سازی کارآمد را فراهم می‌کند. اجزای یادگیری عمیق، بسته به معماری شبکه مورد استفاده، متفاوت است و ممکن است شامل لایه‌های ادغام، کانولوشن، گیت، لایه‌های کاملاً متصل، توابع فعال‌ساز، سلول‌های حافظه و روش‌های رمزگذاری/رمزگشایی باشد [۲۴].

جدول ۱. مقایسه سه نوع شبکه عصبی

معیارها	شبکه عصبی کانولوشنال	شبکه عصبی بازگشتی ساده	شبکه عصبی با حافظه کوتاه مدت –بلند مدت
ورودی‌ها و خروجی‌ها	ثابت	متفاوت	متفاوت
معماری مدل	استفاده از فیلتر و شبکه عصبی پیش خور[9]	یک شبکه تکراری که شبکه با یافته‌ها تغذیه می‌شود.	داده‌های با اهمیت را برای مدت زمان طولانی در خود نگه می‌دارد.
موارد عملی	تشخیص چهره، تحلیل پزشکی، تحلیل تصویر، تشخیص و طبقه‌بندی تصاویر	ترجمه متن،تحلیل احساسات،پردازش زبان طبیعی، تحلیل گفتار	تحلیل گفتار،تشخیص و پردازش دست خط، تشخیص و پردازش تصویر
سناریوهای استفاده مناسب	داده‌های فضایی مانند تصویر	تحلیل داده‌های موقتی و متوالی مانند متن و ویدئو	تحلیل داده‌های موقتی و متوالی مانند متن و ویدئو

علاوه بر انواع شبکه‌های عصبی موجود، تحقیقات در حال انجام منجر به اکتشاف شبکه‌های جدید می‌شود. شبکه‌های عصبی را می‌توان بر اساس ساختار، جریان داده، گره‌های پردازشی (نرون‌ها)، چگالی، لایه‌ها و فیلترهای فعال‌سازی عمق طبقه‌بندی کرد [۲۵]. برخی از انواع شبکه‌های عصبی عمیق رایج شبکه‌های عصبی بازگشتی ساده[10]، شبکه‌های عصبی کانولوشنال[11] و شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلند مدت[12] هستند [۲۷]. در جدول ۱ این سه نوع شبکه با هم مقایسه شده است.

هر نوع شبکه عصبی بسته به نیازهای داده ورودی/خروجی خاص، سناریوها و موارد استفاده، نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارد. ترکیب صحیح دو یا چند نوع شبکه عصبی عمیق می‌تواند کارایی متفاوتی نسبت به استفاده از یک نوع شبکه را مهیا کند.

[1] Proactive
[2] Reactive
[3] Packet_in
[4] Flow Table
[5] Original Packet
[6] Deep Learning
[7] Machine Learning
[8] Representation
[9] Feed Forward (FF)
[10] Sample Recurrent Neural Networks (S_RNN)
[11] Convolutional neural network (CNN)
[12] Long short-term memory (LSTM)

۲-۴- حملات امنیتی در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار

با وجود قابلیت‌ها و عملکردهای متعدد شبکه مبتنی بر نرم‌افزار، امنیت همچنان یک نگرانی حیاتی است. کنترل‌کننده این شبکه‌ها که هسته مرکزی و مسئول مدیریت جریان داده است، بالاترین خطر خرابی تک نقطه‌ای را به همراه دارد. به خطر انداختن کنترل‌کننده می‌تواند عواقب شدیدی در کل شبکه داشته باشد. پیکربندی نادرست در کنترل‌کننده‌ها می‌تواند منجر به عواقب خطرناکی شود، زیرا قابلیت برنامه‌ریزی آن‌ها را در معرض حملات احتمالی قرار می‌دهد و اعتبار، امنیت و یکپارچگی شبکه را به خطر می‌اندازد.

پیاده‌سازی مکانیسم‌های نظارت، تحلیل و پاسخ امنیتی در این شبکه‌ها می‌تواند به افزایش امنیت شبکه کمک کند. توجه به این نکته مهم است که حملات سایبری که این شبکه‌ها را هدف قرار می‌دهند، می‌توانند در مقایسه با شبکه‌های سنتی عواقب مخرب‌تری داشته باشند [۳۱].

جدول ۲ نمای کلی از انواع مختلف حملات بالقوه‌ای که می‌توانند در شبکه مبتنی بر نرم‌افزار رخ دهند، را ارائه می‌دهد، که بر اساس سطوح تهدید در لایه‌های مختلف این شبکه‌ها طبقه‌بندی می‌شوند [۳۲]. هر لایه الزامات امنیتی خاص خود را دارد. عدم رعایت این الزامات، شبکه را در معرض تهدیدات و حملات امنیتی مختلف قرار می‌دهد. اگر پیوند ارتباطی بین سوئیچ‌ها و کنترل‌کننده‌ها به خطر بیفتد، تمام سطوح سیستم در برابر حملات سیل‌آسا آسیب‌پذیر می‌شوند.

جدول ۲. حملات بالقوه در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار[۱۰]

روندهای امنیتی در شبکه مبتنی بر نرم‌افزار		لایه داده	لایه کنترل‌کننده	لایه کاربرد
دسترسی غیر مجاز	برنامه غیرمجاز تسلط بر کنترل‌کننده	× ✓	✓ ✓	✓ ×
مسائل مربوط به پیکربندی	عدم پیاده‌سازی TLS اجرای سیاست	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
حملات انکار سرویس توزیع شده	حمله سیل آسا به کنترل‌کننده حمله سیل آسا به سوئیچ	✓ ✓	✓ ×	× ×
دستکاری داده	دستکاری جریان داده	✓	✓	×
نشت داده	مدیریت اعتبار کشف خط مشی ترافیک	× ×	✓ ✓	× ×

انواع مختلفی از حملات مخرب می‌توانند امنیت شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار را به خطر بیندازند، از جمله حملات انکار سرویس توزیع شده، حملات جعل[۱]، شناسایی[۲] بسته‌هاو حدس زدن گذرواژه‌ها [۳۲].در این پژوهش روشی برای تشخیص حملات انکار سرویس توزیع‌شده ارائه می‌شود.

۳- کارهای مرتبط

در این بخش علاوه بر اینکه رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق موجود برای تشخیص حملات انکار سرویس در کنترل‌کننده شبکه مبتنی بر نرم‌افزار مورد بررسی قرار می‌گیرد، روش ماشین بردار پشتیبان به عنوان یک روش یادگیری ماشین برای انتخاب ویژگی نیز تشریح می‌شود .

۳-۱- روشهای مبتنی بر یادگیری ماشین

رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین توسعه یافته و بهبود می‌یابند. این رویکردها سیستم‌های تشخیص نفوذ[۳] را آموزش می‌دهند تا با تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ترافیک شبکه، حملات انکار سرویس توزیع شده مخرب را شناسایی کنند. به عنوان مثال، روشی برای شناسایی و کاهش شدت این حملات در شبکه مبتنی بر نرم‌افزارتوسط خشاب و همکاران پیشنهاد شد [۳۳]. آنها از شش الگوریتم یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی[۴]، رگرسیون لجستیک[۵]، بیز[۶]، نزدیکترین همسایه[۷]، ماشین بردار پشتیبانی و درختان تصمیم[۸] استفاده کردند. نتایج روش پیشنهادی نشان داد که جنگل تصادفی از سایر الگوریتم‌ها بهتر عمل می‌کند و مناسب‌ترین طبقه‌بندی‌کننده برای روش آنها است.با این حال، نویسندگان جزئیات کافی در مورد مجموعه داده مورد استفاده یا اینکه حملات خاص انکار سرویس توزیع شده در نظر گرفته شده است یا نه ارائه نکردند[۱۰].

سودار و همکاران [۳۴] تحقیقی در مورد استفاده از ماشین بردار پشتیبانی و درخت تصمیم برای شناسایی حملات انکار سرویس توزیع شده در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار انجام داد. آنها رویکرد پیشنهادی خود را با استفاده از مجموعه داده استاندارد ارزیابی کردند. با این حال، روش آنها به عملکرد مناسبی دست نیافت و درختان تصمیم تنها به ۷۸ دست یافت. سانتوس و همکاران [۳۵] از پرسپترون چندلایه، الگوریتم جنگل تصادفی، ماشین بردار

[1] Spoofing
[2] Sniffing
[3] Intrusion Detection System (IDS)
[4] Random Forest(RF)
[5] Logistic Regression
[6] Naïve Bayes
[7] K-Nearest Neighbors (K-NN)
[8] Decision Tree

پشتیبان و درخت تصمیم برای شناسایی انواع مختلف حملات انکار سرویس توزیع شده، از جمله حملات نقطه‌ای، حملات جدول جریان سوئیچ، حملات کنترل‌کننده، و حملات پهنای باند استفاده کرد. آنها رویکرد خود را با استفاده از یک مجموعه داده واقعی ارزیابی کردند. با این حال، نتایج نشان‌دهنده عملکرد ضعیف طبقه‌بندی برای پرسپترون چندلایه و ماشین بردار پشتیبان در تشخیص حملات به کنترل‌کننده، با نرخ دقت تنها ۹۰ درصد شد.

در مقابل، دیپا و همکاران. [۳۷] یک الگوریتم ترکیبی یادگیری ماشین پیشنهاد کرد که ماشین بردار پشتیبانی و نقشه خود سازماندهی[1] (خوشه‌بندی) را برای شناسایی حملات انکار سرویس توزیع شده در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار ترکیب می‌کند. مدل ترکیبی به نرخ تشخیص[2] ۹۰,۴۵ درصد، نرخ دقیق تشخیص[3] ۹۶,۷۷ درصد و نرخ هشدار نادرست[4] ۰,۰۳۲ درصد دست یافت.

با این حال، رویکرد ترکیبی پیشنهادی دقت و عملکرد نرخ تشخیص پایین را نشان داد. علاوه بر این، نویسندگان اطلاعات محدودی در مورد مجموعه داده و نوع حمله انکار سرویس توزیع شده مدنظرشان ارائه کردند.

ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان[۲۷] یک الگوریتم یادگیری ماشین محبوب به دلیل عملکرد برتر آن است. در این مقاله از این روش برای انتخاب ویژگی استفاده می‌شود.

ماشین بردار پشتیبان برای طبقه‌بندی، یک مرز تصمیم (جداسازی ابرصفحه[5]) می‌سازد که نمونه‌های مثبت را از نمونه‌های منفی با حداکثر حاشیه جدا می‌کند. ابرصفحه جداکننده با یک تابع خطی $w \cdot x + b = 0$ نشان داده می‌شود، که در آن $w \in R^m$ بردار وزن و $b \in R$ برای جابجایی ابر صفحه جداکننده است. ایده بردار ماشین بردار پشتیبان را می‌توان به عنوان مسئله بهینه‌سازی محدود به صورت فرمول (۱) در نظر گرفت:

$$\min_{w,b,\xi} \frac{1}{2} \| w \|_2^2 + C \sum_{i=1}^{n} \xi_i \qquad (۱)$$

$$subject\ to\ y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 - \xi_i$$
$$\xi_i \geq 0, i = 1, \ldots, n$$

که در آن $\| w \|$ نرم اقلیدسی را نشان می‌دهد. در اینجا، هدف عبارت اول، منظم‌سازی است که مربوط به اندازه‌گیری معکوس حاشیه جداکننده است، عبارت دوم خطای آموزشی را اندازه‌گیری می‌کند و ابرپارامتر $C > 0$ مبادله بین آنها را مشخص می‌کند.

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در ابتدا برای طبقه‌بندی باینری طراحی شد. درصورتی که، بسیاری از وظایف طبقه‌بندی دنیای واقعی شامل طبقه‌بندی چند کلاسه است. دو رویکرد رایج برای گسترش ماشین بردار پشتیبان برای شناسایی چندین کلاس وجود دارد. یک رویکرد این است که با استفاده از یک استراتژی اکتشافی، مانند استراتژی یک در مقابل یک[6]، مسئله را به چندین مسئله طبقه‌بندی باینری تقسیم کنیم. با استفاده از این رویکرد می‌توان چندین مدل ساخت. کلاس ورودی جدید با رای اکثریت تعیین می‌شود، یعنی کلاسی که بیشترین رای را داشته باشد به عنوان کلاس پیش بینی شده انتخاب می‌شود. هر مدل بردار ضریب متفاوتی را تحویل می‌دهد. در نتیجه، این رویکرد برای انتخاب ویژگی مناسب نیست[۲۸].

روش دیگری برای تعمیم الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای مسائل طبقه‌بندی چند کلاسه، رویکرد همه با هم [7]نامیده می‌شود[۲۹]. این رویکرد به طور همزمان چند ابرصفحه جداکننده را ایجاد می‌کند، که منجر به یک مرز تصمیم‌گیری تکه‌ای می‌شود که مجددا هدف به حداکثر رساندن حاشیه است . [۳۰]در این مقاله از ماشین بردار پشتیبان به عنوان روش مناسب و هوشمند برای انتخاب ویژگی بسته‌های شبکه استفاده شده است.

۳-۲- روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های یادگیری عمیق نقش مهمی در سیستم‌های تشخیص نفوذ برای شناسایی حملات انکار سرویس توزیع شده در شبکه مبتنی بر نرم‌افزار ایفا می‌کند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق ثابت کرده‌اند که بسیار کارآمد و مؤثر هستند و از رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین پیشی گرفته‌اند. علاوه بر این، الگوریتم‌های یادگیری عمیق دارای قابلیت‌های قوی در تقلید از مغز انسان هستند که به آن‌ها اجازه می‌دهد ویژگی‌ها را به دست آورند و به طور خودکار ساختارهای عمیق را از داده‌های خام بیاموزند. چندین رویکرد مبتنی بر یادگیری عمیق پیشنهاد شده است.

به عنوان مثال، آلانازی و همکاران. [۳۸] یک رویکرد ترکیبی از واحد بازگشتی دروازه‌ای[8]، شبکه عصبی کانولوشنال و حافظه کوتاه‌مدت بلند مدت برای شناسایی حملات انکار سرویس توزیع

[1] Self-Organizing Map(SOM)
[2] Detection rate
[3] Accurate detection rate
[4] False alarm rate (FAR)
[5] Separating hyperplane
[6] One-versus-one(OVR)
[7] All-together
[8] Gated Recurrent Unit (GRU)

شده در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار پیشنهاد کرد. این روش با استفاده از مجموعه داده استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفت و تنها با انتخاب چهار ویژگی به دقت تشخیص بالایی دست یافت.

سلسووا و همکاران [۳۶] روشی را پیشنهاد کرد که از یک شبکه عصبی عمیق[1] برای محافظت از صفحات داده و کنترل در مقابل حملات انکار سرویس در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار استفاده می‌کند. با این حال، آنها از مجموعه داده‌ای که به طور خاص برای محیط این شبکه‌ها طراحی نشده است، برای آموزش، آزمایش و ارزیابی سیستم پیشنهادی خود استفاده کردند. در نتیجه، این روش از نظر معیارهای محاسبه به عملکرد پایینی دست یافت.

حسیه و همکاران [۳۹] یک تکنیک یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشنال برای تشخیص حملات سیل آسا پیشنهاد کرد. آنها رویکرد خود را با استفاده از یک مجموعه داده تولید شده آزمایش کردند و نتایج را با نرخ دقت تشخیص ۹۵,۰۳٪ به دست آوردند. علاوه بر این، این رویکرد هزینه‌های سربار را در سطح کنترل‌کننده افزایش داد.

وان و همکاران [۴۰] از یک شبکه حافظه کوتاه مدت دو طرفه برای شناسایی چنین حملاتی در شبکه مبتنی بر نرم‌افزار استفاده کرد. روش پیشنهادی به تشخیص موفقیت آمیز با دقت بالا و نرخ‌های مثبت کاذب پایین دست یافت. با این حال، این رویکرد با استفاده از یک مجموعه داده غیر مرتبط آزمایش شد.

لی و همکاران [۴۱] یک سیستم تشخیص نفوذ بر اساس چهار الگوریتم یادگیری عمیق طراحی کرد: پرسپترون چند لایه، شبکه حافظه کوتاه مدت دو طرفه، رمزگذار خودکار پشته‌ای[2] و شبکه عصبی کانولوشنال، برای شناسایی حملات انکار سرویس توزیع شده و پوسته ایمن[3] در مقابل تلاش‌های همه جانبه در یک شبکه مبتنی بر نرم‌افزار استفاده کرد. پرسپترون چند لایه برای حملات انکار سرویس و پوسته ایمن برای حملات همه جانبه به ترتیب به دقت تشخیص بالایی ۹۸,۳ و ۹۹ درصد دست یافت. با این حال، عملکرد سایر الگوریتم‌های یادگیری عمیق در شناسایی چنین حملاتی به دلیل کمبود اطلاعات در مورد مجموعه داده‌ها و ویژگی‌ها ضعیف بود.

بوکریا و همکاران [۴۲] از الگوریتم‌های استاندارد یادگیری عمیق برای شناسایی تلاش‌ها برای حملات در کانال ارتباطی استفاده کرد که کنترل‌کننده را با صفحه زیرساخت پیوند می‌دهد. نویسندگان ادعا کردند که سیستم پیشنهادی به دقت تشخیص ۹۹,۶ درصد دست یافته است. با این حال، این رویکرد با استفاده از یک مجموعه داده غیر مرتبط که نشان دهنده یک شبکه مبتنی بر نرم‌افزار نیست، آزمایش و ارزیابی شد. علاوه بر این، فقط به محافظت از کانال‌های ارتباطی محدود می‌شود.

منصور و همکاران [۱۰] روشی را پیشنهاد می‌کنند که پس از انتخاب ویژگی‌های برجسته ازطریق مکانیزم‌های خاص، با استفاده از مدل شبکه‌های عصبی بازگشتی، حملات انکار سرویس توزیع شده در شبکه مبتنی بر نرم‌افزار را به طور موثر تشخیص می‌دهد و معیارهای ارزیابی میانگین دقت تشخیص[4]، میانگین دقت[5]، میانگین نرخ هشدارغلط [6] و میانگین هارمونیک[7] برای این روش به ترتیب برابر ۹۴,۱۸۶٪، ۹۲,۱۴۶٪، ۸,۱۱۴٪ و ۹۴,۲۷۶٪ بیان شده است.

انواع مختلفی از حملات از جمله حملات انکار سرویس توزیع شده، حملات جعل، شناسایی بسته‌ها، و حدس زدن گذرواژه‌ها یا حملات همه جانبه مخرب می‌توانند امنیت شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار را به خطر بیندازند [۳۲]. این تحقیق مکانیزمی را برای انتخاب ویژگی ارائه می‌کند که علاوه بر این که مبتنی بر روش ماشین بردار پشتیبان است، به شناسایی حملات انکار سرویس توزیع شده کمک می‌کند. همچنین یک رویکرد مبتنی بر یادگیری عمیق از طریق ترکیب شبکه‌های عصبی بازگشتی ساده و حافظه کوتاه‌مدت بلند مدت با شبکه عصبی کانولوشن را معرفی می‌کند که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۴- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی این مقاله، یک روش مبتنی بر یادگیری عمیق برای تشخیص حملات انکار سرویس توزیع شده بر روی کنترل‌کننده شبکه مبتنی بر نرم‌افزار از طریق ویژگی‌های است. این روش، بسته‌های حمله را از بسته‌های معمولی ترافیک شبکه تفکیک می‌کند. این روش از سه مرحله کلی تشکیل شده است: در مرحله اول: پیش پردازش[8]، پاکسازی[9]، تبدیل[10]، نرمال‌سازی[11] و متعادل‌سازی[12] روی داده‌ها برای آماده شدن جهت ورود به مرحله دوم است. مرحل دوم: شامل استخراج ویژگی‌های برجسته در

[1] Deep Neural Network(DNN)
[2] Stacked Auto Encoder (SAE)
[3] Secure shell(SSH)
[4] Detection Accuracy(DA)
[5] Precision
[6] False Alarm rate(FAR)
[7] F1_measure
[8] Preprocessing
[9] Clean
[10] Transformation
[11] Normalization
[12] Balancing

تفکیک بسته‌های حاوی حملات و بسته‌های ترافیک معمولی شبکه صورت می‌پذیرد و در نهایت مرحله سوم: تشخیص بسته‌های مخرب از بسته‌ای عادی را با استفاده از مدل ترکیبی سه شبکه عصبی کانولوشنال، بازگشتی ساده و با حافظه کوتاه مدت و بلندمدت می‌باشد.

۴-۱- پیش پردازش

مجموعه داده استفاده شده در آموزش و آزمایش مدل پیشنهادی دارای مشخصات ذکر شده در جدول ۳ می‌باشد [۴۴]. پاکسازی داده، به فرایند تصحیح یا حذف داده‌های تکراری، معیوب، در فرمت نادرست یا ناقص اشاره دارد. تبدیل، فرایند تبدیل قالب داده به قالب یا ساختار دیگر است. برای مثال تبدیل داده رشته‌ای به داده عددی یا به طور کلی قابل بهره برداری برای الگوریتم‌های یادگیری عمیق.

نرمال‌سازی یکی از روش‌های بی مقیاس کردن داده است و از فرمول (۲) انجام می‌شود.

$$X_{SCALE} = \frac{x-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \qquad (۲)$$

متعادل کردن داده‌ها، برای اطمینان از استفاده مساوی از هردو نوع عادی و حمله داده‌ها در شبیه‌سازی صورت می‌پذیرد. در این مقاله از روش افزایش نمونه[1] اسموت[2] برای افزایش تعداد نمونه حملات استفاده می‌شود.

۴-۲- انتخاب ویژگی

هدف اصلی از انتخاب ویژگی، تعیین ویژگی‌های با اهمیت و تاثیر گذار از میان همه ویژگی‌های بسته‌های شبکه، قبل از ورود به مدل شبکه عصبی، به منظور کاهش افزونگی، کاهش نویز و کاهش ابعاد نهایتا بهبود عملکرد کلی مدل در تشخیص حملات انکار سرویس توزیع شده است[۱۰]. معیار انتخاب ویژگی‌ها، بالا بودن قدرت پیش بینی است. روش‌های مختلفی و گاها ترکیبی از چند روش برای انتخاب ویژگی‌های تاثیر گذار در تشخیص حملات انکار سرویس توزیع شده وجود دارد .در این مقاله از روش ماشین بردار پشتیبان برای انتخاب ویژگی استفاده می‌شود. این روش در بخش۳,۱,۱ تشریح شد.

۴-۳- تشخیص حملات انکار سرویس توزیع شده

از ترکیب سه نوع شبکه عصبی کانولوشن، شبکه عصبی با حافظه کوتاه مدت، بلند مدت و شبکه عصبی بازگشتی ساده برای ساخت یک مدل تشخیص پیشنهاد می‌شود . این مدل می‌تواند به طور موثری حملات انکار سرویس توزیع شده بر روی کنترل‌کننده‌های شبکه مبتنی بر نرم‌افزار را با استفاده از ویژگی‌های تعیین‌کننده شناسایی کند. جدول ۴ معماری این شبکه عصبی ترکیبی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مجموعه داده جهت آموزش و آزمایش مدل پیشنهادی[۴۴]

مشخصات	جزئیات
تعداد کل رکورد	۱۰۴۳۴۵
تعداد رکورد حمله	۴۰۷۸۴
تعداد رکورد نرمال	۶۳۵۶۱
نوع بسته	نرمال و حمله
کلاس‌های نرمال	ICMP,UDP,TCP
کلاس‌های حمله	ICMP,UDP Flooding , TCP Syn
ویژگی‌های محاسبه شده	- ویژگی Pktrate تعداد بسته‌های ارسال شده در ثانیه است - ویژگی pktperflow تعداد بسته‌ها در یک جریان واحد است - ویژگیTot_durکل جریان ورودی به سوئیچ است - ویژگی packetins تعداد پیام‌های packetins است. - ویژگی Port_no جمع دو ویژگی tx_kbps و rx_kbps - ویژگی byteperflow ازشمارش بایتها درهرجریان به دست می‌آید. - ویژگی‌های tx_kbps و rx_kbps نشان دهنده نرخ ارسال و دریافت داده است.
ویژگی‌های اخذ شده از سوییچ‌ها	- ویژگیهای Switch-id و Packet count و Byte_count و Duration_sec وDuration_nsec که برحسب نانو ثانیه است - ویژگی rx_byte تعداد بایت دریافت شده در پورت سوئیچ است. - ویژگی dt نشان دهنده تاریخ و زمان است که به عدد تبدیل شده است. - ویژگی tx_byte تعداد بایت ارسال شده از پورت سوئیچ است. - ویژگی‌های source IPو Destination IP و port number که به ترتیب آدرس مبدا و مقصد و شماره پورت را مشخص می‌کنند. - ویژگی Porotocol نوع پروتکل را مشخص می‌کند.

۵- پیاده‌سازی و آزمایش

در این بخش نتایج تجربی حاصل از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی تشریح می‌شود.

[1] Oversampling

[2] SMOTE

جدول ۴. معماری شبکه ترکیبی پیشنهادی

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv1d_1 (Conv1D)	(None, 3, 32)	128
max_pooling1d_1 (MaxPooling1D)	(None, 1, 32)	0
dropout_3 (Dropout)	(None, 1, 32)	0
lstm_1 (LSTM)	(None, 1, 32)	8320
simple_rnn_1 (SimpleRNN)	(None, 32)	2080
batch_normalization_1 (BatchNormalization)	(None, 32)	128
dropout_4 (Dropout)	(None, 32)	0
flatten_1 (Flatten)	(None, 32)	0
dense_2 (Dense)	(None, 64)	2112
dropout_5 (Dropout)	(None, 64)	0
dense_3 (Dense)	(None, 2)	130

Total params: 12898 (50.38 KB)
Trainable params: 12834 (50.13 KB)
Non-trainable params: 64 (256.00 Byte)

۵-۱- معیارهای ارزیابی

اثر بخشی روش پیشنهادی با اندازه‌گیری دقت تشخیص، نرخ مثبت کاذب، حساسیت و میانگین هارمونیک بررسی می‌شود. این معیارها با استفاده از ماتریس درهم ریختگی[1] که در جدول ۵ تشریح شده، محاسبه می‌شود.

جدول ۵. ماتریس درهم ریختگی

کلاس پیش بینی	نرمال	حمله
واقعیت	منفی کاذب	مثبت صحیح
	منفی صحیح	مثبت کاذب

مثبت صحیح [2] یعنی طبقه‌بندی‌کننده حمله را به طور دقیق شناسایی کرده است. مثبت کاذب[3] به این معنی است که طبقه‌بندی‌کننده یک بسته عادی را به اشتباها به عنوان حمله طبقه‌بندی کرده است. منفی صحیح[4] یعنی طبقه‌بندی‌کننده به طور صحیح یک بسته عادی را برچسب زده است. منفی کاذب[5] مواردی را نشان می‌دهد که یک حمله به اشتباه توسط طبقه‌بندی‌کننده به عنوان بسته عادی برچسب خورده است

همچنین محققان در مطالعات خود سایر معیارهای ارزیابی را به صورت زیر تعریف کرده‌اند[۱۰]: فرمول (۳) نرخ هشدار اشتباه را که نشان‌دهنده تعداد بسته‌های نرمالی که به اشتباه حمله تشخیص داده شده‌اند را نسبت به کل بسته‌های نرمال نشان می‌دهد. هرچه این عدد پایین‌تر باشد اشتباه مدل در تشخیص بسته‌های نرمال به عنوان بسته حمله کمتر و نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است.

فرمول(۴) دقت مدل را نشان می‌دهد که بیانگر نسبت تعداد بسته‌های حمله درست تشخیص داده شده به کل بسته‌هایی است که حمله تشخیص داده شده است. فرمول (۵) بیانگر میانگین هارمونیک دقت مدل است که از طریق فرمول (۶) و فرمول حساسیت به دست می‌آید. فرمول (۷) صحت مدل را نشان می‌دهد نسبت تشخیص صحیح مجموع حملات و ترافیک نرمال را به کل بسته‌ها نشان می‌دهد.

$$FAR = \frac{FP}{TN+FP} \quad (۳)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (۴)$$

$$F1\ Measure = 2 \times \left(\frac{Precision \times Recall}{Precision+Recall}\right) \quad (۵)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (۶)$$

$$DA = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (۷)$$

۵-۲- مکانیزم انتخاب ویژگی

استفاده از ویژگی‌های مرتبط، برای آموزش مدل، می‌تواند تاثیر قابل توجهی در اثر بخشی رویکرد داشته باشد. در نتیجه ارتباط ۱۹ ویژگی شامل ۱۸ ویژگی به عنوان متغیر مستقل و ۱ ویژگی متغیر وابسته و هدف برای ورودی به الگوریتم ماشین بردار پشتیبان انتخاب می‌شود، رتبه‌بندی ویژگی‌ها بر اساس وزن ارتباط ویژگی‌های مستقل با ویژگی هدف[6] از طریق ماژول وزن ویژگی[7] نرم‌افزار رپیدماینر[8] در نمودار ۱ مشخص شده است. از میان ۱۸ ویژگی ۵ ویژگی که بیشترین وزن را دارند، به عنوان ورودی برای آموزش مدل پیشنهادی انتخاب می‌شوند.

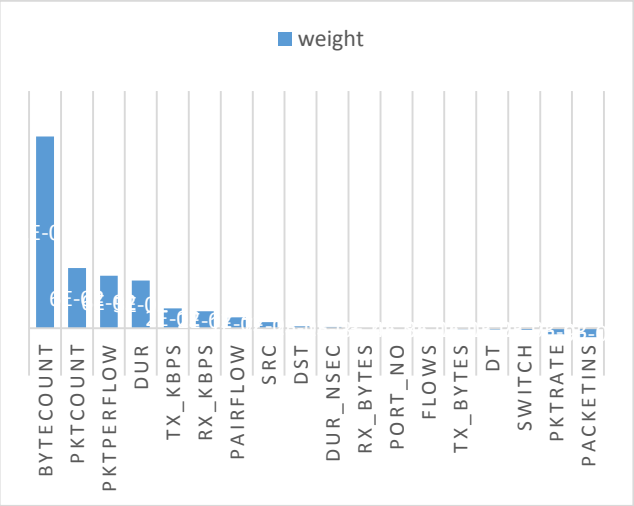
۵-۳- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی

در این بخش، اطلاعات دقیقی در مورد پیکربندی مدل یادگیری و معماری آن ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی با استفاده از ویژگی‌های انتخاب شده آموزش داده می‌شود.

این مدل ترکیبی از سه شبکه کانولوشنال، بازگشتی ساده و حافظه کوتاه مدت و بلندمدت می‌باشد که با نرخ یادگیری ۰٫۰۱ و در ۱۰۰ تکرار برای یادگیری با استفاده از ۸۰ درصد داده‌های مجموعه داده آماده‌سازی شده در مرحله پیش پردازش همبندی شد. ماتریس

[1] Confusion matrix
[2] True Positive(TP)
[3] False Positive(FP)
[4] True Negative(TN)
[5] False Negative(FN)
[6] Target
[7] Feature weight
[8] RapidMiner

درهم ریختگی آزمایش مدل پیشنهادی با ۲۰ درصد باقیمانده از مجموعه داده در پنج اجرا صورت پذیرفت. نتایج آزمایش به طور میانگین به شرح جدول ۶ می‌باشد. همچنین معیارهای ارزیابی این آزمایش در جدول ۷ بررسی می‌شود.



نمودار۱. وزن ویژگی‌های مجموعه داده

جدول ۶. ماتریس درهم ریختگی مدل پیشنهادی (میانگین ۵ اجرا)

کلاس پیش‌بینی	بسته نرمال	بسته حمله
واقعیت	۶۶۰	۷۶۷۴
	۱۲۱۹۳	۳۴۲

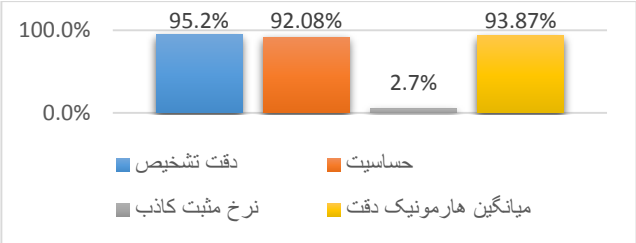
جدول ۷. معیارهای ارزیابی آزمایش میانگین ۵ اجرا(درصد)

دقت تشخیص	حساسیت	نرخ مثبت کاذب	میانگین هارمونیک دقت
۹۵,۲	۹۲,۰۸	۲,۷	۹۳,۸۷

۶- نتیجه‌گیری

نمودار۲ میانگین نتایج آزمایش مدل پیشنهادی را نمایش می‌دهد. در مدل پیشنهادی دقت تشخیص ۹۵,۲ درصد، حساسیت ۹۲,۰۸درصد، نرخ مثبت کاذب(نرخ هشدار اشتباه) ۲,۷درصد و میانگین هارمونیک دقت ۹۳,۸۷درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۸ عملکرد موثر روش پیشنهادی در تشخیص حملات انکار سرویس توزیع شده را در مقایسه با روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق موجود نشان می‌دهد.



نمودار۲. میانگین نتایج آزمایش مدل پیشنهادی

جدول ۸. مقایسه معیارهای ارزیابی روش پیشنهادی با دیگر روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق موجود

	روش پیشنهادی	منصور و همکاران[۳]	حسیه و همکاران[۴۰]	بوکریا و همکاران[۴۳]
دقت تشخیص	٪۹۵,۲	٪۹۴,۱۸۶	٪۹۱,۹۷۶	٪۹۳,۲۰۳
حساسیت	۹۲,۰۸٪	٪۹۲,۱۴۶	٪۹۱,۷۷۲	٪۸۸,۴۷۲
نرخ مثبت کاذب	٪۲,۷	٪۸,۱۱۴	٪۸,۱۳۸	٪۱۲,۷۴۶
میانگین هارمونیک	٪۹۳,۸۷	٪۹۴,۲۷۸	٪۹۱,۹۳۲	٪۹۳,۵۴۶

در این جدول روش پیشنهادی با سه روش موجود دیگر مقایسه می‌شود. در معیار ارزیابی دقت تشخیص نسبت به سه روش دیگر، بهترین عملکرد را دارد، در معیار ارزیابی حساسیت رتبه دوم را دارد، در معیار نرخ خطای کاذب نسبت به سه روش دیگر درصد کمتر و درنتیجه عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. در معیار میانگین هارمونیک دقت نیز رتبه دوم را دارد. لذا در مجموع عملکرد روش پیشنهادی نسبت به دیگر روش‌ها کارایی بالاتری را نشان می‌دهد.

آنچه باعث بهبود عملکرد مدل پیشنهادی نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی شده است، علاوه بر ترکیب مناسب سه نوع شبکه عصبی مطرح شده، استفاده از ماشین بردار پشتیبان به عنوان یک روش یادگیری ماشین برای انتخاب ویژگی به جای روش‌های آماری است.

۷- کارهای آینده

تهدیدات امنیتی باعث نگرانی در استفاده از شبکه مبتنی بر نرم‌افزار است. یکی از نقاط ضعف این شبکه‌ها کنترل‌کننده است. ایجاد یک مکانیزم مناسب برای تشخیص حملات انکار سرویس توزیع شده نقش زیادی در کاهش این نگرانی‌ها دارد. برای رسیدن به این هدف این مقاله یک رویکرد جدید مبتنی بر یادگیری عمیق پیشنهاد می‌کند. روش پیشنهادی شامل سه مرحله است و به طور موثر حملات انکار سرویس توزیع شده را تشخیص می‌دهد. این روش

نسبت به روش‌های موجود بهبود قابل توجهی در عملکرد نشان می‌دهد.

پژوهش در زمینه تشخیص حملات انکار سرویس توزیع شده در شبکه مبتنی بر نرم‌افزار موضوعات فراوانی برای کارهای آینده دارد. بررسی ترکیب انواع شبکه‌های عصبی عمیق، بخصوص انواع رمزگذارهای خودکار[1] و استفاده از دیگر روش‌های یادگیری ماشین برای انتخاب ویژگی می‌تواند منجر به افزایش قدرت مدل‌های تشخیص حمله در کنترل‌کننده‌های شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار شود.

مراجع

[1] Muhammad, Tayyab. "Revolutionizing Network Control: Exploring the Landscape of Software-Defined Networking (SDN)." *International Journal of Computer Science and Technology* 3.1 pp 36-68, (2019).

[2] D. Kreutz et al., "Software-defined networking: A comprehensive survey," Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 1, pp. 14-76, 2015.

[3] S. Mousavi et al., "Early detection of DDoS attacks against SDN controllers," in Proceedings of the 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), pp. 77-81.

[4] M. A. Aladaileh et al., "Renyi Joint Entropy-Based Dynamic Threshold Approach to Detect DDoS Attacks against SDN Controller with Various Traffic Rates," Appl. Sci., vol. 12, no. 12, p. 6127, 2022.

[5] K. M. Sudar et al., "Detection of Distributed Denial of Service Attacks in SDN using Machine learning techniques," in Proceedings of the 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), pp. 1-5.

[6] L. Wan, Q. Wang, and S. Zheng, "Deep SSAE-BiLSTM Model for DDoS Detection In SDN," in Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Communication and Network Security (CCNS), pp. 1-4, 2021

[7] F. Alanazi et al., "Ensemble Deep Learning Models for Mitigating DDoS Attack in Software-Defined Network," Intell. Autom. Soft Comput, vol. 33, pp. 923–938, 2022.

[8] V. Deepa et al., "Detection of DDoS attack on SDN control plane using hybrid machine learning techniques," in Proceedings of the 2018 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), pp. 299–303.

[9] R. Santos et al., "Machine learning algorithms to detect DDoS attacks in SDN," Concurr. Comput. Pract. Exp., vol. 32, p. e5402, 2020.

[10] A. Mansoor et al., "Deep Learning-Based Approach for Detecting DDoS Attack on Software-Defined Networking Controller," Systems, vol. 11, no. 6, p. 296, 2023.

[11] J. Karhunen, T. Raiko, and K. Cho, "Unsupervised deep learning: A short review," in Advances in Independent Component Analysis and Learning Machines, E. Bingham et al., Eds. Academic Press, 2015, pp. 125–142.

[12] A. K. Singh and S. Srivastava, "A survey and classification of controller placement problem in SDN," International Journal of Network Management, vol. 28, no. 3, p. e2018, 2018.

[13] K. Sood and Y. Xiang, "The controller placement problem or the controller selection problem?," Journal of Communications and Information Networks, vol. 2, no. 3, pp. 1-9, 2017.

[14] B. A. A. Nunes et al., "A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks," IEEE Communications surveys & tutorials, vol. 16, no. 3, pp. 1617-1634, 2014.

[15] W. Xia et al., "A survey on software-defined networking," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 1, pp. 27-51, 2014.

[16] Open Networking Foundation. [Online]. Available:https://www.opennetworking.org/about.

[17] Y. Jarraya, T. Madi, and M. Debbabi, "A survey and a layered taxonomy of software-defined networking," IEEE Communications surveys & tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 1955-1980, 2014.

[18] S. Sezer et al., "Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks," IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 7, pp. 36-43, 2013.

[19] R. Trestian, K. Katrinis, and G. M. Muntean, "OFLoad: An OpenFlow-based dynamic load balancing strategy for datacenter networks," IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 14, no. 4, pp. 792-803, 2017.

[20] H. Wang, Y. Wang, and Y. J. Yan, "A distributed network traffic monitoring platform based on SDN," Electric Power Information and Communication Technology, vol. 14, no. 10, pp. 22-27, 2016

[21] J. Schmidhuber, "Deep learning in neural networks: An overview," Neural Netw., vol. 61, pp. 85–117, 2015.

[22] O. E. Elejla et al., "Deep-Learning-Based Approach to Detect ICMPv6 Flooding DDoS Attacks on IPv6 Networks," Appl. Sci., vol. 12, no. 12, p. 6150, 2022.

[23] Y. LeCun and Y. Bengio, "Convolutional networks for images, speech, and time series," Handb. Brain Theory Neural Netw., vol. 3361, 1995.

[24] X. Pan et al., "Recent methodology progress of deep learning for RNA–protein interaction prediction," Wiley Interdiscip. Rev. RNA, vol. 10, p. e1544, 2019.

[25] A. Dongare et al., "Introduction to artificial neural network," Int. J. Eng. Innov. Technol. (IJEIT), vol. 2, pp. 189–194, 2012.

[26] J. Karhunen et al., "Unsupervised deep learning: A short review," in Advances in Independent Component Analysis and Learning Machines, E. Bingham et al., Eds. Academic Press, 2015, pp. 125–142.

[27] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," Mach. Learn., vol. 20, no. 3, pp. 273–297, 1995.

[28] F. Tang et al., "Group feature selection with multiclass support vector machine," Neurocomputing, vol. 317, pp. 42–49, 2018.

[29] J. Weston and C. Watkins, "Support vector machines for multi-class pattern recognition," in Proceedings of the 7th European Symposium On Artificial Neural Networks, 1999, pp. 219–224.

[30] Y. Guo, Z. Zhang, and F. Tang, "Feature selection with kernelized multi-class support vector machine," Pattern Recognition, vol. 117, p. 107988, 2021.

[31] A. Akhunzada et al., "Securing software defined networks: Taxonomy, requirements, and open issues," IEEE Commun. Mag., vol. 53, pp. 36–44, 2015.

[32] A. Pradhan and R. Mathew, "Solutions to Vulnerabilities and Threats in Software Defined Networking (SDN)," Procedia Comput. Sci., vol. 171, pp. 2581–258, 2020.

[1] Auto Encoders (AE)

[33] Khashab, F.; Moubarak, J.; Feghali, A.; Bassil, C. DDoS attack detection and mitigation in SDN using machine learning. In Proceedings of the 2021 IEEE 7th International Conference on Network Softwarization (NetSoft), Tokyo, Japan, 28 June–2 July 2021; pp. 395–401

[34] K. M. Sudar et al., "Detection of Distributed Denial of Service Attacks in SDN using Machine learning techniques," in Proceedings of the 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), pp. 1–5.

[35] R. Santos et al., "Machine learning algorithms to detect DDoS attacks in SDN," Concurr.Comput. Pract. Exp., vol. 32, p. e5402, 2020.

[36] B. Celesova et al., "Enhancing security of SDN focusing on control plane and data plane," in Proceedings of the 2019 7th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS), pp. 1–6.

[37] V. Deepa et al., "Detection of DDoS attack on SDN control plane using hybrid machine learning techniques," in Proceedings of the 2018 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), pp. 299–303.

[38] F. Alanazi et al., "Ensemble Deep Learning Models for Mitigating DDoS Attack in Software-Defined Network," Intell. Autom. Soft Comput, vol. 33, pp. 923–938, 2022.

[39] C. Hsieh et al., "Efficient Detection of Link-Flooding Attacks with Deep Learning," Sustainability, vol. 13, p. 12514, 2021.

[40] L. Wan, Q. Wang, and S. Zheng, "Deep SSAE-BiLSTM Model for DDoS Detection In SDN," in Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Communication and Network Security (CCNS), pp. 1–4, 2021

[41] T. H. Lee, L. H. Chang, and C. W. Syu, "Deep learning enabled intrusion detection and prevention system over SDN networks," in Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), pp. 1–6.

[42] S. Boukria and M. Guerroumi, "Intrusion detection system for SDN network using deep learning approach," in Proceedings of the 2019 International Conference on Theoretical and Applicative Aspects of Computer Science (ICTAACS), Volume 1, pp. 1–6.

[43] M. Iqbal and M. Rizwan, "Application of 80/20 rule in software engineering Waterfall Model," in Proceedings of the 2009 International Conference on Information and Communication Technologies, pp. 223–228.

[44] https://www.kaggle.com/datasets/chiragchiku25/ddos-sdn-dataset

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 123-138

Confidential Payload Attribution on Encrypted Traffic of Enterprise Networks

Seyed Mohammad Hosseini[1*], Amir Hossein Jahangir[2], Mahdi Soltani[3]

[1] Faculty of Computer Science and Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Computer Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
[3] Computer Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Received: 26 November 2024, Revised: 10 January 2025, Accepted: 10 January 2025
Paper type: Research

Abstract

The widespread use of encryption protocols is accompanied by an increased risk of organizational-level security devices becoming ineffective. When network traffic is encrypted, many security tasks such as intrusion detection and network forensics that rely on processing content of flows' payloads become ineffective. Existing practical approaches to this problem are based on TLS interception methods, which not only violate confidentiality but also impose security issues. This paper introduces a confidential payload attribution system called "JormYab". JormYab is a practical approach to enable data attribution on standard encrypted traffic for organizational networks. JormYab, which can be easily deployed in an enterprise network, is based on a simple traffic digesting mechanism and does not violate confidentiality. Our practical and realistic evaluations show that JormYab can store a history of standard encrypted traffic of an enterprise network for use in network forensic investigations. The realistic scenarios we have used in our research also reveal common challenges and problems in the process of payload attribution investigations, and based on them, we discuss effective methods to address the issues.

Keywords: Network forensics; Payload attribution; Encrypted traffic, Confidentiality.

* Corresponding Author's email: m-hosseini@sbu.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۲۳ الی ۱۳۸

انتساب داده روی ترافیک رمز شده سازمانی بدون نقض محرمانگی

سید محمد حسینی[1*]، امیرحسین جهانگیر[2]، مهدی سلطانی[3]

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

[2] دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

[3] دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

استفاده فراگیر از پروتکل‌های رمزنگاری با افزایش خطر ناتوانی دستگاه‌های امنیتی سطح سازمانی همراه است. وقتی ترافیک شبکه رمزگذاری می‌شود، بسیاری از وظایف امنیتی مانند تشخیص نفوذ و جرم‌شناسی شبکه که به پردازش محتوای جریان‌ها وابسته‌اند، بی‌اثر می‌گردند. رویکردهای عملی موجود برای این مشکل بر اساس روش رهگیری TLS هستند که نه تنها محرمانگی را نقض ، بلکه مشکلات امنیتی نیز ایجاد می‌کنند. این مقاله یک سامانه انتساب داده محرمانه به نام «جرم‌یاب» را معرفی می‌کند. جرم‌یاب یک رویکرد عملی برای فراهم کردن امکان انتساب داده بر روی ترافیک رمزگذاری شده استاندارد برای شبکه‌های سازمانی است. جرم‌یاب که به راحتی در شبکه‌های سازمانی قابل استقرار است، بر اساس یک سازوکار ساده مبتنی بر چکیده‌سازی ترافیک عمل می‌کند و محرمانگی را نقض نمی‌کند. ارزیابی‌های عملی و واقع‌گرایانه ما نشان می‌دهند که جرم‌یاب می‌تواند تاریخچه‌ای از ترافیک رمزگذاری شده استاندارد یک شبکه سازمانی را برای استفاده در تجسس‌های جرم‌شناسی شبکه ذخیره کند. سناریوهای واقع‌گرایانه‌ای که ما در تحقیقات خود استفاده کرده‌ایم، چالش‌ها و مشکلات عمومی در فرآیند تجسس‌های انتساب داده را نیز آشکار می‌کند و بر اساس آن‌ها، روش‌های موثری را برای رفع مشکلات مورد بحث قرار می‌دهیم.

کلیدواژگان: جرم‌شناسی شبکه، انتساب داده، ترافیک رمز شده، محرمانگی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: m-hosseini@sbu.ac.ir

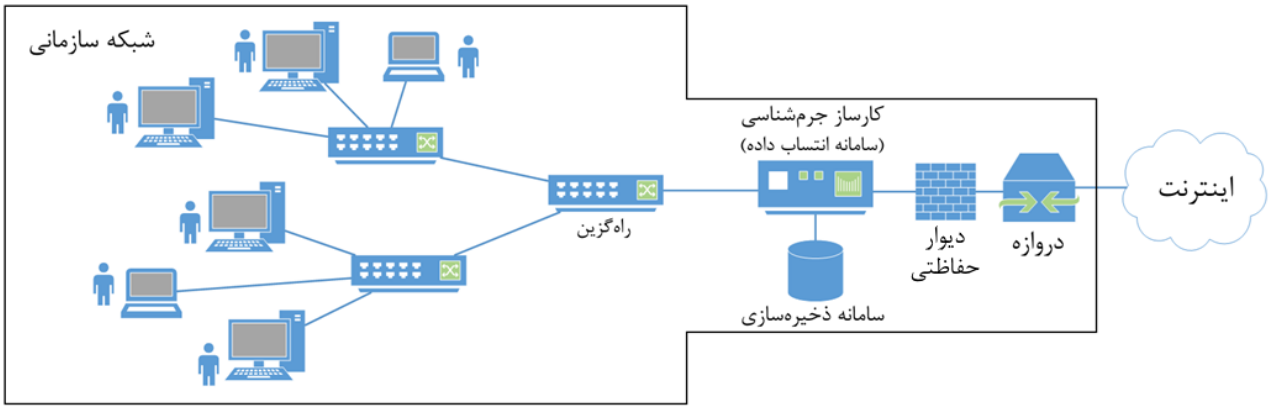
۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از پروتکل‌ها و برنامه‌های رمزگذاری شده مانند HTTPS به‌طور چشمگیری افزایش یافته است [۱]. از دیدگاه کاربران، استفاده از رمزگذاری در تمام ارتباطات شبکه برای اطمینان از محرمانگی[۱]، یکپارچگی[۲]، و سایر ویژگی‌های امنیتی ضروری است. این امر به رشد سریع و استفاده گسترده از پروتکل‌های رمزگذاری منجر شده است. با این حال، مزایای رمزگذاری بدون هزینه نیست. بکارگیری رمزگذاری در تمام پروتکل‌های استاندارد باعث بروز مشکلات و هزینه‌های مهمی می‌شود. مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین مسئله، ناتوانی دستگاه‌های امنیتی سطح سازمانی است. دستگاه‌هایی که وظایف امنیتی مانند تشخیص نفوذ، تشخیص نشت داده[۳]، نظارت والدین، بازرسی عمیق بسته‌ها[۴]، و جرم‌شناسی شبکه[۵] را انجام می‌دهند، در مواجهه با ترافیک رمزگذاری شده بی‌اثر می‌شوند. این مسائل منجر به تحمیل هزینه قابل‌توجهی به سازمان‌ها می‌شود.

در این مقاله، ما بر روی یکی از روش‌های جرم‌شناسی شبکه به نام «انتساب داده[۶]» تمرکز کرده، و به مشکلی که ترافیک رمزگذاری شده برای آن ایجاد می‌کند می‌پردازیم. روش‌های انتساب داده برای شناسایی منبع و مقصد یک رشته داده که از طریق شبکه منتقل می‌گردد، استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، سامانه انتساب داده به طور معمول در لبه یک شبکه سازمانی قرار می‌گیرد و وظیفه ضبط و ثبت ترافیک شبکه سازمان برای بررسی‌های پس از حادثه[۷] را بر عهده دارد. برای بررسی حادثه، یک رشته داده که مشخصه یا نشانگر ویژگی حادثه است به سامانه انتساب داده ارائه می‌شود و سامانه با جستجوی ترافیک ذخیره‌شده، همه اتصال‌های[۸] برقرار شده شبکه (و در نتیجه مبدا و مقصدی) که آن داده را منتقل کرده‌اند، شناسایی و گزارش می‌کند. به عنوان مثال، رشته داده مورد تجسس می‌تواند امضای یک کرم[۹] باشد و سامانه انتساب داده می‌تواند منبع حمله و همچنین ماشین‌های آلوده را تشخیص دهد. به عنوان مثالی دیگر، رشته مورد تجسس می‌تواند اطلاعات محرمانه افشا شده سازمان باشد. در این حالت، سامانه انتساب داده می‌تواند برای شناسایی کارمند داخلی که اطلاعات را افشا کرده است، استفاده شود.

مانند هر سامانه امنیتی دیگری، ترافیک رمزگذاری شده باعث بی‌اثر شدن سامانه انتساب داده می‌شود. به‌طور واضح، جستجوی داده‌های آشکار[۱۰] در ترافیک ذخیره‌شده از اتصال‌های رمزگذاری شده نتیجه مفیدی ندارد. شناخته‌شده‌ترین روش برای این مشکل، روش بازرسی TLS[۱۱] [۲-۵] است که نه تنها نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی و محرمانگی را افزایش، بلکه امنیت را نیز به میزان زیادی کاهش می‌دهد [۶،۲-۹]. در حالی که راه‌حل‌های دیگری در مقالات برای بازرسی عمیق بسته‌ها با حفظ حریم خصوصی بر روی ترافیک رمزگذاری شده پیشنهاد شده‌اند [۲۳-۲۶]، این راه‌حل‌ها در حال حاضر عملی نیستند زیرا نیاز به استفاده از پروتکل رمزگذاری پیشنهادی آنها در هر دو طرف اتصال دارند. به عبارت دیگر، آنها نیاز به تغییر در پروتکل‌ها و برنامه‌های کاربردی فعلی در هر دو سمت اتصال (کارخواه[۱۲] و کارساز[۱۳]) دارند. علاوه بر این، آنها ترافیک را بازرسی و محتوای مخرب را بر اساس قوانین از پیش تعیین‌شده پالایش می‌کنند که برای مسئله انتساب داده قابل استفاده نیست. بنابراین، با توجه به معماری و پروتکل‌های استاندارد فعلی اینترنت، هیچ راه حل عملی برای مسئله انتساب داده با قابلیت حفظ محرمانگی در ترافیک TLS وجود ندارد.

این مقاله یک سامانه انتساب داده محرمانه به نام «جرم‌یاب» را ارائه می‌کند. جرم‌یاب یک راه‌حل عملی و ساده است که انتساب داده را بر روی ترافیک رمزگذاری شده استاندارد (TLS) یک شبکه سازمانی بدون نقض محرمانگی فراهم می‌کند. این راه‌حل بر اساس تجهیز



شکل ۱. شبکه سازمانی مجهز به سامانه انتساب داده در لبه شبکه

کامپیوترهای شبکه سازمانی به یک افزونه نرم‌افزاری است که با پردازش داده‌های آشکار بالای لایه TLS، چکیده‌های فشرده‌ای از داده‌های ترافیک ایجاد می‌کند. افزونه مزبور چکیده‌های تولیدشده را به یک کارساز جرم‌شناسی ارسال می‌کند تا برای تجسس‌های پس از حادثه ذخیره شود. کارساز جرم‌شناسی که در لبه شبکه سازمانی مستقر شده است، اتصال‌های رمز شده‌ای را که چکیده‌های خود را با استفاده از افزونه مجاز[۱۴] و معتبر[۱۵] جرم‌یاب ارائه نمی‌دهند مسدود می‌کند. چکیده‌ها قابل بازگشت به داده‌های آشکار اصلی نیستند و در نتیجه محرمانگی حفظ می‌شود. با این حال، چکیده‌ها می‌توانند برای جستجوی یک رشته داده و تعیین اینکه آیا رشته با آن‌ها مرتبط است یا خیر، استفاده شوند. هزینه این راه حل، نرخ پایینی از پاسخ‌های مثبت کاذب[۱۶] است. ما در این مورد بحث می‌کنیم که چگونه یک تحلیل‌گر جرم‌شناسی[۱۷] می‌تواند با پاسخ‌های مثبت کاذب برخورد کند و همچنین چگونه می‌توان به این راه‌حل از نظر محرمانگی اعتماد کرد.

به‌عنوان نمونه‌ای از روش پیشنهادی، ما افزونه‌ای توسعه داده‌ایم که بر روی پیمانه TLS مرورگر فایرفاکس قرار می‌گیرد. همچنین کارساز جرم‌شناسی را با استفاده از DPDK [۱۰] پیاده‌سازی کرده‌ایم تا تاخیر در انتقال بسته‌های ترافیکی را به حداقل برسانیم. آزمایش‌های عملی و واقع‌گرایانه ما نشان داده‌اند که زمانی که رمزگذاری تنها با استفاده از امنیت لایه انتقال (TLS) انجام شود، که روش معمول در اکثر برنامه‌ها مانند وب‌سایت‌ها (HTTPS) است، جرم‌یاب می‌تواند به طور موثری منبع یا مقصد رشته‌های مورد تجسس را شناسایی کند. این راه‌حل داده‌هایی را که در لایه کاربرد رمزگذاری شده‌اند، مانند برخی برنامه‌های پیام‌رسان، پوشش نمی‌دهد.

دستاوردهای این پژوهش به صورت زیر فهرست شده است:

- معرفی ابزاری به نام جرم‌یاب که راهکاری عملی و جدید برای انتساب داده بر روی ترافیک رمز شده استاندارد بدون نقض محرمانگی است. جرم‌یاب به راحتی در شبکه‌های سازمانی مستقر می‌شود بدون اینکه نیازی به تغییر پروتکل‌های استاندارد موجود به ویژه TLS باشد.

- ما برای اولین بار، آزمایش‌های واقع‌گرایانه‌ای برای ارزیابی سامانه‌های انتساب داده انجام داده‌ایم. سناریوهایی که در ارزیابی‌هایمان استفاده کردیم، چالش‌ها و مشکلات مهمی را آشکار می‌کنند که باید در هنگام اجرای فرآیند انتساب داده مورد توجه قرار گیرند. همچنین روش‌های مقابله با این چالش‌ها را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم.

ساختار ادامه مقاله بدین صورت است: در بخش ۲، به طور خلاصه روش‌های انتساب داده را مرور کرده، به بررسی کارهای مرتبط و رویکردهای موجود برای مشکلی که رمزگذاری برای سامانه‌های امنیتی ایجاد می‌کند می‌پردازیم. در بخش ۳، راهکار پیشنهادی و در بخش ۴، ارزیابی‌های انجام شده را ارائه می‌کنیم. در نهایت، در بخش ۵، مقاله را جمع‌بندی می‌کنیم.

۲- پیش‌زمینه

۲-۱- انتساب داده

«انتساب» مسئله شناسایی منبع و/یا مقصد یک رشته داده است که از طریق شبکه منتقل می‌شود. سامانه انتساب داده که معمولا با استفاده از یک کارساز جرم‌شناسی در لبه یک شبکه سازمانی مستقر می‌شود، تاریخچه‌ای از ترافیک را ذخیره می‌کند تا به وسیله آن بتوان مبداء و مقصد هر رشته داده منتقل شده از طریق شبکه را جستجو کرد. در تجسس‌های پس از حادثه، تحلیل‌گر جرم‌شناسی تاریخچه ذخیره‌شده برای یک رشته داده (مثلا امضای یک کرم) را بررسی می‌کند. سامانه انتساب داده اطلاعات (مانند منبع و مقصد) تمام اتصال‌هایی که آن رشته را حمل کرده‌اند گزارش می‌دهد.

ساده‌ترین سامانه انتساب داده یک ضبط‌کننده ترافیک خام شبکه است. با ضبط ترافیک می‌توان هر حادثه‌ای در شبکه را بررسی کرد. به‌عنوان مثال، تحلیل‌گر جرم‌شناسی می‌تواند با جستجوی اطلاعات افشا شده یا امضای یک کرم در ترافیک ضبط‌شده، مبداء و مقصد آن را بیابد. چالش‌برانگیزترین مشکل این راهکار، ذخیره حجم بالای داده است که بسیار پرهزینه است. مشکل دیگر آن نقض محرمانگی است. امکان دسترسی به اطلاعات شخصی کاربران یا اطلاعات حساس یک سازمان از طریق ضبط ترافیک شبکه، مانع استفاده از ضبط‌کننده‌های ترافیک در بسیاری از موقعیت‌ها می‌شود.

برای حل مشکلات ذکر شده، «کولش» و همکاران [۱۱] اولین سامانه انتساب داده بر پایه ذخیره چکیده‌هایی از ترافیک را پیشنهاد کردند. این سامانه به نام HBF با استفاده از توابع درهم‌سازی[۱۸] و فیلترهای بلوم [۱۲،۱۳] چکیده‌هایی از ترافیک می‌سازد. HBF محتوای هر بسته ترافیکی را به چند قطعه تقسیم و برای هر کدام چکیده‌ای با استفاده از توابع درهم‌سازی تولید می‌کند. چکیده‌های تولید شده بطور فشرده در ساختاری داده‌ای مشابه فیلتر بلوم ادغام می‌شوند.

عملیات چکیده‌سازی یک‌طرفه است زیرا دامنه خروجی توابع درهم‌سازی بسیار کوچک‌تر از دامنه ورودی آنها است. این بدان

معناست که چکیده ترافیک که به‌طور قابل‌توجهی کوچک‌تر از ترافیک اصلی است، نمی‌تواند به داده‌های اصلی بازگردانده شود و در نتیجه، محرمانگی حفظ می‌شود. با توجه به اینکه چکیده نمی‌تواند به ترافیک اصلی بازگردانده شود، از آن برای استعلام یک رشته داده استفاده می‌شود. چکیده می‌تواند به استعلام برای یک رشته پاسخ دهد و فهرستی از اتصال‌هایی که آن رشته را حمل کرده‌اند برگرداند. فرآیند استعلام مشابه با فرآیند چکیده‌سازی است: رشته را به قطعه‌هایی تقسیم کرده و از فیلتر بلوم برای آن قطعه‌ها استعلام می‌گیرند.

هزینه‌ای که بابت فشرده‌سازی چکیده‌ها پرداخت می‌شود پاسخ‌های مثبت کاذب است، بدین معنا که برخی از اتصال‌هایی که توسط تابع استعلام بازگردانده می‌شوند، رشته مورد تجسس را حمل نکرده‌اند. با این حال، تا زمانی که مرزهای یک قطعه از رشته مورد جستجو در دو بسته متوالی قرار نگیرد، منجر به منفی کاذب نمی‌شود. «پونک» و همکاران [۱۴،۱۵] روش‌های بهبود یافته انتساب داده WBS و WMH را پیشنهاد کردند که منجر به کاهش قابل‌توجهی در نرخ مثبت کاذب با نسبت کاهش داده تا ۱:۱۰۰ شدند. آن‌ها از الگوریتم بهبود یافته‌ای برای تقسیم رشته‌ها به قطعه‌ها استفاده می‌کنند. «حقیقت» و همکاران [۱۶] روش CMBF را پیشنهاد دادند که از جستجوهای نویسه عام[۱۹] پشتیبانی می‌کند. جستجوی نویسه عام به معنای جستجوی رشته داده‌ای است که برخی از نویسه‌های[۲۰] آن ناشناخته است، مانند امضای کرم‌های چندریختی[۲۱]. CBID [۱۷] یک سامانه انتساب داده دیگر است که بر اساس ترکیبی از فیلتر بلوم، جدول شاخص بیتی و روش نمونه‌برداری ترافیک طراحی شده است. این سامانه نرخ مثبت کاذب را در مقایسه با روش‌های قبل بطور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. DSPAS جدیدترین راهکار انتساب داده پیشنهاد شده است [۱۸] که با روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال پیاده‌سازی شده است. سازوکار چکیده‌سازی DSPAS امکان یافتن رشته‌های داده مشابه با رشته مورد تجسس را فراهم می‌کند، که البته پیچیدگی محاسباتی آن به مراتب بیشتر از روش‌های قبل است. همه روش‌های ذکر شده ترافیک را در سطح بسته[۲۲] پردازش و چکیده‌سازی می‌کنند این بدین معنی است که زمانی که مرزهای یک رشته مورد جستجو در دو بسته متوالی قرار گیرد سامانه دچار پاسخ منفی کاذب می‌شود.

با وجود همه این پژوهش‌ها در زمینه انتساب داده، همان‌طور که در بخش اول ذکر شد، ترافیک رمزگذاری شده سامانه‌های انتساب داده را بی‌اثر می‌کند. به‌طور واضح، جستجوی داده آشکار در محتوای یک اتصال رمزگذاری شده نتیجه مفیدی ندارد، چه برسد به چکیده یک اتصال رمزگذاری شده.

۲-۲- چالش ترافیک رمز شده

پروتکل‌های رمزگذاری نقش حیاتی در رشد شبکه‌های کامپیوتری، به ویژه اینترنت و برنامه‌های کاربردی آن ایفا کرده‌اند. این پروتکل‌ها حریم خصوصی و محرمانگی کاربران را هنگام انتقال اطلاعات از طریق پیوند[۲۳] نا امن اینترنت فراهم می‌کنند. اما رمزگذاری یک شمشیر دو لبه است. این امر مانع از کارکرد موثر دستگاه‌های نظارتی و امنیتی سازمان‌ها، به ویژه آنهایی که بر پایه بازرسی عمیق بسته‌ها هستند می‌شود. برای حل این مشکل، سازمان‌ها با استفاده از روش بازرسی TLS، تعادلی[۲۴] بین حریم خصوصی افراد داخلی و امنیت سازمانی ایجاد می‌کنند.

یک جعبه میانی[۲۵] بازرسی TLS به سازمان‌ها امکان را می‌دهد که شکل آشکار ترافیک رمزگذاری شده را بررسی کنند و آن‌ها را برای تحلیل‌های جرم‌شناسی ذخیره و یا محتوای مخرب را پالایش کنند. ابزارها و محصولات مختلفی این روش را پیاده‌سازی کرده‌اند، مانند mitmproxy [۱۹]، SSLSplit [۲۰]، دستگاه‌های Symantec SSL Visibility [۵] و دیوار حفاظتی Sophos XG [۴]. بازرسی TLS در واقع یک روش مرد میانی[۲۶] است که توسط مرورگر[۲۷] کامپیوتری که درخواست اتصال امن دارد به عنوان یک حمله شناسایی نمی‌شود. برای بررسی اتصال رمزگذاری شده یک کاربر داخلی، جعبه میانی بازرسی TLS که به‌عنوان نایب (میانجی)[۲۸] در لبه شبکه سازمانی عمل می‌کند، ابتدا اتصال درخواست شده توسط کاربر داخلی را خاتمه داده[۲۹]، داده‌های آن را رمزگشایی می‌کند. پس از بررسی داده‌های آشکار یا ذخیره آن‌ها برای کاربردهای جرم‌شناسی، جعبه میانی آن را دوباره رمزگذاری و از طریق یک اتصال امن دیگر به کارساز مورد نظر کاربر ارسال می‌کند. این فرآیند در جهت معکوس نیز انجام می‌شود، یعنی برای داده‌هایی که از کارساز خارجی به کاربر داخلی ارسال می‌شود. لازم به ذکر است که یک گواهی‌نامه CA خاص بطور بر روی تمام کامپیوترهای سازمانی نصب می‌شود تا این بازرسی به عنوان حمله شناسایی نشود.

روش بازرسی TLS که به آن «تقسیم جلسه TLS[۳۰]» هم گفته می‌شود، دو جلسه TLS کاملا جداگانه (کارخواه به جعبه میانی و جعبه میانی به کارساز) ایجاد می‌کند، بنابراین ویژگی‌های PFS[۳۱] و AEAD[۳۲] در TLS تاثیری بر آن ندارند. به همین دلیل، این روش برای هر دو نسخه ۱,۲ و ۱,۳ پروتکل TLS کار می‌کند. روش‌های بازرسی TLS دیگری نیز وجود دارند که بعضی از آن‌ها با همه نسخه‌های TLS سازگار نیستند. به عنوان مثال، روش‌های غیرفعال

اتصال کارخواه را خاتمه نمی‌دهند و بنابراین تاخیری ایجاد نمی‌کنند. این روش‌ها با گواهی RSA کارساز ارائه می‌شوند تا بتوانند اتصال را به‌طور غیرفعال رمزگذاری کنند. اما این روش زمانی که مجموعه رمزهای[۳۳] PFS استفاده می‌شوند (برخی از مجموعه رمزهای نسخه ۱٫۲ پروتکل TLS و همه مجموعه رمزهای نسخه ۱٫۳ پروتکل TLS) کار نمی‌کند. برخی روش‌های دیگر، مانند [۲۱]، لایه‌های رمزگذاری و احراز هویت را در TLS جدا می‌کنند. این روش به دلیل اجباری بودن حفظ یکپارچگی داده مبتنی بر AEAD در نسخه ۱٫۳ پروتکل TLS قابل استفاده نیست. خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند به مرجع [۲] برای بررسی جامع روش‌های بازرسی TLS مراجعه کنند.

نکته مهمی که می‌خواهیم بر آن تمرکز کنیم این است که روش بازرسی TLS محرمانگی را نقض می‌کند. جعبه میانی اتصال‌های کاربران را رمزگشایی کرده و می‌تواند اطلاعات محرمانه آن‌ها را ببیند. برخی تحقیقات، مانند [۲۲]، پیشنهاد می‌کنند که کارخواه‌ها به طور انتخابی کلید TLS را به جعبه‌های میانی مجاز ارائه دهند. با این حال، این مشکل را حل نمی‌کند. در مدل تهدید ما، نهادی خارج از کامپیوتر کاربر، مثل جعبه میانی، قابل اعتماد در نظر گرفته نمی‌شود و بنابراین نمی‌خواهیم اطلاعات آشکار اتصال‌های رمزگذاری شده را به جعبه میانی ارائه دهیم.

شایان ذکر است که راهکارهای رمزنگاری مانند BlindBox [۲۳]، SPABox [۲۴]، PrivDPI [۲۵]، و Pine [۲۶] امکان بازرسی مستقیم ترافیک رمزگذاری شده را بدون نقض محرمانگی فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها ترافیک را رمزگشایی نمی‌کنند. در عوض، قالب‌های رمزگذاری شده الگوهای ترافیکی مخرب، که به آن‌ها قوانین گفته می‌شود، در اختیار جعبه میانی گذاشته می‌شود. این قوانین می‌توانند شامل امضای بدافزار (برای کاربرد تشخیص نفوذ)، اطلاعات محرمانه (برای تشخیص نشت داده)، و محتوای ممنوعه (برای نظارت والدین) باشند. ترافیک هر اتصال رمزگذاری شده با قوانین رمزگذاری شده مقایسه می‌شود و در صورت تطابق، هشدار ایجاد می‌شود. راه‌حل آن‌ها مبتنی بر روش‌های «رمزنگاری قابل جستجو»[۳۴] است که البته مستعد آسیب‌پذیری در برابر حملات هستند [۲۷،۲۸]. علاوه بر این، این رویکرد تاخیر قابل توجهی در برقراری اتصال و ارسال ترافیک ایجاد می‌کنند و با افزایش تعداد قوانین، تاخیر نیز افزایش می‌یابد. مهم‌ترین جنبه منفی این رویکرد این است که تنها در صورتی کار می‌کند که هر دو طرف هر اتصال از پروتکل ویژه آنها استفاده کنند. بنابراین، این راهکار در حال حاضر عملی نیست، زیرا نمی‌توانیم همه کاربران و کارسازهای اینترنت را مجبور به استفاده از پروتکل جدید کنیم مگر اینکه به یک استاندارد جهانی تبدیل و جایگزین پروتکل TLS موجود شود. علاوه بر این، فرض اساسی این سامانه این است که جعبه میانی قوانین را می‌داند، که برای کاربردهای جرم‌شناسی و روش‌های انتساب داده که نقش خود را زمانی ایفا می‌کنند که قوانین امنیتی نتوانسته‌اند از وقوع حادثه جلوگیری کنند قابل اجرا نیست. بنابراین، ما به راه‌حلی نیاز داریم که ترافیک رمزگذاری شده را به صورت قابل استفاده برای تحلیل‌های جرم‌شناسی ضبط کند و در عین حال محرمانگی را نیز نقض نکند.

در نهایت، شایان ذکر است که چندین مطالعه نشان داده‌اند که جعبه‌های میانی و روش‌های بازرسی TLS باعث کاهش حفاظت ارائه شده توسط TLS می‌شوند [۲،۶،۷،۹]. بر اساس مطالعه‌ای معروف که توسط تیمی از دانشگاهیان و متخصصان انجام شده است [۶]، ۶۲ درصد از اتصالاتی که از طریق یک جعبه میانی بازرسی TLS عبور می‌کنند دارای امنیت کمتری هستند و ۵۸ درصد از اتصال‌های جعبه میانی دارای آسیب‌پذیری‌های بحرانی هستند.

۲-۳- تعریف مسئله و مدل تهدید

هدف ما ارائه راه‌حلی برای مسئله انتساب داده در جریان[۳۵]های TLS یک شبکه سازمانی بر اساس مدل تهدید زیر است. بیان مسئله به صورت کلی عبارت است از:

«اگر k بایت از جریان f (که TLS است) از طریق کارساز جرم‌شناسی S منتقل شود، باید بتوانیم کارساز جرم‌شناسی را برای هر زیررشته‌ای از $k-\tau$ بایت اول محموله f جستجو کنیم و سرآیند f را به دست آوریم.» واضح است که مقدار مطلوب برای τ صفر است، اما اگر هیچ راه‌حلی برای $\tau = 0$ یافت نشود، مقدار کوچک τ نیز قابل قبول است.

در مدل تهدید ما، کارساز جرم‌شناسی «صادق اما کنجکاو»[۳۶] است، یعنی وظایف مورد انتظار را به طور کامل انجام می‌دهد، اما ممکن است سعی کند اطلاعاتی از تاریخچه ترافیک ذخیره شده استخراج کند (مثلا بر اثر جاسوسی یا نشت اطلاعات). علاوه بر این، ممکن است تاریخچه ترافیک از سامانه ذخیره‌سازی نشت کند. یک مهاجم ممکن است تاریخچه ترافیک را از سامانه ذخیره‌سازی سرقت کند. با این حال، نرم‌افزار اصلی کارساز جرم‌شناسی در برابر هرگونه تغییرات و نفوذهای مخرب ایمن در نظر گرفته می‌شود. در مورد کامپیوترهای کاربران، ما نرم‌افزاری که بر روی آن‌ها نصب می‌کنیم را امن در نظر می‌گیریم، یعنی مهاجم نمی‌تواند به نرم‌افزار نفوذ و کلیدهای مخفی را استخراج کند. با این حال، یک مهاجم می‌تواند

نرم‌افزار را حذف یا ترافیک آن را مسدود کند تا مانع از بدست آوردن و ذخیره تاریخچه ترافیک توسط کارساز جرم‌شناسی شود. علاوه بر این، مهاجم ممکن است تلاش کند با ارائه تاریخچه ترافیک جعلی کارساز جرم‌شناسی را فریب دهد.

بر اساس مدل تهدید، یک راه حل مناسب باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

صحت[۳۷]: تاریخچه ترافیک ذخیره شده باید از داده اصلی جریان‌های رمزگذاری شده نشأت گرفته باشد. به عبارت دیگر، راه حل باید از ذخیره چکیده‌های جعلی تولید شده توسط کامپیوترهای مخرب یا آلوده شده جلوگیری کند. علاوه بر این، چکیده‌ها در مسیر خود به سمت کارساز جرم‌شناسی ممکن است تغییر کنند. هرگونه تغییر غیر مجاز نیز باید شناسایی شود.

تمامیت[۳۸]: داده‌های همه جریان‌های TLS که از طریق کارساز جرم‌شناسی منتقل می‌شوند باید در تاریخچه ترافیک گنجانده شوند. به عبارت دیگر، یک جریان TLS نباید منتقل شود مگر اینکه چکیده محموله آن بدست آمده و ذخیره شود.

محرمانگی: راه‌حل نباید محرمانگی کاربران داخلی را نقض کند.

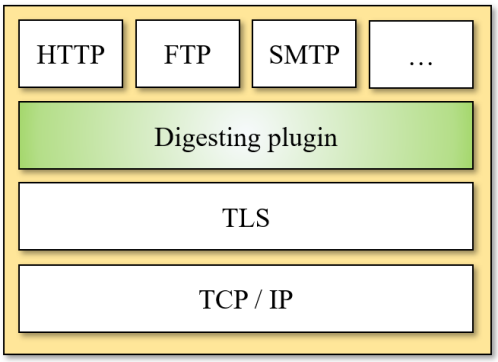
تاکید می‌کنیم که ما فقط ترافیک رمزگذاری شده استاندارد (TLS) و برنامه‌هایی که فقط از آن استفاده می‌کنند (مانند وب‌سایت‌های معمولی مبتنی بر HTTPS) را در نظر می‌گیریم و داده‌هایی که در لایه کاربرد با استفاده از روش‌های رمزگذاری خاص رمزگذاری شده‌اند را پوشش نمی‌دهیم. برای مثال، اگر کاربری یک سند را قبل از ارسال آن از طریق شبکه با استفاده از یک ابزار فشرده‌سازی مثل 7-zip فشرده و رمزگذاری کند، محتوای سند نمی‌تواند انتساب داده شود. در واقع، هیچکدام از روش‌های بازرسی TLS نیز نمی‌توانند اطلاعاتی را که در لایه کاربرد رمزگذاری شده است رمزگشایی کنند.

۳- راهکار پیشنهادی

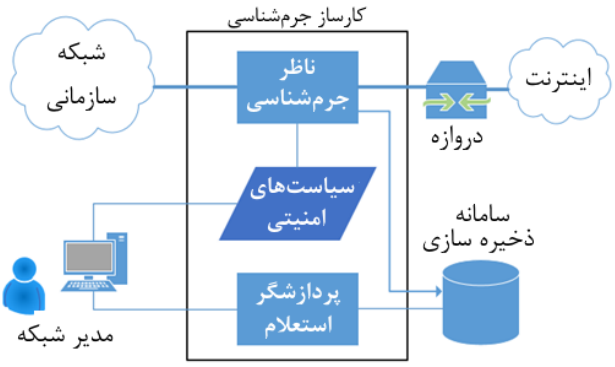
«جرم‌یاب» یک راهکار عملی برای مسئله مطرح شده است. ایده پشت جرم‌یاب بر این واقعیت بنا نهاده شده است که اگرچه ترافیک رمز شده در مسیر خود در شبکه نامفهوم و غیرقابل استفاده است، اما ترافیک در هر طرف اتصال، به صورت غیر رمزشده و آشکار است. بنابراین، اگر یک طرف اتصال، ترافیک ورودی و خروجی ساده خود را به یک کارساز جرم‌شناسی ارائه دهد، کارساز می‌تواند ترافیک را برای تجسس‌های پس از وقوع جرم ذخیره کند. مشکل واضح این است که کاربران نمی‌خواهند اطلاعات حساس خود را حتی برای یک طرف معتبر فاش کنند. اگر راهی وجود داشته باشد که ترافیک کاربران بدون فاش کردن اطلاعات درون آن به کارساز جرم‌شناسی ارسال شود، مشکل حل می‌شود. راه‌حل استفاده از روش‌های چکیده‌سازی ترافیک است.

در راهکار جرم‌یاب، کارساز جرم‌شناسی پشت دروازه[۳۹] شبکه سازمان قرار می‌گیرد و مسئول نظارت بر ترافیک ورودی/خروجی و همچنین ذخیره تاریخچه ترافیک است. هر کامپیوتر متصل به شبکه به یک افزونه نرم‌افزاری به نام «افزونه چکیده‌ساز» مجهز است که مطابق شکل ۲ در بالای لایه TLS قرار می‌گیرد. برنامه‌ها معمولا از پروتکل TLS برای ارسال و دریافت داده‌ها به صورت امن از طریق یک اتصال رمزگذاری شده استفاده می‌کنند. آن‌ها داده‌های آشکار را به لایه TLS می‌دهند و لایه TLS داده‌ها را رمزگذاری و با استفاده از پروتکل TCP ارسال می‌کند. در راه حل پیشنهادی ما، افزونه چکیده‌ساز هر دستگاه حالت آشکار داده‌ای را که یک برنامه به لایه TLS می‌دهد می‌گیرد و از آن‌ها چکیده تولید می‌کند. چکیده‌های تولید شده توسط افزونه به کارساز جرم‌شناسی ارسال می‌شوند تا در یک فیلتر بلوم ادغام و ذخیره شوند.

شکل ۳ اجزای کارساز جرم‌شناسی را نشان می‌دهد. «ناظر جرم‌شناسی» مسئول دریافت چکیده‌ها و انتقال آن‌ها به سامانه ذخیره‌سازی است. اگر چکیده یک اتصال رمزگذاری شده دریافت نشود، ناظر جرم‌شناسی اتصال را مسدود می‌کند. واحد پردازش استعلام در زمان وارسی و تجسس استفاده می‌شود. هنگامی که تحلیل‌گر جرم‌شناسی یک رشته داده را استعلام می‌کند، واحد «پردازشگر استعلام» چکیده‌های ذخیره شده را پردازش و جریان‌هایی که رشته را حمل کرده‌اند گزارش می‌کند. برای برآورده کردن ویژگی‌های مطرح شده در بخش ۳-۲، شبکه سازمانی باید یک سری سیاست‌های امنیتی اتخاذ کند که در ادامه، مورد بحث قرار می‌گیرد. مدیر شبکه سیاست‌ها را در کارساز جرم‌شناسی تنظیم می‌کند تا توسط ناظر جرم‌شناسی و افزونه چکیده‌ساز هر کامپیوتر سازمان قابل دسترس باشد.



شکل ۲. موقعیت افزونه چکیده‌ساز در پشته شبکه



شکل ۳. اجزای کارساز جرم‌شناسی

تا بدینجا، یک سامانه انتساب داده در سطح سازمانی داریم که بر روی ترافیک رمزگذاری شده استاندارد کار می‌کند و همچنین ویژگی سوم، یعنی حفظ محرمانگی، را برآورده می‌کند. با این حال، دو ویژگی دیگر، یعنی صحت و تمامیت نیز باید برآورده شوند. در ادامه، به چگونگی تامین این دو ویژگی می‌پردازیم.

۳-۱- صحت

برای دستیابی به ویژگی صحت، باید از پذیرش چکیده‌های جعلی توسط ناظر جرم‌شناسی جلوگیری کنیم. یک چکیده جعلی می‌تواند توسط یک افزونه چکیده‌ساز جعلی تولید یا توسط یک مهاجم بازپخش شود. علاوه بر این، چکیده‌ها در مسیر خود به سمت کارساز جرم‌شناسی ممکن است دچار تغییرات مخرب شوند. این مشکل را می‌توان به‌سادگی با استفاده از علامت احراز هویت پیام درهم‌سازی شده[۴۰] یا HMAC حل کرد. علامت احراز هویت یکپارچگی و اصالت داده را تایید می‌کند. افزونه چکیده‌ساز یک شماره توالی و یک شناسه اتصال را به هر چکیده اضافه و سپس علامت احراز هویت ترکیب حاصل را با استفاده از کلید مخفی آن کامپیوتر محاسبه می‌کند و در نهایت چکیده و علامت احراز هویت را برای کارساز جرم‌شناسی ارسال می‌کند. کلید مخفی خاص هر کاربر یا کامپیوتر در افزونه چکیده‌ساز ثابت‌گذاری[۴۱] می‌شود و باید محافظت شود (با روش‌هایی مانند مبهم‌سازی[۴۲] [۲۹] که خارج از محدوده این مقاله است). بر اساس مدل تهدید مطرح شده، مهاجمان نمی‌توانند به افزونه چکیده‌ساز نفوذ و کلیدهای مخفی را سرقت کنند. با این حال، آن‌ها می‌توانند سعی در ارسال چکیده‌های جعلی داشته باشند. کارساز جرم‌شناسی می‌تواند با استفاده از علامت احراز هویت یکپارچگی و اصالت چکیده‌های دریافت شده را تایید کرده و تغییرات غیرمجاز یا تولید چکیده‌های جعلی را شناسایی کند. به عبارت دیگر، کارساز جرم‌شناسی یک چکیده را می‌پذیرد اگر بتواند یکپارچگی و اصالت آن را با استفاده از علامت احراز هویت پیام تایید کند. لازم به ذکر است که به دلیل استفاده از شماره توالی، از دست رفتن یا تکرار چکیده‌ها قابل شناسایی است. علاوه بر این، اگر چکیده یک اتصال برای اتصال دیگر توسط یک مهاجم بازپخش شود، شناسه اتصال مانع از پذیرش آن می‌شود.

۳-۲- تمامیت

ویژگی تمامیت به این معنی است که چکیده هر جریانی که از طریق کارساز جرم‌شناسی منتقل می‌شود باید ذخیره شود. این هدف می‌تواند با اتخاذ برخی سیاست‌های امنیتی محقق شود. اعمال سیاست‌های امنیتی یک وظیفه اساسی و حیاتی برای شبکه‌های سازمانی است [۳۰،۳۱]، که ابزارهای پیچیده‌ای برای آن پیشنهاد شده است [۳۲،۳۳].

مدیر شبکه قوانین و سیاست‌های امنیتی را تنظیم و برقرار می‌کند. این قوانین از واحد سیاست امنیتی دریافت شده و باید توسط هر افزونه چکیده‌ساز رعایت شوند. در غیر این صورت، اتصال رمزگذاری شده آن‌ها توسط ناظر جرم‌شناسی مسدود می‌شود.

یک قانون ساده می‌تواند این باشد:

قانون ۱: «هر بسته ترافیکی یک اتصال رمزگذاری شده، باید چکیده داده خود را نیز به همراه داشته باشد. در غیر این صورت، کارساز جرم‌شناسی مانع از عبور بسته می‌شود.»

این قانون دو مشکل دارد. مشکل اول این است که افزونه چکیده‌ساز در بالای لایه انتقال قرار دارد و نمی‌تواند چکیده‌ای برای بار داده هر بسته ترافیکی که در لایه شبکه ساخته می‌شود، تولید کند. به عبارت دیگر، مرزهای بخش داده بسته‌های شبکه در لایه‌های بالای لایه شبکه قابل تعیین نیستند. علاوه بر این، همگام‌سازی چکیده‌ها و بسته‌ها دشوار و تقریبا غیر ممکن است. بنابراین، قانون باید بر داده هر اتصال به جای هر بسته اعمال شود. مشکل دوم این است که چکیده یک بسته ورودی نمی‌تواند تا زمانی که کاربر داخلی مربوطه آن را دریافت نکند، بدست آید. با توجه به این دو مسئله، ما از قانون تعدیل شده زیر استفاده می‌کنیم:

قانون ۲: «یک جریان رمزگذاری شده تا زمانی که بخشی از بار داده جریان که چکیده آن دریافت نشده است از یک آستانه تعریف‌شده، به نام آستانه قطع ارسال، تجاوز نکند، اجازه عبور از ناظر جرم‌شناسی را دارد.»

این بدین معنی است که افزونه چکیده‌ساز می‌تواند چکیده‌های چندین بسته را ذخیره کند تا زمانی که اندازه کل بار داده آن‌ها به نزدیکی آستانه قطع ارسال برسد و سپس چکیده‌ها را با یک تراکنش

ارسال کند. از طرف دیگر، تا زمانی که چکیده‌ها به طور منظم دریافت شوند و اختلاف بین اندازه کل بار داده‌های ارسال شده و اندازه کل بار داده‌هایی که چکیده‌های آن‌ها دریافت شده است از آستانه تجاوز نکند ناظر جرم‌شناسی بسته‌ها را بدون هیچ تاخیری انتقال می‌دهد. ما از نماد τ برای نشان دادن آستانه قطع ارسال استفاده می‌کنیم.

بنابراین، افزونه چکیده‌ساز در سطح جریان کار می‌کند نه سطح بسته. برای اجرای این قانون، ناظر جرم‌شناسی باید دو متغیر برای هر اتصال فعال نگه دارد، d_c و u_c. متغیر d_c اندازه (تعداد بایت‌ها) بخشی از بار داده اتصال که چکیده‌های آن دریافت شده را ذخیره می‌کند و متغیر u_c اندازه بخشی از بار داده که از طریق ناظر جرم‌شناسی منتقل شده است را ذخیره می‌کند. هنگامی که چکیده δ برای اتصال c دریافت می‌شود، کارساز جرم‌شناسی d_c را بروزرسانی می‌کند. از طرف دیگر، هنگامی که کارساز جرم‌شناسی یک بسته را منتقل می‌کند، u_c، به اندازه بار داده بسته افزایش می‌یابد. بنابراین، کارساز جرم‌شناسی می‌تواند با استفاده از این دو متغیر از انتقال جریانی که چکیده آن دریافت نشده است جلوگیری کند. به‌طور خاص، برای هر بسته ترافیکی p که می‌خواهد از لبه شبکه از طریق کارساز جرم‌شناسی عبور کند، بسته تنها در صورتی ارسال می‌شود که:

$$u_c + PayloadLength(p) - d_c \leq \tau \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱) $PayloadLength(p)$ اندازه بار داده بسته p را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که وقتی شرط معادله (۱) برای بسته p برقرار نباشد، ناظر جرم‌شناسی بسته را میانگیر[۴۳] می‌کند و منتظر دریافت چکیده جریان آن می‌ماند. اگر چکیده پس از زمان از پیش تعریف شده‌ای دریافت نشود، اتصال جریان مسدود و گزارش می‌شود. شبه‌کدهای افزونه چکیده‌ساز و ناظر جرم‌شناسی در الگوریتم ۱ و الگوریتم ۲ نشان داده شده‌اند.

بنابراین، راه‌حل پیشنهادی دارای سطح قابل قبولی از ویژگی تمامیت است. به عبارت دیگر، تنها τ بایت از یک جریان ترافیک رمز شده می‌تواند بدون ارائه چکیده آن منتقل شود. امکان ارسال اطلاعات مهم بدون ارائه چکیده می‌تواند با تنظیم مقدار کوچک برای آستانه قطع ارسال، مانند ۴ کیلوبایت، به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. اگر یک کاربر داخلی چکیده ترافیک رمزگذاری شده خود را پس از τ بایت ارسال نکند، ناظر جرم‌شناسی اتصال را متوقف کرده و فعالیت مشکوک را گزارش می‌کند.

یک سیاست تکمیلی نیز می‌تواند برای اتصال‌های داخلی یک سازمان تنظیم شود تا چکیده‌های ترافیک داخلی نیز جمع‌آوری شود. در این صورت، افزونه چکیده‌ساز باید چکیده هر اتصال با هر فرد در داخل شبکه سازمانی را نیز به کارساز جرم‌شناسی ارسال کنند. با این حال، نقض این سیاست توسط ناظر جرم‌شناسی قابل تشخیص نیست زیرا اتصال‌های داخلی از طریق کارساز جرم‌شناسی عبور نمی‌کنند. راه حل ممکن برای این مشکل استفاده از عوامل جرم‌شناسی توزیع‌شده است، یعنی استقرار یک ناظر جرم‌شناسی در هر مجموعه شبکه سازمانی. راه‌حل‌های مبتنی بر SDN و NFV برای تسهیل در پیاده‌سازی و اعمال چنین سیاست‌های امنیتی به‌صورت توزیع شده وجود دارد [۳۲،۳۳]. اگر یک شبکه سازمانی از راه‌گزین‌های[۴۴] SDN استفاده کند، ناظر جرم‌شناسی می‌تواند به‌عنوان یک برنامه نظارتی برای کار در سراسر شبکه پیاده‌سازی شود. OpenSec [۳۴]، که یک سکوی امنیتی مبتنی بر سیاست برای SDN است، گزینه مناسبی برای پیاده‌سازی این راه‌حل و سیاست‌های آن است.

افزونه چکیده‌ساز: یک مسئله مهم در راه حل پیشنهادی، پیاده‌سازی و استقرار افزونه چکیده‌ساز است. ما یک افزونه برای مرورگر فایرفاکس طراحی و پیاده‌سازی کردیم که تمام داده‌های آشکار ارسال یا دریافت شده از طریق هر اتصال TLS مرورگر را ضبط می‌کند. این افزونه را با استفاده از جاوااسکریپت و توابع webRequest موزیلا [۳۵] پیاده‌سازی کردیم. رویداد onBeforeRequest از توابع webRequest می‌تواند حالت آشکار همه درخواست‌ها و پاسخ‌های لایه کاربرد را در اختیار ما بگذارد. افزونه داده‌ها را با استفاده از الگوریتم CBID [۱۷] پردازش و به ناظر جرم‌شناسی ارسال می‌کند. بنابراین، همه اتصال‌های رمزگذاری شده استاندارد که با استفاده از مرورگر برقرار می‌شوند، مانند HTTPS، FTPS و SSMTP، به‌راحتی پردازش و در کارساز جرم‌شناسی ذخیره می‌شوند.

یک مزیت مهم دیگر ضبط درخواست‌ها و پاسخ‌ها در بالای پیمانه TLS این است که داده‌ای که قرار است پردازش شود، تحت تاثیر پروتکل‌های لایه پایین‌تر قرار نمی‌گیرد. به عبارت دیگر، ما اثرات قطعه‌های TCP و بسته‌های IP را نمی‌بینیم و افزونه می‌تواند داده خام لایه کاربرد را به صورت کامل ضبط کند. سامانه‌های انتساب داده موجود که در لبه شبکه کار می‌کنند، ترافیک را در سطح بسته پردازش می‌کنند. آن‌ها می‌توانند بار داده هر بسته را به طور جداگانه پردازش کنند یا بار داده بسته‌های هر جریان را ترکیب کرده و بار داده جریان حاصل را به‌صورت کامل پردازش کنند. مورد اول می‌تواند در زمان تجسس به نتایج منفی کاذب منجر شود، زیرا

الگوریتم ۱- شبه‌کد افزونه چکیده‌ساز

```
DigestingPlugIn_DataTransferHandler
Input: plainData: Data from either application or TLS layer
       cID: Connection identifier (5-tuple)
δ[cID].digest ← δ[cID].digest || MakeDigest(plainData)
δ[cID].dataLen ← δ[cID].dataLen + Length(plainData)
if (δ[cID].dataLen ≥ τ − T) then
    digestMsg.digest ← δ[cID]
    digestMsg.hMAC ← CalculateHMAC(δ[cID], hKey)
    Send(digestMsg, fsIP)
    δ[cID].digest ← NULL
    δ[cID].dataLen ← 0
    δ[cID].seq ← δ[cID].seq + 1
end if
```

Notation:
|| : Append operator
δ : Map of digest objects for different connections.
τ : Forwarding block threshold
hKey : HMAC secret key
T : Digest pass threshold
seq : Sequence number for digest messages
fsIP : IP address of the forensic server

مرزهای یک قطعه از رشته جستجو شده ممکن است در دو بسته متوالی قرار بگیرد. مورد دوم منجر به هزینه پردازش و نیاز به حافظه بسیار زیاد می‌شود زیرا سامانه انتساب بار داده باید بسیاری از اتصال‌ها را دنبال و بار داده بسته‌های هر جریان را ترکیب کند. بنابراین، سامانه‌های انتساب بار داده موجود، رویکرد اول را انتخاب می‌کنند [۱۸-۱۵] که گاهی منجر به نتایج منفی کاذب می‌شود.

افزونه چکیده‌ساز می‌تواند به‌راحتی برای مرورگرهای متن‌باز دیگر نیز توسعه یابد. علاوه بر این، چکیده‌ساز می‌تواند به صورت‌های دیگر، مانند کتابخانه‌های برنامه‌نویسی توسعه یابد تا توسط برنامه‌های دیگر مورد استفاده قرار گیرد. به‌عنوان مثال، فرض کنید یک شرکت امنیتی برنامه خاص خود را برای ارتباط بین شعبه‌های خود دارد. توسعه‌دهندگان برنامه می‌توانند به سادگی این کتابخانه را به برنامه اضافه و آن را به افزونه چکیده‌ساز مجهز کنند.

۴- ارزیابی

ما ارزیابی‌های خود را در دو مرحله انجام دادیم. در مرحله اول، توانایی جرم‌یاب در شناسایی و انتساب رشته‌های جستجو شده را ارزیابی کردیم. در مرحله دوم، سایر ویژگی‌های کارایی آن مانند سربار ترافیکی، تاخیر افزوده شده به ترافیک، و بار پردازش پردازنده کاربران داخلی را مورد ارزیابی قرار دادیم.

۴-۱- ارزیابی قابلیت انتساب

ما افزونه چکیده‌ساز را برای مرورگر فایرفاکس توسعه دادیم و آن را

الگوریتم ۲- شبه‌کد ناظر جرم‌شناسی

```
ForensicAgent_DigestReceiveHandler
Input: digestMsg: Digest message from a client machine
δ ← digestMsg.digest
if (CalculateHMAC(δ, hKey) = digestMsg.hMAC) then
    cID ← digestMsg.connectionID
    if (digestMsg.seq = seq[cID] + 1) then
        StoreInBloomFilter(δ.digest, cID)
        d_c[cID] ← d_c[cID] + digestMsg.dataLen
        seq[cID] ← seq[cID] + 1
        if (pktBuffer[cID] ≠ EMPTY) then
            do
                pkt ← Dequeue(pktBuffer[cID])
                Forward(pkt)
                u_c[cID] ← u_c[cID] + PayloadLength(pkt)
            while(u_c[cID]+PayloadLength(pkt)-
                    d_c[cID] ≤ τ)
        end if
    end if
end if
```

```
Packet_Receive_Handler
Input: pkt: Packet from either inside or outside of network
       cID: Connection identifier of the packet
if (u_c[cID] + PayloadLength(pkt) - d_c[cID] ≤ τ) then
    Forward(pkt)
    u_c[cID] ← u_c[cID] + PayloadLength(pkt)
else
    Enqueue(pkt, pktBuffer[cID])
end if
```

بر روی مرورگر فایرفاکس سه کامپیوتر آزمایشگاه تحقیقاتی خود نصب کردیم. الگوریتم چکیده‌سازی با نسبت کاهش داده ۱:۱۰۰ تنظیم شد. برنامه ناظر جرم‌شناسی را نیز توسعه دادیم. برای پردازش سریع بسته‌ها، نیاز داشتیم که هسته سیستم‌عامل را دور بزنیم و بسته‌ها را بدون وقفه‌های سیستم‌عامل پردازش کنیم. بنابراین، از DPDK [۱۱] و حالت سرکشی[۴۵] آن استفاده کردیم تا ناظر جرم‌شناسی را پیاده‌سازی کنیم. یک کامپیوتر مجزا این برنامه را میزبانی و نقش کارساز جرم‌شناسی را ایفا می‌کرد که از طریق آن سه کامپیوتر دیگر به اینترنت متصل شدند. به کاربران سه رایانه اجازه دادیم تا کارهای روزمره خود را با استفاده از اینترنت انجام دهند. در این مدت، کارساز جرم‌شناسی در مجموع چکیده‌ای به اندازه ۶۰ مگابایت از کل ترافیک را جمع‌آوری کرد. علاوه بر کارهای روزمره کاربران، سه سناریوی زیر را در طول روز انجام دادیم:

۱. کاربر شماره ۱ به وب‌سایت https://www.mehrnews.com مراجعه کرد و یکی از مقالات آن را باز کرد.

۲. کاربر شماره ۲ از طریق دو کارساز ایمیل مختلف دو نامه الکترونیک ارسال کرد. متن هر نامه حدود ۲۵۰۰ شناسه بود. بدین منظور از دو کارساز ایمیل زیر استفاده کردیم:

- https://pmail.sbu.ac.ir
- https://mail.google.com

۳. کاربر شماره ۳ به وب‌سایت‌های https://web.telegram.org و https://web.whatsapp.com وارد شد که برنامه‌های پیام‌رسان تلگرام و واتساپ مبتنی بر وب هستند و چند پیام ارسال کرد.

پس از جمع‌آوری چکیده‌ها، هر یک از سناریوها را به صورت زیر بررسی کردیم.

بررسی سناریو ۱: هدف این تجسس آزمایشی، شناسایی کاربری است که مقاله را دریافت کرده است. بدین منظور، از چکیده ترافیک برای کل متن مقاله استعلام گرفتیم، اما نتیجه مثبتی به دست نیامد. دلیل بدست نیامدن نتیجه این است که مقاله به صورت یک صفحه HTML دانلود شده بود و در نتیجه، فراداده‌ها و به ویژه برچسب‌های HTML بین پاراگراف‌های مقاله وجود داشت. این مسئله مانع از تطابق کامل بین رشته جستجو شده و رشته دریافت شده توسط کاربر می‌شد. بنابراین، برای یکی از پاراگراف‌های مقاله که حدود ۲۵۰ کاراکتر داشت استعلام کردیم. دو نتیجه مثبت به دست آمد: کاربران شماره ۱ و ۳. سپس، برای پاراگراف دیگری که حدود ۳۰۰ کاراکتر داشت استعلام گرفتیم و کاربران شماره ۱ و ۲ به عنوان نتایج مثبت گزارش شدند. از آنجا که سامانه‌های انتساب داده پاسخ منفی کاذب ندارند [۱۷-۱۱]، می‌توانیم نتایج مثبت کاذب را با اشتراک گرفتن از نتایج حذف کنیم. اشتراک مجموعه نتایج اول و دوم، کاربر شماره ۱ را به عنوان نتیجه نهایی مشخص می‌کند. باید توجه داشت که نرخ مثبت کاذب سامانه‌های انتساب داده برای رشته‌های کوچک جستجو شده بالا است. بر اساس نتایج مقالات قبلی، برای نسبت کاهش داده ۱:۱۰۰، زمانی که چکیده‌ها برای رشته‌هایی بزرگ‌تر از ۴۰۰ بایت جستجو می‌شوند، نرخ مثبت کاذب نزدیک به صفر است. ما برای پاراگراف دیگری از مقاله که حدود ۵۰۰ کاراکتر داشت جستجو کردیم و تنها پاسخ مثبت درست (کلاینت ۱) بدست آمد.

بررسی سناریو ۲: هدف از این تجسس، شناسایی کاربر ارسال کننده نامه الکترونیک است. ابتدا از چکیده برای یک پاراگراف از نامه ارسال شده توسط pmail.sbu.ac.ir استعلام گرفتیم، اما نتیجه مثبتی بدست نیامد. برای پیدا کردن مشکل، درخواست‌ها و پاسخ‌های کارساز ایمیل را در بخش ناظر شبکه فایرفاکس در حین ارسال ایمیل بررسی کردیم. مشاهده کردیم که نوع محتوا application/x-www-form-urlencoded است. در این فرمت، کاراکتر فاصله با علامت + جایگزین می‌شود. همچنین نشان‌های غیرالفبایی با نشانه HH%، که شامل یک نویسه درصد و دو رقم مبنای ۱۶ که نمایانگر کد ASCII کاراکتر است جایگزین می‌شوند. این موضوع در بخش محتوا نیز قابل مشاهده است. بنابراین، کاراکترهای فاصله پاراگراف مورد نظر را با علامت + جایگزین کرده و از چکیده‌ها دوباره برای پاراگراف اصلاح شده استعلام گرفتیم. کاربر شماره ۲ به درستی و بدون نتیجه مثبت کاذب شناسایی و گزارش شد.

سپس، چکیده‌ها را برای یک پاراگراف از نامه ارسال شده توسط کارساز گوگل استعلام کردیم. پس از عدم دریافت پاسخ مثبت، درخواست‌ها به کارساز گوگل را بررسی کردیم. مشاهده کردیم که نوع محتوا application/json است و متن ایمیل به‌عنوان یک سند HTML در یک شیء از ساختار JSON ارسال می‌شود. از آنجا که متن ایمیل به عنوان یک سند HTML در نظر گرفته می‌شود، برچسب‌های HTML در متن ایمیل وجود دارند، به ویژه بین پاراگراف‌ها. علاوه بر این، کاراکترهای فاصله با نشانه   جایگزین می‌شوند که شناسه فاصله غیر قابل شکست در HTML است. بنابراین، کاراکترهای فاصله پاراگراف را با   جایگزین و چکیده‌ها را دوباره برای پاراگراف اصلاح شده استعلام کردیم. کاربر شماره ۲ به درستی و بدون هیچ نتیجه مثبت کاذبی گزارش شد.

این سناریوها نشان می‌دهد که گاهی نیاز است که برای انتساب یک رشته داده جستجو شده، پیش‌پردازشی انجام شود و بازرسان امنیتی باید نقش خود را در مواجهه با وضعیت و انجام یک بررسی جامع به درستی و با دقت ایفا کنند. باید توجه داشت که این روال حتی برای ابتدایی‌ترین سامانه‌های انتساب داده، یعنی ابزارهای ضبط ترافیک خام، اجتناب‌ناپذیر است. یک راه‌حل برای ساده‌تر کردن این روال این است که افزونه با انجام پیش‌پردازش‌هایی فراداده‌های شناخته شده را قبل از اعمال توابع درهم‌سازی از داده‌ها حذف کند. به عنوان یک راه‌حل دیگر، روش چکیده‌سازی افزونه که مبتنی بر الگوریتم CBID است را می‌توان با روش چکیده‌سازی DSPAS که به تفاوت‌های کوچک حساس نیست، جایگزین کرد. همان‌طور که قبلا گفته شد، DSPAS از روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال برای چکیده‌سازی یک رشته داده استفاده می‌کند. هنگامی که چکیده‌ها را برای یک رشته با استفاده از DSPAS استعلام کنیم، کاربرانی که رشته‌های داده مشابه با رشته استعلام شده را منتقل کرده‌اند هم به عنوان پاسخ گزارش می‌شوند.

بررسی سناریو ۳: هدف در این سناریو، شناسایی کاربری است که پیام را ارسال کرده است. از چکیده برای یکی از پیام‌ها استعلام گرفتیم، اما نتیجه مثبتی بدست نیامد. درخواست‌ها به کارسازهای

تلگرام و واتساپ را بررسی کردیم. مشاهده کردیم که نوع محتوا application/octet-stream است و داده‌های درخواست‌ها نامشخص است. تلگرام از پروتکل خاصی به نام MTProto برای انتقال پیام‌ها استفاده می‌کند. یکی از وظایف اصلی این پروتکل رمزگذاری پیام‌ها قبل از ارسال از طریق پروتکل لایه انتقال است. به عبارت دیگر، تلگرام پیام‌ها را در لایه کاربرد رمزگذاری می‌کند. از سوی دیگر، واتساپ از یک سازوکار رمزگذاری انتها به انتها[۴۶] استفاده می‌کند که در لایه کاربرد عمل می‌کند. بنابراین، در این مورد، چکیده‌هایی که افزونه از داده‌های رمزگذاری شده تولید می‌کند بی‌فایده هستند. همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد، روش پیشنهادی فقط زمانی موثر است که داده‌ها تنها با استفاده از پروتکل امنیت لایه انتقال رمزگذاری شوند.

۴-۲- ارزیابی خصوصیات دیگر کارایی

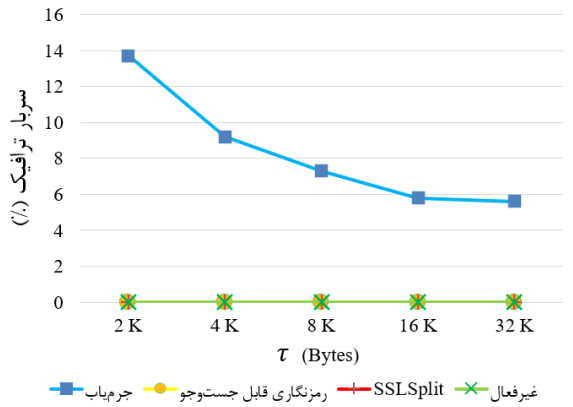
برای ارزیابی دیگر ویژگی‌های کارایی جرم‌یاب، به یک شبکه سازمانی مجهز به افزونه چکیده‌ساز و ناظر جرم‌شناسی نیاز داشتیم. کاربران داخلی شبکه باید اتصال‌های TLS به خارج از شبکه برقرار کنند و مدیر شبکه باید قادر به تنظیم سیاست‌های امنیتی روی ناظر جرم‌شناسی باشد. در این مدت، ویژگی‌های مختلفی مانند سربار ترافیک، تاخیر افزوده به ترافیک، و سربار پردازش پردازنده کاربران داخلی باید اندازه‌گیری شود.

برای انجام این ارزیابی، ما یک شبکه سازمانی را با استفاده از سکوی Docker [۳۶،۳۷] شبیه‌سازی کردیم. Docker یک سکوی مجازی‌سازی است که برای شبیه‌سازی و ارزیابی سامانه‌ها و شبکه‌های توزیع شده استفاده می‌شود [۳۸،۳۹]. شبکه شبیه‌سازی شده دارای ۵۰۰ کامپیوتر به عنوان کاربران داخلی است. هر کامپیوتر یک سامانه لینوکسی است. برای شبیه‌سازی این تعداد زیاد کامپیوترها، از توزیع Alpine که یک لینوکس سبک و قابل تنظیم است استفاده کردیم. همچنین افزونه چکیده‌ساز را روی مرورگر فایرفاکس هر رایانه نصب کردیم. در شبکه شبیه‌سازی شده، یک رایانه لینوکسی ویژه را به عنوان دروازه شبکه تنظیم کرده و کل شبکه را از طریق دروازه به اینترنت متصل کردیم. ناظر جرم‌شناسی نیز در کامپیوتر دروازه پیاده‌سازی شده است.

فهرستی از وظایف برای هر رایانه آماده کردیم. این وظایف شامل بارگیری صفحات وب HTTPS تصادفی از لیست ۱۰۰ وب‌سایت پربازدید و همچنین بارگیری و بارگذاری اسناد به یک کارساز FTPS است. فهرست وظایف هر رایانه شامل ۱۰۰ وظیفه است که در یک بازه زمانی یک ساعته پخش شده‌اند. همچنین برنامه‌ای برای کامپیوترها نوشتیم که وظایف تعریف شده را اجرا کند. این برنامه ابتدا حافظه نهان[۴۷] مرورگر رایانه‌ها را پاک می‌کند، سپس وظایف آنها را دریافت و در زمان مشخص شده اجرا می‌کند.

در آزمایش اول، افزونه چکیده‌ساز و ناظر جرم‌شناسی را غیرفعال کرده و سپس وظایف را انجام دادیم. در طول شبیه‌سازی یک ساعته، رایانه‌ها در مجموع ۴۷۴۲ مگابایت ترافیک بارگیری کردند. از سوی دیگر، ترافیک بارگذاری شده در مجموع ۳۹۵۷ مگابایت بود. پس از آن، افزونه‌های چکیده‌ساز و ناظر جرم‌شناسی را که برای نسبت کاهش داده ۱:۱۰۰ تنظیم شده بودند، فعال و آزمایش را برای ارزیابی خصوصیات کارایی تکرار کردیم. ما همچنین نرم‌افزار بازرسی TLS، یعنی SSLsplit [۲۰] و روش رمزگذاری غیرفعال [۲۲] را برای مقایسه با روش خود مورد ارزیابی عملی قرار دادیم. علاوه بر این، کارایی روش‌های رمزگذاری قابل جستجو را هر زمان که لازم بود بیان و با روش پیشنهادی جرم‌یاب مقایسه کرده‌ایم. ما روش‌های رمزگذاری قابل جست‌وجو را پیاده‌سازی نکردیم زیرا آنها نیاز دارند که دو طرف اتصال رمزگذاری شده از پروتکل رمزگذاری پیشنهادی خودشان استفاده کنند و بنابراین در آزمایش ما نمی‌توانند کار کنند. علاوه بر این، آنها برای کاربرد دیگری، یعنی تطبیق امضا برای تشخیص نفوذ، طراحی شده‌اند.

سربار ترافیک: شکل ۴ سربار ترافیک ناشی از تولید و ارسال چکیده‌ها را نشان می‌دهد. سربار ترافیک را بدین صوتر تعریف می‌کنیم: اندازه کل ترافیک چکیده‌های ارسال شده به ناظر جرم‌شناسی تقسیم بر حجم کل ترافیک ورودی و خروجی اصلی کامپیوترها (بدون در نظر گرفتن ترافیک چکیده‌ها) است. اولین سوالی که ممکن است مطرح شود این است که «با توجه به نسبت کاهش داده ۱:۱۰۰، چرا سربار ترافیک بیش از یک درصد از کل ترافیک است؟» دلیل آن به سازوکار چکیده‌سازی مربوط می‌شود. الگوریتم چکیده‌سازی ترافیک را با استفاده از فیلترهای بلوم چکیده

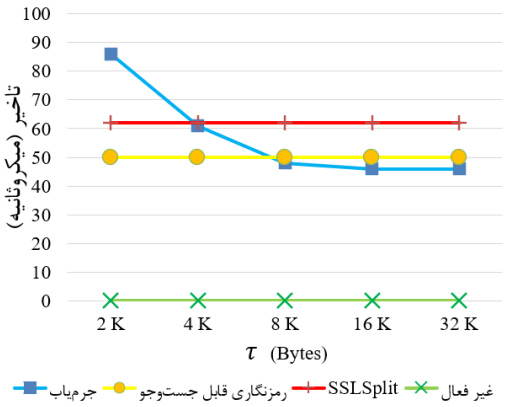


شکل ۴. سربار ترافیکی چکیده‌ها

می‌کند. به‌طور خلاصه، یک فیلتر بلوم از یک آرایه بیتی تشکیل شده است که مقدار همه آنها در ابتدا صفر است. در طول فرآیند چکیده‌سازی، بسته‌های ترافیک به قطعاتی تقسیم و قطعه‌ها درهم‌سازی می‌شوند. بیت‌های فیلتر بلوم متناظر با نتایج درهم‌سازی به یک مقداردهی می‌شوند. هنگامی که نتایج درهم‌سازی در یک فیلتر بلوم جمع‌آوری می‌شوند، اندازه نهایی چکیده کوچک‌تر از کل درهم‌سازی‌ها می‌شود. بنابراین، سربار ترافیک چکیده‌ها بیشتر از چکیده نهایی است. برای کاهش سربار ترافیک، افزونه چکیده‌ساز را به گونه‌ای طراحی کردیم که مقادیر درهم‌سازی که در مقادیر ارسالی قبل بوده‌اند را ارسال نکند. با جلوگیری از ارسال مقادیر درهم‌سازی یکسان توسط افزونه چکیده‌ساز، یعنی درهم‌سازی‌هایی که فیلتر بلوم ناظر جرم‌شناسی را تغییر نمی‌دهند، سربار ترافیک کاهش پیدا می‌کند. برای پیاده‌سازی این سازوکار، افزونه چکیده‌ساز مقادیر درهم‌سازی که قبلا ارسال شده‌اند را در یک فیلتر بلوم داخلی ذخیره و درهم‌سازی‌های جدید را قبل از ارسال به ناظر جرم‌شناسی با آن بررسی می‌کند. علاوه بر این، لازم به ذکر است که بخش قابل‌توجهی از سربار ترافیک به دلیل سربار سطح شبکه در ارسال پیام‌های درهم‌سازی است، یعنی سربار سرآیندهای IP و TCP.

همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، با افزایش τ، سربار ترافیک کاهش می‌یابد. مقدار بزرگتر برای τ به معنای آن است که افزونه چکیده‌ساز می‌تواند چکیده‌های بیشتری را ذخیره و در یک تراکنش ارسال کند و در نتیجه، سربار سطح شبکه کاهش می‌یابد. با این حال، تاثیر سربار سطح شبکه در $\tau = 16\,KB$ ناچیز می‌شود.

از سوی دیگر، SSLsplit که یک روش بازرسی TLS به روش مرد میانی است و همچنین روش رمزگذاری غیرفعال هیچ‌گونه سربار ترافیکی ایجاد نمی‌کنند. روش‌های رمزگذاری قابل جستجو به دلیل تنظیمات خاص اتصال و تبادل نشانه در حین انتقال داده، دارای مقداری سربار ترافیک هستند، اما این سربار ناچیز است.



شکل ۵. تاخیر انتقال بسته‌های شبکه توسط ناظر جرم‌شناسی

تاخیر ترافیک: یکی دیگر از خصوصیات مهم کارایی، تاخیر افزوده به ترافیک است، یعنی زمانی که ناظر جرم‌شناسی صرف پردازش و ارسال یک بسته می‌کند. انتظار می‌رود تاخیر کم باشد زیرا ناظر جرم‌شناسی بیشتر بسته‌ها را فوراً ارسال می‌کند. تنها زمانی که شرط معادله ۱ برای یک بسته برآورده نشود، بسته در میانگیر ناظر نگهداری می‌شود. احتمال وقوع این رویداد برای مقادیر پایین τ بیشتر است. ما میانگین تاخیر بسته را در ناظر جرم‌شناسی اندازه‌گیری کردیم. نتایج در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، تاخیر کم و ناچیز است و در محدوده تاخیر دیوارهای حفاظتی سخت‌افزاری قرار دارد و حتی کمتر است. مقادیر ۲ و ۴ کیلوبایت برای τ منجر به نرخ میانگیری بسته بالا و در نتیجه تاخیر بیشتر می‌شود. با این حال، $\tau = 8\,KB$ و بالاتر، نرخ میانگیری بسته زیادی را اعمال نمی‌کند و باعث می‌شود که ناظر جرم‌شناسی بیشتر بسته‌ها را بدون معطلی ارسال کند، که منجر به تاخیر کمتر بسته می‌شود.

در مورد SSLsplit، تأخیر حدود ۶۰ میکروثانیه مشاهده شد. تاخیر SSLsplit بیشتر از حداقل تاخیر روش پیشنهادی است زیرا SSLsplit ترافیک را قبل از ارسال رمزگشایی و رمزگذاری می‌کند. روش‌های رمزگذاری قابل جستجو که تطبیق امضا انجام می‌دهند، می‌توانند تاخیر بیشتری داشته باشند که به تعداد قوانین و امضاهای آن‌ها بستگی دارد. با این حال، در بهترین حالت، تاخیر آن‌ها به اندازه ارسال فوری است. علاوه بر این، در فرایند پیچیده برقراری اتصال، تاخیر قابل‌توجهی ایجاد می‌کنند که می‌تواند تا یک ثانیه افزایش یابد. در نهایت، روش رمزگذاری غیرفعال تاخیر انتقال بسته‌ها را افزایش نمی‌دهد زیرا در وسط اتصال‌ها قرار ندارد و ترافیک را منتقل نمی‌کند.

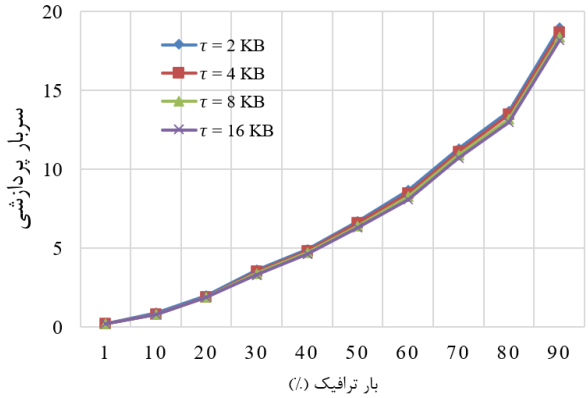
سربار پردازش: برای ارزیابی سربار پردازش افزونه چکیده‌ساز، میانگین استفاده از پردازنده کامپیوترها را در هر آزمایش اندازه‌گیری کردیم. شکل ۶ سربار پردازشی افزونه چکیده‌ساز را برای مقادیر مختلف τ نشان می‌دهد. از آنجا که بار پردازشی فرآیند چکیده‌سازی به بار ترافیک وابسته است، آزمایش‌ها را با تعداد وظایف مختلف تکرار کردیم که منجر به بارهای ترافیکی متفاوت شد. بنابراین، سربار پردازش به عنوان تابعی از بار ترافیک نشان داده شده است. به دلیل محدودیت پهنای باند اینترنت، تمام کامپیوترها به جز یکی را غیرفعال کردیم تا بتوانیم بار ترافیک یک کامپیوتر را به بیشینه نزدیک کنیم.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سربار پردازش برای بارهای ترافیکی

جدول ۱. مقایسه رویکردهای مختلف برای انتساب داده روی ترافیک رمز شده

	ضبط ترافیک خام	مرد میانی [۵،۱۹،۲۰]	رمزگشایی غیر فعال [۲۲]	رمزنگاری قابل جست‌وجو [۲۳-۲۶]	جرم‌یاب
موثر روی ترافیک رمز شده	خیر	بله	بله	بله	بله
حفظ محرمانگی	بله	خیر	خیر	بله	بله
عملی بودن	بله	بله	بله	خیر	بله
سربار ترافیک	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد
تاخیر انتقال ترافیک	ندارد	دارد	ندارد	دارد	دارد
تاخیر برقراری اتصال	ندارد	دارد	ندارد	دارد	ندارد
سربار پردازشی روی کاربران	ندارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد
سربار پردازشی	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد

رنگ سبز و قرمز به ترتیب نشان دهنده ویژگی مثبت و منفی است



شکل ۶. سربار پردازشی افزونه چکیده‌ساز

در محدوده ۱٪ تا ۹۰٪ بین ۰٫۰۴٪ تا ۱۸٪ متغیر است. علاوه بر این، سربار پردازش تقریبا مستقل از τ است. از سوی دیگر، SSLsplit هیچ‌گونه سربار پردازشی روی کامپیوترهای شبکه اعمال نمی‌کند. روش‌های رمزگذاری قابل جستجو به طور متوسط و بیشینه سربار پردازشی به ترتیب حدود ۱۰% و ۲۵٪ را گزارش کرده‌اند.

در نهایت، جدول ۱ مقایسه‌ای از همه روش‌ها ارائه می‌دهد. به طور خلاصه، تا آنجا که ما اطلاع داریم، جرم‌یاب تنها راه حل موجود کارا برای مشکل انتساب داده در ترافیک رمزگذاری شده استاندارد است که هم محرمانگی را حفظ می‌کند و هم پیاده‌سازی آن با در نظر گرفتن استانداردهای فعلی شبکه امکان‌پذیر است.

۵- جمع‌بندی

در این مقاله، جرم‌یاب را به‌عنوان یک راه‌حل عملی و بدون نقض محرمانگی برای مسئله انتساب داده در ترافیک رمزگذاری شده استاندارد (TLS) در شبکه‌های سازمانی معرفی کردیم. برای استفاده از این راهکار، سازمان باید کامپیوترهای خود را به یک افزونه نرم‌افزاری چکیده‌ساز مجهز کند که از داده‌های آشکار بالای لایه TLS چکیده‌های فشرده‌ای ایجاد کند. ما در این مورد بحث کردیم که چگونه با اتخاذ برخی سیاست‌ها و روش‌های امنیتی در سطح شبکه می‌توان صحت و تمامیت این راهکار را تضمین کرد. تجسس‌های آزمایشی واقع‌گرایانه ما نشان داد که روش جرم‌یاب می‌تواند به‌طور موثری برای انتساب رشته‌های داده منتقل شده از طریق TLS استفاده شود. ارزیابی‌های انجام‌شده نشان داد که سربار ترافیک و همچنین سربار پردازش راهکار پیشنهادی معقول است. در کارهای آینده، قصد داریم سامانه‌های تشخیص نفوذ و همچنین سامانه‌های پیشگیری از نشت داده را با استفاده از روش خود پیاده‌سازی کنیم تا بتوانند وظایف خود را روی ترافیک رمزگذاری شده انجام دهند. این کار با ارائه چکیده‌های امضاهای مخرب (یا چکیده‌های اطلاعات محرمانه) به آنها و مقایسه این چکیده‌ها با چکیده‌های ترافیک در دروازه شبکه قابل انجام به نظر می‌رسد.

مراجع

[1] Porter Felt, A., Barnes, R., King, A., Palmer, C., Bentzel, C. and Tabriz, P., Measuring HTTPS Adoption on the Web. 26th USENIX Security Symposium (2017), 1323–1338.

[2] de Carnavalet, X. de C. and van Oorschot, P.C., A survey and analysis of TLS interception mechanisms and motivations. ACM Computing Surveys. (Jan. 2023)

[3] Erlacher, F., Woertz, S. and Dressler, F., A TLS Interception Proxy with Real-Time Libpcap Export. 41st IEEE Conference on Local Computer Networks (Nov. 2016), 1–3.

[4] Sophos XG Firewall: https://www.sophos.com/en-us/products/next-gen-firewall.

[5] Symantec SSL visibility appliances: https://www.broadcom.com/products/cybersecurity/network/encrypted-traffic-management/ssl-visibility-appliance.

[6] Durumeric, Z., Ma, Z., Springall, D., Barnes, R., Sullivan, N., Bursztein, E., Bailey, M., Halderman, J.A. and Paxson, V., The security impact of HTTPS interception. Proceedings 2017 Network and Distributed System Security Symposium (San Diego, USA, Feb. 2017), 1–14.

[7] O'Neill, M., Ruoti, S., Seamons, K. and Zappala, D., TLS Proxies: Friend or Foe? Proceedings of the 2016 Internet Measurement Conference (New York, NY, USA, Nov. 2016), 551–557.

[8] Waked, L., Mannan, M. and Youssef, A., The Sorry State of TLS Security in Enterprise Interception Appliances. Digital Threats: Research and Practice. 1, 2 (Jun. 2020), 1–26.

[9] Waked, L., Mannan, M. and Youssef, A., To Intercept or Not to Intercept: Analyzing TLS Interception in Network Appliances. Proceedings of the 2018 on Asia Conference on Computer and Communications Security (New York, NY, USA, May 2018), 399–412.

[10] DPDK: Data Plane Development Kit: https://www.dpdk.org

[11] Shanmugasundaram, K., Brönnimann, H. and Memon, N.D., Payload attribution via hierarchical Bloom filters. Proceedings of the 11th ACM Conference on Computer and Communications Security (Washington, USA, Oct. 2004), 31–41.

[12] Bloom, B.H., Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors. Communications of the ACM. 13, 7 (1970), 422–426.

[13] Roussev, V., Hashing and data fingerprinting in digital forensics. IEEE Security & Privacy. 7, 2 (2009), 49–55.

[14] Ponec, M., Giura, P., Brönnimann, H. and Wein, J., Highly efficient techniques for network forensics. Proceedings of the 14th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS '07) (Alexandria, USA, Oct. 2007), 150–160.

[15] Ponec, M., Giura, P., Wein, J. and Brönnimann, H., New payload attribution methods for network forensic investigations. ACM Transactions on Information and System Security. 13, 2 (2010), 1–32.

[16] Haghighat, M.H., Tavakoli, M. and Kharrazi, M., Payload attribution via character dependent multi-Bloom filters. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 8, 5 (2013), 705–716.

[17] Hosseini, S.M. and Jahangir, A.H., An effective payload attribution scheme for cybercriminal detection using compressed bitmap index tables and traffic downsampling. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 13, 4 (Apr. 2018), 850–860.

[18] Hosseini, S.M., Jahangir, A.H. and Kazemi, M., Digesting network traffic for forensic investigation using digital signal processing techniques. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 14, 12 (2019), 3312–3321.

[19] mitmproxy: https://mitmproxy.org/. Accessed: 2023-04-08.

[20] SSLsplit: https://www.roe.ch/SSLsplit.

[21] Lesniewski-Laas, C. and Kaashoek, M.F., SSL Splitting: Securely Serving Data from Untrusted Caches. 12th USENIX Security Symposium (2003).

[22] Wilkens, F., Haas, S., Amann, J. and Fischer, M., Passive, Transparent, and Selective TLS Decryption for Network Security Monitoring. (2022), 87–105.

[23] Sherry, J., Lan, C., Popa, R.A. and Ratnasamy, S., BlindBox: Deep packet inspection over encrypted traffic. Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication - SIGCOMM '15 (London, United Kingdom, Aug. 2015), 213–226.

[24] Fan, J., Guan, C., Ren, K., Cui, Y. and Qiao, C., SPABox: Safeguarding privacy during deep packet inspection at a middleBox. IEEE/ACM Transactions on Networking. 25, 6 (2017), 3753–3766.

[25] Ning, J., Poh, G. Sen, Loh, J.C., Chia, J. and Chang, E.C., PrivDPI: Privacy-Preserving Encrypted Traffic Inspection with Reusable Obfuscated Rules. Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (New York, NY, USA, Nov. 2019), 1657–1670.

[26] Ning, J., Huang, X., Poh, G. Sen, Xu, S., Loh, J.-C., Weng, J. and Deng, R.H., Pine: Enabling Privacy-Preserving Deep Packet Inspection on TLS with Rule-Hiding and Fast Connection Establishment. European Symposium on Research in Computer Security (2020), 3–22.

[27] Damie, M., Hahn, F. and Peter, A., A Highly Accurate Query-Recovery Attack against Searchable Encryption using Non-Indexed Documents. 30th USENIX Security Symposium (2021), 143–160.

[28] Ning, J., Xu, J., Liang, K., Zhang, F. and Chang, E.-C., Passive Attacks Against Searchable Encryption. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 14, 3 (2019), 789–802.

[29] Xu, H., Zhou, Y., Ming, J. and Lyu, M., Layered obfuscation: a taxonomy of software obfuscation techniques for layered security. Cybersecurity. 3, 1 (Dec. 2020), 1–18.

[30] Palanisamy, R., Norman, A.A. and Kiah, M.L.M., Compliance with Bring Your Own Device security policies in organizations: A systematic literature review. Computers & Security. (2020), 101998.

[31] Safa, N.S., Von Solms, R. and Furnell, S., Information security policy compliance model in organizations. Computers & Security. 56, (2016), 70–82.

[32] Achleitner, S., Burke, Q., McDaniel, P., Jaeger, T., La Porta, T. and Krishnamurthy, S., MLSNet: A policy complying multilevel security framework for software defined networking. IEEE Transactions on Network and Service Management. 18, 1 (2021), 729–744.

[33] Perales, A.P., Adding Support for Automatic Enforcement of Security Policies in NFV Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking. 27, 2 (2019), 707–720.

[34] Lara, A. and Ramamurthy, B., OpenSec: Policy-Based Security Using Software-Defined Networking. IEEE Transactions on Network and Service Management. 13, 1 (2016), 30–42.

[35] Mozilla's webRequest APIs: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Mozilla/Add-ons/WebExtensions/API/webRequest.

[36] Docker virtualization platform: https://www.docker.com.

[37] Merkel, D. 2014. Docker: lightweight Linux containers for consistent development and deployment. Linux Journal. 2014, 239 (2014).

[38] Naik, N., Migrating from virtualization to dockerization in the cloud: Simulation and evaluation of distributed systems. IEEE 10th International Symposium on the Maintenance and Evolution of Service-Oriented and Cloud-Based Environments (MESOCA) (Raleigh, USA, Oct. 2016), 1–8.

[39] Ramalho, F. and Neto, A., Virtualization at the network edge: A performance comparison. IEEE 17th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM) (Coimbra, Portugal, Jun. 2016), 1–6.

[1] Confidentiality
[2] Integrity
[3] Data exfiltration
[4] Deep packet inspection
[5] Network forensics
[6] Payload attribution
[7] Post-mortem investigations
[8] Connection
[9] Worm
[10] Plain

[11] Transport Layer Security
[12] Client
[13] Server
[14] Authorized
[15] Authenticated
[16] False positive
[17] Forensic analyst
[18] Hash
[19] Wild-card character
[20] Character
[21] Polymorphic worms
[22] Packet
[23] Link
[24] TLS interception
[25] Middlebox
[26] Man-in-the-middle
[27] Browser
[28] Proxy
[29] Terminate
[30] TLS session splitting
[31] Perfect forward secrecy
[32] Authenticated encryption with associated data
[33] Cipher suite
[34] Searchable encryption
[35] Flow
[36] Honest-but-curious
[37] Soundness
[38] Completeness
[39] Gateway
[40] Hash-based message authentication code
[41] Hard-code
[42] Obfuscation
[43] Buffer
[44] Switch
[45] Polling
[46] End-to-end
[47] Cache

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 139-154

An Architecture, Implementation, and Evaluation of Internet of Healthcare Things Ecosystem Platform

Sayed Gholam Hassan Tabatabaei[1]*, Sarvenaz Aghadavoudi[2]
[1] Department of Electrical & Computer Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
[2] Department of Electrical & Computer Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Received: 25 April 2024, Revised: 26 December 2024, Accepted: 18 January 2025
Paper type: Research

Abstract

Nowadays, healthcare delivery has shifted from in-person appointments with doctors to disease prediction through remote monitoring, and healthcare has shifted from a traditional hospital-centric approach to a distributed patient-centric approach. It is important to use the Internet of Things as a technology that can provide a distributed patient-centric approach. Providing an architecture and, consequently, a platform that can meet this need is very valuable for healthcare organizations and related institutions, because prevention costs are considered more economical for citizens and the government than treatment costs. To respond to the issues raised, a conceptual architecture based on the integration of IoT technologies, 5G, fog/edge computing, cloud computing, network slicing, software-defined networking, and network function virtualization has been presented for electronic monitoring of citizens' health. A variety of medical and environmental sensors have been used to monitor citizens and their environmental conditions in real time and over time; Therefore, the main goal of this research is to present an IoT technology ecosystem architecture in the health sector in order to improve the quality and level of health of citizens and respond to health issues as a cost-effective solution. The ecosystem is specific to the health sector and cannot be used in other sectors due to the provision of health network slices. The results obtained from evaluating the solution based on efficiency and scalability criteria indicate the desirability of the solution because the execution time for up to 100 nodes has been calculated to be less than 1 second. The architecture can be implemented and used on a large scale and at the same time maintain its appropriate efficiency. In the proposed solution, the risk of premature loss of life in citizens is reduced because by real-time monitoring of citizens without a history of illness and citizens with a history of illness under care in the event of a critical situation, the percentage of life losses will be reduced with timely assistance, and the result of using this solution will be in the interest of user organizations and institutions.

Keywords: Internet of Things (IoT), 5G, Network Slicing, Cloud Computing, Software Defined Networking (SDN), Network Function Virtualization (NFV).

* Corresponding Author's email: tabatabaei@mut.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۳۹ الی ۱۵۴

ارائه معماری،پیاده‌سازی و ارزیابی سکوی زیست‌بوم اینترنت اشیای حوزه سلامت

سیدغلامحسن طباطبائی [۱]*، سروناز آقاداودی [۲]

[۱] مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

[۲] مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

امروزه ارائه خدمات مراقبت‌های بهداشتی از قرار ملاقات حضوری با پزشکان به‌پیش بینی بیماری از طریق نظارت از راه دور تبدیل‌شده و مراقبت‌های بهداشتی از رویکرد سنتی متمرکز بر بیمارستان، به رویکرد بیمار محور توزیع‌شده تغییر یافت است. بکارگیری اینترنت اشیا به‌عنوان فناوری که توانایی فراهم کردن رویکرد بیمار محور توزیع‌شده را دارد امری حائز اهمیت است. ارائه معماری و به تبع آن سکویی که بتواند این نیاز را مرتفع کند برای سازمان‌های بهداشتی و نهادهای مربوطه بسیار ارزشمند محسوب می‌شود به‌این‌علت که هزینه‌های پیشگیری برای شهروندان و دولت به‌صرفه‌تر از هزینه‌های درمان لحاظ می‌گردد. برای پاسخ‌دهی به مسائل مطرح‌شده، معماری مفهومی بر اساس تلفیق فناوری‌های اینترنت اشیا، 5G، رایانش مه/لبه، رایانش ابری، برش شبکه، شبکه نرم‌افزار محور و مجازی‌سازی توابع شبکه برای مانیتورینگ الکترونیک سلامت شهروندان ارائه‌شده است. از انواع حسگرهای پزشکی و محیطی برای رصد لحظه‌ای و دوره‌ای شهروندان و شرایط محیطی آنان استفاده‌شده است؛ بنابراین هدف اصلی این تحقیق ارائه یک معماری زیست‌بوم فناوری اینترنت اشیا حوزه سلامت در راستای ارتقاء کیفیت و سطح سلامت شهروندان و پاسخگویی به مسائل حوزه سلامت به‌عنوان راهکاری مقرون‌به‌صرفه است. زیست‌بوم مذکور مختص حوزه سلامت بوده و به دلیل ارائه برش‌های شبکه سلامت در دیگر حوزه‌ها نمی‌توان آن را بکار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی راهکار مبتنی بر معیارهای کارایی و مقیاس‌پذیری، نشان‌دهنده مطلوب بودن راهکار مذکور می‌باشد زیرا زمان اجرا تا ۱۰۰ گره زیر یک ثانیه محاسبه گردیده است. معماری مذکور می‌تواند در مقیاس بزرگ پیاده‌سازی و بکار گرفته شود و درعین‌حال کارایی مناسب خود را حفظ نماید. در راهکار پیشنهادی خطر خسارات جانی نابهنگام در شهروندان کاهش پیدا می‌کند به دلیل اینکه با پایش لحظه‌ای شهروندان بدون سابقه بیماری و شهروندان دارای سابقه بیماری تحت مراقبت در صورت وقوع موقعیت بحرانی با امدادرسانی به‌موقع از درصد تلفات جانی کاسته خواهد شد و نتیجه استفاده از این راهکار به نفع سازمان‌ها و نهادهای استفاده‌کننده خواهد بود.

کلیدواژگان: اینترنت اشیا، شبکه نسل پنجم، برش‌بندی شبکه، رایانش ابری، شبکه نرم‌افزارمحور، مجازی‌سازی توابع شبکه.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: tabatabaei@mut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه مراقبت‌های بهداشتی از رویکرد سنتی متمرکز بر بیمارستان، به رویکرد بیمار محور توزیع‌شده تغییر یافت است. یعنی از مرحله قرار ملاقات حضوری با پزشکان به مرحله پیشگیری از طریق نظارت از راه دور رسیدیم. لازمه‌ی رویکرد بیمارمحور توزیع‌شده، استفاده از اینترنت اشیا می‌باشد. اینترنت اشیا اصطلاحی است که تعامل میلیاردها شیء در سراسر جهان را فراهم می‌کند و امکان ادراک دستگاه‌های متصل‌به‌هم را فراهم می‌کند. اینترنت اشیا به‌عنوان یک بستر در مراقبت‌های بهداشتی عمل می‌کند و نقش بسیار مهمی در حوزه‌های وسیعی از خدمات پزشکی دارد. به‌طور کامل صنعت پزشکی را از طریق بازتعریف کردن نقش اپلیکیشن‌ها یا دستگاه‌ها و شیوه ارتباط افراد در ارائه راهکارهای پزشکی، متحول کرده و می‌تواند در زمینه‌های مختلف پزشکی ازجمله سیستم مراقبت از راه دور بیماران، مراقبت از سالمندان، برنامه‌های رژیم و تناسب‌اندام و سیستم هشداردهنده موارد اورژانسی و همچنین برنامه‌ای که در آن پزشک می‌تواند پس از ترخیص بیمار از بیمارستان، بیمار خود را تحت نظر داشته باشد، مورداستفاده قرار گیرد. امروزه هزینه‌های درمان برای بیماران و دولت در حال طی کردن شیب صعودی است به همین دلیل شکل‌گیری سکویی که بتواند کادر درمان را به یک مرحله قبل یعنی پیشگیری از بیماری منتقل کند نویدبخش کاهش ضریب بیماری در شهروندان و کاهش چشمگیر هزینه‌های درمان خواهد بود. در بحث پیشگیری و مانیتورینگ سلامت، فقط افراد بیمار جامعه هدف نیستند بلکه پایش افراد سالم هم حتماً باید انجام گیرد به این دلیل که در حال حاضر دولت‌ها به‌اندازه کافی روی بحث پیشگیری متمرکز نیستند و اکثر توجه‌ها به سمت تشخیص و درمان معطوف می‌باشد و درنهایت هزینه‌های زیادی به دولت و جامعه تحمیل‌شده است. پس بحث پیشگیری بسیار حائز اهمیت می‌باشد اینکه افراد سالم هم به‌صورت دوره‌ای پایش شوند. توسعه تعامل‌پذیری مبتنی بر زیست‌بوم حوزه سلامت دغدغه و مسئله اصلی می‌باشد چون داده‌های زیادی در حوزه سلامت به وجود آمده که این داده‌ها از منابع زیادی دریافت می‌شوند. تا قبل از اینترنت اشیا حوزه سلامت، هیچ‌گونه سکوی مشخصی که بتواند تعامل بین داده‌های مختلف را برقرار کند وجود نداشت اما امروزه می‌توان سکوی مشترکی را در حوزه سلامت ایجاد کرد تا حسگرها و محرک‌های مختلفی که داده‌های حوزه سلامت را تولید می‌کنند به سکو وصل کرد و از این طریق بین داده‌ها ارتباط برقرار کرد تا فکت احصا شود. به‌عنوان‌مثال قبلاً این امکان وجود نداشت که یک اپیدمی در کشور کشف شود ولی امروزه با توجه به اینکه تمام داده‌ها در یک سکو دریافت می‌شوند و مورد تحلیل قرار می‌گیرند به‌راحتی می‌توان کشف اپیدمی‌های مختلف در حوزه سلامت انجام گیرد و پیشگیری‌های لازم لحاظ شود بنابراین پیشگیری با توجه به این تعامل‌پذیری که بین داده‌های مختلف در حوزه اینترنت اشیا حوزه سلامت اتفاق افتاده بسیار حائز اهمیت است. . در میان فناوری‌های مختلف، فناوری‌های ارتباطی امکان ارائه خدمات مراقبت‌های بهداشتی شخصی و از راه دور را فراهم کرده‌اند. تا پیش‌ازاین، مراقبت‌های بهداشتی مدرن و برنامه‌های کاربردی به‌طور گسترده از شبکه 4G استفاده می‌کردند. با این وجود، نگرانی بابت سلامت هوشمند در سراسر جهان وجود دارد. همان‌طور که بازار مراقبت‌های بهداشتی هوشمند گسترش می‌یابد، تعداد برنامه‌های کاربردی متصل به شبکه، داده‌هایی را تولید می‌کند که در اندازه و فرمت متفاوت است. این امر تقاضاهای پیچیده‌ای را بر روی شبکه ازنظر پهنای باند، نرخ داده و تأخیر و سایر عوامل ایجاد می‌کند. همان‌طور که این بازار هوشمند مراقبت‌های بهداشتی بالغ می‌شود، نیازهای اتصال برای تعداد زیادی دستگاه و ماشین را ضروری می‌کند. فعالیت‌های این حوزه، نیاز به ارتباطات باقابلیت اطمینان فوق‌العاده و تأخیر کم دارند. از طرفی جامعه ممکن است در پاندمی بیماری قرار بگیرد که نیاز به منابع محاسباتی به‌شدت افزایش‌یافته که در زمان‌های دیگر این منابع باید آزاد گردند. همچنین اقتصادی بودن هزینه‌های پیاده‌سازی منابع و کنترل متمرکز این زیست‌بوم در عین توزیع‌شدگی وسیع آن‌هم موردتوجه است.

پس به یک معماری مفهومی نیاز است تا تلفیق فناوری‌هایی مثل اینترنت اشیا، 5G، MEC/FEC، رایانش ابری، برش شبکه، شبکه نرم‌افزارمحور و مجازی‌سازی توابع شبکه برای مانیتورینگ الکترونیک سلامت شهروندان را فراهم سازد. تلاش شده با پارادایم‌های تلفیقی محاسباتی اینترنت اشیا مثل رایانش ابری برای ذخیره‌سازی دائمی به همراه پردازش‌های سنگین و FEC/MEC برای ذخیره‌سازی موقت به همراه پردازش‌های سریع را پوشش داد، شبکه غیر سلولار برای جمع‌آوری دیتای مربوط به وضعیت سلامت کاربران که از حسگرهای پزشکی و محیطی دریافت می‌شوند و شبکه سلولار برای مأموریت‌های بحرانی بکار گرفته خواهد شد. بهره‌مندی از شبکه سلولار 5G بجای 4G برای مأموریت‌های بحرانی به دلیل نیاز به ارتباطات باقابلیت اطمینان فوق‌العاده و تأخیر کم و تحقق اهداف این شبکه با استفاده از فناوری‌های برش شبکه، شبکه نرم‌افزار محور و مجازی‌سازی توابع شبکه. پیاده‌سازی شبکه‌های مجازی حوزه سلامت با کاربرد متفاوت باقابلیت افزایش و کاهش منابع محاسباتی در دوره پاندمی و خارج از آن با فناوری برش شبکه محقق می‌گردد. مدیریت متمرکز این شبکه توزیع‌شده از بیماران از

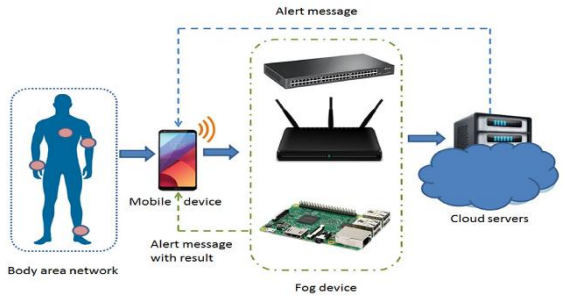
طریق فناوری شبکه نرم‌افزار محور حاصل می‌گردد و می‌توان هزاران مرکز پزشکی هوشمند مانند بیمارستان‌های مختلف را از طریق یک پلتفرم هدایت کرد و لازم نیست که هر مرکز پزشکی برای خودش به‌صورت ادهاک یک معماری جدا داشته باشد. کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی منابع (محاسبات، ذخیره‌سازی و شبکه) از طریق فناوری مجازی‌سازی توابع شبکه حاصل می‌گردد.

می‌توان نتیجه گرفت که هدف اصلی این تحقیق ارائه یک معماری زیست‌بوم فناوری اینترنت اشیا حوزه سلامت از تلفیق فناوری‌های مذکور است که از بطن آن نیز سکویی طراحی و ارزیابی گردیده که خطر خسارات جانی نابهنگام در شهروندان کاهش می‌دهد به دلیل اینکه با پایش لحظه‌ای شهروندان بدون سابقه بیماری و شهروندان دارای سابقه بیماری تحت مراقبت در صورت وقوع موقعیت بحرانی با امدادرسانی به‌موقع از درصد تلفات جانی کاسته خواهد شد.

در این مقاله در بخش اول معماری مفهومی پیشنهادی زیست‌بوم فناوری اینترنت اشیاء حوزه سلامت در سطح اول و دوم، اجزا و مؤلفه‌های مختلف معماری، فناوری‌های هر بخش از معماری، پروتکل‌های انتخابی ارائه شده است. در بخش دوم برش‌های نوین برای بهره‌گیری در زیست‌بوم فناوری اینترنت اشیا حوزه سلامت به همراه ویژگی‌های مختص هر برش از شبکه احصا گردیده است.در بخش سوم نمودار توالی معماری طبق سناریویی مشخص ارائه خواهد شد. در بخش چهارم پیاده سازی سکو از بطن معماری به نمایش گذاشته خواهد شد و در بخش پنجم ارزیابی کار ارائه خواهد گردید.

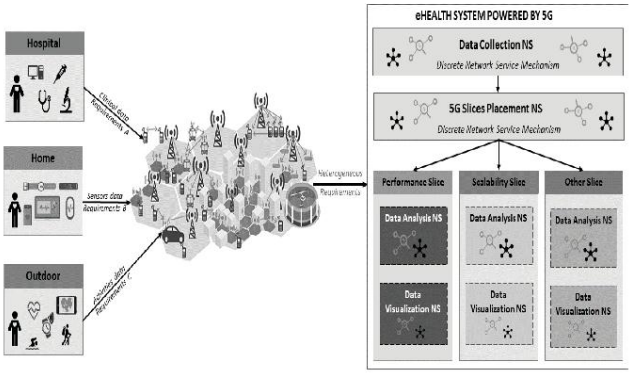
۲- مروری بر معماری‌های پیشین

مقاله[۱] یک چارچوب مراقبت‌های بهداشتی سیار را بر اساس شبکه مشارکتی لبه-مه-ابر طبق شکل ۱پیشنهاد می‌کند. از دستگاه‌های لبه و مه برای نظارت بر سلامت استفاده می‌کند و از ابر برای تجزیه‌وتحلیل بیشتر داده‌های سلامت در صورت وضعیت سلامت غیرعادی استفاده می‌کند. تأخیر و مصرف انرژی دستگاه کاربر را به ترتیب ۲۸٪ و ~۲۷٪ نسبت به مدل مراقبت بهداشتی ابری کاهش می‌دهد. همچنین نشان می‌دهد که مدل پیش‌بینی پیشنهادی دقت و کارایی زمان بهتری نسبت به مدل‌های موجود دارد. در این مقاله از شبکه نسل پنجم برای بهره‌برداری بیشتر استفاده نشده و همگرایی IoHT[1] و 5G محقق نگردیده است و به‌تبع عدم به‌کارگیری شبکه نسل پنجم معیارهایی که این شبکه به همراه دارد مثل افزایش توان عملیاتی، پهنای باند بالا، قابلیت اطمینان، کاهش مصرف شبکه،کیفیت خدمات و امنیت حاصل نگشته است و فناوری‌های نوینی همچون NFV،SDN و برش شبکه نیز بکار گرفته نشده‌اند.



شکل ۱-چارچوب اینترنت اشیای حوزه سلامت مبتنی بر ابر-مه-لبه [۱]

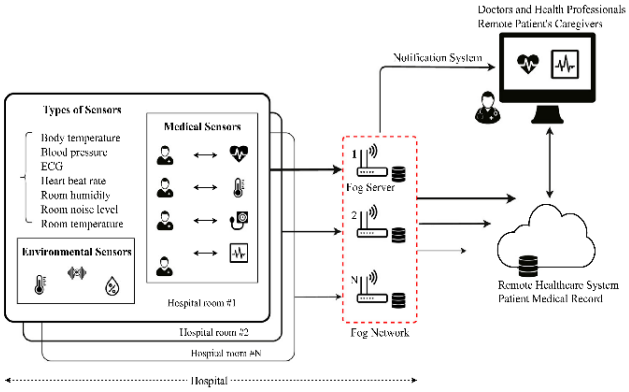
مقاله[۲] اشاره دارد که یک چالش کلیدی، میزان داده‌های پزشکی و نحوه انتقال و پردازش آن‌هاست. فرمت‌ها، نرخ‌ها و اندازه‌های مختلف مجموعه داده‌ها به‌طور مداوم در حال افزایش است و نیاز به یک سیستم سلامت الکترونیکی را که هوشمند و کارآمد باشد، افزایش می‌دهد. درعین‌حال، باید الزامات رویکردهایی را که هدف آن تجزیه‌وتحلیل داده‌های پزشکی است، به سمت مراقبت‌های بهداشتی کارآمد، ترکیب و تسهیل کند. با بهره‌گیری از قابلیت‌های نوظهور 5G، برش شبکه به‌عنوان یک‌راه حل امیدوارکننده در مورد نیازهای ناهمگن داده‌های پزشکی و محدودیت‌های متنوع آن‌ها پیش‌بینی‌شده است. در این مقاله یک سیستم سلامت الکترونیک نوآورانه طبق شکل ۲ پیشنهاد می‌شود که با برش‌بندی شبکه 5G، به‌منظور برآورده کردن الزامات برای ایجاد یک شبکه کارآمد با ظرفیت بالا، ارائه می‌شود. داده‌های مراقبت‌های بهداشتی در داخل برش‌های مجزا و ایزوله برای تولید دیدگاه کلی‌نگر بیماران جمع‌آوری و مدیریت می‌شوند درحالی‌که آگاهی در مورد سلامت بیماران و کیفیت خدمات افزایش پیدا می‌کند. در این مقاله فناوری‌هایی همچون لبه، مه،NFV و SDN بکار گرفته نشده‌اند .



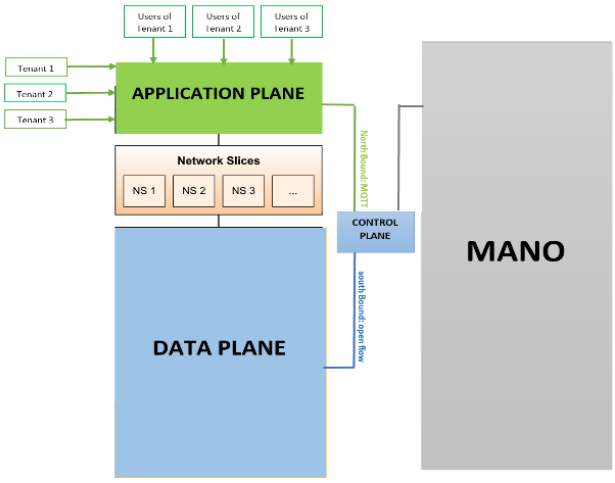
شکل ۲- معماری سیستم سلامت الکترونیکی با برش‌های شبکه 5G [۲]

[1] Internet of healthcare things

مقاله [۳] به مطالعه سهم الگوی محاسبات مه در مراقبت‌های بهداشتی می‌پردازد و مزایای اصلی آن را در مورد تأخیر، مصرف شبکه و مصرف انرژی برجسته می‌کند. بر اساس این پارامترها، یک سیستم پایش سلامت به کمک مه طبق شکل ۳ پیشنهادشده و ارزیابی و نمایش عملکرد آن انجام می‌شود. نتایج، نشان‌دهنده افزایش بالقوه این رویکرد برای به حداقل رساندن ترافیک داده‌ها در هسته شبکه است، زیرا داده‌ها به‌صورت محلی تجزیه و تحلیل می‌شوند. در این مقاله از شبکه نسل پنجم برای بهره‌برداری بیشتر استفاده نشده و همگرایی IoHT و 5G محقق نگردیده است و به‌تبع عدم به‌کارگیری شبکه نسل پنجم معیارهایی که این شبکه به همراه دارد مثل کارایی، پهنای باند بالا، قابلیت اطمینان و کیفیت خدمات حاصل نشده است و فناوری‌هایی همچون SDN، NFV، لبه و برش شبکه نیز بکار گرفته نشده‌اند.



شکل ۳-معماری سه لایه اینترنت اشیا حوزه سلامت[۳]



شکل ۴-معماری مفهومی سطح یک پیشنهادی اینترنت اشیا حوزه سلامت

۳- معماری مفهومی پیشنهادی

۳-۱- معماری مفهومی سطح یک

در شکل ۴ معماری مفهومی با تفکر SDN[1] ارائه‌شده است که در آن آن تمام بخش‌ها و مؤلفه‌های تفکر معماری‌های پیشین نیز موجود است. با رفتن به سمت SDN مؤلفه‌های پایه در معماری‌های سنتی حفظ خواهند شد و ماهیت آن‌ها تغییر نخواهد کرد. معماری مبتنی بر SDN، مبتنی بر فناوری نیست بلکه تفکر SDN مطرح می‌کند که به صورت سرویس‌گرا سه لایه را از هم مجزا کنیم حال هر مفهوم و فناوری می‌تواند در آن قرار گیرد و هر فناوری دیگری نیز می‌تواند ظهور کرده و در SDN خودش را تطبیق دهد. یکی از نوآوری‌هایی که می‌تواند اتفاق بیفتد این است که هزاران بیمارستان هوشمند در جایگاه مستأجر از طریق یک پلتفرم هدایت شوند مثل ارائه بیمارستان به‌عنوان سرویس[2] است و لازم نیست که هر بیمارستان برای خودش به‌صورت ادهاک[3] یک معماری جدا داشته باشد. SDN به‌تنهایی نمی‌توانست پاسخگوی نیازمندی‌های 5G باشد پس مفهوم NFV[4] مطرح شد که با تلفیق SDN توانست کل شبکه 5G را محقق کند. معماری تلفیقی ارائه‌شده تحت عنوان SDNFV راهکار اصلی برای 5G در نظر گرفته می‌شود که نقص های معماری های پیشین را جبران خواهد کرد:

Data Plane : لایه داده (d-plane)[5] انواع دیوایس‌ها که در معماری سنتی در لایه فیزیکی قرار دارند در معماری پیشنهادی در d-plane قرار خواهند گرفت. تمام تجهیزات ازجمله حسگرها و محرک‌ها، اکسس پوینت MEC/FEC[6] که نقش Gateway را ایفا می‌کند، روترها و سوئیچ‌ها یا تجهیزات فیزیکی متعلق به مؤلفه 5G مانند آنتن‌های BTS در این لایه قرار می‌گیرند؛ اما کنترل و هدایت آن‌ها کاملاً در c-plane[7] اتفاق می‌افتد.

Network Slices: فناوری برش شبکه (NS)[8] به‌صورت توزیع‌شده در همه لایه‌های SDN قرار دارد چون برش شبکه یک مفهوم می‌باشد بنابراین در لایه‌های مختلف SDN به‌صورت توزیع‌شده حضور خواهد داشت. با توجه به کاربردهای مختلف، برش‌های متنوع در 5G تشکیل خواهند شد.

Application Plane: اپلیکیشن‌های مختلف در این لایه متمرکزشده‌اند که از طریق اپ استور گوگل[9] در دسترس عموم

[1] Software defined network
[2] Hospital as a service
[3] Ad-Hoc
[4] Network function virtualization
[5] Data plane
[6] Multi access edge computing /fog and edge computing
[7] Control plane
[8] Network slicing
[9] google app store

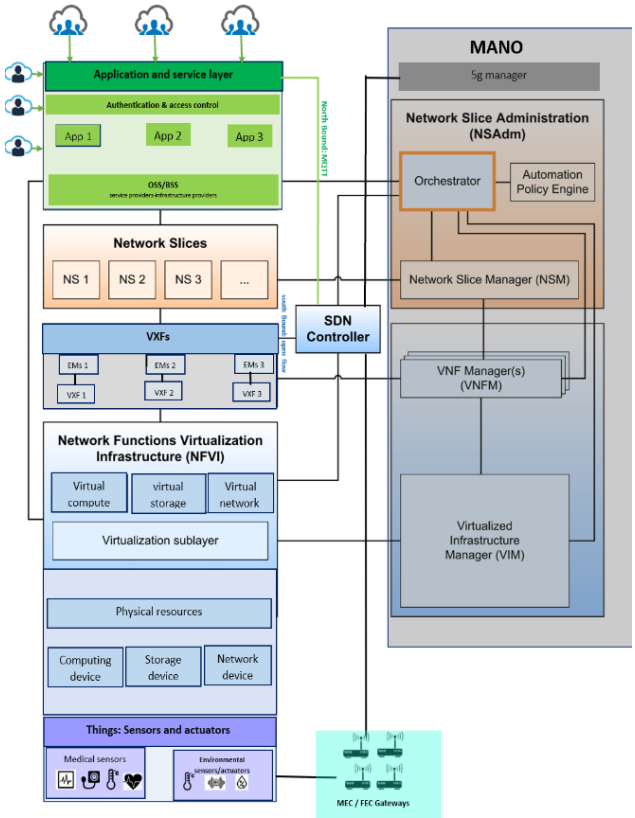
قرار خواهند گرفت. برنامه‌های مذکور با c-plane ارتباط برقرار می‌کنند و از طریق c-plane با تمام دستگاه‌ها مثل حسگرها و محرک‌ها در لایه d-plane ارتباط برقرار می‌کنند. هر شخص ثالثی می‌تواند برنامه جدیدی را در اپ استور اضافه کند.

Tenants: مستأجر برش شبکه، یک برش شبکه را از MANO به دست می‌آورد و از معماری پیشنهادی برای ارائه یک سرویس خاص به مشتریان خود استفاده می‌کند. مستأجر درگیر کارهای فنی شبکه‌ای نمی‌شود و به‌راحتی سرویس‌ها را as a service دریافت می‌کند. هر مستأجر می‌تواند یک بیمارستان باشد و منظور از کاربر مستأجر بیماران، پزشکان و پرستاران می‌باشد.

Control Plane: پارادایم SDN این توانایی را دارد که data-plane را از c-plane، یعنی جایی که تصمیمات مسیریابی[1] گرفته می‌شود جدا کند. در SDN مغز متفکر معماری، NOS[2] است که در c-plane قرار دارد و هدایت اصلی شبکه پایش سلامت را انجام می‌دهد. در تفکر SDN عمده دیوایس‌ها به سمت dummy device در حال حرکت هستند یعنی تغییرات روی تجهیزات[3] کمتر اتفاق می‌افتد و از طریق c-plane تغییرات روی عمده دیوایس‌ها اعمال می‌شود. به این سبب تغییرات سریع‌تر روی سخت‌افزارها اعمال می‌شود بدون اینکه تحولات اساسی روی معماری‌های فیزیکی سخت‌افزاری ایجاد شود. به همین دلیل هزینه تغییرات در شبکه به‌شدت کاهش پیدا خواهد کرد. در نسل‌های پیشین باعرضه ورژن جدید از سخت‌افزار به‌عنوان‌مثال سوئیچ، باید کل سوئیچ‌های قبلی تغییر می‌کرد که هزینه زیادی تحمیل می‌شد اما دنیای امروز به دنبال تغییرات سخت‌افزاری نبوده بلکه تمرکز روی هوشمند سازی سوئیچ‌ها و روترها می‌باشد که این هوشمند سازی کاملاً نرم‌افزاری صورت می‌گیرد.

MANO: مؤلفه مدیریت و هماهنگ‌کننده (MANO)[4]، مؤلفه‌ای است که مدیریت و هماهنگی معماری را بر عهده دارد. عملکرد تمام لایه‌ها توسط این لایه نظارت و مدیریت می‌شود.

5G Component: مؤلفه 5G در SDN به‌صورت توزیع‌شده حضور دارد، به عنوان مثال تجهیزات فیزیکی متعلق به آن مانند آنتن‌های BTS در D-plane و شبکه اصلی[5] آن‌که مدیریت کل شبکه را انجام می‌دهد در c-plane قرار می‌گیرد و اپلیکیشن‌های آن نیز در app-plane قرار دارند.



شکل ۵-معماری مفهومی سطح دو پیشنهادی اینترنت اشیا حوزه سلامت

Cloud: مؤلفه ابر نیز در SDN به‌صورت توزیع‌شده قرار دارد. تجهیزات آن مثل روترها و سوئیچ‌ها در D-plane، برنامه‌های نرم‌افزار به‌عنوان سرویس (Saas)[6] در app-plane و هماهنگ‌کننده[7] نیز در c-plane قرار می‌گیرد.

۳-۲- معماری مفهومی سطح دو

در شکل ۵ بلوک‌های معماری از پایین به بالا به شرح زیر می‌باشد:

Sensors and actuators layer: تمامی حسگرها و محرک‌ها از طریق Non-Cellular MEC/FEC Gateways به مؤلفه 5G Manger متصل هستند. شبکه غیرسلولار[8] با شبکه سلولار نسل پنجم تعامل دارد. حسگرها به دودسته حسگرهای پزشکی و محیطی تقسیم می‌شوند.

MEC/FEC Gateway layer: در این لایه، از Non-Cellular LoRa Gateways استفاده می‌شود. Gateways می‌تواند اکسس پوینت باشد. این لایه نزدیک‌ترین لایه به لایه فیزیکی و جمع‌آوری‌کننده داده‌ها از حسگرها می‌باشد. در FEC/MEC داده‌ها به‌صورت موقت ذخیره می‌شوند که در صورت مفقود شدن

[1] routing decisions
[2] Network operating system
[3] appliance
[4] management and orchestration
[5] core network
[6] Software as a service
[7] coordinator
[8] non-cellular

بسته‌های داده ارسالی دوباره ارسال شوند و یکسری آنالیز اولیه برای بررسی استاندارد بودن فرمت داده‌ها و درست بودن محتوا صورت می‌گیرد و پردازش رویداد هم انجام می‌گیرد که اگر وضعیت داده سلامت شهروند خارج از رنج طبیعی باشد هشدار ابتدایی برای کاربر ارسال گردد (مثلاً ضربان قلب شما در حال بالا رفتن است یا هوای اطراف شما بسیار آلوده است). علاوه بر ارسال پیام از پایین به لایه‌های بالا، در زمان دریافت پیام از لایه بالا نیز بررسی‌های لازم صورت گرفته و به حسگر و یا اجراکننده مربوطه ارسال می‌شوند (ارائه برنامه جامع سبک زندگی به کاربر).

NFVI layer: زیرساخت مجازی توابع شبکه (NFVI)[1] منابع سخت‌افزاری را به عنوان محیط‌های مجازی برای VNF ها فراهم می‌کند. یک محیط محاسباتی مقیاس‌پذیر است که وظیفه میزبانی VNF ها را به همراه EMS دارد.[۴]

این لایه دارای سه مؤلفه زیر می‌باشد: [۴]

Physical Resources: این لایه منابع سخت‌افزاری مثل (محاسبات، فضای ذخیره‌سازی، پهنای باند و غیره) را به برش‌های شبکه تخصیص می‌دهد.

Virtualization Sublayer: در این لایه هایپروایزر وجود دارد که وظیفه تولید، کنترل و مدیریت ماشین‌های مجازی را بر عهده دارد. اشتراک منابع سخت‌افزاری را بین instances های برش شبکه، فعال و نظارت می‌کنند و وظیفه جدا کردن منابع نرم‌افزاری از منابع سخت‌افزاری را بر عهده دارد. این یک لایه انتزاعی است که فقط منابع سخت‌افزاری مورد نیاز را به صورت پویا در معرض نرم‌افزار VNF های پیاده‌سازی شده قرار می‌دهد. دو نوع اصلی هایپروایزر وجود دارد: نوع اول bare metal مانند VMware ESXi و KVM. نوع دوم hosted مثل Oracle Virtual Box.

Virtual Resources: منابعی انتزاعی از منابع سخت‌افزاری هستند که از طریق لایه Hypervisor در دسترس VNF ها قرار می‌گیرند تا برای مقاصد آن‌ها استفاده شود؛ مانند virtual network، virtual storage،virtual compute.

VXF layer: تابع شبکه مجازی شده (VNF)[2] یک نمونه مجازی‌سازی شده از یک تابع شبکه و عملیات انجام‌شده، به‌صورت مجازی بر روی یک سخت‌افزار است. این توابع شبکه به مجموعه‌ای از سرویس‌های شبکه اشاره دارند (مثل روترهای مجازی، فایروال‌ها و خدمات ترجمه آدرس شبکه (NAT)[3]) که می‌توانند در یک یا چند ماشین مجازی (VM)[4] مستقر شوند. این VNF ها شامل VM هایی هستند که نرم‌افزار را در بالای NFVi اجرا می‌کنند. اکثر VNF ها در VM ها روی نرم‌افزارهای زیرساخت مجازی‌سازی رایج مانند VMWare یا KVM اجرا می‌شوند.VNF ها را می‌توان مانند بلوک‌های ساختمانی در فرآیندی به نام زنجیره خدمات به هم مرتبط کرد. هم کانتینرها و هم VM ها قادر به اجرای VNF هستند. درحالی‌که ماشین‌های مجازی ممکن است انزوای منطقی کاملی را برای عملکرد VNF ها در یک برش شبکه ارائه دهند، اما ماهیت سبک‌وزن کانتینرها می‌تواند به‌طور مؤثر از برش‌های شبکه با کاربران بسیار متحرک پشتیبانی کند.[۴]

فراتر از بحث VNF، پیاده‌سازی انواع دیگر سرویس‌های مجازی شده نیز می‌تواند برای استقرار توابع خاصی در نظر گرفته شود که می‌توان به توابع مجازی VXF اشاره کرد. نمونه‌هایی از VXF ها می‌توانند از عملکردهای شبکه مانند متعادل‌کننده بار[5] یا فایروال گرفته تا سرویس‌های عمومی مانند پخش ویدئو[6] یا صدا را شامل شوند. VXF ها یک یا چند VM را اجرا می‌کنند که در NFVI در معرض دید و مستقر هستند. این لایه شامل مؤلفه زیر می‌باشد:

سیستم مدیریت عناصر (EMS)[7]: یک سیستم مدیریتی برای عناصر است که با VNF تعامل دارد و آن را مدیریت می‌کند. معمولاً یک VNF توسط یک EMS مدیریت می‌گردد که این سیستم مسئول تنظیم، نظارت و نگهداری خرابی، پیکربندی، حسابرسی، بررسی عملکرد و امنیت می‌باشد. معمولاً در برخی مواقع VNF و EMS را در قالب یک بلوک رسم می‌کنند اما می‌توانند به‌صورت جدا هم ترسیم شوند و اشاره دارد به برنامه کاربردی که یک سرویس از شبکه را ارائه می‌دهد.[۴]

Network slices layer: برش شبکه که در آن منابع شبکه به‌صورت مجزا قرار دارد و به مجموعه‌ای از کاربران با توجه به نیازهای خاص آن‌ها تخصیص داده می‌شود.[۴]

فناوری برش شبکه به‌صورت توزیع‌شده در همه لایه‌های SDN قرار دارد چون برش شبکه یک مفهوم می‌باشد بنابراین در لایه‌های مختلف SDN به‌صورت توزیع‌شده حضور خواهد داشت. با توجه به کاربردهای مختلف، برش‌های متنوع در 5G تشکیل خواهند شد.

Application and service layer: این لایه انتظارات کاربردی خاصی را از زیرساخت شبکه و عملکردهای شبکه نشان می‌دهد. وظیفه ارسال وضعیت پایش شده شهروندان به تیم پزشکی (پایین به بالا) و ارسال پیام از تیم پزشکی به شهروندان (بالا به پایین) را دارد. بحث احراز هویت و کنترل دسترسی هم در همین لایه

[1] Network Functions Virtualization Infrastructure
[2] Virtual network function
[3] Network address translation
[4] Virtual machine
[5] load balancers
[6] video streaming
[7] Element Management System

بررسی می‌گردد. این لایه شامل OSS/BSS است .OSS[1] سیستم‌های مدیریتی هستند که همراه با سیستم‌های پشتیبانی کسب‌وکار (BSS)[2]، به ارائه‌دهنده خدمات[3] در استقرار و مدیریت انواع خدمات ارتباطات راه دور (مانند سفارش، صدور صورتحساب، تمدید، عیب‌یابی و...) کمک کرده و به MANO در اجرای سیاست‌های شبکه، به‌صورت خودکار یا دستی کمک می‌کند.[۴]

Tenants and users of tenants: مستأجر[4] برش شبکه، یک برش شبکه را از MANO به دست می‌آورد و از معماری پیشنهادی برای ارائه یک سرویس خاص به کاربران[5] خود استفاده می‌کند. هر مستأجر می‌تواند یک شبکه عظیم IOHT[6] مستقل را شکل دهد. مستأجر درگیر کارهای فنی شبکه‌ای نمی‌شود و به‌راحتی سرویس‌ها را as a service دریافت می‌کند. هر مستأجر می‌تواند یک بیمارستان باشد و منظور از کاربر مستأجر هم بیماران، پزشکان و پرستاران می‌باشد. به‌عنوان‌مثال زمانی که قند خون یک شهروند پایش شود از جایگاه کاربر مستأجر[7] استفاده می‌شود.

MANO layer: مؤلفه دقیقی است که مدیریت و هماهنگی معماری را بر عهده دارد. عملکرد لایه‌های قبلی، توسط این لایه نظارت و مدیریت می‌شود. وظیفه اصلی این لایه شامل موارد زیر می‌باشد: [۴]

- ایجاد نمونه‌های شبکه مجازی[8] بر روی شبکه فیزیکی با استفاده از عملکرد لایه زیرساخت.
- حفظ ارتباط بین لایه سرویس/برنامه و چارچوب برش شبکه برای مدیریت چرخه حیات نمونه‌های شبکه مجازی و تطبیق یا مقیاس بندی پویا منابع مجازی شده.

این لایه شامل مؤلفه‌های زیر می‌باشد:

۱) VIM[9]: مؤلفه مدیر زیرساخت مجازی مسئول مدیریت NFVI و نظارت بر منابع است. VIM قادر به ایجاد، کنترل، نظارت و از بین بردن کل چرخه حیات ماشین‌های مجازی است که بر روی منابع فیزیکی عمومی نمونه‌سازی شده‌اند. VIM منابع مرتبط NFVI در یک برش شبکه را تخصیص، مدیریت و کنترل می‌کند و ارتباط آن‌ها یعنی زنجیره خدمات[10] و هدایت ترافیک[11] را مدیریت می‌کند. [۴]

۲) VNFM[12]: مسئول پیکربندی، مدیریت و نظارت بر هر یک از VxF هایی هستند که برش‌های شبکه را تشکیل می‌دهند. هر مدیر قادر است VxF های خود را برحسب تقاضا با عملکرد ارائه‌شده توسط هر برش شبکه، مستقر و پیکربندی یا حذف کند. VNFM مسئول مدیریت چرخه عمر یک یا چند نمونه VNF است که در یک برش شبکه اجرا می‌شوند. چنین فرآیندی شامل پیکربندی و نمونه‌سازی VNF با در نظر گرفتن یک الگوی برش شبکه و جمع‌آوری اطلاعات عملکرد NFVI مربوط به نمونه‌های برش شبکه[13] است.[۴]

۳) SDN controller: عنصر اصلی کنترل است که عناصر شبکه[14] متعلق به data plane را مدیریت می‌کند. کنترلر SDN به معماری پیشنهادی اجازه می‌دهد تا ارتباطات شبکه را به‌صورت بلادرنگ بین عناصر برش شبکه باهدف اطمینان از جنبه‌هایی مانند امنیت، حریم خصوصی و QoS کنترل کند.[۴]

۴) Orchestrator: ارکستراتور[15]، مدیریت عناصر فوق را به‌طور خودکار انجام می‌دهد. این مؤلفه با VIM، VNFM، SDN controller، NSM و OSS/BSS که خدمات مشتری را ارائه می‌دهد مرتبط می‌شود.[۴]

۵) NSAdm[16]: مدیریت برش شبکه شامل دو مؤلفه زیر است که مستقیماً با چرخه حیات برش‌های شبکه سروکار دارند.[۴]

- NSM[17]: مدیریت چرخه حیات برش‌های شبکه را انجام می‌دهد. [۴]
- Automation Policy Engine: موتور پالیسی اتوماسیون مسئول تصمیم‌گیری در مورد مدیریت برش‌های شبکه است. تعاملات درون برش یا تعاملات بین برش را با در نظر گرفتن پالیسی‌های تعریف‌شده توسط مدیر شبکه و همچنین اطلاعات context برش شبکه و مکان منابع که توسط معماری برای کنترل داینامیک برش‌های شبکه و منابع آن‌ها در نظر گرفته می‌شود، مدیریت می‌کند. [۴]

[1] Operating support systems
[2] Business support systems
[3] service provider
[4] Tenant
[5] Users
[6] Internet of healthcare things
[7] user of tenant
[8] virtual network instances
[9] Virtualized Infrastructure Manager
[10] service chain
[11] traffic steering
[12] VNF Manager
[13] Network slice instances
[14] network elements
[15] Orchestrator
[16] Network Slice Administration
[17] Network Slice Manager

- **5G Component**: این مؤلفه کاملاً به‌صورت انتزاعی حضور دارد و درون آن مؤلفه‌های بسیاری قرار دارد و در لایه منطقی معماری تأثیر دارد.
- **Cloud layer**: ذخیره‌سازی دائمی کلیه داده‌ها و پردازش‌های سنگین در این لایه اتفاق می‌افتد. داده‌های وضعیتی شهروندان طبق آخرین تغییرات ذخیره و به صورت دوره‌ای بروز خواهد شد این لایه برای دسترسی همیشگی و همچنین ایجاد سابقه سلامتی برای بیماران و تجزیه و تحلیل‌های بعدی نیاز است. داده‌ها را دریافت کرده و بعد از انجام آنالیز و مقایسه آن‌ها با پارامترهای پزشکی یک فرد سالم، سلامت و یا وخیم بودن شرایط بیمار را نتیجه‌گیری می‌کند. اگر داده‌هایی خارج از محدوده طبیعی وجود داشته باشد، آن داده‌ها را به لایه اپلیکیشن می‌فرستد تا لایه اپلیکیشن هشدار لازم را برای شهروند ارسال نماید.

۳-۳-پروتکل‌های ارتباطی

پروتکل‌های ارتباطی به شرح زیر انتخاب شده است:

۱) در لایه d-plane: ارتباط اشیا با Gateways به‌صورت غیرسلولار[1] و پروتکل لورا[2] انجام می‌شود. این پروتکل ویژگی‌ها و مزایای زیادی دارد:[۵]

۲) در ارتباط SDN controller با d-plane در باند جنوبی از پروتکل open flow استفاده می‌شود.

۳) در ارتباط SDN controller با باند شمالی برای ارتباط با app plane استانداردسازی پروتکل تا به امروز محقق نگردیده به همین دلیل از هریک از پروتکل‌های لایه اپلیکیشن می‌تواند استفاده کرد اما معماری پیشنهادی در لایه اپلیکیشن از پروتکل MQTT استفاده می‌کند. این پروتکل ویژگی‌ها و مزایای بسیاری دارد:[۵]

۴) دیگر تعاملاتی که بین مؤلفه‌های مختلف core معماری وجود دارد کاملاً سلولار و مبتنی بر 5G می‌باشد.

۴- ارائه برش‌بندی‌های نوین به‌همراه ویژگی‌های مختص هر برش

بامطالعه مقالات [۴, ۶]، انواع برش‌ها به‌صورت نوین برای بهره‌گیری در زیست‌بوم فناوری اینترنت اشیا حوزه سلامت دسته‌بندی شده که علاوه بر دسته‌بندی نوین، ویژگی‌های آن‌ها تشخیص، تطبیق و احصا گردیده است که در جدول ۱ به آن پرداخته شده است.

جدول ۱- کاربردهای برش شبکه

برش شبکه	ویژگی‌ها	توضیح
Massive IOT(remote consultancy /wearable IOT/sensors & actuators) [۶]	Low Energy Ultra reliability High availability High scalability Low bandwidth low throughput devices large data sets security privacy Resiliency High energy efficiency (Long battery life) MEC required MMTC	تمامی حسگرهای پزشکی و محیطی
AR/VR [۶]	High Resolution High bandwidth Low latency Ultra reliability High security High privacy Large data sets Security Privacy EMBB	نظارت کادر درمان به‌صورت مجازی بر شهروندان
Drone surveillance [۶]	High availability Very low latency EMBB	-پهپادهای شهری برای نظارت بر سلامت -پهپاد به‌عنوان ایستگاه پایه شناور
Drone for delivery/photography [۶]	Ultra reliability Very low latency Computer vision technology URLLC	-ثبت تصویر -تحویل بسته‌های سلامت به شهروندان -از پروتکل‌های کم‌توان استفاده می‌شود به همین دلیل بحث پهنای باند مطرح نمی‌باشد
Drone in emergency situations [۶]	MEC required High security High privacy Ultra reliability Very low latency High bandwidth URLLC	خاموش کردن آتش در سطح شهر در صورت وقوع
Remote care [۴]	Low energy Security Privacy ultra reliability High availability High scalability Resiliency High energy efficiency (Long battery life) Low bandwidth MEC required MMTC low throughput devices	تمامی حسگرهای محیطی و پزشکی
Multimedia [۴]	Low latency Very High bandwidth High speed High availability Large coverage QOS High resolution Frame per second EMBB transmitting a large amount of content	-شهروندانی که در خانه به‌صورت تصویری تحت مراقبت هستند -ویدئو کنفرانس برای کنفرانس ویدئویی بین کادر پزشکی و بیماران احتمالی برای اطلاع‌رسانی مشکل و ارائه اطلاعات به کادر درمان -مشاوره مجازی به شهروندان

[1] non-cellular

[2] lora

مفهوم در دسترس بودن[1] شبکه به این معناست که ضمانت می‌کند شبکه همواره در دسترس است. درصد زمانی است که شبکه در دسترس کاربران است. اگر سرویسی از دسترس خارج شد جایگزین آن وجود دارد. ۹۹,۹۹۹ در دسترس است و تنها یک‌هزارم امکان از دست رفتن دسترسی وجود دارد. در دسترس بودن شبکه به عواملی مانند افزونگی[2]، پشتیبان‌گیری، نگهداری و تحمل خطا[3] بستگی دارد.

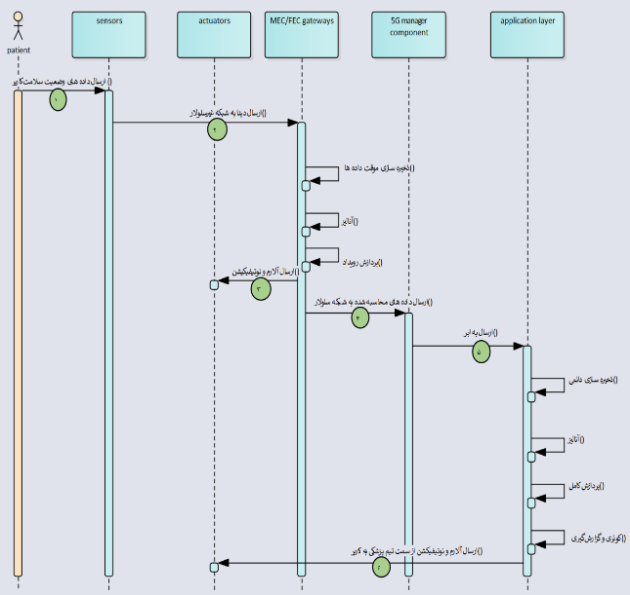
مفهوم قابلیت اطمینان[4] شبکه به معنی احتمالی است که شبکه بتواند عملکرد مورد نظر خود را بدون خرابی برای مدت زمان مشخصی تحت شرایط معین انجام دهد. قابلیت اطمینان شبکه به عواملی مانند کیفیت، ظرفیت، ازدحام و تصحیح خطا[5] بستگی دارد.

در دسترس بودن و قابلیت اطمینان شبکه به هم مرتبط هستند اما یکسان نیستند. یک شبکه می‌تواند در دسترس بودن بالا اما قابلیت اطمینان پایین داشته باشد یا برعکس. برای مثال، شبکه‌ای که همیشه روشن است اما مکرراً عملیات را قطع می‌کند، در دسترس بودن بالا اما قابلیت اطمینان پایینی دارد. شبکه‌ای که اغلب ازکارافتاده است، اما در صورت روشن بودن، خدمات بی‌عیب و نقصی ارائه می‌دهد، در دسترس بودن پایین اما قابلیت اطمینان بالایی دارد. در حالت ایدئال، یک شبکه باید هم در دسترس بودن و هم قابلیت اطمینان بالا برای اطمینان از رضایت و وفاداری مشتری داشته باشد.

مفهوم تاب‌آوری[6] در شبکه به این معناست که شبکه می‌تواند به‌سرعت به اختلال‌هایی که برای عملکرد عادی پیش می‌آید پاسخ دهد و بهبود یابد. اختلالات می‌تواند شامل هر چیزی از تعمیر و نگهداری شبکه گرفته تا تهدیدات سایبری، تجهیزات خراب تا بلایای طبیعی باشد. مفهوم مقیاس‌پذیری[7] به این معناست که با افزایش مقیاس و تعداد اشیا شبکه در ارائه خدمات دچار مشکل نخواهد شد.

۵- نمودار توالی معماری مفهومی

شکل ۶ سناریو نحوه تعامل مؤلفه‌ها در معماری ارائه‌شده را با استفاده از روش نمودار توالی در UML نشان داده است. در مرحله اول داده‌های وضعیت سلامت هر شهروند (شهروند سالم یا بیمار تحت مراقبت) به همراه داده‌های محیطی اطراف ایشان از طریق حسگرهای پزشکی و محیطی جمع‌آوری می‌گردد.



شکل ۶-نمودار توالی معماری پیشنهادی

در مرحله دوم دیتاها برای نزدیک‌ترین دروازه که نقش FEC/MEC را دارد در شبکه غیرسلولار از طریق پروتکل لورا ارسال می‌گردد. در FEC/MEC داده‌ها به‌صورت موقت ذخیره می‌شوند که در صورت مفقود شدن بسته‌های داده ارسالی دوباره ارسال شوند و یکسری آنالیز اولیه برای بررسی استاندارد بودن فرمت داده‌ها و درست بودن محتوا صورت می‌گیرد و پردازش رویداد هم انجام می‌گیرد که اگر وضعیت داده سلامت شهروند خارج از رنج طبیعی باشد اما بحرانی نباشد در مرحله سوم هشدار ابتدایی برای کاربر ارسال می‌گردد (مثلاً ضربان قلب و فشارخون شما در حال بالا رفتن است یا هوای اطراف شما بسیار آلوده است).

در مرحله چهارم بعد از گذشتن یک دوره مشخص زمانی از نحوه فعالیت‌ها و سبک زندگی هر شهروند و شرایط محیطی ایشان، داده‌های وضعیت سلامت شهروندان در طی مدت سپری‌شده از FEC/MEC به شبکه سلولار 5G منتقل خواهد شد.

در مرحله پنجم دیتاها به ابر و لایه اپلیکیشن که کادر پزشکی به آن دسترسی دارند ارسال می‌شود. در لایه اپلیکیشن داده‌ها بصری‌سازی شده و در رابط‌های کاربری تیم پزشکی نمایش داده خواهند شد. در ابر اطلاعات به صورت دائمی ذخیره شده و به صورت دوره‌ای روی داده‌ها، آنالیز جامع، پردازش کامل و گزارش‌های پیشرفته انجام می‌شود و اطلاعات مفید مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

[1] Availability
[2] Redundancy
[3] fault tolerance
[4] Reliability
[5] error correction
[6] Resiliency
[7] Scalability

در مرحله ششم درصورتی‌که سبک زندگی نامناسب کاربر یا شرایط محیطی ناسالم، ایشان را در معرض ابتلا به بیماری خاصی قرار دهد مجموعه اقدامات پیشگیرانه جامع برای تغییر سبک زندگی صحیح برای جلوگیری از ابتلا به بیماری به کاربران در معرض ابتلا به بیماری ارائه خواهد شد (مثلاً کاربر گرامی شما در معرض ابتلا به بیماری فشارخون قرار دارید برای جلوگیری از ابتلا دستورالعمل‌های ذیل را اعمال فرمایید یا کاربر گرامی با بیماری فشارخون شما در دوره گذشته ناپرهیزی از دستورالعمل‌ها داشته‌اید که به تشدید بیماری شما منجر گردیده است پس دستورالعمل‌های ذیل را اعمال فرمایید).

اگر در مرحله پردازش رویداد در شبکه غیرسلولار، علائم بیماری اورژانسی در فرد به وجود آید و داده خارج از رنج طبیعی باشد (مثلاً به ناگهان فشارخون کاربر افزایش چشمگیر پیدا کند) با تشخیص بحرانی بودن شرایط پیش‌آمده، اطلاعات بیمار را از شبکه غیرسلولار سریعاً به شبکه سلولار و ابر اصلی منتقل می‌کند تا تیم پزشکی مستقر در مرکز هشدار را مشاهده کنند و اقدامات فوری را لحاظ کنند و کادر درمان به محل اعزام گردند. درواقع همه این مراحل با سرعت بیشتری انجام می‌شود و منتظر سپری شدن دوره زمانی برای ارسال اطلاعات به ابر نمی‌ماند.

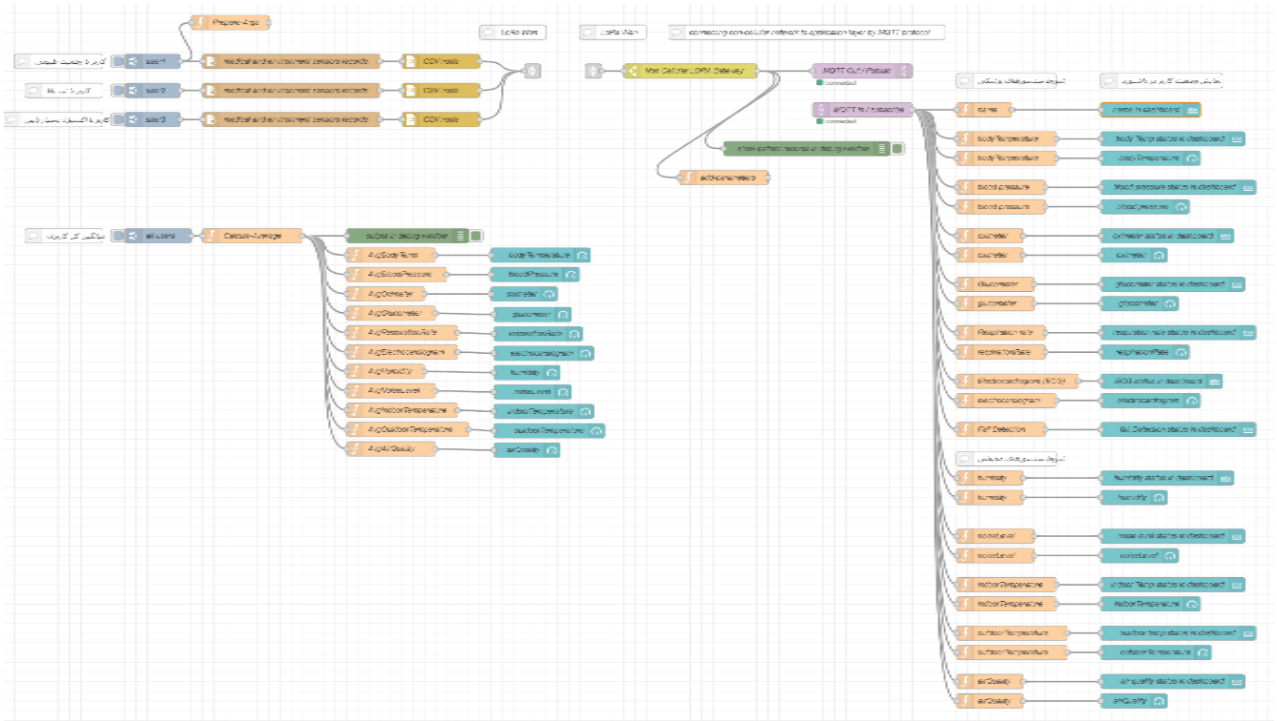
۶- پیاده‌سازی راهکار پیشنهادی در سکوی متن‌باز Node-RED

در شکل ۷ پیاده‌سازی سکوی زیست‌بوم فناوری اینترنت اشیاء حوزه سلامت در پلتفرم متن‌باز Node-RED مبتنی بر Node.js و با زبان جاوا اسکریپت انجام‌شده است. نرم‌افزار Node-RED یک پلتفرم اپن‌سورس برای راه‌اندازی پروژه‌های اینترنت اشیاء می‌باشد. این نرم‌افزار توسط IBM طرح‌ریزی و تولیدشده است. سکوی متن‌باز Node-RED بر روی Google's V8 engine و Node.js ساخته‌شده است. NPM نیز نقش مدیر پکیج‌های جاوا اسکریپت برای دانلود ماژول‌ها و تجمیع آن‌ها در مرورگر UI را دارد. UI یک ارائه بصری از خروجی جریان‌های کاری می‌باشد[۷]. برای اجرای این پلتفرم در برنامه CMD دستور node-red را وارد نمایید.

جدول ۲ داده‌های سلامت در نظر گرفته‌شده برای کاربران شامل: دمای بدن، فشارخون اکسیمتر، گلوکومتر، تعدادتنفس، الکتروکاردیوگرام، تشخیص سقوط، میزان رطوبت محیط، سطح نویز محیط، دمای داخل اتاق، دمای محیط بیرون، میزان کیفیت هوا را نشان می‌دهد.

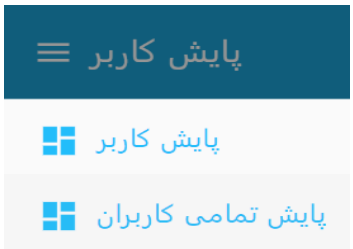
جدول ۲- داده‌های سلامت هر کاربر

name	bodyTemperature	bloodPressureSystolic	bloodPressureDiastolic	oximeter	glucometer	respirationRate	electrocardiogram	fallDetection	humidity	noiseLevel	indoorTemperature	outdoorTemperature	airQuality
sara	36	113	70	93	91	12	60	no	45	40	20	15	50



شکل ۷-فلو پیاده‌سازی شده در محیط node-red

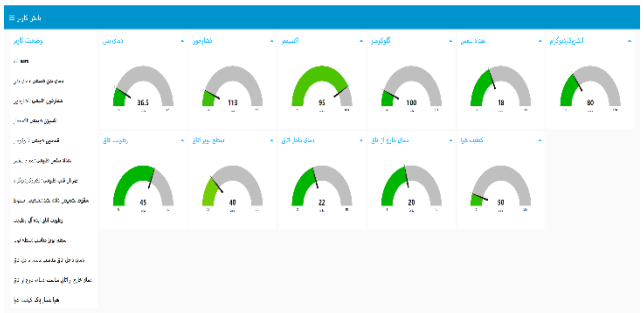
شکل ۸ تب‌های طراحی‌شده در داشبورد را نشان می‌دهد.



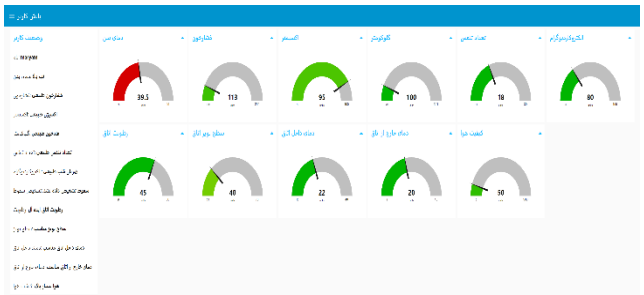
شکل ۸-تب‌های داشبورد تیم پزشکی

۶-۱- تب پایش کاربر

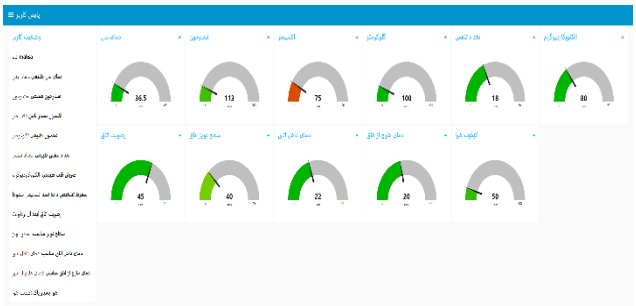
تب پایش کاربر وضعیت هر کاربر را به‌صورت مجزا در داشبورد نشان می‌دهد که درشکل ۹ الی شکل ۱۱ قابل‌مشاهده است.



شکل ۹-نمایش کاربر تحت پایش با پارامترهای کاملاً نرمال در داشبورد تیم پزشکی



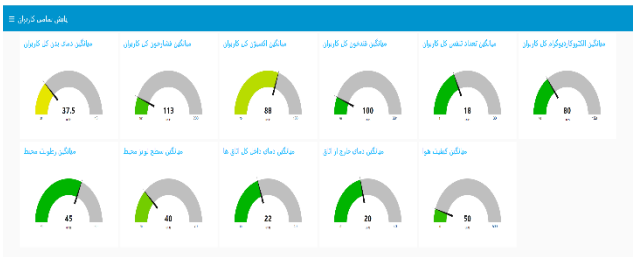
شکل ۱۰-نمایش کاربر تحت پایش با دمای بدن بالا در داشبورد تیم پزشکی



شکل ۱۱-نمایش کاربر تحت پایش با سطح اکسیژن خون پایین در داشبورد تیم پزشکی

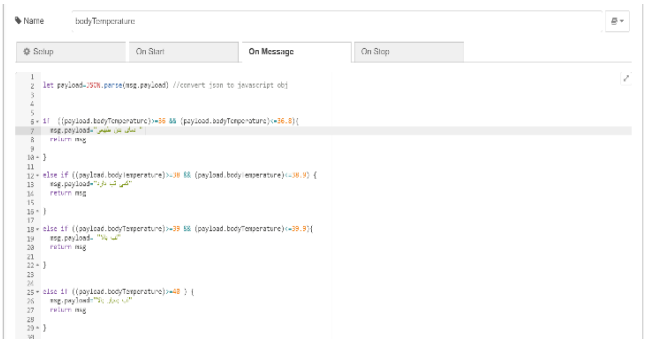
۶-۲- تب پایش تمامی کاربران

تب پایش تمامی کاربران که میانگین وضعیت حسگرهای پزشکی و محیطی برای تمامی کاربران حاضر در شبکه را نشان می‌دهد درشکل ۱۲ قابل‌مشاهده است.



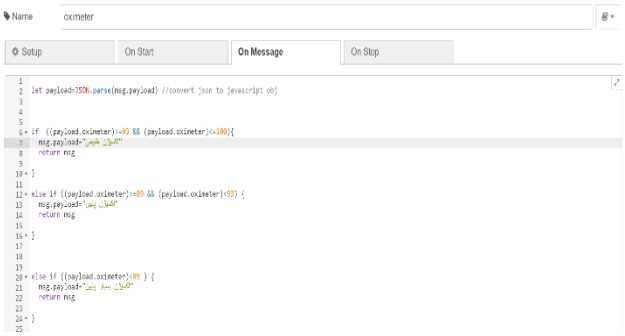
شکل ۱۲-نمایش میانگین وضعیت پزشکی و محیطی کل کاربران در داشبورد تیم پزشکی

در **شکل ۱۳** الی **شکل ۲۴** توابع حسگرهای پیاده‌سازی شده قابل‌مشاهده می‌باشد.



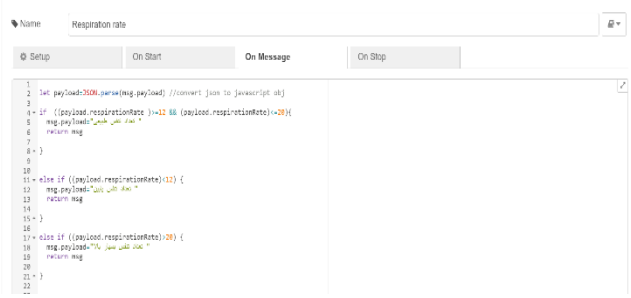
شکل ۱۳-تابع بررسی دمای بدن بیمار

شکل ۱۴-تابع بررسی فشارخون بیمار

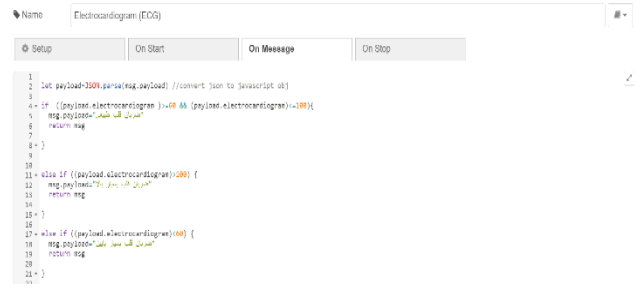


شکل ۱۵-تابع بررسی اکسیژن خون بیمار

شکل ۱۶-تابع بررسی قند خون بیمار

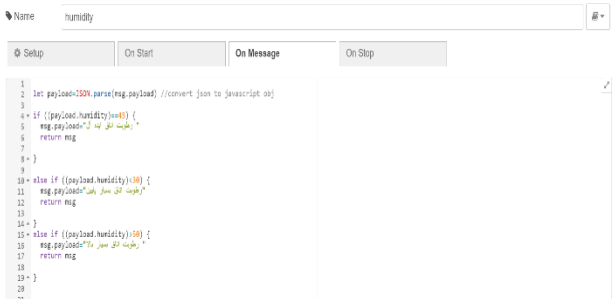


شکل ۱۷-تابع بررسی تعداد تنفس بیمار

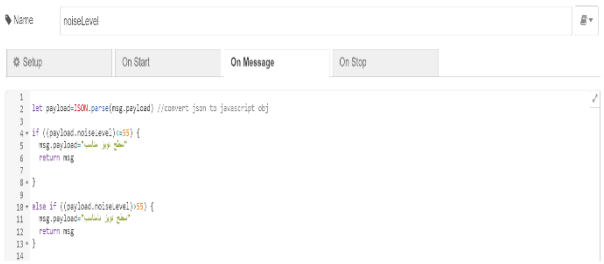


شکل ۱۸-تابع بررسی وضعیت قلب بیمار

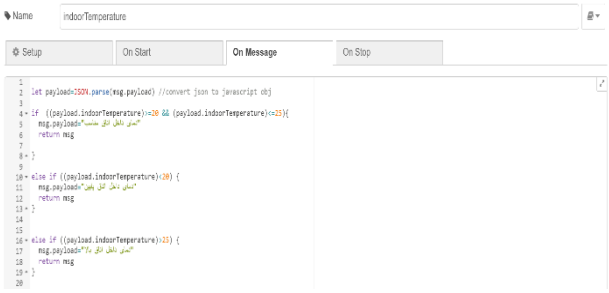
شکل ۱۹-تابع بررسی وضعیت سقوط بیمار



شکل ۲۰-تابع بررسی رطوبت محیط

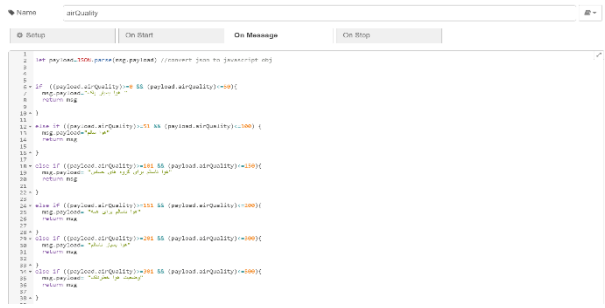


شکل ۲۱-تابع بررسی سطح نویز محیط اطراف



شکل ۲۲-تابع بررسی دمای داخل اتاق

شکل ۲۳-تابع بررسی دمای بیرون از اتاق



شکل ۲۴-تابع بررسی سطح کیفیت هوا از منظر میزان آلودگی

۷- ارزیابی

در این بخش به ارزیابی سکوی متن‌باز Node-RED و همچنین راهکار پیشنهادی پرداخته خواهد شد. ارزیابی سکو برای بررسی دلیل انتخاب سکوی Node-RED نسبت به سکوی Kaa خواهد بود.

۷-۱- مقایسه و ارزیابی سکوی متن‌باز Node-RED با سکوی Kaa

در مقاله[۷]، در ۳ سناریو مختلف، دو سکوی متن‌باز Kaa و Node-red را با یکدیگر مقایسه و ارزیابی کرده است. هر ۳ سناریو در این مقاله، بر روی ماشین مجازی با ۴ گیگابایت RAM اجرا شده است. خود ماشین مجازی بر روی سیستم‌عامل ویندوز ۱۰ با قدرت پردازشی core i7 و ۶ گیگابایت RAM مستقرشده است. نتایج یک ارزیابی مقدار میانگین زمان رفت و برگشت (RTT)[1] را برای سکوی متن‌باز Kaa و سکوی متن‌باز Node-RED جداول زیر در شرایط ارسال در فواصل زمانی متفاوت برای سناریو چت می‌باشد.

همان‌طور که نتایج جدول ۳ و جدول ۴ نشان می‌دهد، نتایج بهتر در میانگین زمان رفت و برگشت داده‌ها به نفع سکوی متن‌باز Node-RED می‌باشد.

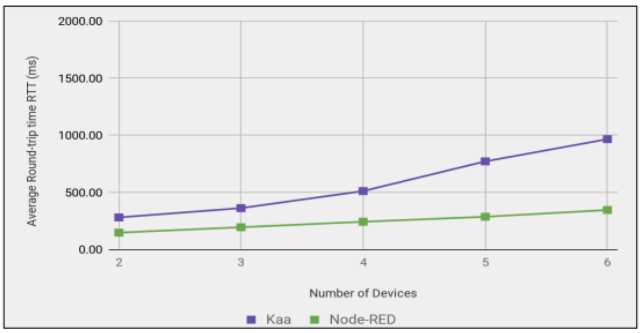
جدول ۳-نتایج Kaa از انتشار ۱۰ پیام با ۲ تا ۶ وسیله.[۷]

No of Devices	2	3	4	5	6
Average Round-Trip Time (ms)	279.40	361.00	510.10	770.10	964.60
STDdev	41.57	58.09	88.25	113.24	124.92

جدول ۴-نتایج Node-RED از انتشار ۱۰ پیام با ۲ تا ۶ وسیله [۷]

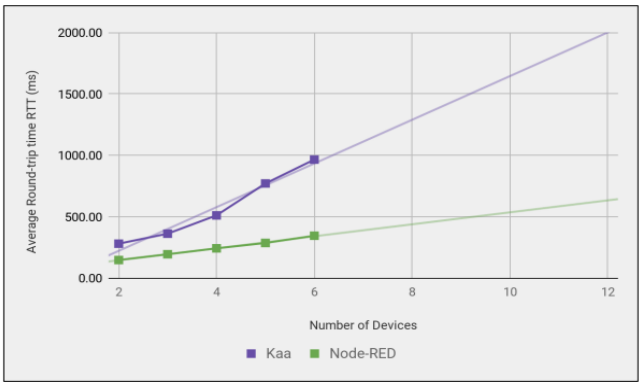
No of Devices	2	3	4	5	6
Average Round-Trip Time (ms)	146.20	193.50	241.50	285.20	344.30
STDdev	41.65	46.99	50.28	53.49	61.51

در سناریو چت مذکور در مقاله، میانگین زمان رفت و برگشت با ۱۰ پیام پشت سر هم برای ۲ تا ۶ گره پایانی برای هر دو سکوی متن‌باز بررسی‌شده است. نتایج میانگین زمان رفت و برگشت برای Kaa و Node-RED را مشاهده کنید. در این ارزیابی سکوی متن‌باز Node-RED عملکرد بهتری از خود نشان داده است. همچنین مقدار انحراف از معیار برای Node-RED به‌طور چشم‌گیری کمتر از همین مقدار برای Kaa می‌باشد که نشان‌دهنده پراکندگی کمتر زمان‌های رفت و برگشت برای Node-RED می‌باشد.



شکل ۲۵-میانگین RTT برای ۲ تا ۶ وسیله با Kaa و Node-RED [۷]

شکل ۲۵ نشان می‌دهد که سکوی Node-RED در میانگین زمان‌های رفت و برگشت به ازای تعداد ۲ تا ۶ دستگاه اندرویدی به‌مراتب بهتر از سکوی Kaa می‌باشد و این روند برای تعداد دستگاه‌های بیشتر همچنان ادامه می‌یابد.



شکل ۲۶-مقدار RTT از سناریو چت به همراه خط روند.[۷]

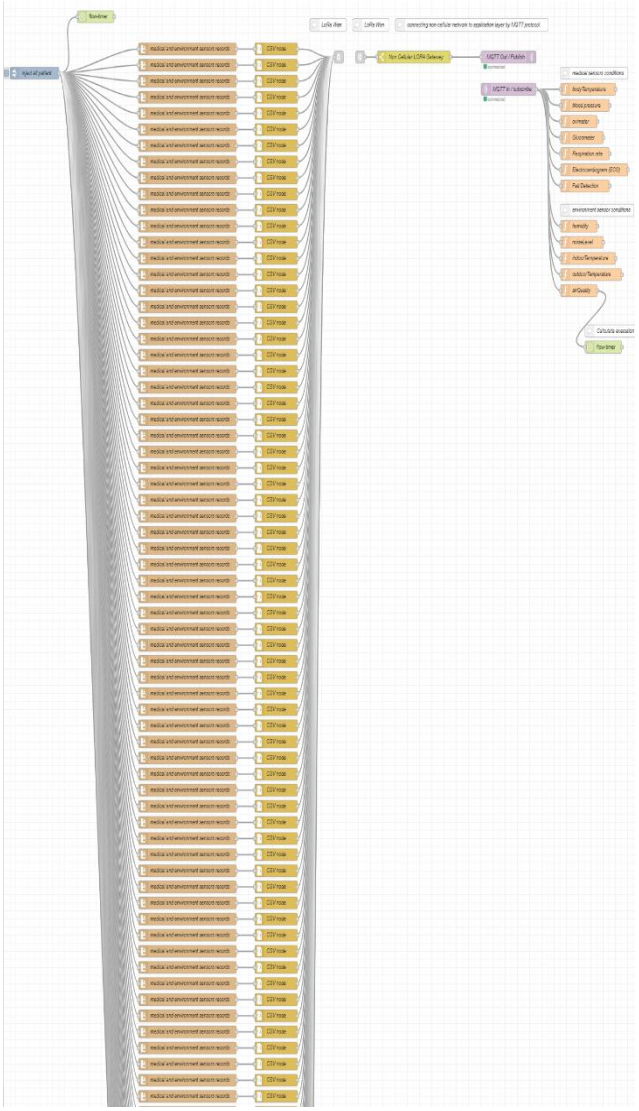
هدف از سناریو چت در شکل ۲۶، شبیه‌سازی چت برای تعداد متغیری از دستگاه‌های اندرویدی می‌باشد. باتوجه به شبیه‌سازی انجام‌شده در مقاله، مقیاس‌پذیری سکوی Kaa تا ۶ یا ۷ دستگاه اندرویدی بوده است درحالی‌که برای Node-RED مقیاس‌پذیری تا ۱۲ یا حتی تعداد بیشتری دستگاه اندرویدی می‌باشد. این مقیاس‌پذیری برای زمان RTT کمتر از ۱ ثانیه در نظر گرفته شده است؛ زیرا مقدار تأخیر ۱ ثانیه مقدار تأخیر نرمالی برای این حوزه می‌باشد و همچنین ازنظر کاربر قابل تحمل است.

[1] Round Trip Time

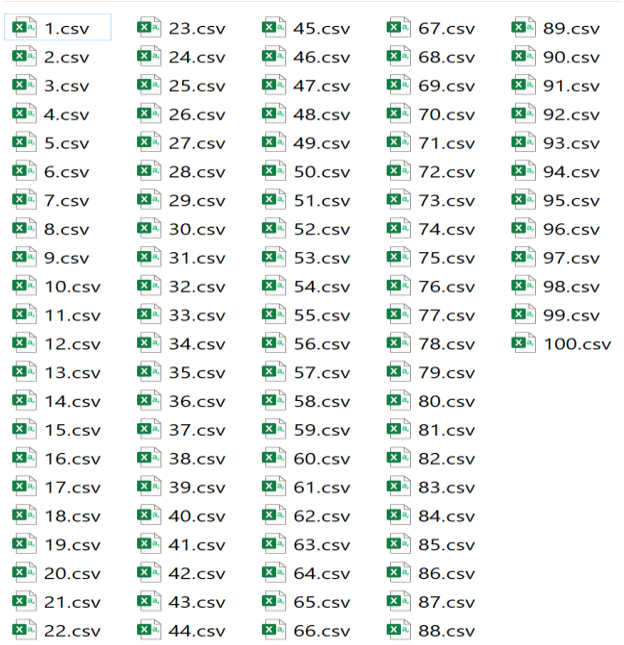
از منظر ارزیابی عملکردی و مقیاس‌پذیری این نتیجه حاصل شد که سکوی متن‌باز Node-RED نسبت به پلتفرم KAA ازنظر سرعت و سبک بودن بهتر است.

۷-۲- ارزیابی کارایی و مقیاس‌پذیری راهکار پیشنهادی

در شکل ۲۷ و شکل ۲۸ شرایطی شبیه‌سازی‌شده که تعداد بیماران ورودی بـه حد قابل‌توجهی افزایش پیداکرده تا معماری در مقیاس بزرگ‌تر هم مورد بررسـی واقع شـود. سـناریو طراحی شـده توسط نویســندگان نشــان‌دهنده این اســت که با افزایش تعداد نودهای بیماران در مقیاس بزرگ، کارایی (زمان اجرا) مناسـبی ارائه خواهد شد.



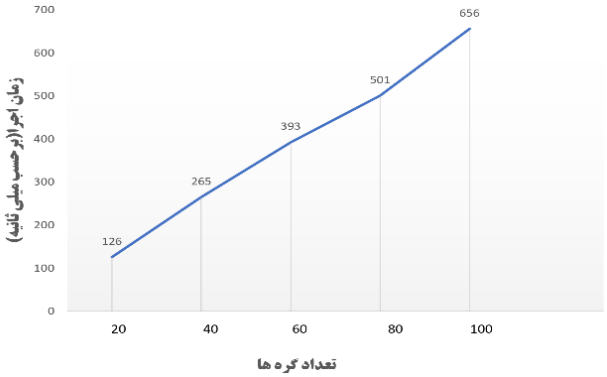
شکل ۲۷-افزایش تعداد گره‌های سکو به ۱۰۰ گره



شکل ۲۸-فایل‌های اطلاعات وضعیت سلامت ۱۰۰ گره

با اضافه کردن نود flow-timer زمان اجرا اندازه‌گیری شده و ارتباط اشـــیا حوزه ســـلامت بر اســـاس یک‌زمان معقول اتفاق می‌افتد. از لحظه‌ای که درخواســت ارسال می‌شود تا لحظه‌ای که نتیجه‌گیری لازم صورت می‌گیرد، زمان معقول از نظر میلی‌ثانیه به وقوع خواهد پیوست.

زمـان اجرای تقریبی در واحد میلی‌ثانیه برای تعداد گره‌های پایانی متفاوت می‌باشـد. همان‌طور که منحنی شـکل ۲۹ نشـان می‌دهد، زمان اجرا تا ۱۰۰ گره زیر ۱ ثانیه است که عدد معقولی می‌باشد.



شکل ۲۹-زمان اجرا به ازای تعداد گره‌های پایانی

۷-۳- ارزیابی فناوری‌های راهکار پیشنهادی

راهکار فعلی، به دلیل اســـتفاده از فناوری 5G تمام مؤلفه‌های این شـــبکه را پشـــتیبانی می‌کند مانند کاهش تأخیر، افزایش کارایی، افزایش پهنای باند، کاهش مصـــرف انرژی، قابلیت اطمینان، کاهش

استفاده از شبکه، افزایش کیفیت سرویس و افزایش توان عملیاتی. مؤلفه‌های مذکور با فناوری 5G ممزوج شده و به‌تبع استفاده از 5G تمامی آن‌ها نیز محقق خواهند شد. راهکار فعلی همچنین از فناوری رایانش ابری و FEC/MEC نیز پشتیبانی می‌کند.

در بخش بهبود راهکار فعلی، با اضافه کردن لایه حسگرهای پزشکی/محیطی و محرک‌ها، FEC/MEC Gateways، مستأجران و کاربران مستأجران، استفاده از شبکه غیرسلولار در کنار شبکه سلولار، معماری مبتنی بر SDN و NFV بهبود پیداکرده همچنین با اضافه کردن مؤلفه احراز هویت و کنترل دسترسی در لایه اپلیکیشن بحث امنیت لایه اپلیکیشن نیز بهبود داده شده و با دسته‌بندی انواع برش‌های شبکه و ارائه ویژگی‌های مفصل برای هر برش بحث قطعه‌بندی نیز بهبود یافته است.

۸- نتیجه‌گیری

در بخش اول معماری مفهومی پیشنهادی زیست‌بوم فناوری اینترنت اشیاء حوزه سلامت در سطح اول و دوم، اجزا و مؤلفه‌های مختلف معماری، فناوری‌های هر بخش از معماری، پروتکل‌های انتخابی ارائه شد. در بخش دوم برش‌های نوین برای بهره‌گیری در زیست‌بوم فناوری اینترنت اشیا حوزه سلامت به همراه ویژگی‌های مختص هر برش از شبکه احصا گردید. در بخش سوم نمودار توالی معماری طبق سناریویی مشخص ارائه شد. در بخش چهارم پیاده‌سازی سکو از بطن معماری به نمایش گذاشته شد و در بخش پنجم ارزیابی کار ارائه گردید. در بخش مربوط به ارزیابی، برتری پلتفرم NODE-RED نسبت به پلتفرم KAA اثبات شد. از منظر ارزیابی عملکردی و مقیاس‌پذیری این نتیجه حاصل شد که سکوی متن‌باز Node-RED نسبت به پلتفرم KAA از نظر سرعت و سبک بودن بهتر است. همچنین ازنظر مقیاس‌پذیری نشان داد تعداد گره بالا را هم به‌راحتی پشتیبانی می‌کند. در ادامه راهکار پیشنهادی بر اساس معیارهای کارایی و مقیاس‌پذیری ارزیابی شد و نتیجه نشان‌دهنده مطلوب بودن راهکار مذکور بود زیرا زمان اجرا تا ۱۰۰ گره زیر ۱ ثانیه محاسبه گردید و نشان داد که سکوی مذکور می‌تواند در مقیاس بزرگ پیاده‌سازی و بکار گرفته شود و درعین‌حال کارایی مناسب خود را حفظ نماید.

می‌توان نتیجه گرفت که در راهکار پیشنهادی خطر خسارات جانی نابهنگام در شهروندان کاهش پیدا می‌کند به دلیل اینکه با پایش لحظه‌ای شهروندان بدون سابقه بیماری و شهروندان دارای سابقه بیماری تحت مراقبت در صورت وقوع موقعیت بحرانی با امدادرسانی به‌موقع از درصد تلفات جانی کاسته خواهد شد و نتیجه استفاده از این راهکار به نفع سازمان‌ها و نهاد های استفاده‌کننده خواهد بود.

مراجع

[1] A. Mukherjee, S. Ghosh, A. Behere, S. K. Ghosh, and R. Buyya, "Internet of health things (IoHT) for personalized health care using integrated edge-fog-cloud network," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 12, pp. 943-959, 2021.

[2] E. Kapassa *et al*., "An innovative ehealth system powered by 5G network slicing," in *2019 Sixth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS)*, 2019: IEEE, pp. 7-12.

[3] P. H. Vilela, J. J. Rodrigues, P. Solic, K. Saleem, and V. Furtado, "Performance evaluation of a Fog-assisted IoT solution for e-Health applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 379-386, 2019.

[4] A. H. Celdrán, M. G. Pérez, F. J. G. Clemente, F. Ippoliti, and G. M. Pérez, "Dynamic network slicing management of multimedia scenarios for future remote healthcare," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, pp. 24707-24737, 2019.

[5] T. D. Mou and G. Srivastava, "Network Protocols for the Internet of Health Things," in *Intelligent Internet of Things for Healthcare and Industry*: Springer, 2022, pp. 21-66.

[6] S. Wijethilaka and M. Liyanage, "Survey on network slicing for Internet of Things realization in 5G networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 957-994, 2021.

[7] R. Scott and D. Östberg, "A comparative study of open-source IoT middleware platforms," ed, 2018.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 155-165

Analysis of Traffic Data for Congestion Detection Using Machine Learning Algorithms

Nahid Amani[1], Mohammad Hossein Amerimehr[1], Sara Efazati[1*], Ali Javidani[2]

[1] ICT Research Institute (ITRC), Tehran, Iran

[2] School of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 01 July 2024, Revised: 20 January 2025, Accepted: 15 February 2025

Paper type: Research

Abstract

Congestion detection is one of the basic elements in guaranteeing the quality of service and is one of the most important measures of efficiency in new-generation telecommunication networks. Congestion leads to the loss of information packets in the network because the sending rate is higher than the capacity in some network links. To control congestion in the network, the first step is to distinguish between the loss of packets due to congestion with the packet loss introduced by other cases, including link failure. Because if the source of the loss is mistakenly identified as congestion, reducing the sending rate in the transmitter does not mitigate the congestion and only reduces throughput and quality of service. Therefore, the main problem of this paper is to identify congestion and distinguish it from the error caused by communication links in a traffic data sample. In solving this problem, various supervised machine learning algorithms including decision tree, random forest, support vector machine, logistic regression, K-nearest neighbor, XGBoost, and neural network have been used. The mentioned algorithms have been evaluated based on different criteria and compared with each other.

Keywords: Congestion Detection, Machine Learning, XGBoost, Evaluation Criteria of ML Algorithms.

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

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۵۵ الی ۱۶۵

تحلیل داده‌های ترافیکی با هدف تشخیص ازدحام با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین

ناهید امانی[۱]، محمدحسین عامری‌مهر[۱]، سارا افاضاتی[۱*]، علی جاویدانی[۲]

[۱] گروه مدیریت یکپارچه شبکه، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات ، تهران، ایران

[۲] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

شناسایی ازدحام یکی از ارکان پایه‌ای در تضمین کیفیت خدمت به عنوان مهم‌ترین معیار سنجش کارایی در شبکه‌های مخابراتی نسل جدید است. ازدحام منجر به از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی در شبکه میشود که به دلیل بالاتر بودن نرخ ارسال از ظرفیت در برخی از لینک‌های شبکه رخ میدهد. برای کنترل ازدحام در شبکه گام نخست تمایز میان از دست رفتن اطلاعات در اثر ازدحام و یا در اثر سایر موارد از جمله خرابی لینک است زیرا در صورتی که منشا از دست رفتن بسته به اشتباه ازدحام تشخیص داده شود کاهش نرخ ارسال در فرستنده کمکی به کاهش ازدحام نکرده و تنها موجب کاهش گذردهی و کیفیت سرویس می شود. از این رو مسئله اصلی این مقاله شناسایی ازدحام و تفکیک آن از خطای ناشی از لینک‌های ارتباطی در یک نمونه داده ترافیکی است. در این مقاله برای حل مسئله مذکور از الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین نظارت‌شده از جمله درخت تصمیم، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، لجیستیک رگرسیون، K-نزدیکترین همسایه، XGBoost، شبکه عصبی و تقویت درخت تصمیم بهره گرفته شده است. الگوریتم‌های مذکور بر اساس معیارهای مختلف از جمله دقت، درستی، F1-measure، حساسیت و AUC مورد ارزیابی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این ارزیابی بر اساس روش K-fold Cross Validation انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم XGBoost به لحاظ تمام معیارهای ارزیابی نسبت به دیگر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری در زمینه تشخیص ازدحام دارد.

کلیدواژگان: تشخیص ازدحام، یادگیری ماشین، XGBoost، معیارهای ارزیابی الگوریتم‌های یادگیری ماشین

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: s.efazati@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه با توسعه سریع فناوری‌ها، تقاضا برای سرویس‌های متنوع مخابراتی با کیفیت‌های مورد انتظار متنوع به طور گسترده‌ای افزایش یافته است. از این رو فراهم کردن کیفیت خدمت (QoS) و جلب رضایت‌مندی مشتریان از اهداف اساسی نسل‌های جدید شبکه‌های مخابراتی ازجمله 5G، B5G و 6G می‌باشد[۱-۲]. در راستای رسیدن به هدف تضمین QoS راهکارهای مختلفی توسط محققان ارائه و پیاده‌سازی شده است. یکی از راهکارهای کلیدی در تضمین QoS کنترل ازدحام در ترافیک شبکه است[۳]. منظور از ازدحام شرایطی در شبکه است که بسته‌های ارسالی دقیقا به علت شلوغی و ازدحام شبکه گم می‌شوند. به عبارت دیگر ازدحام به حالتی گفته می‌شود که نرخ ارسال در برخی از لینک‌های شبکه از ظرفیت لینک بیشتر شده که موجب از دست رفتن بسته یا تاخیر زیاد در ارسال بسته می‌شود. در روش‌های سنتی تشخیص و کنترل ازدحام به طور ضمنی از تاخیر و اتلاف بسته برای تشخیص ازدحام و تغییر سایز پنجره ازدحام (CWND) استفاده می‌شود. به عنوان مثال در روش TCP Tahoe در ابتدای الگوریتم CWND تا رسیدن به حد آستانه افزایش می‌یابد و مرتبا دو برابر می‌شود [۴]. سپس در گام بعد در صورتی که از دست رفتن بسته مشاهده نشود (ACK بسته دریافت شود)، CWND به اندازه یک واحد افزایش می‌یابد. اما در صورت اتلاف بسته حدآستانه برابر با نصف مقدارCWND فعلی قرار داده می‌شود و CWND نیز به مقدار اولیه بازنشانی می‌شود. در الگوریتم-های دیگر مثل TCP Reno و TCP New Reno نیز مشابه با TCP Tahoe با توجه به از دست رفتن بسته، CWND و بالطبع نرخ ارسال تغییر می‌کند تا ازدحام در شبکه کنترل شود [۵-۶]. در روش TCP Vegas، تغییر CWND بر اساس میزان تاخیر ارسال بسته (RTT) انجام می‌شود [۵].

مشکل روش‌های سنتی کنترل ازدحام آن است که نمی‌توانند منشا از دست رفتن بسته را تشخیص دهند و هر اتلاف بسته را ناشی از ازدحام تلقی کرده و راهکارهای کنترلی را اعمال می‌کنند. در حالیکه اتلاف بسته به ویژه در شبکه‌های بی‌سیم می‌تواند ناشی از بروز خطا در لینک‌های ارتباطی به واسطه عواملی همچون نویز، محوشدگی کانال بی‌سیم، تداخل، تحرک کاربران و handover، قطع شدن به دلیل پوشش محدود رادیویی، تاخیر و... باشد. عدم تشخیص ازدحام از سایر عوامل از دست رفتن بسته و اعمال مکانیزم‌های کنترل ازدحام مانند کاهش CWND بی‌مورد بوده و تنها باعث افت گذردهی و عملکرد شبکه می‌شود. لذا تشخیص منشا از دست رفتن بسته و تشخیص ازدحام امری بسیار مهم و قابل توجه به شمار می‌رود. در روش‌های سنتی، تشخیص ازدحام به طور ضمنی از روی تاخیر و اتلاف بسته بر اساس یک سری قوانین از پیش‌تعریف شده محاسبه می‌شود [۷]. در حالیکه روش‌های مبتنی بر قانون‌های از پیش تعریف شده بهینه نبوده و در شرایط واقعی ممکن است عملکرد مناسبی از خود ارائه ندهند. از این رو روش‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین در حل این مسئله مطرح می‌شوند.

در روش مبتنی بر یادگیری ماشین از روی وضعیت شبکه تشخیص ازدحام انجام می‌شود. لذا تشخیص ازدحام مبتنی بر یادگیری ماشین از هوشمندی و دقت بیشتری نسبت به روش‌های سنتی تشخیص ازدحام برخوردار است [۸]. در یادگیری ماشین با تجزیه و تحلیل داده‌هایی که به عنوان ورودی دریافت می شود فرایند یادگیری انجام شده و عملکرد سیستم به طور خودکار از طریق تجربه بهبود می‌یابد. از میان انواع الگوریتم‌های یادگیری ماشین، الگوریتم‌های یادگیری نظارت‌شده از دقت بالاتری در حل مسئله تشخیص ازدحام برخوردارند [۹-۱۰]. در این روش آموزش بر اساس داده‌های برچسب‌دار انجام می‌شود و الگوریتم سعی می‌کند پارامترهای خود را بر اساس این داده‌ها بروزرسانی کند به نحوی که خطای پیش‌بینی داده‌ها به حداقل برسد.

در این مقاله به حل مسئله تشخیص ازدحام و تفکیک آن از سایر عوامل از دست رفتن بسته با بهره‌گیری از یادگیری ماشین نظارت شده پرداخته می‌شود. هدف اصلی پیداکردن الگوریتم یادگیری ماشین نظارت‌شده‌ای است که بتواند بهترین عملکرد را بر اساس معیارهای ارزیابی مختلف در حل مسئله تشخیص ازدحام ارائه دهد.

در این زمینه، [۱۱] به بررسی تشخیص ازدحام در یک شبکه حسگری بی‌سیم با استفاده از یادگیری ماشین پرداخته است. در این مقاله برای تشخیص ازدحام از دو الگوریتم شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. البته در این مقاله بحث تفکیک ازدحام از دیگر خطاهای ارتباطی وجود ندارد بلکه با دریافت سه پارامتر مختلف از شبکه، رخ دادن ازدحام در شبکه پیش‌بینی می‌شود.

در [۱۲] از الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای شناسایی ازدحام استفاده شده است. الگوریتم یادگیری ماشین استفاده شده در این مقاله الگوریتمی مبتنی بر الگوریتم ماشین بردار پشتیبان است که به شناسایی و کنترل ازدحام در شبکه‌های مبتنی بر حسگر اینترنت اشیا می‌پردازد.

[۱۳] یک مرور جامع بر روی مقالاتی که با استفاده از یادگیری عمیق به شناسایی ازدحام پرداخته‌اند انجام داده است. [۱۴-۱۵]

نیز از الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری عمیق برای شناسایی ازدحام استفاده کرده‌اند.

در [۱۶] به مسئله تفکیک ازدحام از دیگر خطاهای ارتباطی با استفاده از یادگیری ماشین پرداخته است. در این مقاله از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده از قبیل درخت تصمیم، جنگل تصادفی و شبکه عصبی استفاده شده است.

همین نویسندگان در مقاله‌ای دیگر از الگوریتم یادگیری نظارت شده‌ای با عنوان تقویت درخت تصمیم و همان مجموعه داده قبلی استفاده کرده‌اند و با نتایج مقاله قبل مقایسه کرده‌اند و نتایج بهتری را به دست آورده‌اند [۱۷].

در مقاله حاضر الگوریتم‌های یادگیری نظارت شده متعددی در مسئله تشخیص ازدحام به کار گرفته شده‌اند، از جمله درخت تصمیم، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، لجستیک رگرسیون، K-نزدیکترین همسایه، XGBoost، شبکه عصبی چند لایه و تقویت درخت تصمیم. نسبت به مقالات [۱۶] و [۱۷] که نزدیکی بیشتری با این مقاله دارند، از الگوریتمی با دقت بالاتر با نام XGBoost در حل مساله تشخیص ازدحام استفاده شده است و نشان داده شده که این الگوریتم به لحاظ تمام معیار-های ارزیابی از جمله درستی، دقت، حساسیت، F1-measure و AUC عملکردی بهتر از سایر الگوریتم‌های مذکور از خود ارائه می‌دهد. در جدول ۱ مقالات مرتبط با مقاله حاضر آورده شده است.

جدول ۱. کارهای مرتبط با مقاله حاضر

مرجع	مسئله	الگوریتم مورد استفاده
[۴]	کنترل ازدحام به صورت سنتی	TCP Tahoe
[۵]، [۶]	کنترل ازدحام به صورت سنتی	TCP Tahoe TCP Reno TCP New Reno TCP Vegas
[۱۱]	تشخیص ازدحام با استفاده از یادگیری ماشین	Neural network SVM
[۱۲]	کنترل ازدحام با استفاده از یادگیری ماشین	SVM
[۱۶]، [۱۷]	تفکیک ازدحام از دیگر خطاهای ارتباطی با استفاده از یادگیری ماشین	Decision Tree, Random forest, Neural Network, Decision Tree Boosting
مقاله حاضر	تفکیک ازدحام از دیگر خطاهای ارتباطی با استفاده از یادگیری ماشین	Logistic Regression, SVM, Random Forest, KNN, XGBoost, Decision Tree, Neural Network

چارچوب اصلی مقاله حاضر بر اساس موارد زیر بنا شده است:

۱. به کارگیری الگوریتم‌های متنوع یادگیری نظارت شده شامل درخت تصمیم، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، لجستیک رگرسیون ، K-نزدیکترین همسایه، XGBoost، شبکه عصبی چند لایه و تقویت درخت تصمیم
۲. به کارگیری معیارهای ارزیابی مختلف شامل درستی[1] دقت[2]، F1-measure، حساسیت[3] و AUC در ارزیابی الگوریتم‌ها
۳. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مذکور بر اساس معیارهای ارزیابی و انتخاب بهترین آن‌ها برای حل مسئله تشخیص ازدحام با یکدیگر.

ساختار مقاله در ادامه بدین شرح تنظیم شده است. در بخش دوم به معرفی اجمالی الگوریتم‌های یادگیری نظارت‌شده پرداخته می‌شود. سپس شیوه مقایسه الگوریتم‌های یادیگیری ماشین و معیارهای ارزیابی آن‌ها در بخش سوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی ارائه شده و در نهایت در بخش پنجم جمع‌بندی نهایی صورت می‌پذیرد.

۲- مرور اجمالی الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت شده

همانطور که قبلا اشاره شد الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت شده بر اساس یک مجموعه داده برچسب‌دار عمل کرده و آموزش می‌بینند. در این بخش به معرفی اجمالی الگوریتم‌های مورد استفاده در این مقاله پرداخته می‌شود.

الف) الگوریتم درخت تصمیم

این الگوریتم یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال محبوب‌ترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده در کاربردهای تصمیم-گیری و طبقه‌بندی است [۱۸]. در این الگوریتم فرآیند تصمیم‌گیری از طریق شاخه‌بندی ویژگی‌ها از مهم‌ترین ویژگی به کم‌اهمیت‌ترین ویژگی انجام می‌شود. هر شاخه نشانگر یک تصمیم یا قانون است. ایده اصلی آن است که مجموعه‌ای از تصمیمات متوالی برای رسیدن به یک نتیجه خاص اتخاذ می‌شوند. مزیت اصلی این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، پیچیدگی محاسباتی کم در کنار دقت بالا می‌باشد.

ب) الگوریتم جنگل تصادفی

[1] Accuracy
[2] Precision
[3] Recall

الگوریتم جنگل تصادفی بر پایه الگوریتم درخت تصمیم ساخته شده است[۱۸-۱۹]. ایده اصلی این روش آن است که خروجی چندین درخت تصمیم را با یکدیگر ادغام کند. بنابراین به جای تکیه بر خروجی یک درخت تصمیم، نتایج چندین درخت تصمیم را جمع‌آوری کرده و بر اساس میانگین یا اکثریت آرا پیش‌بینی نهایی را ارائه می‌دهد.

ج) الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

این الگوریتم برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. مبنای کار طبقه‌بند SVM دسته‌بندی خطی داده‌ها است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌شود خطی انتخاب شود که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد.

د) الگوریتم لجستیک رگرسیون

این الگوریتم روشی ساده و کارآمد برای مسائل طبقه‌بندی باینری و خطی است و به طور گسترده برای طبقه‌بندی در صنعت به کار گرفته می‌شود [۲۰]. در این روش از یک ابر صفحه در یک فضای m بعدی برای جداسازی نقاط داده با تعداد m ویژگی در کلاس‌هایشان استفاده می‌شود.

ه) الگوریتم K-نزدیکترین همسایه

این الگوریتم که به منظور طبقه‌بندی و رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد بر این ایده استوار است که نقاط داده مشابه برچسب‌های مشابه دریافت می‌کنند [۲۱-۲۲]. این تشابه بر اساس مقیاس فاصله بین نقاط داده که می‌تواند به عنوان مثال فاصله اقلیدسی در نظر گرفته شود تعیین می‌شود. عملکرد الگوریتم KNN در عین سادگی و محبوبیت در انتخاب، تحت تأثیر انتخاب پارامتر K و متریک فاصله قرار می‌گیرد. بنابراین تنظیم دقیق پارامتر K برای نتایج بهینه ضروری است.

و) الگوریتم XGBoost

الگوریتم XGBoost یا به عبارتی الگوریتم تقویت گرادیان حداکثر با ترکیب الگوریتم درخت تصمیم و الگوریتم تقویت گرادیان ایجاد شده است [۲۳]. الگوریتم تقویت گرادیان یک مدل پایه طبقه‌بندی ایجاد می‌کند و سپس طی مراحلی عملکرد خود را بهبود می‌بخشد تا به یک مدل پیش‌بینی قوی برسد. به این صورت که در هر مرحله مدل جدیدی که ایجاد می‌شود برای رفع خطاهای مدل قبلی است. XGBoost با ترکیب پیش‌بینی‌های چندین مدل جداگانه درخت‌های تصمیم‌گیری، یک مدل پیش‌بینی جدید می‌سازد. عملکرد مناسب، دقت بالا و انعطاف‌پذیری این روش آن را به یکی از روش‌های پرکاربرد در حوزه‌های مختلف تبدیل کرده است.

ز) الگوریتم شبکه عصبی

الگوریتم شبکه عصبی بر اساس رفتار بیولوژیکی نورون‌های عصبی در مغز عمل می‌کند [۲۴-۲۵]. یک شبکه عصبی مصنوعی تشکیل شده است از گره‌هایی معادل نورون‌های مصنوعی که توسط روابطی معادل سیناپس‌های عصبی با یکدیگر در ارتباط هستند. این الگوریتم شامل یک لایه ورودی، چندین لایه تصمیم‌گیری و یک لایه خروجی است. تعداد لایه‌ها، گره‌ها، روابط و حدود آستانه مشخص شده در هر گره مواردی هستند که به صورت تجربی و خاص هر مسئله تنظیم می‌شوند.

ح) الگوریتم تقویت درخت تصمیم

این الگوریتم در راستای تقویت عملکرد الگوریتم درخت تصمیم ساخته شده است. در این روش ابتدا یک مدل اولیه ساخته می‌شود و به تدریج مدل بهبود می‌یابد. به عبارت دقیق‌تر، هر مدل با استفاده از مدل قبلی و با افزایش وزن نمونه‌های یادگیری که در مدل قبل به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند ساخته می‌شود. سپس پیش‌بینی نهایی با استفاده از مجموعه مدل‌های بدست آمده و بر اساس کلاس اکثریت در بین همه کلاس‌ها ساخته می‌شود [۲۶].

۳- ارزیابی و مقایسه الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت شده

یکی از اهداف اصلی در این مقاله ارزیابی الگوریتم‌های مختلف یادگیری نظارت‌شده و مقایسه آن‌ها بر اساس معیارهای متفاوت ارزیابی است. مساله مطرح شده در این مقاله تشخیص ازدحام و شناسایی و تفکیک آن از خطای ارتباطی در یک نمونه داده برچسب‌دار است. از آنجا که جنس این مساله از نوع طبقه‌بندی است از روش متداول K-fold Cross Validation جهت ارزیابی طبقه‌بندی انجام شده استفاده می‌شود [۲۷]. روش Cross-Validation شامل دو مرحله اصلی است: تقسیم داده‌ها به زیر مجموعه‌هایی به نام folds و چرخش آموزش و اعتبارسنجی میان آن‌ها. مرحله تقسیم داده‌ها معمولاً ویژگی‌های زیر را دربردارد:

- اندازه هر fold تقریباً یکسان است.
- داده‌ها را می‌توان به صورت تصادفی در هر fold انتخاب کرد.
- همه fold ها، به جز یکی که برای اعتبار سنجی استفاده می‌شود، برای آموزش مدل استفاده می‌شوند. آن fold اعتبارسنجی باید چرخانده شود تا زمانی که همه fold ها یک بار و تنها یک بار به یک fold اعتبارسنجی تبدیل شوند. در

این الگوریتم، عموما توصیه می‌شود که هر نمونه در یک و تنها یک قسمت قرار گیرد.

حرف K در نام این الگوریتم مشخص‌کننده آن است که مجموعه داده‌ها به چند قسمت تقسیم می‌شود. بسیاری از کتابخانه‌های پایتون از k=10 به عنوان یک مقدار پیش‌فرض استفاده می‌کنند که نشان‌دهنده این است که ۹۰٪ داده‌ها برای آموزش و ۱۰٪ از داده‌ها برای اعتبارسنجی استفاده خواهد شد.

چارچوب کلی مقایسه میان الگوریتم‌ها در این مقاله بدین شرح است که در ابتدا پیش‌پردازش‌های مورد نظر بر روی نمونه داده‌های برچسب‌دار موجود انجام می‌شود. سپس داده‌های پیش‌پردازش شده بر اساس روش k-fold به صورت تصادفی به k دسته تقسیم می‌شوند تا برای آموزش و اعتبارسنجی الگوریتم یادگیری مورد نظر از آن‌ها استفاده شود. الگوریتم مورد نظر اجرا شده و بر اساس داده‌های آموزشی و داده‌های اعتبارسنجی که در روش k-fold به آن داده شده معیار ارزیابی مشخص شده را محاسبه می‌کند. در ادامه به معرفی معیارهای ارزیابی مد نظر در این مقاله پرداخته شده است.

۳-۱- معیارهای ارزیابی

در شناسایی الگو معیارهای ارزیابی متداول برای مسائل از جنس طبقه‌بندی، عموما درستی، دقت ، حساسیت ، F1-Measure و AUC هستند. معیارهایی همچون دقت، درستی و F1-measure و حساسیت که بر اساس ارزیابی تعداد نمونه‌های درست و نادرست در یک مجموعه داده سنجیده می‌شوند از ابزاری به نام ماتریس درهم‌ریختگی در ارزیابی خود استفاده می‌کنند. از سوی دیگر معیار AUC که یک معیار عددی در سنجش عملکرد یک مدل یادگیری است از منحنی ROC مشتق می‌شود. در ادامه به شرح کامل ماتریس در هم‌ریختگی و منحنی ROC پرداخته شده و سپس معیارهای ارزیابی مستخرج از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ماتریس درهم-ریختگی، عملکرد یک مدل یادگیری ماشین را بر روی مجموعه ای از داده‌های آزمایشی خلاصه می‌کند. در حقیقت این ماتریس، ابزاری برای نمایش تعداد نمونه‌های درست و نادرست بر اساس پیش‌بینی-های مدل است. از این ماتریس برای اندازه‌گیری عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی، که هدف آن پیش‌بینی یک برچسب طبقه‌بندی برای هر نمونه ورودی است، استفاده می‌شود. برای یک مساله طبقه‌بندی دو کلاسه، ۴ عنصر زیر در ماتریس درهم‌ریختگی تعریف می‌شوند:

- مثبت واقعی (TP): زمانی رخ می‌دهد که مدل به درستی، یک داده مثبت را پیش‌بینی کند.
- منفی واقعی (TN): زمانی رخ می‌دهد که مدل به درستی، یک داده منفی را پیش‌بینی کند.
- مثبت کاذب (FP): زمانی رخ می‌دهد که مدل به اشتباه، یک داده منفی را مثبت پیش‌بینی کند.
- منفی کاذب (FN): زمانی رخ می‌دهد که مدل به اشتباه، یک داده مثبت را منفی پیش‌بینی کند.

هنگام ارزیابی عملکرد یک مدل طبقه‌بندی، بررسی ماتریس درهم‌ریختگی ضروری است. این ماتریس یک تجزیه و تحلیل کامل از پیش‌بینی‌های مثبت واقعی، منفی واقعی، مثبت کاذب و منفی کاذب ارائه می‌دهد و درک عمیق‌تر از دقت، درستی و اثربخشی کلی مدل در تمایز طبقاتی را تسهیل می‌کند.

منحنی ROC نموداری است که ارزیابی یک سیستم طبقه‌بندی دودویی را به نمایش می‌گذارد. منحنی ROC توسط ترسیم نرخ مثبت واقعی یا TPR بر حسب نرخ مثبت کاذب یا FPR به دست می‌آید که با فرمول‌های زیر قابل محاسبه هستند.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۱)$$

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \quad (۲)$$

این مقادیر برای آستانه‌های مختلف در طبقه‌بندی محاسبه می‌شوند و در منحنی ROC معادل یک نقطه می‌شوند. با اتصال این نقاط به یکدیگر، منحنی ROC ایجاد می‌شود. منحنی ROC دارای سه بخش است.

- بالای خط نیمساز: در این بخش نقاطی قرار گرفته‌اند که مقدار حساسیت آن‌ها نسبت به FPR بیشتر است. به معنای آن‌که در این بخش، نرخ مثبت صحیح بیشتر از نرخ مثبت کاذب است. قرار گرفتن نقاط در این محیط مطلوب است.
- روی خط نیمساز: در این بخش، مقدار عددی نرخ مثبت صحیح و نرخ مثبت کاذب با یکدیگر برابر است. این نقاط چندان مطلوب ما نیستند.
- پایین خط نیمساز: در این قسمت نقاطی قرار گرفته‌اند که مقدار حساسیت آن‌ها نسبت به FPR کمتر است. یعنی در این بخش، نرخ مثبت صحیح کمتر از نرخ مثبت کاذب است. قرار گرفتن نقاط در این بخش اصلاً مطلوب نیست.

۳-۱-۱- معیار ارزیابی دقت

یکی از معیارهای ارزیابی دقت می‌باشد. در حقیقت این معیار بیان می‌کند که چند درصد از داده‌هایی که کلاس آن‌ها مثبت تشخیص

داده شده، واقعا مثبت هستند. دقت به بیان ریاضی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (۳)$$

۳-۱-۲- معیار ارزیابی حساسیت

از دیگر معیارهای ارزیابی حساسیت است. این معیار بیان می‌کند که چند درصد از داده‌هایی که کلاس آن‌ها مثبت بوده، به درستی مثبت تشخیص داده شده‌اند. حساسیت به بیان ریاضی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۴)$$

۳-۱-۳- معیار ارزیابی F1-Measure

معیار F1-Measure تجمیع دو معیار دقت و حساسیت بوده و هر دو جنبه عملکردی این دو معیار را در بر دارد. این معیار به بیان ریاضی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F1 - Measure = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (۵)$$

۳-۱-۴- معیار ارزیابی درستی

معیار درستی نیز همانند F1-Measure عناصر ماتریس درهم‌ریختگی را در خود تجمیع کرده است. عملکرد طبقه‌بند با در نظر گرفتن تنها همین عدد درستی به طور کامل مورد سنجش قرار گرفته و قابلیت مقایسه الگوریتم‌های مختلف را فراهم می‌ورد. درستی به بیان ریاضی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (۶)$$

۳-۱-۵- معیار ارزیابی AUC

به سطح زیر منحنی ROC، AUC گفته می‌شود. مقدار عددی AUC عددی بین صفر تا یک است و نشان می‌دهد قدرت تشخیص یک طبقه‌بند چقدر است. اگر این عدد به یک نزدیک باشد به معنای آن است که نقاط موجود روی منحنی ROC عموماً در بالای خط نیمساز قرار گرفته‌اند و میزان نرخ مثبت صحیح بالا است. اعداد AUC نزدیک به ۰٫۵ همان برابری نرخ مثبت صحیح و نرخ مثبت کاذب را نشان می‌دهد و نشان می‌دهد که طبقه‌بند نزدیک به حالت تصادفی داده‌ها را طبقه‌بندی می‌کند. اعداد کمتر از ۰٫۵ بیانگر بالاتر بودن نرخ مثبت کاذب در مقایسه با نرخ مثبت صحیح است و نشان می‌دهد که طبقه‌بند حتی بدتر از حالت تصادفی عمل می‌کند.

۴- نتایج شبیه سازی

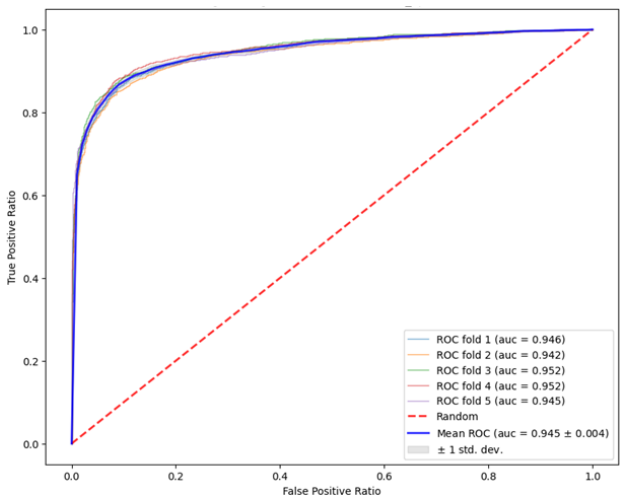
در این قسمت نتایج آموزش الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین نظارت شده روی مجموعه داده مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از زبان برنامه‌نویسی پایتون بهره گرفته شده و الگوریتم‌ها در این محیط پیاده‌سازی می‌شوند. مجموعه داده نمونه مورد استفاده در مقاله حاضر توسط [۱۷] تولید شده که از طریق لینک ارائه شده در [۲۸] قابل دریافت است. این مجموعه داده با شبیه ساز شبکه ns-2 تولید شده و برای تولید مشاهدات در آن، از روش زیر استفاده شده است: در هربار توپولوژی شبکه به‌طور تصادفی تولید شده و شبکه در مدت زمان ثابتی شبیه‌سازی شده است. ترافیک داده‌ها به‌صورت تصادفی تولید شده و تمام خطاهای رخ داده در بازه زمانی مشخص شده در پایگاه داده جمع آوری شده است. این روش تا زمانی تکرار می‌شود که تعداد مشاهدات کافی در پایگاه داده ایجاد شود. در این مجموعه داده، تعداد ۳۵۴۴۱ مشاهده جمع‌آوری شده است که این مشاهدات مربوط به بیش از هزار توپولوژی تصادفی متفاوت هستند. برای تولید توپولوژی تصادفی، ابتدا تعداد تصادفی گره (بین ۱۰ تا ۶۰۰) انتخاب شده است و سپس به صورت تصادفی اتصالات بین این گره‌ها برقرار شده است. با توجه به ترافیک، حداقل ۶۰ درصد از جریان‌ها، جریان‌های TCP بودند و بقیه به‌طور تصادفی از بین TCP و سایر انواع ترافیک بر اساس UDP انتخاب شدند. فرستنده‌ها، گیرندگان و مدت زمان هر ترافیک به صورت تصادفی تنظیم شده‌اند. بنابراین، پایگاه داده حاوی خطاهای مربوط به دوره‌های کوتاه و طولانی TCP است.

این مجموعه داده شامل ۱۰۰ ویژگی است که در آن آماره‌های مختلفی از قبیل میانگین، انحراف معیار، کمینه، بیشینه و ... در مورد اطلاعاتی از شبکه مانند RTT، زمان بین رسیدن بسته‌ها در مقصد، اندازه پنجره CWND و ... وجود دارد. همچنین اطلاعاتی از قبیل تعداد بسته‌های از دست رفته و زمان بین رسیدن بسته‌ها تقسیم بر RTT نیز موجود است. از سوی دیگر هر داده دارای برچسب A یا C است که C به معنای ازدحام و A به معنای خطاهای ارتباطی است [۱۱].

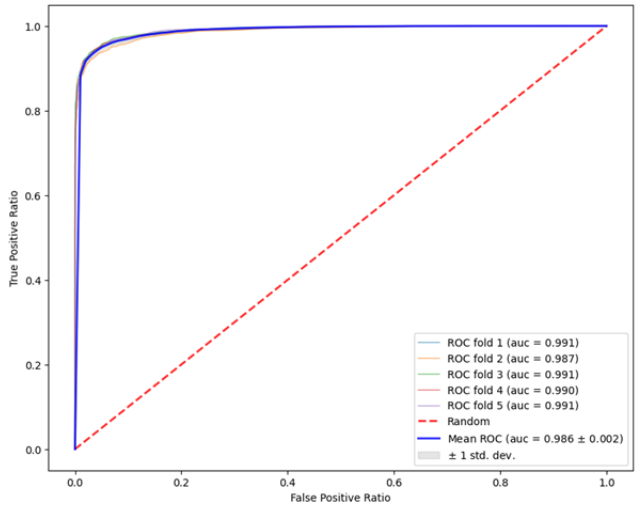
به منظور استانداردسازی ویژگی‌های مستقل موجود در داده‌ها در یک محدوده ثابت از نرمال‌سازی استفاده می‌شود. نرمال‌سازی به بهبود فرایند یادگیری ماشین کمک می‌کند زیرا باعث می‌شود اطمینان حاصل شود که در طول فرآیند یادگیری به هر مشخصه توجه می‌شود. بدون نرمال‌سازی، ویژگی‌های مقیاس بزرگ‌تر می‌توانند بر یادگیری مسلط شوند و نتایج ناهنجاری ایجاد کنند. در اینجا فرض بر آن است که مجموعه داده تنها توسط نرمال‌ساز Z-

Score مورد پیش‌پردازش قرار گرفته است. این تکنیک مقادیر ویژگی‌ها را طوری میزان می‌کند که میانگین آن‌ها برابر ۰ و انحراف معیار آنها برابر ۱ شود. در این مقاله به منظور تشخیص ازدحام از الگوریتم‌های یادگیری نظارت شده درخت تصمیم، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، لجستیک رگرسیون، K- نزدیکترین همسایه، XGBoost و شبکه عصبی استفاده می‌شود. برای الگوریتم شبکه عصبی از یک شبکه با سه لایه مخفی استفاده شده است. تعداد نورون‌ها در هر لایه مخفی برابر با ۱۰ و تعداد نورون‌ها در لایه خروجی با توجه به وجود دو کلاس برابر ۲ می‌باشد.

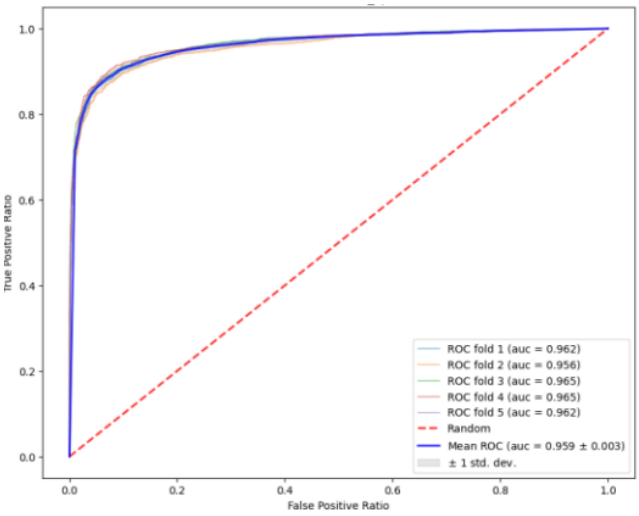
از روش ارزیابی K-fold Cross Validation با K=5 جهت ارزیابی همه الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شده است. نمودار منحنی ROC برای fold های مختلف و هم‌چنین متوسط ROC برای الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین ترسیم شده است. این نمودارها در شکل‌های ۱ تا ۷ رسم شده است. همانطور که در تمام این نمودارها مشخص است نقاط روی این منحنی‌ها با نیمساز ۴۵ درجه فاصله زیادی دارند. همچنین عدد AUC نیز برای همه الگوریتم‌ها بسیار نزدیک به ۱ است. لذا بر اساس توضیحات بخش ۳ میزان نرخ مثبت صحیح برای همه الگوریتم‌های مورد بررسی، بالا است. هم چنین مقایسه بین منحنی ROC الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهد که الگوریتم XGBoost عملکرد بهتری به لحاظ شکل منحنی دارد. به عبارت دیگر معیار AUC (که سطح زیرنمودار منحنی ROC را نشان می‌دهد) برای الگوریتم XGBoost نسبت به الگوریتم‌های دیگر بالاتر است. همچنین برای مقایسه بین الگوریتم XGBoost و الگوریتم تقویت درخت تصمیم ارائه شده در [۱۷] نیز منحنی ROC برای الگوریتم تقویت درخت تصمیم در شکل ۸ رسم شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که معیار AUC برای الگوریتم XGBoost نسبت به الگوریتم درخت تصمیم بالاتر است.



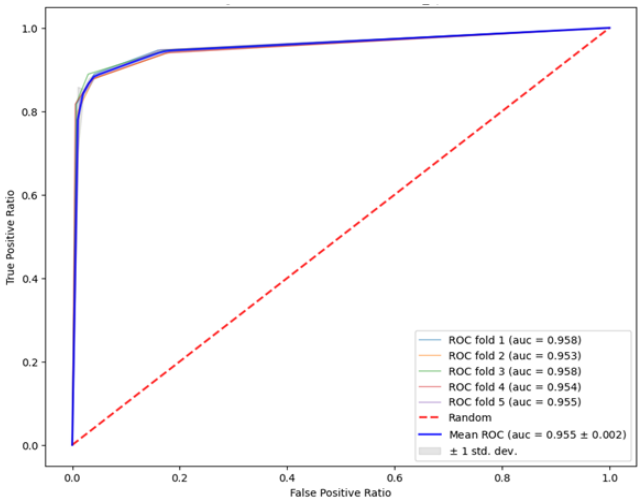
شکل ۱. منحنی ROC طبقه‌بند لاجستیک رگرسیون



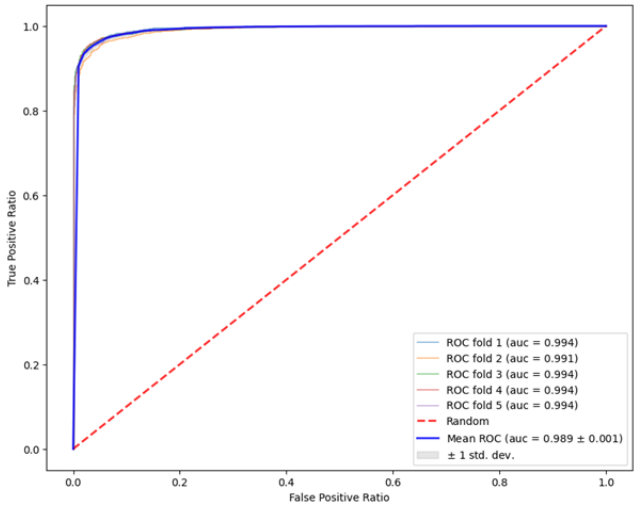
شکل ۲. منحنی ROC طبقه‌بند جنگل تصادفی



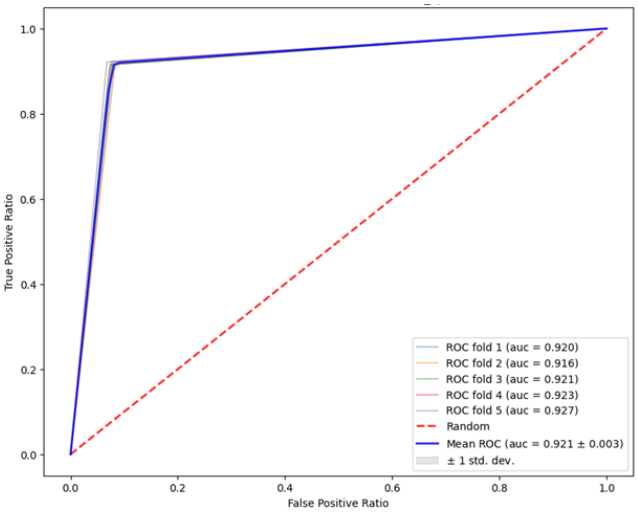
شکل ۳. منحنی ROC طبقه‌بند ماشین بردار پشتیبان



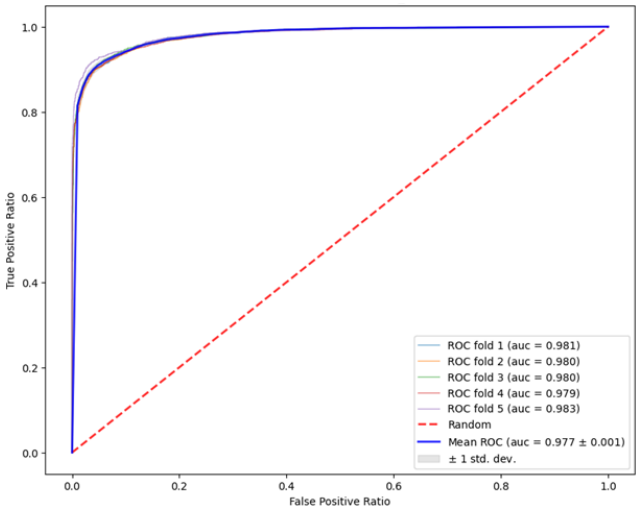
شکل ۴. منحنی ROC طبقه‌بندk نزدیکترین همسایه



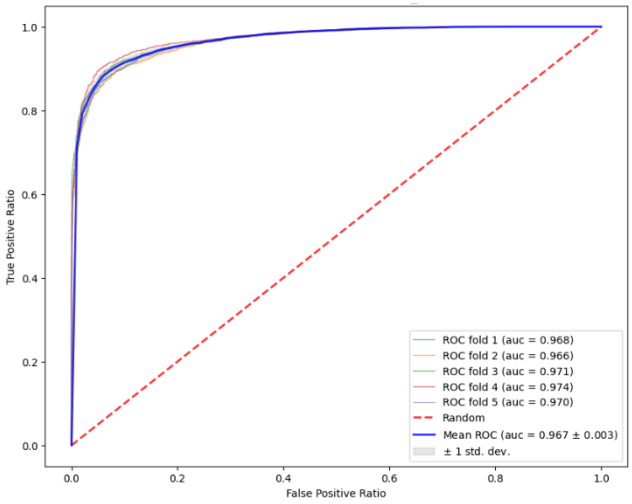
شکل ۵. منحنی ROC طبقه‌بند XGBoost



شکل ۶. منحنی ROC طبقه‌بند درخت تصمیم



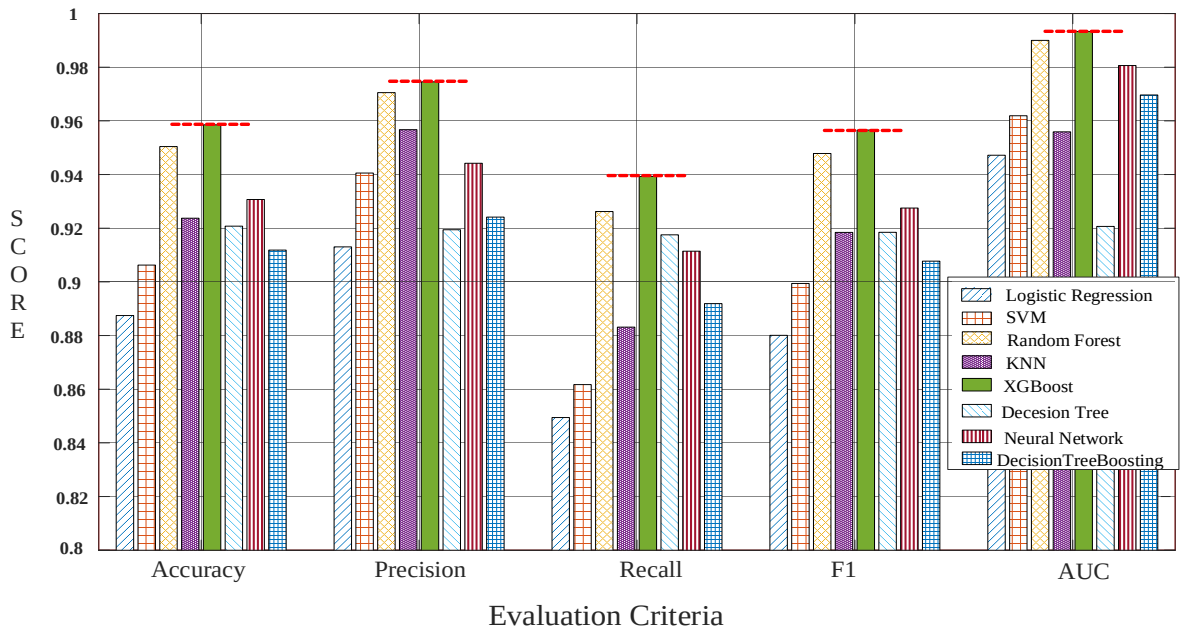
شکل ۷. منحنی ROC طبقه‌بند شبکه عصبی



شکل ۸. منحنی ROCطبقه بند تقویت درخت تصمیم

در ادامه الگوریتم‌های مختلف به لحاظ معیارهای ارزیابی گوناگون با یکدیگر مقایسه می‌شوند. بدین منظور برای هر کدام از foldها، معیارهای ارزیابی دقت، درستی، حساسیت، F1-Measure و ROC-AUC محاسبه شده است و در نهایت میانگین تمامی foldها به عنوان میانگین کلی آن معیار محاسبه شده است. این نمودارها در شکل ۹ آورده شده است.

در شکل ۹ خلاصه نتایج به دست آمده از آموزش الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین روی مجموعه داده زمانی که از نرمال‌ساز Z-Score استفاده شده نمایش داده شده است. همانگونه که مشخص است، الگوریتم XGBoost توانسته است از سایر الگوریتم‌ها در همه شاخص‌ها عملکرد بهتری ارائه دهد. بعد از این الگوریتم، الگوریتم‌های جنگل تصادفی و شبکه عصبی در جایگاه بعدی قرار دارند. برای مجموعه داده‌های حوزه شبکه، تمایز بین خطاهای ازدحام و پیوند، مستلزم یافتن الگوهای دقیق در جریان ترافیک شبکه و از دست رفتن بسته‌ها است. توانایی XGBoost در مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده و تعاملات بین ویژگی‌ها، آن را برای این امر بسیار مناسب می‌سازد. علاوه بر این، شبکه پویا و دارای تغییرات ناگهانی است. سازگاری XGBoost به آن کمک می‌کند حتی با تغییر رفتار شبکه، همچنان موثر باقی بماند. به طور خلاصه، ترکیب XGBoost از پیچیدگی مدل، منظم‌سازی، مدیریت مجموعه داده‌های نامتعادل و مکانیسم موثر هرس درخت، آن را برای کارهای طبقه‌بندی پیچیده، ایده‌آل می‌سازد. عملکرد قوی آن در شاخص‌های دقت، درستی، حساسیت، F1-Measure و ROC-AUC گواهی بر پیش‌بینی موثر الگوهای پیچیده در داده‌های شبکه است که سبب می‌شود اطمینان بالایی برای استقرار عملی در تمایز بین خطاهای ازدحام و پیوند تضمین شود.



شکل ۱. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف بر اساس معیارهای ارزیابی درستی, دقت، حساسیت، F1 و AUC

هر دو جنگل تصادفی و شبکه‌های عصبی جایگزین‌های قوی برای XGBoost با نقاط قوت خود ارائه می‌دهند. جنگل تصادفی، کاهش واریانس و مقاومت مناسبی را از طریق روش تجمیعی ارائه می‌دهد که آن را برای طبقه‌بندی شبکه بسیار قابل اعتماد می‌کند. در واقع الگوریتم جنگل تصادفی، چندین درخت تصمیم می‌سازد و آن‌ها را با هم ادغام می‌کند تا پیش‌بینی دقیق و پایدارتری داشته باشد. شبکه‌های عصبی انعطاف‌پذیری و قابلیت یادگیری بی‌نظیری را به ویژه در یادگیری الگوهای پیچیده لازم برای تمایز مؤثر در رفتار شبکه فراهم می‌کنند. این امر ناشی از قابلیت مدل‌سازی و یادگیری روابط غیرخطی به علت ساختار معماری چندلایه و وجود توابع فعال‌سازی می‌باشد. بررسی نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد که به لحاظ معیارهای مختلف ارزیابی، الگوریتم جنگل تصادفی پس از الگوریتم XGBoost در رتبه دوم قرار دارد. همچنین الگوریتم شبکه عصبی نیز در تمام معیارها در رتبه سوم قرار دارد (به جز معیار حساسیت که اختلاف کمی با الگوریتم لجستیک رگرسیون دارد). قرار گرفتن این دو الگوریتم در رتبه‌های دوم و سوم نشان‌دهنده کارایی آن‌ها در مدیریت پیچیدگی‌ها و پویایی داده‌های ترافیک شبکه است. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی در شکل ۹ مقایسه بین الگوریتم XGBoost و الگوریتم تقویت درخت تصمیم نشان می‌دهد که به لحاظ تمام معیارهای ارزیابی XGBoost عملکرد بهتری را ارائه می دهد. به عنوان مثال به لحاظ معیار ارزیابی درستی، الگوریتم XGBoost دارای درستی ۹۶ درصد در تفکیک کلاس ازدحام از کلاس خطاهای ارتباطی است در حالی که این عدد برای الگوریتم تقویت درخت تصمیم ۹۱ درصد می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله تشخیص ازدحام با دقت بالا با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت شده بود و مسئله اصلی با عنوان شناسایی ازدحام و تفکیک آن از خطای ناشی از لینک‌های ارتباطی مورد بررسی قرار گرفت. برای حل مسئله مذکور از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت شده‌ی متعدد از جمله درخت تصمیم، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، لجیستیک رگرسیون، K-نزدیکترین همسایه، XGBoost، شبکه عصبی و تقویت درخت تصمیم استفاده گردید. در راستای یافتن بهترین روش حل مساله از میان روش‌های مذکور عملکرد این الگوریتم‌ها با کمک معیارهای مختلف از جمله دقت، درستی، F1-measure، حساسیت و AUC ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوریتم XGBoost توانسته است بر اساس همه معیارهای ارزیابی از سایر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری ارائه دهد و الگوریتم‌های جنگل تصادفی و شبکه عصبی در جایگاه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین مقایسه بین الگوریتم XGBoost و الگوریتم تقویت درخت تصمیم ارائه شده در [۱۷] بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم XGBoost بر اساس تمام معیارهای ارزیابی است. به عنوان مثال به لحاظ معیار ارزیابی درستی، الگوریتم XGBoost دارای درستی ۹۶ درصد در تفکیک کلاس ازدحام از کلاس خطاهای ارتباطی است اما درستی الگوریتم تقویت درخت تصمیم ۹۱ درصد می‌باشد. لذا الگوریتم XGBoost به عنوان یک روش کارامد برای حل مسئله تشخیص ازدحام در شبکه می‌تواند مورد بهره برداری قرار گیرد.

در ادامه فعالیت‌های انجام شده در این مقاله به شبیه‌سازی محیط‌های پیچیده‌تر، از قبیل شبکه با فرضیاتی نظیر تحرک کاربران یا وجود فیدینگ در کانال به منظور واقعی تر شدن مسئله، با استفاده از شبیه‌ساز شبکه NS3 پرداخته و مسئله شناسایی ازدحام را در آن محیط‌ها مورد بررسی قرار خواهیم داد. همچنین استفاده از انواع الگوریتم‌های شبکه عصبی عمیق از جمله LSTM برای پیش‌بینی ازدحام از دیگر مطالعاتی است که در ادامه مطالعه حاضر انجام خواهد شد.

مراجع

[1] Z. Zhang; Y. Zhou; L. Teng; W. Sun; C. Li and X.Min, "Quality-of-Experience Evaluation for Digital Twins in 6G Network Environments," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, pp. 1-13, 2024.

[2] R. Prasad and A. Sunny, "QoS-Aware Scheduling in 5G Wireless Base Stations," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 32, no. 3, pp. 1999-2011, June 2024.

[3] J. P. Astudillo León, L. J. Cruz Llopis and F. J. Rico-Novella, "A machine learning based Distributed Congestion Control Protocol for multi-hop wireless networks," in *Computer Networks*, vol. 231, July 2023.

[4] J. Lorincz, Z. Klarin and J. Ožegovic, "A Comprehensive Overview of TCP Congestion Control in 5G Networks: Research Challenges and Future Perspectives," in *MDPI Sensors*, vol. 21, no. 13, pp. 4510, 2021.

[5] L. Machora. "A survey of transmission control protocol variants," in *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 21, no. 3, pp. 1828– 1853, 2024.

[6] I. Stoica, "A Comparative Analysis of TCP Tahoe, Reno, New-Reno, SACK and Vegas," University of California Berkeley, CA, 2005.

[7] Z. Tafa, Zhilbert, and V. Milutinovic. "Machine learning in congestion control: A survey on selected algorithms and a new roadmap to their implementation." *arXiv preprint* arXiv:2112.15522 2021.

[8] T. Zhang and S. Mao, "Machine Learning for End-to-End Congestion Control," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 6, pp. 52-57, June 2020.

[9] Huiling Jiang, Qing Li, Yong Jiang, GengBiao Shen, Richard Sinnott, Chen Tian, Mingwei Xu, "When machine learning meets congestion control: A survey and comparison", in *Computer Networks*, vol. 192, pp. 1-28, 2021.

[10] M. B. M. Kamel, I. Ahmed Najm and A. Khalaf Hamoud, "Congestion Control Prediction Model for 5G Environment Based on Supervised and Unsupervised Machine Learning Approach," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 91127-91139, 2024

[11] J. Alejandrino, R. Concepcion, S. Lauguico, M. G. Palconit, A. Bandala and E. Dadios, "Congestion Detection in Wireless Sensor Networks Based on Artificial Neural Network and Support Vector Machine," in 12th International Conf. on Humanoid, Nanotechnology, Inf. Tech., Commun. and Control, Environment, and Management (HNICEM), Manila, Philippines, 2020, pp. 1-6.

[12] P.T. Kasthuribai, "Optimized support vector machine based congestion control in wireless sensor network based Internet of Things," in *Int. J. Computer Network and Application*, vol. 8, no. 4, pp. 444-454, 2021.

[13] N. Kumar, and M. Raubal. "Applications of deep learning in congestion detection, prediction and alleviation: A survey." in *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* vol.133 pp. 103432, 2021.

[14] G. W. Geremew, , J. Ding. "Elephant Flows Detection Using Deep Neural Network, Convolutional Neural Network, Long Short-Term Memory, and Autoencoder." in *Journal of Computer Networks and Communications*, pp. 1-18, 2023.

[15] M. Labonne, C. Chatzinakis and A. Olivereau, "Predicting Bandwidth Utilization on Network Links Using Machine Learning," in European Conf. on Networks and Commun. (EuCNC), Dubrovnik, Croatia, 2020, pp. 242-247.

[16] P. Geurts, I. El Khayat and G. Leduc, "A machine learning approach to improve congestion control over wireless computer networks," in Fourth IEEE International Conf. on Data Mining (ICDM'04), Brighton, UK, 2004, pp. 383-386.

[17] I. El Khayat, P. Geurts, and G. Leduc, 'Improving TCP in Wireless Networks with an Adaptive Machine-Learnt Classifier of Packet Loss Causes', in NETWORKING, 2005, pp. 549–560.

[18] J. D. Kelleher, B. M. Namee and A. D. Arcy. Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: algorithms, worked examples, and case studies. MIT press, 2020.

[19] T. K. Ho, "Random Decision Forests," in Proceedings of the 3rd International Conf. on Document Analysis and Recognition, Montreal, QC, 14–16 Aug., 1995, pp. 278–282.

[20] J. Tolles, WJ. Meurer, "Logistic Regression: Relating Patient Characteristics to Outcomes," in *JAMA*, Vol. 316, no. 5, pp. 533-534, Aug. 2016.

[21] E. Fix, J. L. Hodges, "Discriminatory Analysis. Nonparametric Discrimination: Consistency Properties," in International Statistical Review, vol. 57, no.3, pp. 238-247, 1989.

[22] R. O. Duda and P. E. Hart, Pattern classification. John Wiley & Sons, 2006.

[23] T. Chen, "Story and Lessons behind the evolution of XGBoost," 2016.

[24] LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," in *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, 2015.

[25] D. Shi, W. Ping, A. Khushnood. "A survey on deep learning and its applications," in *Computer Science Review*, vol. 40, pp. 100379, 2021.

[26] Y. Freund, R. E Schapire. "A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting," in *J. of Computer and System Sciences*, vol. 55, no. 1, pp. 119-139, 1997.

[27] C. M. Bishop, and N. M. Nasrabadi. Pattern recognition and machine learning. Vol. 4. No. 4. New York: springer, 2006.

[28] [Online]. Available: https://people.montefiore.uliege.be/geurts/Papers/Boosting-DT/BD-Fifo.dat.gz

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 166-186

Digital Twin: Embracing the Fourth Industrial Revolution in Food Supply Chain Management (A Dynamic Analysis)

Hajar Soleymanizadeh[1], Seyed Mahmood Zanjirchi[2*], Habib Zare Ahmadabadi[3], Seyed Habibollah Mirghafoori[4]

[1] PhD Student of Industrial Management, Faculty of Economics-Management and Accounting, Yazd, Iran
[2] Professor of Industrial Management Department, Faculty of Economics-Management and Accounting, Yazd, Iran
[3] Associate Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Economics-Management and Accounting, Yazd, Iran
[4] Associate Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Economics-Management and Accounting, Yazd, Iran

Received: 31 August 2024, Revised: 01 November 2024, Accepted: 25 February 2025
Paper type: Research

Abstract

Today, the food supply chain is facing various challenges, including long supply chains, complexity, uncertainty, and food waste. With the advent of advanced technologies such as digital twins, these challenges can be addressed. The aim of this study is to investigate the causal relationships between the influencing factors and the results of implementing digital twins in the food supply chain using system dynamics. A descriptive-causal approach with an application-oriented goal was employed, involving a field study among food industry experts, managers, and specialists. Data was collected from various sources such as interviews, reports, documents, and databases. System dynamics was used to analyze the causal relationships between the implementation and application of digital twins in the food supply chain. Three scenarios were considered to provide solutions for the best possible use of digital twin technology in the food industry. The findings showed that an increase in the cost of upgrading internet speed and technology infrastructure, as well as an increase in the training rate of employees, are factors that influence the creation of digital twins. However, the quality of using digital twins in the early years is not optimal due to the lack of skills and knowledge of employees and their resistance to accepting this technology. By training employees and using experts in the field of digital twin technology, employee resistance can be reduced and their understanding of the benefits of using this technology can be increased. In addition, the results showed that the implementation of digital twins can improve product quality, increase consumer willingness to purchase, and reduce the total cost of the product in the long term.

Keywords: Supply Chain, Fourth Industry, Digital Twin, System Dynamics, Food Industry, Technology Deployment.

* Corresponding Author's email: zanjirchi@yazd.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۶۶ الی ۱۸۶

دوقلوی دیجیتال: تبلور انقلاب صنعتی چهارم در مدیریت زنجیره تأمین مواد غذایی (تحلیلی پویا)

هاجر سلیمانی‌زاده[۱]، سیدمحمود زنجیرچی[۲*]، حبیب زارع احمدآبادی[۳]، سیدحبیب‌الله میرغفوری[۴]

[۱] دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد- مدیریت و حسابداری، یزد، ایران

[۲] استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد- مدیریت و حسابداری، یزد، ایران

[۳] دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد- مدیریت و حسابداری، یزد، ایران

[۴] دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد- مدیریت و حسابداری، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

امروزه زنجیره تأمین مواد غذایی با چالش‌های مختلفی از جمله طولانی بودن مسیر در زنجیره مواد غذایی، پیچیدگی، عدم قطعیت و ضایعات مواد غذایی مواجه است. با ظهور فناوری‌های پیشرفته، از جمله فناوری دوقلوی دیجیتال، می‌توان به این چالش‌ها پرداخت. هدف از این مطالعه بررسی روابط علت و معلولی بین عوامل مؤثر و نتایج استقرار دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی با استفاده از پویایی سیستم است. یک رویکرد توصیفی- علی با هدف کاربردی‌محور، شامل بررسی میدانی بین کارشناسان، مدیران و متخصصان صنایع غذایی به کار گرفته شد. داده‌ها از منابع مختلف از جمله مصاحبه، گزارش، اسناد و پایگاه‌های داده جمع‌آوری شده است. از پویایی سیستم برای تجزیه و تحلیل روابط علت و معلولی استقرار و کاربرد دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی استفاده شد. سه سناریو برای ارائه راهکارهایی برای بهترین استفاده ممکن از فناوری دوقلو دیجیتال در صنایع غذایی مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد افزایش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری و همچنین افزایش نرخ آموزش کارکنان از عوامل موثر در ایجاد دوقلوهای دیجیتال هستند. اما کیفیت استفاده از دوقلوهای دیجیتال در سال‌های اولیه به دلیل عدم مهارت و دانش کارکنان و مقاومت آن‌ها در پذیرش این فناوری مطلوب نیست. با آموزش کارکنان و استفاده از متخصصان در زمینه فناوری دوقلو دیجیتال، می‌توان مقاومت کارکنان را کاهش داد و درک آن‌ها از مزایای استفاده از این فناوری را افزایش داد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که پیاده‌سازی دوقلوهای دیجیتال می‌تواند کیفیت محصول را بهبود، تمایل مصرف‌کننده به خرید را افزایش و هزینه کل محصول را در بلندمدت کاهش دهد.

کلیدواژگان: زنجیره تأمین، صنعت چهارم، دوقلوی دیجیتال، پویایی سیستم، صنعت مواد غذایی، استقرار فناوری.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: zanjirchi@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه زنجیره تأمین مواد غذایی به سیستمی بسیار پیچیده و چندوجهی تبدیل شده است که مسیر طویلی را از مزارع و کارخانه‌های تولیدی تا تبدیل به محصول نهایی طی می‌کند. این زنجیره دارای چندین مؤلفه به هم مرتبط است که هر یک وظیفه حیاتی را در تهیه، پردازش، توزیع و تحویل مواد غذایی بر عهده دارند [1].زنجیره تأمین مواد غذایی نقشی حیاتی در تضمین ایمنی، کیفیت و قابلیت ردیابی محصولات غذایی ایفا می‌کند. لذا مصرف‌کنندگان به طور فزاینده‌ای خواستار غذای ایمن، با کیفیت بالا و با منشاء مشخص هستند [۲]. این امر زنجیره تأمین مواد غذایی را تحت فشار قرار می‌دهد تا کارآمدتر، شفاف‌تر و پایدارتر عمل کند. از طرفی، پاسخگویی موثر به تقاضای مشتریان برای مواد غذایی باکیفیت بالا مستلزم یک زنجیره تأمین مواد غذایی با مدیریت دقیق است که به طور همزمان از بروز مشکلات و ضررهای بعدی جلوگیری می‌کند [۳].

علی‌رغم اهمیت زنجیره تأمین مواد غذایی و نقش آن در کیفیت محصولات نهایی، این زنجیره با مشکلات و چالش‌های متعددی مواجه است [4]. یکی از این چالش‌ها، مسیر طولانی در زنجیره مواد غذایی از تأمین‌کننده به مصرف‌کننده نهایی است. این موضوع ردیابی منشاء غذا را برای مصرف‌کنندگان دشوار کرده و خطرات مربوط به ایمنی مواد غذایی را افزایش می‌دهد [۵]. اطمینان از ایمنی و کیفیت محصولات غذایی برای حفاظت از سلامت عمومی و حفظ اعتماد مصرف‌کننده ضروری است [۶]. همچنین، پیچیدگی و عدم قطعیت نیز به عنوان یک چالش مهم در مراحل مختلف مواد غذایی خود را نشان می‌دهد [۷]. این عدم قطعیت به دلیل ماهیت پیچیده و پراکنده زنجیره تأمین مواد غذایی و وجود بازیگران متعدد در سطوح مختلف (از تولیدکنندگان تا خرده‌فروشان)، به وجود می‌آید [۸]. فقدان کنترل کافی بر عملیات ذخیره‌سازی و حمل و نقل مواد غذایی در طول زنجیره، منجر به افزایش عدم قطعیت و بروز مشکلات متعددی می‌شود [۹]. ضایعات مواد غذایی یکی دیگر از موارد قابل توجه است [۱۰]. ناکارآمدی در جابجایی، ذخیره‌سازی و فقدان زیرساخت‌های مناسب برای فرآوری، حمل و نقل و نگهداری سرد از جمله دلایل اصلی این ضایعات به شمار می‌آیند [۱۱]. این امر می‌تواند منجر به ناپایداری زیست محیطی و اجتماعی، از جمله افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و استثمار نیروی کار شود. برای غلبه بر این چالش‌ها، شرکت‌های مواد غذایی به طور فزاینده‌ای به دنبال راه‌حل‌های نوآورانه هستند. فناوری‌های نوین صنعت ۴ می‌توانند جهت غلبه بر این چالش‌ها مورد استفاده قرار بگیرند [12].

یکی از فناوری‌های نوظهوری که پتانسیل قابل توجهی برای تحول این صنعت دارد، دوقلوی دیجیتال است. رشد چشمگیر فناوری‌های فعال‌کننده صنعت ۴,۰ مانند حسگرها، اینترنت اشیا [۱۳]، محاسبات ابری، تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ، و واقعیت افزوده و مجازی، زمینه را برای پذیرش گسترده دوقلوی دیجیتال در طیف وسیعی از بخش‌های صنعتی فراهم کرده است [۱۴]. دوقلو دیجیتال یک کپی مجازی از یک شی فیزیکی، فرآیند یا سیستم است که می‌تواند برای نظارت و کنترل همتای واقعی خود استفاده شود [۱۵]. در زمینه صنعت مواد غذایی، یک دوقلو دیجیتالی می‌تواند برای نظارت بر ایمنی مواد غذایی از تأمین مواد اولیه تا توزیع محصولات نهایی استفاده شود [۱۶]. با شبیه‌سازی فرآیند تولید به صورت دیجیتال، شرکت‌ها می‌توانند بر طیف وسیعی از پارامترهای موثر بر ایمنی مواد غذایی نظارت و کنترل دقیق داشته باشند [۱۷]. با انجام شبیه‌سازی، می‌توان بر روی دما، رطوبت و سایر عوامل محیطی را که بر رشد باکتری‌ها یا سایر عوامل بیماری‌زا تأثیر می‌گذارند، نظارت کرد [۱۸]. همچنین می‌توان کیفیت مواد خام و محصولات نهایی را کنترل و از رعایت استانداردهای نظارتی و ایمن بودن برای مصرف اطمینان حاصل کرد [۱۹]. استفاده از دوقلوی دیجیتال در صنعت مواد غذایی تحت تأثیر تعدادی از عوامل هدایت می‌شود. یکی از محرک‌های اصلی نیاز به کارایی و بهره‌وری بیشتر در مواجهه با افزایش رقابت و تغییر تقاضای مصرف‌کنندگان است [۲۰]. فناوری دوقلوی دیجیتال نه تنها تصویری دقیق از زنجیره تأمین مواد غذایی ارائه می‌دهد، بلکه با ارائه داده‌های تاریخی و بی‌درنگ از موجودیت فیزیکی، به ذینفعان مختلف، مانند تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان مواد غذایی، ابزاری قدرتمند برای تجزیه و تحلیل سناریوها، مقایسه گزینه‌ها و پیش‌بینی اختلالات احتمالی در زنجیره تأمین را ارائه می‌دهد [۲۱]. با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف تولید و شناسایی تنگناها یا ناکارآمدی‌های احتمالی، شرکت‌ها می‌توانند عملیات خود را بهینه کرده و ضایعات را کاهش دهند [۲۲]. یکی دیگر از عوامل کلیدی نیاز به اطمینان به کیفیت مواد غذایی است. شرکت‌های مواد غذایی با ایجاد دوقلوهای دیجیتالی از فرآیندهای تولید خود و نظارت بر آن‌ها در زمان واقعی، می‌توانند مشکلات بالقوه کیفیت را شناسایی کرده و اقدامات اصلاحی را قبل از تبدیل شدن به یک مشکل انجام دهند [۲۳]. این امر به اطمینان از رعایت مقررات ایمنی مواد غذایی و محافظت از مصرف‌کنندگان در برابر بیماری‌های ناشی از غذا کمک می‌کند.

فناوری دوقلوی دیجیتال به طور گسترده در صنایع مختلفی مانند ساخت‌وساز [۲۴]؛ [۲۵]؛ [۲۶]، مراقبت‌های بهداشتی [۲۷]؛ [۲۸]؛ [۲۷]؛ [۲۹] ، خودروسازی [۳۰]؛ [۳۱] و ... مورد مطالعه قرار گرفته

است. با این حال، تحقیقات جامع در مورد کاربرد این فناوری در صنعت مواد غذایی هنوز در مراحل اولیه خود است. شایان ذکر است که پژوهش‌های محدود انجام شده در زمینه کاربردهای دوقلوی دیجیتال در صنعت مواد غذایی، عمدتاً بر روی حوزه‌های خاص یا موارد استفاده محدود تمرکز داشته‌اند. به عنوان مثال، [۳۲] به بررسی تاثیر همه‌گیری کووید-۱۹ بر زنجیره تأمین خرده فروشی مواد غذایی و میزان تاب‌آوری آن در برابر این بحران با استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال پرداختند. [۳۳] در مطالعه خود به کاربرد دوقلوی دیجیتال در زمینه‌ی نظارت بر کیفیت میوه در زنجیره تأمین مواد غذایی اشاره کرده‌اند. [۳۴] به بررسی نقش فناوری دوقلوی دیجیتال در بهبود تاب‌آوری و پایداری زنجیره تأمین مواد غذایی پرداخته‌اند. [۳۵] یک مرور سیتماتیک با هدف پاسخ به سوالات علمی رایج در مورد کاربرد مدل‌های دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین کشاورزی و غذایی انجام داده‌اند. [۲۲] در مطالعه خود به بررسی مزایای مدل دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی پرداخته‌اند. [۳۶] با استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال مشکلات واقعی در یک شرکت فرآوری مواد غذایی را پیاده‌سازی کرده و با استفاده از شبیه‌سازی به بررسی مشکلات موجود پرداخته‌اند.

در مطالعات انجام شده تأثیر فناوری دوقلوی دیجیتال در صنعت مواد غذایی در زمینه‌هایی همچون بهبود کارایی در زنجیره تأمین مواد غذایی، افزایش تاب‌آوری و کاهش هزینه‌ها، افزایش شفافیت و اعتماد، بهبود پایداری، بهبود ایمنی و کیفیت محصول و ... مورد بررسی قرار گرفته است [37]. همچنین در برخی از مطالعات انجام شده با انجام مرور سیستماتیک به بررسی کاربرد فناوری دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی اشاره شده است. در حالی که مطالعات متعددی به بررسی عوامل مؤثر و مزایای استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال در صنعت مواد غذایی پرداخته‌اند، خلأ قابل توجهی در درک نحوه تعامل این عوامل و پیامدهای سیستمی آنها بر زنجیره تأمین مواد غذایی وجود دارد. اگرچه فناوری دوقلوی دیجیتال پتانسیل تحول زنجیره تأمین مواد غذایی را دارد، اما پذیرش و استقرار آن به سادگی امکان‌پذیر نیست. این فناوری نوظهور با چالش‌ها و موانع متعددی روبرو است. ما در این پژوهش سعی می‌کنیم عوامل اثرگذار بر استقرار دوقلوی دیجیتال را شناسایی و بر اساس دیدگاه سیستمی که در آن عناصر یک سیستم با یکدیگر در تعامل بوده و تغییر در یکی از آنها می‌تواند کل سیستم را تحت تاثیر قرار دهد، با اتخاذ رویکردی جامع و سیستمی به بررسی روابط علت و معلولی بین عوامل مؤثر و نتایج استقرار دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی بپردازیم. این رویکرد به ما کمک می‌کند تا روابط پیچیده و پویای بین عوامل مختلف را درک کرده و تاثیر تغییرات در یک عنصر را بر کل سیستم زنجیره تأمین پیش‌بینی کنیم. در این راستا، روش‌شناسی پویایی سیستم به عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل این روابط و تأثیرات متقابل بین عناصر سیستم و تغییرات آنها مطرح می‌شود. پویایی سیستم رویکردی تحقیقاتی برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های پیچیده است که بر پایه مفاهیم بازخورد، تأخیر و انباشت بنا شده است [۳۸]. این روش به بررسی چگونگی تعامل عناصر مختلف سیستم و نحوه تغییر رفتار آن در طول زمان می‌پردازد. با توجه به عدم وجود مطالعه‌ای با رویکرد سیستمی و نگاهی جامع به نحوه اثرگذاری و اثرپذیری عوامل موثر بر استقرار و کاربرد فناوری دوقلوی دیجیتال در صنعت مواد غذایی، هدف از انجام این پژوهش بررسی روابط علت و معلولی بین عوامل مؤثر و نتایج استقرار دوقلوی دیجیتال در زنجیره مواد غذایی با استفاده از روش شناسی پویایی سیستم است.

۲- بررسی ادبیات و پیشینه پژوهش

صنعت غذایی با چالش‌های مهمی پیرامون کیفیت، ضایعات، ایمنی و امنیت مواجه است. زنجیره تأمین مواد غذایی در مقایسه با زنجیره تأمین عمومی ویژگی‌های منحصر به فردی دارد. اولاً، بسیاری از محصولات غذایی فاسد شدنی هستند، در مقایسه با کالاهای بادوام ماندگاری محدودی دارند و نیاز به مدیریت زنجیره سرد و حمل و نقل به موقع دارند. ثانیاً، برای اطمینان از کیفیت و ایمنی مواد غذایی، محصولات غذایی اغلب دارای شرایط ذخیره‌سازی و پردازش خاصی هستند، مانند دما، رطوبت، و جابجایی. علاوه بر این، محصولات غذایی اغلب در مقایسه با کالاهای تولید شده معمولی، دچار دگرگونی‌های بیشتری (مانند ذبح، نگهداری، پخت‌وپز و بسته‌بندی) می‌شوند که پیچیدگی زنجیره تأمین مواد غذایی را افزایش می‌دهد [۳۹]. ثالثاً، برای اطمینان از ایمنی مواد غذایی، محصولات غذایی به قابلیت ردیابی سرتاسر نیاز دارند، که برای مدیریت فراخوان مواد غذایی حیاتی است. پیشرفت‌های اخیر در حوزه فناوری، فرصت‌های جدیدی جهت ارتقای شفافیت و کارایی برای ذینفعان مختلف در زنجیره تأمین ، از جمله کشاورزان [۴۰]، پردازنده‌های مواد غذایی [۳۶]، توزیع‌کنندگان[۴۱] و خرده‌فروشان [۳۲] ارائه می‌دهد. دوقلوهای دیجیتال پتانسیل قوی برای حل برخی از مسائل اساسی زنجیره تأمین مواد غذایی را نشان می‌دهند. این فناوری در حال حاضر در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته و مطالعاتی نیز در این زمینه انجام شده است. به عنوان نمونه، یک مطالعه تحقیقاتی و کاربردی برای تقویت تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران‌های غیرمنتظره مانند کووید-۱۹ ارائه شده است. این

مقاله با در نظر گرفتن پنج رکن اساسی، چارچوبی را برای افزایش پایداری کشاورزان پیشنهاد می‌کند و این ارکان بر روی یک مدل دوقلوی دیجیتال با قابلیت شبیه‌سازی پیاده‌سازی می‌شوند. هدف نهایی این مطالعه، توسعه رویکرد و ابزاری است که توانایی کشاورزان را برای مقابله با هرگونه اختلال بهبود بخشد و از آن‌ها در تمام فعالیت‌های مدیریت و کنترل‌شان پشتیبانی کند. مدل ارائه شده در این مطالعه با الهام از مفهوم مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها، به دنبال تحلیل اثرات ریسک‌ها و همچنین سیاست‌هایی است که می‌تواند از بروز آن‌ها جلوگیری کند، اثراتشان را کاهش دهد یا در برابر هر ریسک داخلی یا خارجی در سه سطح (سازمان کشاورزان، زنجیره تأمین و محیط مرتبط) واکنش نشان دهد [۴۲]. در مطالعه‌ای دیگر، تاثیر همه‌گیری کووید-۱۹ بر زنجیره تأمین خرده‌فروشی مواد غذایی (زنجیره تأمین) و میزان تاب‌آوری آن در برابر این بحران مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه بر اساس سناریوهای واقعی همه‌گیری که در آلمان رخ داده، یک مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته با استفاده از نرم‌افزار (anyLogistix) توسعه داده و از آن برای بررسی عملکرد و پویایی زنجیره تأمین استفاده شد. نتایج محاسباتی نشان داد که تاب‌آوری زنجیره تأمین خرده‌فروشی مواد غذایی در زمان بحران تحت تاثیر سه عامل اصلی شدت همه‌گیری و اقدامات قرنطینه/تعطیلی مرتبط با دولت، پویایی سفارش موجودی در زنجیره تأمین و رفتار مشتریان قرار دارد. مشاهدات نشان داد که افزایش ناگهانی تقاضا و تعطیلی تأمین‌کنندگان بیشترین تأثیر را بر عملکرد و کارایی زنجیره تأمین داشته‌اند، در حالی که تأثیر اختلالات حمل‌و نقل نسبتاً کم بوده است. با این حال، هزینه‌های حمل و نقل به دلیل نوسانات زیاد در سفارش‌دهی و در نتیجه حمل و نقل‌های مکرر و نامنظم، افزایش یافته است. در مطالعه‌ی دیگری، به بررسی شکاف تکنولوژیکی در زمینه‌ی نظارت بر کیفیت میوه در زنجیره تأمین مواد غذایی پرداخته شد. در این مطالعه یک راه‌حل امیدوارکننده مبتنی بر دوقلوی دیجیتال برای کاهش ضایعات میوه ارائه شده است. هدف ارائه شده در این مطالعه، بکارگیری یک روش جدید برای ایجاد یک مدل دوقلوی دیجیتال مبتنی بر یادگیری ماشین برای میوه‌ی موز است تا بتوان تغییرات کیفی آن را در طول انبارداری پایش کند. به دلیل توانایی دوربین حرارتی در تشخیص تغییرات سطحی و فیزیولوژیکی میوه در طول انبارداری، از آن به عنوان ابزاری برای جمع‌آوری داده استفاده شده است. در این مطالعه، پس از ایجاد مجموعه‌ی داده‌ی تصاویر حرارتی متعلق به چهار طبقه (کیفیت)، آموزش مدل با استفاده از فناوری‌های هوشمند شرکت SAP انجام شده است. راه‌حل ارائه شده از یک شبکه‌ی عصبی پیچشی عمیق برای پایش وضعیت میوه بر اساس اطلاعات حرارتی استفاده می‌کند و فرایند آموزش، دقت بالایی را نشان داده است. این روش، تکنیکی امیدوارکننده برای توسعه‌ی مدل‌های دوقلوی دیجیتال میوه است. استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری حرارتی می‌تواند به عنوان منبعی برای ایجاد مدل دوقلوی دیجیتال میوه مبتنی بر یادگیری ماشین به کار رود و در نتیجه، ضایعات میوه در زنجیره‌ی تأمین مواد غذایی را به حداقل برساند [۳۳]. پژوهش دیگری به بررسی نقش فناوری دوقلوی دیجیتال در بهبود تاب‌آوری و پایداری زنجیره تأمین مواد غذایی پرداخته است. در این مطالعه عنوان شده است که پذیرش فناوری‌های دیجیتال می‌تواند منجر به افزایش تولید، کارایی و سودآوری زنجیره تأمین مواد غذایی شود. مدل دوقلوی دیجیتال ائه شده در زنجیره تأمین مواد غذایی می‌تواند انعطاف‌پذیری این زنجیره را افزایش، ضایعات مواد غذایی را کاهش و پایداری آن را بهبود بخشد. هدف این تحقیق شناسایی و تحلیل نقش فناوری دوقلوی دیجیتال در ارتقای تاب‌آوری و پایداری زنجیره تأمین مواد غذایی بوده است. در این مطالعه برای تجزیه و تحلیل، از روش جدید مدل‌سازی علی خاکستری (GCM) استفاده شده است. متدولوژی GCMبرای تحلیل علی می‌تواند چهار ویژگی را در نظر بگیرد که به عنوان علل، اثرات، اهداف و نتایج شناخته می‌شوند. در این پژوهش، پانزده عامل از طریق مرور ادبیات موجود و نظرات کارشناسان شناسایی شده است. پاسخ‌ها از کارشناسان در دو فاز جمع‌آوری شده است. در فاز اول، پاسخ‌ها برای یافتن عوامل علت و معلولی گرفته شد، و در فاز دوم، پاسخ‌ها برای رتبه‌بندی جفت‌های علت و معلولی شناسایی شده برای اهداف مختلف برای محاسبه نتایج مطالعه جمع‌آوری شد. بر اساس نتایج با توجه به اهداف، سناریوهای مختلف با استفاده از نمودارهای مقیاس ترسیم گردید. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که «هماهنگی بهبود یافته» با در نظر گرفتن دو هدف همزمان «تاب‌آوری» و «پایداری»، عامل علی سرنوشت‌ساز است. این تحقیق می‌تواند برای سیاستگذاران، متخصصان و صنایع غذایی برای توسعه یک سیستم زنجیره تأمین مواد غذایی پایدار و انعطاف‌پذیر مفید باشد [۳۵]. همچنین، در پژوهشی دیگر به مرور ادبیات موجود و نظر کارشناسان، به شناسایی موانع پیاده‌سازی مدل دوقلوی دیجیتال پرداخته شده است. یافته‌های این مطالعه برای سازمان‌های دولتی، سیاست‌گذاران، مؤسسات کشاورزی و ذی‌نفعان صنعت کشاورزی و غذایی مفید خواهد بود تا موانع پیاده‌سازی موفق مدل دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین کشاورزی و غذایی را از بین ببرند [۴۳]. مطالعه‌ی دیگری، به بررسی مزایای مدل دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی پرداخته است. در بسیاری از موارد، ابهاماتی در مورد

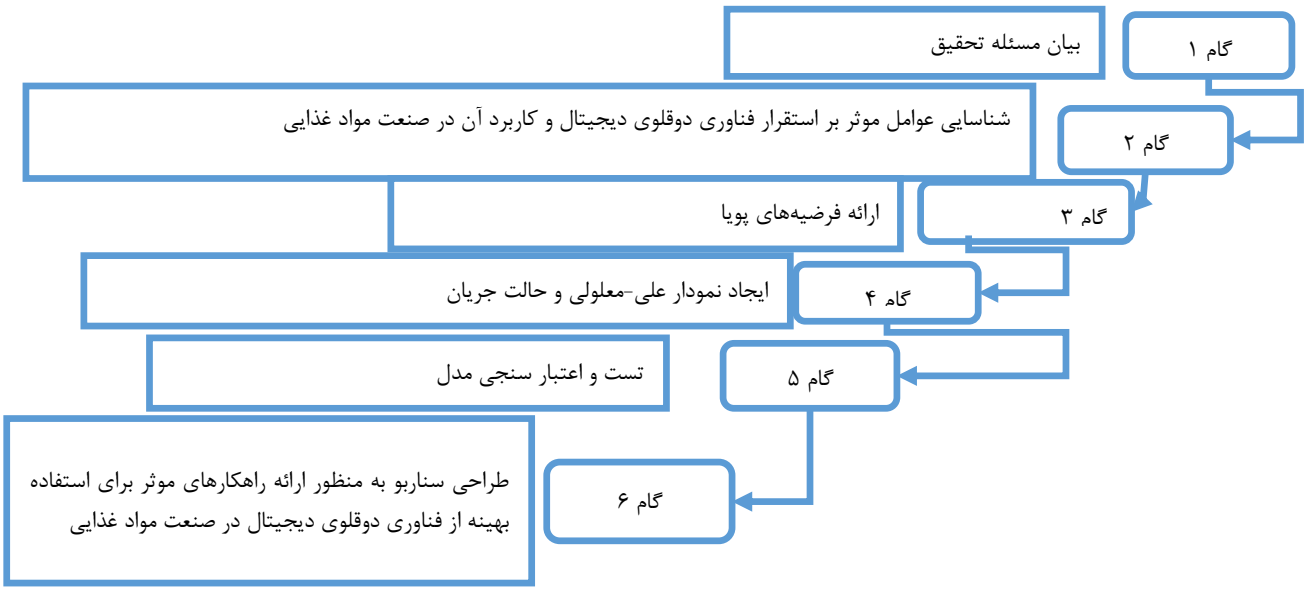
اینکه مدل دوقلوی دیجیتال چه زمانی و چگونه می‌تواند به زنجیره تأمین مواد غذایی کمک کند، وجود دارد. این مطالعه، مسئله یکپارچه استراتژی‌های تأمین، تولید و توزیع را در یک شرکت فرآوری مواد غذایی با ابعاد متوسط حل می‌کند. مدل با استفاده از رویکرد دوقلوی دیجیتال، فرصت‌های همزیستی صنعتی بین تأمین‌کننده، تولیدکننده و مشتری را در نظر می‌گیرد. این مدل با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و شبیه‌سازی مبتنی بر عامل در یک محیط محدود با متغیرهای فاصله‌ای و توالی عمل می‌کند. این مطالعه زمان راه‌اندازی و سربار زمانی را بهینه می‌کند و همزمان به سطح بالاتری از دیجیتالی شدن دست می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که چگونه مدل دوقلوی دیجیتال با بهبود زمان راه‌اندازی، کاهش موازی‌کاری داده‌ها، برنامه زمان‌بندی بهینه، اثربخشی کلی عملیات، اثربخشی کلی تجهیزات و بهره‌وری ظرفیت، باعث افزایش بهره‌وری زنجیره تأمین می‌شود. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی بدون نقص استراتژی‌های تأمین، تولید و توزیع انعطاف‌پذیری تولید را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و منجر به سطح عالی خدمات ۹۴ درصدی می‌شود. به گونه‌ای که مدیران می‌توانند از شبیه‌سازی لحظه‌ای برای برآورد دقیق نقطه تجدید سفارش با حداقل زمان سربار استفاده می‌کنند که تضمین‌کننده عملکرد بهینه است [۲۲].

۳- روش تحقیق

مطالعه حاضر از نظر هدف کاربردی است، زیرا هدف آن ارائه یافته‌هایی است که ممکن است به طور مستقیم در بخش مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، ماهیت و روش این مطالعه توصیفی – علی است، زیرا عناصری که بر پذیرش و استقرار دوقلو دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی تأثیر می‌گذارند، از پیش تعریف نشده است. این عوامل در طول فرآیند تحقیق یافت می‌شوند. روش گردآوری داده‌ها میدانی و با استفاده از ابزار مصاحبه گردآوری شده است. در این پژوهش، برای بررسی روابط علت و معلولی بین عوامل مؤثر و نتایج استقرار دوقلوی دیجیتال، از رویکردی جامع برای جمع‌آوری داده استفاده شد. این رویکرد شامل گردآوری اطلاعات از منابع مختلف و ترکیب داده‌ها برای ارائه تصویری کامل و دقیق از موضوع مورد مطالعه بود. این منابع شامل گزارش‌ها، اسناد، پایگاه‌های داده و سایر منابع داخلی بود که اطلاعات ارزشمندی در مورد فرآیندهای زنجیره تأمین، چالش‌ها و فرصت‌های مرتبط با دوقلوی دیجیتال ارائه می‌دادند. مصاحبه‌های عمیق با مدیران، کارشناسان و ذینفعان کلیدی در شرکت صنایع غذایی انجام شد تا دیدگاه‌ها و تجربیات آنها در مورد فناوری دوقلوی دیجیتال جمع‌آوری شود. این مصاحبه‌ها به درک عمیق‌تر از چالش‌ها و فرصت‌های خاص پیاده‌سازی دوقلوی دیجیتال در این شرکت‌ها کمک می‌کند. در این پژوهش از تکنیک پویایی سیستم به بررسی روابط علت و معلولی بین عوامل مؤثر و نتایج استقرار دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی استفاده شده است. بر اساس اصول تفکر سیستمی، رویکرد پویایی سیستم، ایجاد مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی جامع سیستم‌های پیچیده را امکان‌پذیر می‌کند [۴۴]. مدل‌سازی پویایی سیستم یک فرآیند چند مرحله‌ای برای تبدیل یک مسئله به یک نمایش کمی و سپس شبیه‌سازی آن است [۴۵]. هدف اصلی پویایی سیستم، درک و مدیریت پیچیدگی سیستم‌ها از طریق شناسایی و تحلیل تعاملات پویای بین اجزای مختلف و تأثیر آن‌ها بر رفتار کلی سیستم است [۴۶]. این رویکرد به طور موثر مفروضات پیکربندی سیستم و ساختارهای پویا را مدیریت می‌کند و مدیریت تغییرات در زیرسیستم‌ها و تعاملات در سراسر سیستم را امکان‌پذیر می‌کند [۴۷]. روند انجام این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در مرحله اول بیان مسئله و دلیل انجام تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اهمیت صنعت مواد غذایی در رشد و توسعه کشور و وجود چالش هایی مانند کیفیت، ضایعات، ایمنی و امنیت و ...، این پژوهش به بررسی روابط علت و معلولی بین عوامل مؤثر و نتایج استقرار دوقلوی دیجیتال در یک شرکت مواد غذایی پرداخته است. در گام دوم عوامل موثر بر پیاده‌سازی و کاربرد دوقلوی دیجیتال در شرکت مواد غذایی بررسی شد. شناسایی این عوامل بر اساس مرور ادبیات مرتبط با موضوع پژوهش و انجام مصاحبه با خبرگان این حوزه صورت گرفت. در مرحله سوم، فرضیه‌های پویا تدوین شد. فرضیه‌های پویا علل و مکانیسم‌های اساسی رفتارهای مشاهده شده را توضیح می‌دهند. تدوین فرضیه‌های پویا بر مبنای داده‌ها و اطلاعات به دست آمده از مراحل قبل (مرور ادبیات و مصاحبه با خبرگان) انجام می‌شود. این داده‌ها به‌عنوان مرجع اصلی برای شناسایی روابط و تعاملات بین متغیرها عمل می‌کنند [48]. در این مرحله، محققان باید متغیرهای مستقل (عوامل تأثیرگذار) و متغیرهای وابسته (نتایج یا اثرات) را شناسایی کنند. این کار به ایجاد یک چارچوب ساختاری برای فرضیه‌ها کمک می‌کند

.



شکل ۱. گام‌های انجام پژوهش

پس از تعریف فرضیه‌های پویا، نمودار مرز مدل طراحی شد. نمودار مرز مدل، محدوده مدل را با فهرست‌کردن متغیرهای درون‌زا و برون‌زا و همچنین متغیرهایی که در مدل گنجانده نشده‌اند، مشخص می‌کند. متغیرهای درون‌زا در داخل مدل قرار دارند و تحت تأثیر متغیرهای دیگر تغییر می‌کنند. به عبارتی، تغییر در این متغیرها نتیجه فعل و انفعالات درون مدل است. متغیرهای برون‌زا از خارج به مدل وارد می‌شوند و معمولاً تأثیرات خود را بر روی متغیرهای درون‌زا اعمال می‌کنند. نمودار مرز مدل به تصویرسازی روابط بین متغیرها کمک می‌کند. با مشخص کردن این روابط، تحلیلگران می‌توانند به وضوح ببینند که چگونه متغیرهای درون‌زا و برون‌زا به هم مرتبط هستند و بررسی‌کنند که چگونه تغییر در یک متغیر می‌تواند سایر متغیرها را تحت تأثیر قرار دهد. در مرحله چهارم نمودار علی معلولی و نمودار حالت و جریان طراحی شد. نمودار علی معلولی به عنوان یک ابزار اساسی برای نشان دادن ساختار بازخورد سیستم عمل می‌کند. یک علامت مثبت یا منفی به هر پیوند علی در نمودار اختصاص داده می‌شود. علامت مثبت نشان می‌دهد که تغییرات در متغیرها در یک جهت است، در حالی که علامت منفی نشان‌دهنده تغییرات مخالف است [۴۹]. با انجام یک سری جلسات مصاحبه حضوری با کارشناسان، روابط علی بین متغیرها شناسایی شد که منجر به طراحی یک نمودار علی معلولی جامع شد. پس از ساختن نمودار علی- معلولی، از نمودار حالت و جریان برای فرموله‌کردن روابط بین متغیرهای مورد مطالعه استفاده شد. نمودار حالت و جریان امکان بررسی رفتار سیستم در طول زمان را فراهم می‌کند. نمودار حالت و جریان با استفاده از اطلاعات به دست آمده از یک شرکت مواد غذایی در شهر یزد ساخته شد. روابط ریاضی بین متغیرها در نمودار علی معلولی تعیین گردید و این روابط بیشتر توسط متخصصان این حوزه تأیید شد. در نهایت، نمودار حالت و جریان ساخته شده با آزمایش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و سناریوهایی برای ارائه راهکارهای مناسب جهت بررسی عوامل مؤثر و نتایج استقرار دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی ارائه شد.

۴- مدل پیشنهادی

با استفاده از ادبیات پژوهشی و نظرات کارشناسان، روابط بین عوامل مؤثر بر پیاده‌سازی و کاربرد فناوری دوقلوی دیجیتال در شرکت مواد غذایی شناسایی و نمودار علی معلولی طراحی شد.

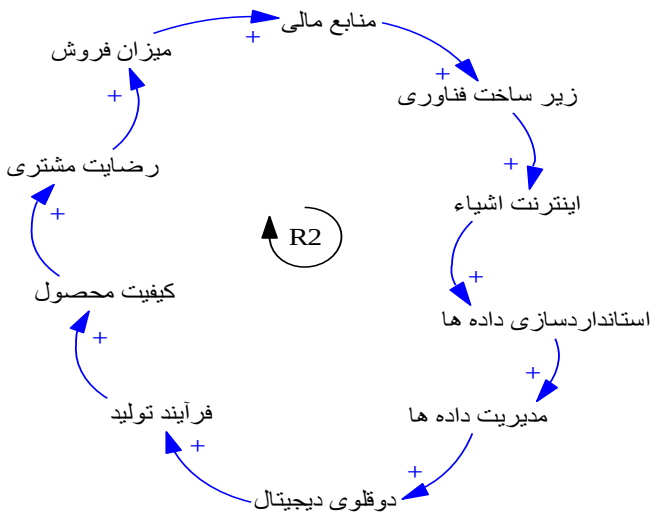
۴-۱- فرضیه‌های پویا

فرضیه پویا یک مدل مفهومی است که بر اساس متغیرهای کلیدی مسئله، روابط علت و معلولی بین آن‌ها و چگونگی تغییر این روابط در طول زمان را توصیف می‌کند. این مدل شامل شناسایی تقویت‌کننده‌ها و متعادل‌کننده‌های اصلی سیستم و همچنین تعیین نمودار مرجع به عنوان یک حالت مطلوب یا هدف مشخص برای مقایسه رفتار سیستم است. نمودار مرجع، نمایش گرافیکی وضعیت مطلوب سیستم بوده و به عنوان یک نقطه مرجع برای ارزیابی عملکرد واقعی سیستم عمل می‌کند. با مقایسه رفتار واقعی سیستم با نمودار مرجع، می‌توان نقاط ضعف و قوت سیستم را شناسایی کرده و نقاط مداخله برای بهبود عملکرد سیستم را مشخص نمود.

به عبارت دیگر، فرضیه پویا به ما کمک می‌کند تا پویایی سیستم را درک کرده و راهکارهایی برای هدایت سیستم به سمت حالت مطلوب ارائه دهیم [۵۰]. فرضیه‌های پویا طراحی شده در این پژوهش به شرح زیر ارائه شده است.

H1: منابع مالی بر روی زیرساخت فناوری تأثیرگذار است.
H2 : زیر ساخت فناوری تأثیر مثبتی بر روی اینترنت اشیاء دارد.
H3 : اینترنت اشیاء بر روی استانداردسازی داده‌ها تأثیر دارد.
H4 : استانداردسازی داده‌ها بر روی مدیریت داده‌ها تأثیر دارد.
H5: مدیریت داده‌ها تأثیر مثبتی بر روی فناوری دوقلوی دیجیتال دارد.
H6: فناوری دوقلوی دیجیتال بر روی فرآیند تولید تأثیر دارد.
H7: فرآیند تولید بر روی کیفیت محصول تأثیر دارد.
H8: کیفیت محصول بر روی رضایت مشتری تأثیر دارد.
H9: رضایت مشتری بر روی میزان فروش تأثیر دارد.
H10: میزان فروش بر روی منابع مالی تأثیر دارد.

فرضیه پویا مسئله مورد مطالعه در شکل ۲ زیر نشان داده شده است. همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد منابع مالی بر روی زیرساخت فناوری تأثیرگذار است. با افزایش منابع مالی، شرکت‌ها می‌توانند در تجهیزات و نرم‌افزارهای پیشرفته برای زیرساخت فناوری خود سرمایه‌گذاری کنند. این امر به نوبه خود منجر به افزایش قابلیت‌ها و کارایی سیستم‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات آن‌ها می‌شود. زیرساخت فناوری قوی بستر لازم برای پیاده‌سازی و اجرای موفق اینترنت اشیاء را فراهم می‌کند. این امر به شرکت‌ها امکان می‌دهد تا از حجم عظیمی از داده‌های تولید شده توسط دستگاه‌های متصل به اینترنت را جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل کنند. با افزایش تعداد دستگاه‌های متصل به اینترنت، نیاز به استانداردسازی فرمت‌ها و پروتکل‌های داده‌ها برای تسهیل تبادل و تجزیه و تحلیل اطلاعات به وجود می‌آید. اینترنت اشیاء با ایجاد انگیزه برای شرکت‌ها برای به اشتراک‌گذاری داده‌های خود، به پیشبرد این امر کمک می‌کند. همچنین، استانداردسازی داده‌ها، فرآیند مدیریت داده‌ها را کارآمدتر و مقرون به صرفه‌تر می‌کند. با استفاده از فرمت‌ها و پروتکل‌های استاندارد، شرکت‌ها می‌توانند داده‌ها را به راحتی جمع‌آوری، ذخیره، بازیابی و تحلیل کنند.



شکل ۲. حلقه‌های بازخورد

از طرف دیگر، مدیریت داده‌های موثر برای ایجاد و نگهداری مدل‌های دوقلوی دیجیتال که کپی‌های مجازی از دارایی‌های فیزیکی هستند، ضروری است. این مدل‌ها می‌توانند برای شبیه‌سازی عملکرد، پیش‌بینی خرابی‌ها و بهینه‌سازی فرآیندها استفاده شوند. فناوری دوقلوی دیجیتال می‌تواند به طور قابل توجهی فرآیند تولید را با ارائه بینش‌های عمیق‌تر در مورد عملکرد سیستم‌ها، شناسایی فرصت‌های بهبود و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی و کنترل تولید، ارتقا دهد. فرآیندهای تولید کارآمد و بهینه شده به طور مستقیم منجر به تولید محصولات با کیفیت بالاتر می‌شوند. این امر به نوبه خود ضایعات و دوباره کاری را کاهش و رضایت مشتری را افزایش می‌دهد. محصولات با کیفیت بالا تمایل به تقاضای بیشتری در بازار دارند و منجر به افزایش فروش می‌شوند. مشتریان حاضرند برای محصولاتی که قابل اعتماد، بادوام و کارآمد هستند، پول بیشتری بپردازند. مشتریان راضی تمایل بیشتری به خرید مجدد محصولات و خدمات شرکت دارند و همچنین احتمال بیشتری دارد که آن را به دیگران توصیه کنند. که این امر منجر به افزایش سهم بازار و در نهایت افزایش منابع مالی شرکت می‌شود.

۴-۲- نمودار مرز مدل

پس از تحلیل فرضیه‌های پویا، برای ایجاد نمودار مرز مدل و شناسایی متغیرهای درونزا و برونزا سیستم اقدام شد. یافته‌های این بررسی در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

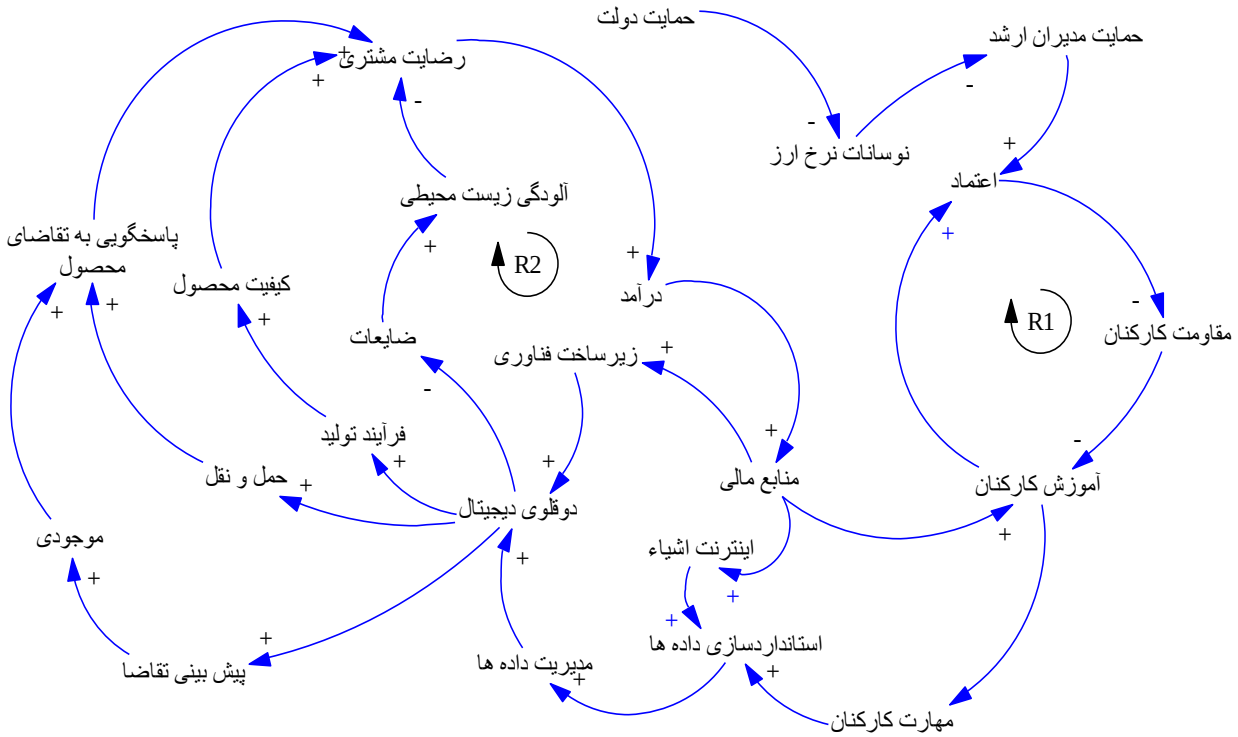
۴-۳- مودار علّی معلولی

با توجه به تعیین فرضیه‌های پویا و شناسایی متغیرهای درون‌زا و برون‌زا مدل، نمودار علّی معلولی در شکل ۳ نشان داده شده است..

جدول۱. نمودار مرز مدل

شماره		عوامل	تعریف	منابع
۱	درون زا	پیش‌بینی تقاضا	پیش‌بینی تقاضا، علمِ برآورد میزان تقاضا برای کالاها یا خدمات در آینده است. این فرآیند به کسب‌وکارها کمک می‌کند تا با دیدی روشن‌تر به برنامه‌ریزیِ تولید، موجودی و توزیع محصولات خود بپردازند.	[۵۱]؛ [۵۲]
۲		موجودی	موجودی به دارایی‌های جاری یک شرکت اطلاق می‌شود که شامل کالاها و محصولاتی است که برای فروش در نظر گرفته شده‌اند و یا در مراحل مختلف تولید قرار دارند. به عبارت دیگر، موجودی، پل بین بخش تولید و بخش فروش است.	[۵۳]؛[۵۴]
۳		پاسخگویی به تقاضای محصول	پاسخگویی به تقاضای محصول به توانایی یک شرکت در تأمین نیاز مشتریان به محصولات مورد نیازشان در زمان مناسب و با قیمتی مناسب اشاره دارد.	[۵۵]، [۵۶]
۴		رضایت مشتری	رضایت مشتری به احساسی گفته می‌شود که یک مشتری پس از خرید یا استفاده از محصول یا خدمات یک شرکت تجربه می‌کند. این احساس به میزان انطباق تجربه‌ی مشتری با انتظارات او بستگی دارد.	[۵۷]، [۵۸]
۵		درآمد	درآمد به جریان پول نقدی گفته می‌شود که یک شرکت از طریق فروش محصولات یا خدمات خود به دست می‌آورد. درآمد یکی از مهم‌ترین مفاهیم مالی برای هر کسب و کاری است و به اندازه‌گیری عملکرد مالی آن کمک می‌کند.	[۵۹]، [۶۰]
۶		منابع مالی	منابع مالی به دارایی‌ها و وجوهی گفته می‌شود که یک شرکت در اختیار دارد و می‌تواند از آنها برای انجام فعالیت‌های خود، سرمایه‌گذاری و دستیابی به اهداف خود استفاده کند.	[۶۱]، [۶۲]
۷		زیرساخت فناوری	زیرساخت فناوری به مجموعه‌ی سخت‌افزار، نرم‌افزار، شبکه‌ها و سایر اجزایی گفته می‌شود که یک شرکت برای پشتیبانی از عملیات خود به آنها نیاز دارد. زیرساخت فناوری نقشی اساسی در عملکرد یک کسب و کار ایفا می‌کند و به شرکت‌ها کمک می‌کند تا به اهداف خود دست پیدا کنند.	[۶۳]، [۶۴]
۸		حمل و نقل	حمل و نقل به جابجایی افراد و کالاها از یک مکان به مکان دیگر اطلاق می‌شود. این فرآیند شامل استفاده از انواع مختلف وسایل نقلیه، مانند کامیون، قطار، هواپیما و کشتی می‌باشد. حمل و نقل نقشی حیاتی در تجارت ایفا می‌کند و به شرکت‌ها امکان می‌دهد تا محصولات خود را به مشتریان در زنجیره تأمین برسانند.	[۶۵]، [۶۶]
۹		فرآیند تولید	فرآیند تولید به مجموعه فعالیت‌هایی گفته می‌شود که با هدف تبدیل مواد اولیه به کالای نهایی یا ارائه خدماتی با ارزش اقتصادی انجام می‌شود. این فرآیند شامل مراحلی مختلف از جمله طراحی، تأمین مواد اولیه، ساخت، مونتاژ، کنترل کیفیت، بسته‌بندی، انبارداری و حمل‌ونقل می‌شود.	[۶۷]، [۶۸]
۱۰		کیفیت	کیفیت به میزان انطباق یک محصول یا خدمت با نیازها و انتظارات مشتریان گفته می‌شود.	[۶۹]، [۷۰]
۱۱		ضایعات	ضایعات به مواد یا محصولاتی گفته می‌شود که دیگر قابل استفاده نیستند و باید دور انداخته شوند.	[۷۱]، [۷۲]
۱۲		آلودگی زیست محیطی	آلودگی زیست محیطی به وجود هر گونه ماده یا انرژی مضر در محیط زیست گفته می‌شود که می‌تواند به سلامت انسان، حیوانات و گیاهان آسیب برساند و تعادل طبیعی اکوسیستم‌ها را مختل کند.	[۷۳]، [۷۴]
۱۳		ردیابی مواد	فرآیند ردیابی مواد شامل جمع‌آوری و ثبت اطلاعات مربوط به حرکت و جابجایی مواد در طول زنجیره تأمین ، از مبدأ تا مقصد نهایی می‌شود.	[۷۵]
۱۴		مقاومت کارکنان	مقاومت کارکنان به مجموعه‌ای از رفتارها، نگرش‌ها و اقدامات کارکنان در برابر تغییر، نوآوری یا اجرای برنامه‌های جدید در یک سازمان گفته می‌شود. این مقاومت می‌تواند به صورت‌های مختلفی مانند عدم همکاری، غیبت از محل کار، کاهش بهره‌وری، اعتراض و حتی ترک شغل تجلی یابد.	[۷۶]، [۷۷]
۱۵		اعتماد	اعتماد یک باور است که در آن فرد به صداقت، قابلیت و تعهد فرد یا گروه دیگری ایمان دارد. این باور به گونه‌ای است که فرد احساس امنیت می‌کند و اطمینان دارد که طرف مقابل به نفع او عمل خواهد کرد.	[۷۸]، [۷۹]
۱۶		حمایت دولت	حمایت دولت به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که دولت برای کمک به افراد، گروه‌ها یا بخش‌های مختلف جامعه انجام می‌دهد. این حمایت می‌تواند به صورت‌های مختلفی مانند ارائه یارانه، کمک‌های مالی، معافیت‌های مالیاتی، ارائه خدمات عمومی، وضع قوانین حمایتی و اجرای برنامه‌های توسعه‌ای باشد.	[۸۰]، [۸۱]

شماره	عوامل		تعریف	منابع
۱۷		نوسانات نرخ ارز	نوسانات نرخ ارز به تغییرات مداوم قیمت یک ارز در مقابل ارز دیگر اشاره دارد. این نوسانات می‌توانند کوتاه‌مدت یا بلندمدت باشند و تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار بگیرند.	[۸۲]، [۸۳]
۱۸		حمایت مدیران ارشد	حمایت مدیران ارشد به حمایت و پشتیبانی مستمر مدیریت ارشد یک سازمان از تلاش‌ها، ابتکارات و ایده‌های کارکنان اشاره دارد. این حمایت می‌تواند به صورت‌های مختلفی مانند تخصیص منابع، اعطای اختیارات، تشویق و قدردانی، و ایجاد فضای مناسب برای کارکنان تجلی یابد.	[۸۴]، [۸۵]
۱۹		آموزش کارکنان	آموزش کارکنان به فرایندی اطلاق می‌شود که در آن به کارکنان دانش، مهارت‌ها و نگرش‌های لازم برای انجام وظایفشان به طور موثر و کارآمد آموزش داده می‌شود.	[۸۶]، [۸۷]
۲۰		مهارت کارکنان	مهارت کارکنان به توانایی‌ها و قابلیت‌هایی اطلاق می‌شود که کارکنان برای انجام وظایفشان به طور موثر و کارآمد به آنها نیاز دارند.	[۸۸]، [۸۹]
۲۱		استانداردسازی داده‌ها	استانداردسازی داده‌ها به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن ساختار، قالب و فرمت داده‌ها را یکسان و هماهنگ می‌کنیم. هدف از این کار ایجاد یک مجموعه داده منسجم و قابل‌تبادل است که می‌توان به طور آسان و کارآمد از آن در تجزیه و تحلیل، گزارش‌گیری و سایر کاربردها استفاده کرد.	[۹۰]، [۹۱]
۲۲		مدیریت داده‌ها	مدیریت داده‌ها به فرآیند جمع‌آوری، سازماندهی، ذخیره‌سازی، بازیابی، حفاظت و استفاده از داده‌ها به طور موثر و کارآمد اطلاق می‌شود. هدف از مدیریت داده‌ها تضمین در دسترس بودن، صحت، امنیت و یکپارچگی داده‌ها در زمان نیاز به آنها است.	[۹۲]، [۹۳]



شکل ۳. نمودار علی و معلولی

۴-۴- نمودار حالت و جریان

پس از ترسیم نمودار علّی و معلولی، برای درک عمیق‌تر از پویایی سیستم، اقدام به توسعه نمودار حالت و جریان نمودیم. این کار با برقراری روابط و معادلات ریاضی بین متغیرهای کلیدی انجام شد. شکل ۴ نیز نمودار نهایی حاصل شده را نشان می‌دهد.

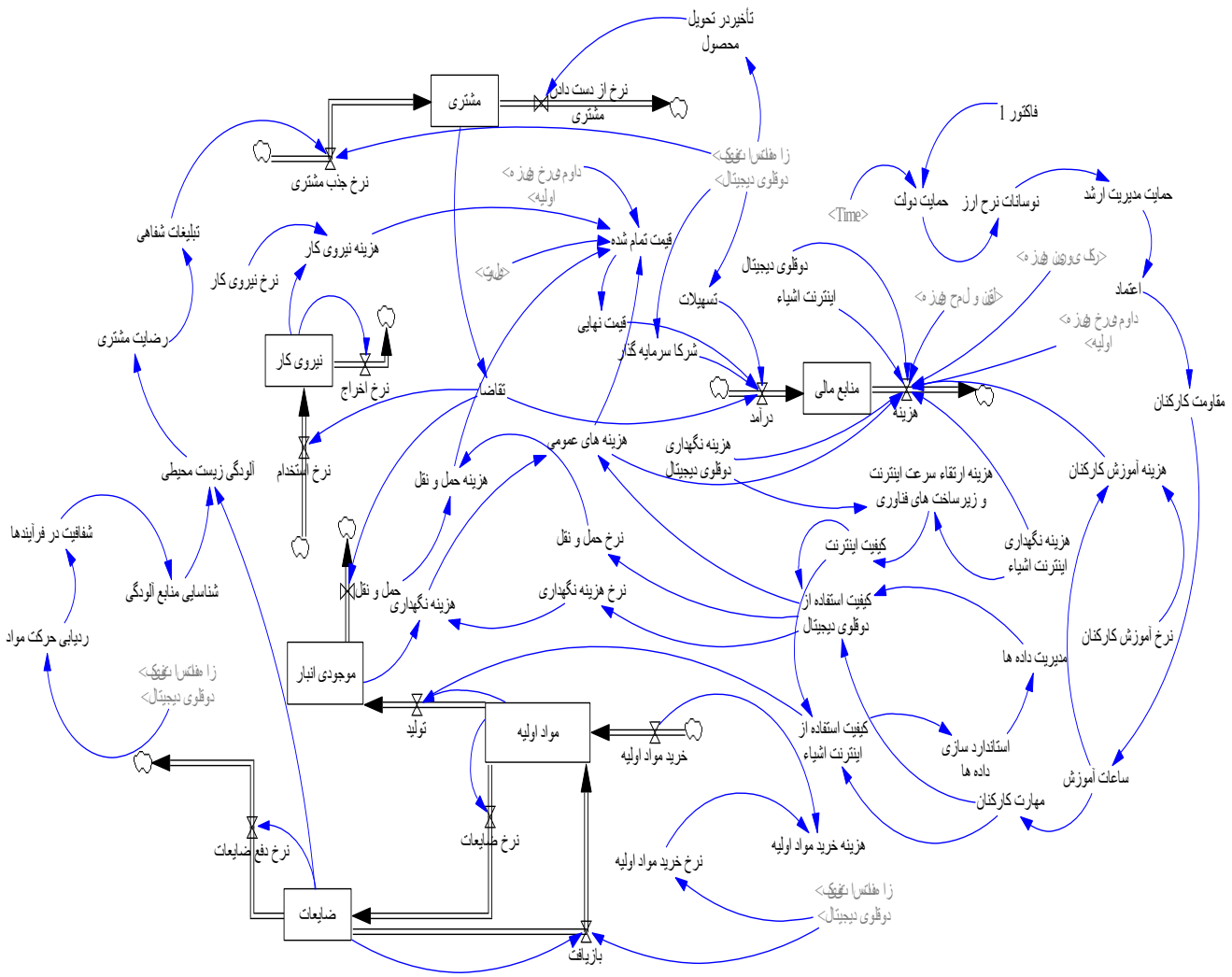
شکل ۴ نمودار حالت-جریان را به تصویر می‌کشد که متشکل از ۵۵ متغیر است. این متغیرها شامل ۶ متغیر حالت، ۱۲ متغیر جریان و ۳۷ متغیر کمکی می‌شوند. جهت شبیه‌سازی، بازه زمانی پنج ساله با فواصل زمانی ۱۲ ماهه برای مطالعه در نظر گرفته شده است.

۵- اعتبارسنجی مدل

فرآیند اعتبارسنجی مدل در چهار مرحله مجزا انجام می‌شود.

۵-۱- آزمون ارزیابی ساختار مدل

برای اطمینان از انطباق ساختار مدل طراحی شده با دانش موجود، آزمونی تحت عنوان «آزمون ارزیابی ساختار مدل» انجام شد. به عبارت دیگر، آزمون ارزیابی ساختار، سازگاری رفتار مدل با ساختار آن را مورد بررسی قرار می‌دهد. این مسئله ایجاب می‌کند که در مدل شبیه‌سازی شده، رفتار متغیرها در بازخورد مثبت و منفی باید به ترتیب نمائی و هدف‌جو باشد. بر همین اساس، همانطور که در نمودار علت و معلولی ملاحظه می‌شود، متغیرهایی که حلقه‌های بازخوردی منفی را تشکیل می‌دهند، رفتار آن‌ها در مدل شبیه‌سازی شده باید هدف‌جو باشد. در این پژوهش، ساختار مدل بر پایه پیشینه تحقیقاتی و نظرات مدیران و کارشناسان حوزه مواد غذایی تدوین و مورد تأیید قرار گرفت.



شکل ۴. نمودار حالت- جریان

۵-۲- آزمون ارزیابی پارامتر

آزمون «ارزیابی پارامتر» با هدف اطمینان از تطابق مقادیر تخصیص‌یافته به متغیرها با مقادیر واقعی آنها انجام می‌شود. این کار برای تضمین صحت و دقت مدل و پیش‌بینی‌های آن بسیار مهم است. در ابتدا به شناسایی پارامترهای مورد استفاده در مدل پرداخته می‌شود.در مرحله بعد، برای ارزیابی همخوانی پارامترها، نیاز به داده‌های واقعی از سیستم مورد مطالعه می‌باشد. در این پژوهش، مقادیر متغیرها از منابع مختلفی استخراج شده‌اند، از جمله:

- زمینه تحقیق: اطلاعات مربوط به موضوع تحقیق از طریق مطالعات میدانی و بررسی اسناد و مدارک جمع‌آوری شده است.
- ادبیات مرتبط: از یافته‌های تحقیقات پیشین در حوزه مرتبط با موضوع پژوهش استفاده شده است.
- نظرات کارشناسان: از نظرات خبرگان و متخصصان در حوزه مواد غذایی برای تکمیل و تصحیح اطلاعات استفاده شده است.

در گام بعد، مقادیر عددی پارامترهای مدل با داده‌های واقعی مقایسه می‌شوند. اگر مشخص شود که مقادیر پارامترها با داده‌های واقعی همخوانی ندارند، نیاز است که پارامترها مورد بازنگری یا به‌روزرسانی قرار گیرند. با توجه به تنوع و دقت منابع مورد استفاده، می‌توان اطمینان داشت که مقادیر ارائه شده در مدل با واقعیت مطابقت دارند.

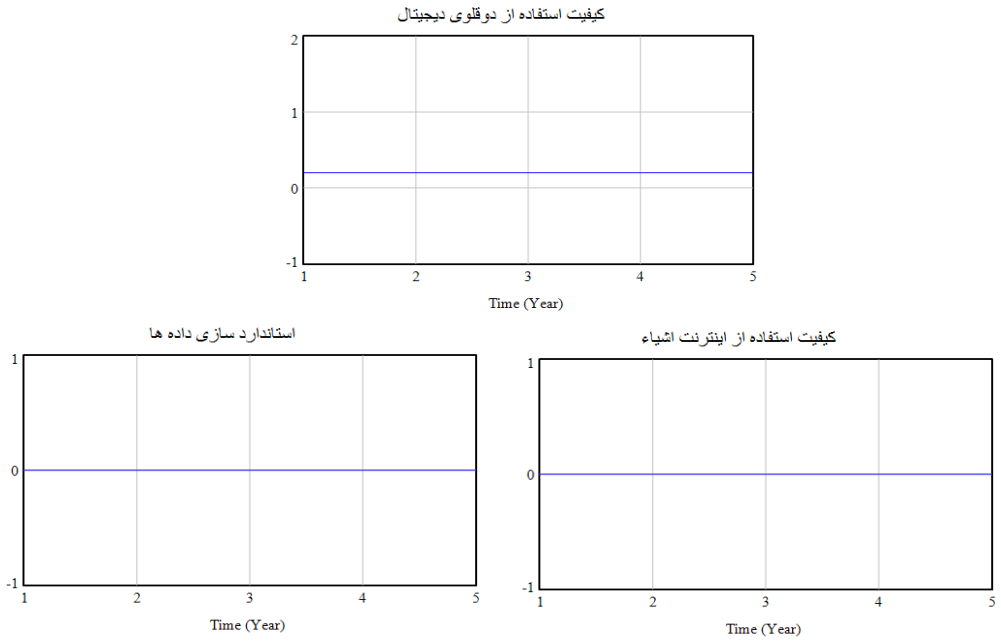
۵-۳- آزمون شرایط حدی

هدف از این آزمون، بررسی عملکرد مدل در شرایطی است که مقادیر ورودی به آن مقادیر حداکثری یا مینیمم خود را اختیار می‌کنند. در این راستا، مقدار یکی از عوامل اثرگذار بر استقرار فناوری دوقلوی دیجیتال در صنعت مواد غذایی در مدل به سمت صفر میل داده می‌شود و رفتار سایر عوامل تحت این شرایط خاص مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که مدل در این شرایط نیز رفتاری منطقی و قابل توجیه از خود نشان دهد، آزمون صحت رفتار مدل در شرایط حدی با موفقیت پشت سر گذاشته می‌شود.

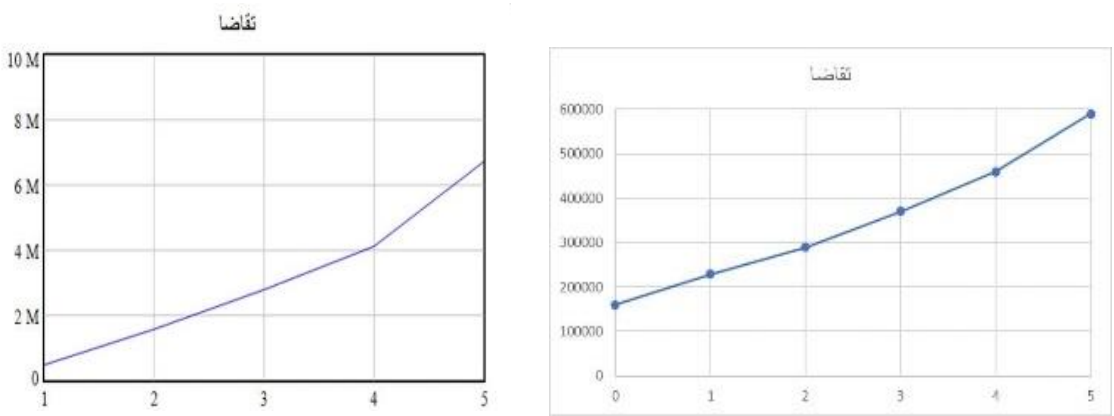
همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با نزدیک شدن میزان کیفیت اینترنت، متغیرهای کیفیت استفاده از دوقلوی دیجیتال، کیفیت استفاده از اینترنت اشیا و استانداردسازی داده‌ها به سمت صفر حرکت خواهند کرد.

۵-۴- آزمون بازتولید رفتار (آزمون مقایسه با رفتار مرجع)

این آزمون نتایج شبیه‌سازی را با داده‌های واقعی مقایسه می‌کند تا صحت رفتار مدل را تأیید کند. در شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی متغیر تقاضا با داده‌های واقعی آن مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۵. آزمایش و اعتبار سنجی مدل



شکل ۶. آزمون مقایسه با رفتار مرجع

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نمودار نشان‌دهنده تقاضا در پنج سال گذشته با داده‌های واقعی به‌طور نمایی در حال افزایش است. ما شبیه‌سازی را برای پنج سال آینده نیز تکرار کردیم. نتایج این شبیه‌سازی نشان دهنده الگوی رفتاری مشابهی با شرایط واقعی می‌باشد.

۶- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت شبیه‌سازی رفتارهای متغیرهای کلیدی اثرگذار بر استقرار فناوری دوقلوی دیجیتال و کاربرد آن در صنعت مواد غذایی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی ونسیم مورد بررسی قرار گرفته است. این نرم‌افزار قابلیت ایجاد نمودارها و نمایش بصری روابط بین متغیرها را دارد که باعث درک بهتر سیستم می‌شود.

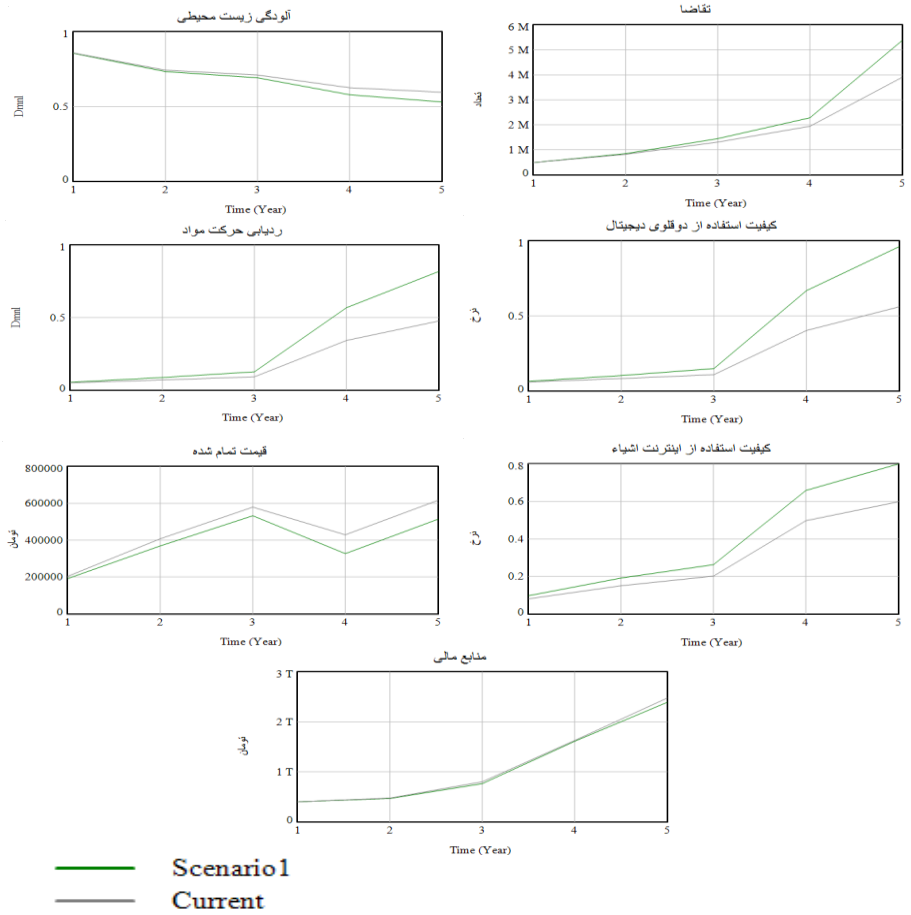
۶-۱- اجرا و ارزیابی سیاست‌ها

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی و تحلیل سه سناریو مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی اول میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری را تغییر داده و پیامدهای آن بر متغیرهای کلیدی مدل مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی دوم نرخ آموزش را افزایش داده و تأثیر آن بر سایر متغیرها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در سناریوی سوم نیز هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری را کاهش و نرخ آموزش را افزایش داده و تأثیر آن بر سایر متغیرهای پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

۶-۱-۱ سیاست افزایش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری در صنعت مواد غذایی

درشکل ۷ رفتار متغیرهای کلیدی اثرگذار بر استقرار و کاربرد فناوری دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی در صورت افزایش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده با افزایش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری، کیفیت استفاده از فناوری اینترنت اشیا و کیفیت استفاده از دوقلوی دیجیتال در سال‌های اولیه، با شیب ملایمی‌افزایش می‌یابد. اما از سال سوم به بعد، این نرخ رشد به طور چشمگیری شتاب می‌گیرد و در نهایت در سال پنجم به حداکثر خود می‌رسد. ردیابی حرکت مواد از سال سوم شبیه‌سازی با شیب تندتری نسبت به سال‌های اولیه افزایش خواهد یافت. علاوه بر این، در اوایل دوره شبیه‌سازی، نرخ رشد تقاضا با شیب کمتری افزایش می‌یابد. اما از سال چهارم به بعد، این نرخ رشد با سرعت بیشتری همراه خواهد بود. میزان آلودگی زیست‌محیطی نیز با شیب ملایمی‌کاهش پیدا خواد کرد. همچنین قیمت تمام شده نیز با روند کاهشی تغییر خواهد کرد. در نهایت با افزایش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری در دراز مدت شاهد افزایش منابع مالی خواهیم بود. افزایش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری برای اجرای فناوری دوقلوی دیجیتال، تأثیر مستقیمی بر کیفیت استفاده از آن دارد. با این حال، این تأثیر خطی نیست و نوساناتی در طول زمان مشاهده می‌شود. الگوی نوسان در کیفیت استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال به ماهیت در حال تحول نوآوری در استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال در طول زمان نسبت داده می‌شود. رفتار نوسانی کیفیت استفاده از دوقلوی دیجیتال را می‌توان به عواملی مانند زیرساخت فناوری اطلاعات و ارتباطات و فرآیند یادگیری زمان بر برای کارکنان در هنگام انطباق با استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال نسبت داد.



شکل ۷. نتایج سیاست افزایش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری

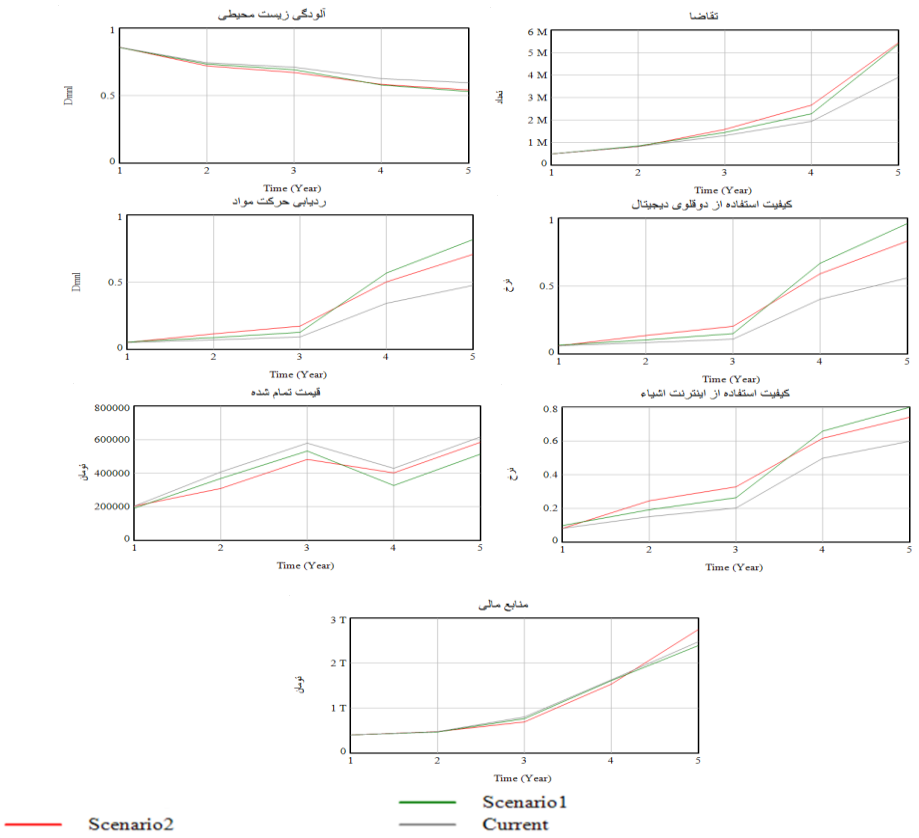
۶-۱-۲ سیاست افزایش میزان نرخ آموزش کارکنان در صنعت مواد غذایی

درشکل ۸ رفتار متغیرهای کلیدی اثرگذار بر استقرار و کاربرد فناوری دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی در صورت افزایش میزان نرخ آموزش کارکنان نشان داده شده است.

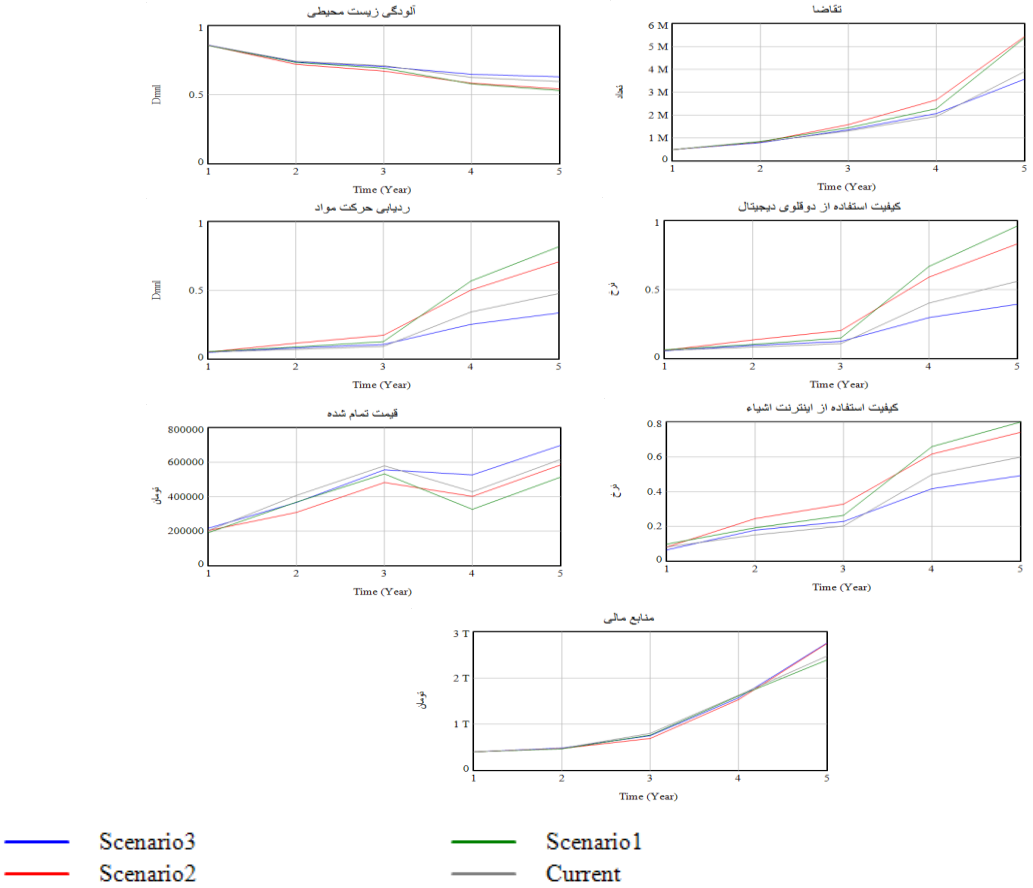
همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده با افزایش نرخ آموزش کارکنان، میزان کیفیت استفاده از اینترنت اشیاء و کیفیت استفاده از دوقلوی دیجیتال و به دنبال آن ردیابی حرکت مواد در سال سوم به بعد با شیب قابل توجهی رشد خواهد نمود. همچنین میزان آلودگی زیست محیطی نیز از سال سوم به بعد با شیب ملایمی‌کاهش خواهد یافت. تقاضا و منابع مالی نیز از حدود سال سوم به بعد دوره شبیه‌سازی با شیب قابل توجهی رشد خواهند کرد. قیمت تمام شده محصول نیز در سال‌های اولیه با شیب کندتری کاهش خواهد یافت. از سال سوم و چهارم با شیب ثابت تغییرخواهد کرد. ولی از سال چهارم به بعد با شیب تندتری کاهش خواهد نمود. درشکل ۹ رفتار متغیرهای کلیدی اثرگذار بر استقرار فناوری دوقلوی دیجیتال و کاربرد آن در زنجیره تأمین مواد غذایی در صورت افزایش میزان نرخ آموزش و کاهش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری نشان داده شده است.

۶-۱-۳ سی‌است افزای‌ش می‌زان نرخ آموزش و کاهش می‌زان هزی‌نه ارتقاء سرعت ای‌نترنت و زی‌رساخت‌های فناوری در زنجی‌ره تأمی‌ن مواد غذای‌ی

همان‌گونه که در شکل ۹مشاهده شده است با افزایش میزان نرخ آموزش و کاهش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری، میزان کیفیت استفاده از اینترنت اشیا و کیفیت استفاده از دوقلوی دیجیتال و ردیابی حرکت مواد به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهند یافت. میزان آلودگی زیست محیطی نیز افزایش خواهد یافت. میزان تقاضا و منابع مالی در سال‌های ابتدایی به صورت نوسانی تغییر کرده و در گذر زمان با شیب قابل توجهی کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر، قیمت تمام شده محصول در سال‌های اول تا سوم با شیب تندتری تغییر خواهد یافت. از سال سوم تا چهارم این تغییرات ثابت باقی خواهد ماند. ولی از سال چهارم تا پنجم میزان قیمت تمام شده محصول با شیب کمتری تغییر پیدا خواهد کرد.



شکل ۸. نتایج سیاست افزایش میزان نرخ آموزش کارکنان در صنعت مواد غذایی



شکل ۹. نتیجه سیاست افزایش میزان نرخ آموزش و کاهش میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری در زنجیره تأمین مواد غذایی

۷- نتیجه‌گیری

صنعت مواد غذایی نقش حیاتی در سلامت و رفاه جامعه ایفا می‌کند. و به عنوان یکی از ارکان اصلی اقتصاد، سهم بسزایی در اشتغال‌زایی و توسعه پایدار دارد. با وجود پتانسیل‌های موجود در این صنعت، با چالش‌های متعددی روبرو است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، پیچیدگی زنجیره تأمین مواد غذایی است. این زنجیره شامل مراحل متعددی از جمله تولید، فرآوری، توزیع و فروش است که هر کدام با چالش‌های خاص خود روبرو هستند. این پیچیدگی باعث می‌شود تا مدیریت و نظارت بر این زنجیره به امری دشوار و پرهزینه تبدیل شود. همچنین، فقدان شفافیت در زنجیره تأمین مواد غذایی، امکان ردیابی و رصد محصولات را از مبدأ تا مقصد دشوار می‌کند. این امر می‌تواند منجر به تقلب، ضایعات و عدم اطمینان از کیفیت و سلامت مواد غذایی شود. ضایعات مواد غذایی در تمام مراحل زنجیره تأمین، از جمله در مزارع، حین حمل‌ونقل، در انبارها و در فروشگاه‌ها اتفاق می‌افتد. این ضایعات نه تنها باعث هدر رفتن منابع ارزشمند می‌شود، بلکه به محیط‌زیست نیز آسیب می‌رساند. از طرف دیگر، بسیاری از فرآیندها در صنعت مواد غذایی به صورت سنتی و دستی انجام می‌شوند که این امر باعث ناکارآمدی، اتلاف وقت و افزایش هزینه‌ها می‌شود. در طی سالیان أخیر با توسعه و پیشرفت فناوری اطلاعات و ارتباطات، صنایع غذایی و تولیدی نیز پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند. بنابراین استفاده از فناوری‌های جدید از جمله فناوری دوقلوی دیجیتال می‌تواند صنعت مواد غذایی را متحول کرده و عملکرد آن را بهبود بخشد.

هدف از این پژوهش، ارائه مدل شبیه‌سازی برای بررسی روابط علت و معلولی بین عوامل مؤثر و نتایج استقرار دوقلوی دیجیتال در زنجیره تأمین مواد غذایی است. ابتدا، عوامل مؤثر بر فناوری دوقلوی دیجیتال در این صنعت، بر اساس ادبیات و پیشینه پژوهش، شناسایی شدند. سپس، این عوامل بر اساس نظرات خبرگان دانشگاهی و مدیران و کارشناسان متخصص در حوزه مواد غذایی مورد تأیید قرار گرفتند. در ادامه، با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، مدل علت و معلولی بین عوامل مؤثر و نتایج استقرار دوقلوی دیجیتال در صنعت مواد غذایی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی پویایی سیستم در این پژوهش نشان داد که تخصیص میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری، افزایش نرخ آموزش و مهارت کارکنان از جمله عوامل مؤثر در جهت استقرار هر چه بهتر فناوری دوقلوی دیجیتال به شمار می‌روند. با توجه به عدم مهارت و دانش کافی کارکنان و میزان مقاومت آن‌ها نسبت به پذیرش فناوری دوقلوی دیجیتال، کیفیت استفاده از این فناوری در سال‌های ابتدایی مطلوب نبوده و در گذر زمان رشد خواهد کرد. با آموزش کارکنان و استفاده از خبرگان متخصص در زمینه فناوری دوقلوی دیجیتال، علاوه بر افزایش مهارت و توانایی آن‌ها، می‌توان میزان مقاومت کارکنان را نسبت به پذیرش این فناوری کاهش داد. به عبارت دیگر، با افزایش دانش و مهارت کارکنان، درک آن‌ها نسبت به فواید و منافع حاصل از به کارگیری فناوری دوقلوی دیجیتال افزایش یافته و مقاومت‌های احتمالی آن‌ها در جهت پذیرش این فناوری کاهش خواهد یافت.

همچنین نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در صورت استقرار فناوری دوقلوی دیجیتال، ردیابی حرکت مواد غذایی افزایش می‌یابد. در حال حاضر، ردیابی حرکت مواد در زنجیره تأمین مواد غذایی چالش‌برانگیز و پرهزینه است. دوقلوی دیجیتال می‌تواند با استفاده از فناوری‌های مانند RFID[1]، سنسورها و بلاک‌چین، به طور دقیق و با در نظر گرفتن داده‌های زمان واقعی، محل و وضعیت مواد غذایی را در زنجیره تأمین ردیابی کند. این امر به بهبود شفافیت، کاهش ضایعات و آلودگی زیست‌محیطی کمک می‌کند. استقرار دوقلوی دیجیتال، کیفیت محصولات را افزایش می‌دهد و این امر، تمایل و خرید بیشتر مصرف‌کنندگان و در نتیجه افزایش تقاضا را به دنبال دارد. با وجود زمان‌بر بودن استقرار کامل دوقلوی دیجیتال و وابستگی آن به کیفیت اجرا، تقاضا برای محصولات در سال‌های اولیه رشد خواهد کرد و در گذر زمان با بهبود عملکرد این فناوری، شاهد جهش قابل توجهی در این زمینه خواهیم بود. افزایش تقاضا، رضایت مشتریان را به همراه دارد و در بلندمدت، قیمت تمام شده محصول را کاهش و منابع مالی را افزایش می‌دهد.

در این پژوهش سه سناریو به منظور ارائه راهکارهایی در جهت استفاده هر چه بهتر از فناوری دوقلوی دیجیتال و کاربرد آن در صنعت مواد غذایی مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های حاصل از سناریوی اول نشان داد که با تخصیص میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری از جمله دسترسی به اینترنت پر سرعت و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری مرتبط با فناوری دوقلوی دیجیتال، کیفیت استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال بهبود خواهد یافت که این یافته پژوهش با یافته‌های حاصل از مطالعه صورت گرفته توسط بونومی و دروبوت[2](۲۰۲۳) مطابقت دارد. از دیگر نتایج به دست آمده در این سناریو افزایش میزان ردیابی مواد غذایی است. با سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناوری مانند سنسورها و اینترنت

[1] Radio Frequency Identification

[2] Bonomi & Drobot

اشیاء، می‌توان ردیابی محصولات را در سراسر زنجیره تأمین به طور چشمگیری ارتقا داد. این امر منجر به افزایش کارایی، کاهش ضایعات و آلودگی زیست‌محیطی و همچنین ارائه خدمات به مشتریان در سطح بالاتر می‌شود. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است این سرمایه‌گذاری‌ها می‌توانند تقاضا برای محصولات غذایی را به طور مستقیم و غیرمستقیم افزایش دهند. از یک سو، ردیابی دقیق‌تر به مصرف‌کنندگان اطمینان بیشتری از کیفیت و ایمنی مواد غذایی می‌دهد و از سوی دیگر، افزایش کارایی و کاهش ضایعات می‌تواند منجر به قیمت‌های پایین‌تر برای محصولات شود. در نهایت، خدمات به مشتریان بهتر می‌تواند وفاداری به برند و میزان تقاضا را افزایش دهد. علاوه بر این، افزایش تقاضا می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در مقیاس و کاهش بیشتر قیمت تمام شده محصولات شود. این امر چرخه‌ای مثبت در جهت افزایش میزان منابع مالی ایجاد می‌کند که در نهایت به نفع مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان مواد غذایی خواهد بود.

یافته‌های حاصل از سناریوی دوم نشان داد که با افزایش ساعات آموزش کارکنان، مهارت‌ها و توانایی آن‌ها نسبت به استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال افزایش می‌یابد. افزایش سطح آموزش کارکنان باعث می‌شود که استانداردسازی و مدیریت داده‌ها بهتر انجام شود. این امر به استقرار موفق دوقلوی دیجیتال منجر می‌شود. در طول دوره پنج ساله شبیه‌سازی، شاهد جهشی چشمگیر در کیفیت به‌کارگیری دوقلوی دیجیتال خواهیم بود که در سال پنجم به اوج خود خواهد رسید. این پیشرفت قابل توجه، منجر به تولید محصولاتی با کیفیتی برتر و در نتیجه افزایش تقاضا برای آن‌ها خواهد شد. به‌دنبال این افزایش تقاضا، شاهد رضایت بیشتر مصرف‌کنندگان خواهیم بود که این امر پیامدهای مثبتی همانند تمایل به خرید بیشتر محصولات توسط مشتریان و در نهایت، افزایش منابع مالی به همراه خواهد داشت. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است میزان منابع مالی در دوره‌های اول شبیه‌سازی با شیب ملایمی‌افزایش می‌یابد اما از سال سوم به بعد با شیب تندتری رشد خواهد کرد. این امر به دلیل این است که اسقرار دوقلوی دیجیتال در سال‌های اولیه ممکن است بخاطر هزینه‌هایی که در پی خواهد داشت منجر به سود و افزایش درآمد نشود. با افزایش سطح مهارت و توانایی کارکنان میزان مقاومت آن‌ها و میزان کیفیت استفاده از اینترنت اشیاء به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. که در این راستا ردیابی حرکت مواد نیز بهبود می‌یابد. این امر باعث می‌شود میزان ضایعات مواد غذایی کاهش پیدا کرده و آلودگی‌های زیست محیطی کاهش یابد.

نتایج حاصل از مقایسه دو سناریوی مورد بررسی نشان می‌دهد که تخصیص میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری (سناریوی اول)، تأثیر به مراتب بیشتری بر کیفیت استفاده از اینترنت اشیاء و دوقلوی دیجیتال در مقایسه با افزایش نرخ آموزش کارکنان (سناریوی دوم) دارد. افزایش تخصیص میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری، منجر به ارتقای قابل‌توجه کیفیت استفاده از اینترنت اشیاء می‌شود. این امر به دلیل بهبود پهنای باند، پایداری و امنیت شبکه است که برای عملکرد صحیح اینترنت اشیاء ضروری هستند. تأثیر نرخ آموزش کارکنان بر کیفیت استفاده از اینترنت اشیاء، کمتر از سرمایه‌گذاری در زیرساخت است. با این وجود، آموزش می‌تواند به استفاده کارآمدتر از اینترنت اشیاء و افزایش دقت داده‌های جمع‌آوری‌شده کمک کند. همانند اینترنت اشیاء، سرمایه‌گذاری در زیرساخت فناوری تأثیر چشمگیری بر کیفیت استفاده از دوقلوی دیجیتال دارد. زیرساخت‌های قوی شبکه‌ای، بستر لازم برای جمع‌آوری، انتقال و تحلیل حجم عظیمی‌از داده‌های مورد نیاز دوقلوی دیجیتال را فراهم می‌کنند. آموزش کارکنان در مورد نحوه استفاده از دوقلوی دیجیتال، نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد این فناوری ایفا می‌کند. با آموزش مناسب، کارکنان می‌توانند به طور موثرتری از دوقلوی دیجیتال برای حل چالش‌های زنجیره تأمین و ارتقای کارایی فرآیندها استفاده کنند. با توجه به نتایج این پژوهش، سرمایه‌گذاری در زیرساخت فناوری باید در اولویت قرار گیرد. چرا که این امر تأثیر به مراتب بیشتری بر کیفیت عملکرد اینترنت اشیاء و دوقلوی دیجیتال و در نهایت کارایی زنجیره تأمین مواد غذایی دارد.

همچنین میزان تغییرات کیفیت استفاده از دوقلوی دیجیتال در سناریوی اول (تخصیص میزان هزینه ارتقاء سرعت اینترنت و زیرساخت‌های فناوری) نسبت به سناریوی دوم (افزایش نرخ آموزش) بیشتر است. به عبارتی دیگر نتایج این بخش نشان می‌دهد که فراهم‌کردن زیرساخت‌های مناسب به منظور استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال در اولویت قرار دارد. از دیگر نتایج بدست آمده از مقایسه دو سناریو می‌توان به تأثیر قابل توجه افزایش ساعات آموزش در پذیرش استفاده از دوقلوی دیجیتال اشاره کرد که این امر منجر به بهبود ردیابی محصولات، کاهش آلودگی زیست محیطی، کاهش قیمت تمام شده محصول و افزایش تقاضا و افزایش منابع مالی خواهد شد.

یافته‌های سناریوی سوم نشان می‌دهد که با کاهش سرمایه‌گذاری در زیرساخت فناوری و اینترنت، کیفیت استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال به طور قابل‌توجهی افت می‌کند. این امر به دلیل وابستگی

شدید این فناوری به زیرساخت‌های شبکه‌ای است. کاهش کیفیت دوقلوی دیجیتال پیامدهای منفی متعددی در زنجیره تأمین مواد غذایی به همراه دارد. کاهش کیفیت دوقلوی دیجیتال، رصد و ردیابی دقیق مسیر مواد غذایی در زنجیره تأمین را دشوار می‌کند. این افت، دید کلی از زنجیره تأمین را مختل کرده و آگاهی از مکان، وضعیت و دمای محصولات در هر لحظه را با مشکل مواجه می‌کند. بدون اطلاعات دقیق، شناسایی نقاط ضعف و مشکلات زنجیره تأمین که منجر به فساد یا هدر رفتن مواد غذایی میگردد، دشوارتر می‌شود. این امر، افزایش ضایعات مواد غذایی و آلودگی محیطزیست را به دنبال خواهد داشت. عملکرد ضعیف دوقلوی دیجیتال در جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، می‌تواند بر کیفیت فرآیند تولید و در نهایت کیفیت محصولات نهایی تأثیر منفی بگذارد. افت کیفیت محصولات ناشی از عملکرد ضعیف دوقلوی دیجیتال، اعتماد مصرف‌کنندگان به برند محصولات غذایی را کاهش می‌دهد. این امر به دلیل عدم انطباق محصولات با انتظارات مصرف‌کنندگان ایجاد می‌شودکه به نوبه خود تقاضا برای محصولات غذایی را کاهش می‌دهد. کاهش تقاضا با کاهش عرضه مواد اولیه همراه است. این امر می‌تواند منجر به افزایش قیمت تمام شده مواد اولیه و در نهایت افزایش قیمت نهایی محصول شود. بدیهی است که با کاهش تقاضا، تعداد واحدهای محصول جهت فروش نیز کاهش می‌یابد. این امر به طور مستقیم درآمد حاصل از فروش و به طور کلی منابع مالی را کاهش می‌دهد. افت کیفیت اینترنت اشیاء نیز در این سناریو مشهود است. اینترنت اشیاء نقش کلیدی در جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای عملکرد دوقلوی دیجیتال ایفا می‌کند. با افت کیفیت اینترنت اشیاء، میزان و دقت داده‌های جمع‌آوری‌شده کاهش می‌یابد که به نوبه خود بر عملکرد دوقلوی دیجیتال و پیامدهای ذکر شده در بالا تأثیر منفی می‌گذارد.

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با استقرار فناوری دوقلوی دیجیتال می‌توان مسیر حرکت محصولات غذایی را از مزرعه تا سفره به طور دقیق و لحظه‌ای رصد کرد. این امر به شفافیت زنجیره تأمین، جلوگیری از تقلب و تضمین کیفیت محصولات کمک می‌کند. همچنین با تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط دوقلوی دیجیتال، می‌توان نقاط ضعف زنجیره تأمین را شناسایی و اقدامات لازم برای کاهش ضایعات مواد غذایی را انجام داد. و با بهینه‌سازی فرآیندها و کاهش ضایعات، می‌توان به طور قابل‌توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست کاست. از طرفی، با ارائه اطلاعات دقیق و به موقع به مصرف‌کنندگان در مورد محصولات غذایی، می‌توان اعتماد و رضایت آنها را جلب و تقاضا برای این محصولات را افزایش داد. بهبود کارایی زنجیره تأمین و کاهش هزینه‌ها، می‌تواند منجر به افزایش سودآوری و منابع مالی برای شرکت‌های فعال در این صنعت شود. در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود از فناوری‌های دیگری مانند اینترنت اشیاء، سیستم‌های سایبر-فیزیکی، بلاک‌چین و هوش مصنوعی نیز برای ارتقای زنجیره تأمین مواد غذایی استفاده شود. یا از روش‌های دیگری برای بررسی اسقرار و کاربرد دوقلوی دیجیتال در صنعت مواد غذایی استفاده شود. همچنین می‌توان به بررسی روابط علی و معلولی بین استقرار دوقلوی دیجیتال و نتایج حاصل از آن در صنایع مختلف، مانند صنعت گردشگری، پرداخت.

مراجع

[1] Davis, K.F., S. Downs, and J.A. Gephart, *Towards food supply chain resilience to environmental shocks.* Nature Food, 2021. **2**(1): p. 54-65.

[2] Iftekhar, A. and X. Cui, *Blockchain-based traceability system that ensures food safety measures to protect consumer safety and COVID-19 free supply chains.* Foods, 2021. **10**(6): p. 1289.

[3] Mesterházy, Á., J. Oláh, and J. Popp, *Losses in the grain supply chain: Causes and solutions.* Sustainability, 2020. **12**(6): p. 2342.

[4] Talaie, H., M. Ziaeian, and P. Malekinejad ,*Designing the establishment and implementation model of quality 4.0 with the integrated approach of interpretive structural modeling and structural equation modeling.* Journal of quality engineering and management, 2022. **12**(1): p. 51-68.

[5] Patidar, A., et al., *Traceability and transportation issues in the food supply chain*, in *Operations and Supply Chain Management in the Food Industry: Farm to Fork*. 2022, Springer. p. 73-93.

[6] Ayokanmbi, F.M. and J. Oluwoye, *Improving consumer confidence in food safety and nutritional quality.* J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol, 2020. **7**: p. 12723-12728.

[7] Sharif, A.M. and Z. Irani, *Policy making for global food security in a volatile, uncertain, complex and ambiguous (VUCA) world.* Transforming Government: People, Process and Policy, 2017. **11**(4): p. 523-534.

[8] Paciarotti, C. and F. Torregiani, *The logistics of the short food supply chain: A literature review.* Sustainable Production and Consumption, 2021. **26**: p. 428-442.

[9] Kumar, A. and S. Agrawal, *Challenges and opportunities for agri-fresh food supply chain management in India.* Computers and Electronics in Agriculture, 2023. **212**: p. 108161.

[10] Shen, G., et al., *The status of the global food waste mitigation policies: experience and inspiration for China.* Environment, Development and Sustainability, 2024. **26**(4): p. 8329-8357.

[11] Jayalath, M.M., et al. *Adopting Circular Economy Paradigm to Waste Prevention: Investigating Waste Drivers in Vegetable Supply Chains*. in *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. 2023. Springer.

[۱۲] مقدم, ز.ک. و غ. ثالث, بهبود سیستم تشخیص نفوذ در اینترنت اشیاء صنعتیِ مبتنی بر یادگیری عمیق با استفاده الگوریتم‌های فراابتکاری. فصلنامه فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران. ۵۷(۵۷): ص ۱۶۵.

[۱۳] شمس، و همکاران., بهبود مدیریت منابع در اینترنت اشیا با استفاده از محاسبات مه و الگوریتم بهینه‌سازی شیر مورچه. فصلنامه فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران. ۵۷(۵۷): ص ۲۳۷.

[14] Attaran, S., M. Attaran, and B.G. Celik, *Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0.* Decision Analytics Journal, 2024. **10**: p. 100398.

[15] Liu, Y., et al., *A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model.* Advanced Engineering Informatics, 2024. **62**: p. 102592.

[36] Maheshwari, P., et al., *Digital twin implementation for performance improvement in process industries-A case study of food processing company.* International Journal of Production Research, 2023. **61**(23): p. 8343-8365.

[37] Talaie, H., M. Ziaeian, and P. Malekinejad, *Towards quality 4.0 in home appliances: definitions, deployment scenarios, and future perspectives.* Journal of Manufacturing Technology Management, 2024. **35**(7): p. 1416-1438.

[38] Größler, A., J.H. Thun, and P.M. Milling, *System dynamics as a structural theory in operations management.* Production and operations management, 2008. **17**(3): p. 373-384.

[39] Manzini, R. and R. Accorsi, *The new conceptual framework for food supply chain assessment.* Journal of food engineering, 2013. **115**(2): p. 251-263.

[40] Ghandar, A., et al., *A decision support system for urban agriculture using digital twin: A case study with aquaponics.* Ieee Access, 2021. **9**: p. 35691-35708.

[41] Onwude, D., et al., *Physics-driven digital twins to quantify the impact of pre-and postharvest variability on the end quality evolution of orange fruit* .Resources, Conservation and Recycling, 2022. **186**: p. 106585.

[42] Gallego-García, S., D. Gallego-García, and M. García-García, *Sustainability in the agri-food supply chain: a combined digital twin and simulation approach for farmers.* Procedia Computer Science, 2023. **217**: p. 1280-1295.

[43] Yadav, V.S. and A. Majumdar, *What impedes digital twin from revolutionizing agro-food supply chain? Analysis of barriers and strategy development for mitigation.* Operations Management Research, 2024: p. 1-17.

[44] Sterman, J., *System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.* 2002.

[45] Möllers, T., et al. *Design and evaluation of a system dynamics based business model evaluation method.* in *Designing the Digital Transformation: 12th International Conference, DESRIST 2017, Karlsruhe, Germany, May 30–June 1, 2017, Proceedings 12*. 2017. Springer.

[46] Adane, T.F., et al., *Application of system dynamics for analysis of performance of manufacturing systems.* Journal of Manufacturing Systems, 2019. **53**: p. 212-233.

[47] Turner, B.L., et al., *System dynamics modeling for agricultural and natural resource management issues: Review of some past cases and forecasting future roles.* Resources, 2016. **5**(4): p. 40.

[48] Ziaeian, M., et al., *Investigating how knowledge management affects the implementation of Industry 4.0 in the home appliance industry of the country.* Sciences and Techniques of Information Management, 2023. **9**(4): p. 261-292.

[49] Karnopp, D.C., D.L. Margolis, and R.C. Rosenberg, *System dynamics: modeling, simulation, and control of mechatronic systems.* 2012: John Wiley & Sons.

[50] Sterman, J.D., *System dynamics modeling: tools for learning in a complex world.* California management review, 2001. **43**(4): p. 8-25.

[51] Fildes, R., S. Ma, and S. Kolassa, *Retail forecasting: Research and practice.* International Journal of Forecasting, 2022. **38**(4): p. 1283-1318.

[52] Van Nguyen, T., et al., *Predicting customer demand for remanufactured products: A data-mining approach.* European Journal of Operational Research, 2020. 281(3): p. 543-558.

[53] Anisere-Hameed, R.A. and T.D. Bodunde, *The impact of inventory management on the profitability of manufacturing companies in Nigeria.* International Journal of Innovative Research and Advanced Studies (IJIRAS), 2021. **8**(1): p. 9-15.

[54] Sakib, S.N., *The application of the inventory models to manage and control overstocking in the production system.* 2021.

[55] Altekar, R.V., *Supply chain management: Concepts and cases*. 2023: PHI Learning Pvt. Ltd.

[56] Hutt, M.D. and T.W. Speh, *Business marketing management: B2B.* 2021: South-Western, Cengage Learning.

[16] Sutar, P., J. Olivares-Aguila, and A. Vital-Soto, *An Offline Digital Twin for Resilience and Supplier Reliability in Perishable Food Supply Chains.*

[17] Zafar, M.H., E.F. Langås, and F. Sanfilippo, *Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024. **89**: p. 102769.

[18] Liao, H., et al., *Climate change, its impact on emerging infectious diseases and new technologies to combat the challenge.* Emerging Microbes & Infections, 2024(just-accepted): p. 2356143.

[19] Ahire, J.J., et al., *Quality Management of Probiotics: Ensuring Safety and Maximizing Health Benefits.* Current Microbiology, 2024. **81**(1): p. 1.

[20] Myshko, A., et al., *Towards twin transition in the agri-food sector? Framing the current debate on sustainability and digitalisation.* Journal of Cleaner Production, 2024: p. 142063.

[21] Lim, K.Y.H. and C.-H. Chen, *Incorporating supply and production digital twins to mitigate demand disruptions in multi-echelon networks.* International Journal of Production Economics, 2024: p. 109258.

[22] Maheshwari, P., et al., *Digital twin-driven real-time planning, monitoring, and controlling in food supply chains.* Technological Forecasting and Social Change, 2023. **195**: p. 122799.

[23] Dyck, G., et al., *Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling.* Smart Agricultural Technology, 2023. **3**: p. 100079.

[24] Omrany, H., et al., *Digital twins in the construction industry: a comprehensive review of current implementations, enabling technologies, and future directions.* Sustainability, 2023. **15**(14): p. 10908.

[25] Drobnyi, V., et al., *Construction and maintenance of building geometric digital twins: state of the art review.* Sensors, 2023. **23**(9): p. 4382.

[26] Mohandes, S.R., et al., *Determining the stationary digital twins implementation barriers for sustainable construction projects.* Smart and Sustainable Built Environment, 2024.

[27] Venkatesh, K.P., G. Brito, and M.N. Kamel Boulos, *Health digital twins in life science and health care innovation.* Annual Review of Pharmacology and Toxicology, 2024. **64**: p. 159-170.

[28] Subasi, A. and M.E. Subasi, *Digital twins in healthcare and biomedicine*, in *Artificial Intelligence, Big Data, Blockchain and 5G for the Digital Transformation of the Healthcare Industry*. 2024, Elsevier. p. 365-401.

[29] Kaul, R., et al., *The role of AI for developing digital twins in healthcare: The case of cancer care.* Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2023. **13**(1): p. e1480.

[30] Damtew, A.W., *Roles of digital twins on material performances and utilization on upstream industry (The case of automotive industry).* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024. **130**(7): p. 3525-3536.

[31] Li, X., W. Niu, and H. Tian, *Application of Digital Twin in Electric Vehicle Powertrain: A Review.* World Electric Vehicle Journal, 2024. **15**(5): p. 208.

[32] Burgos, D. and D. Ivanov, *Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions.* Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021. **152**: p. 102412.

[33] Melesse, T.Y., et al., *Machine learning-based digital twin for monitoring fruit quality evolution.* Procedia Computer Science, 2022. **200**: p. 13-20.

[34] Singh, G., et al., *Resilience and sustainability enhancements in food supply chains using Digital Twin technology: A grey causal modelling (GCM) approach.* Computers & Industrial Engineering, 2023. **179**: p. 109172.

[35] Melesse, T.Y., et al., *Analyzing the Implementation of Digital Twins in the Agri-Food Supply Chain.* Logistics, 2023. **7**(2): p. 33.

[76] Basyal, D.K. and P.D.J. Wan, *Employees' resistance to change and technology acceptance in Nepal.* South Asian Studies, 2020. **32**(2).

[77] Elgohary, E. and R. Abdelazyz, *The impact of employees' resistance to change on implementing e-government systems: An empirical study in Egypt.* The Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries, 2020. **86**(6): p. e12139.

[78] Paluri, R.A. and A. Mishal, *Trust and commitment in supply chain management: a systematic review of literature.* Benchmarking: an international journal, 2020. **27**(10): p. 2831-2862.

[79] Nguyen, C.T., *Trust as an unquestioning attitude.* 2022.

[80] Pu ,G., et al., *Innovative finance, technological adaptation and SMEs sustainability: the mediating role of government support during COVID-19 pandemic.* Sustainability, 2021. **13**(16): p. 9218.

[81] Chen, C.-L., et al., *Role of government to enhance digital transformation in small service business.* Sustainability, 2021. **13**(3): p. 1028.

[82] Liu, T.Y. and C.C. Lee, *Exchange rate fluctuations and interest rate policy.* International Journal of Finance & Economics, 2022. **27**(3): p. 3531-3549.

[83] Alasha, R.U., *The impact of exchange rate fluctuations on economic growth in Nigeria.* A Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for The Award of Bachelors of Science (B. Sc.) Degree in Economics. Department of Economics, Faculty of Management and Social Sciences Baze University, Abuja, 2020.

[84] Liu, J., Y. Liu, and L. Yang, *Uncovering the influence mechanism between top management support and green procurement: The effect of green training.* Journal of Cleaner Production, 2020. **251**: p. 119674.

[85] Zhen, J., Z. Xie, and K. Dong, *Impact of IT governance mechanisms on organizational agility and the role of top management support and IT ambidexterity.* International Journal of Accounting Information Systems, 2021. **40**: p. 100501.

[86] Mehale, K.D., C.M. Govender, and C.M. Mabaso, *Maximising training evaluation for employee performance improvement.* SA Journal of Human Resource Management, 2021. **19**: p. 11.

[87] Burhan Ismael, N., et al., *The role of training and development on organizational effectiveness.* Ismael ,NB, Othman, BJ, Gardi, B., Hamza, PA, Sorguli, S., Aziz, HM, Ahmed, SA, Sabir, BY, Ali, BJ, Anwar, G.(2021). The Role of Training and Development on Organizational effectiveness. International Journal of Engineering, Business and Management, 2021. **5**(3): p. 15-24.

[88] Hajiali, I., et al., *Determination of work motivation, leadership style, employee competence on job satisfaction and employee performance.* Golden Ratio of Human Resource Management, 2022. **2**(1): p. 57-69.

[89] Saniuk, S., D. Caganova, and A. Saniuk, *Knowledge and skills of industrial employees and managerial staff for the industry 4.0 implementation.* Mobile Networks and Applications, 2023. **28**(1): p. 220-230.

[90] Kush, R.D., et al., *FAIR data sharing: the roles of common data elements and harmonization.* Journal of biomedical informatics, 2020. **107**: p. 103421.

[91] Papadimitroulas, P., et al., *Artificial intelligence: Deep learning in oncological radiomics and challenges of interpretability and data harmonization.* Physica Medica, 2021. **83**: p. 108-121.

[92] Zainab, A., et al., *Big data management in smart grids: Technologies and challenges.* IEEE Access, 2021. **9**: p. 73046-73059.

[93] Diène, B., et al., *Data management techniques for Internet of Things.* Mechanical Systems and Signal Processing, 2020 :۱۳۸ .p. 106564.

[57] Hasfar, M., T. Militina, and G.N. Achmad, *Effect of customer value and customer experience on customer satisfaction and loyalty PT meratus samarinda.* International Journal of Economics. Business and Accounting Research (IJEBAR), 2020. **4**(01).

[58] Jaiswal, S. and A. Singh, *Influence of the determinants of online customer experience on online customer satisfaction.* Paradigm, 2020. **24**(1): p. 41-55.

[59] Putri, P., *The effect of operating cash flows, sales growth, and operating capacity in predicting financial distress.* International Journal of Innovative Science and Research Technology, 2021. **6**(1): p. 638-646.

[60] Giarto, R.V.D. and F. Fachrurrozie, *The effect of leverage, sales growth, cash flow on financial distress with corporate governance as a moderating variable.* Accounting Analysis Journal, 2020. **9**(1): p. 15-21.

[61] Zakirova, A., et al. *Organizational and methodological approach to managing financial flows of agricultural enterprises*. in *E3S web of conferences*. 2020. EDP Sciences.

[62] Atmaja, D.S., et al., *Actualization Of Performance Management Models For The Development Of Human Resources Quality, Economic Potential, And Financial Governance Policy In Indonesia Ministry Of Education.* 2022.

[63] Fedushko, S., T. Ustyianovych, and M. Gregus, *Real-time high-load infrastructure transaction status output prediction using operational intelligence and big data technologies.* Electronics, 2020. **9**(4): p. 668.

[64] Hou, C.-K., *The effects of IT infrastructure integration and flexibility on supply chain capabilities and organizational performance: An empirical study of the electronics industry in Taiwan.* Information Development, 2020. **36**(4): p. 576-602.

[65] Plawsky, J.L., *Transport phenomena fundamentals*. 2020: CRC press.

[66] Verlinghieri, E. and T. Schwanen, *Transport and mobility justice: Evolving discussions.* Journal of Transport Geography, 2020. **87**: p. 102798.

[67] Zhang, X., et al., *A critical review on challenges and trend of ultrapure water production process.* Science of The Total Environment, 2021. **785**: p. 147254.

[68] Santos, D., J.A.L. da Silva, and M. Pintado, *Fruit and vegetable by-products' flours as ingredients: A review on production process, health benefits and technological functionalities.* Lwt, 2022. **154**: p. 112707.

[69] Mahsyar, S. and U. Surapati, *Effect of service quality and product quality on customer satisfaction and loyalty.* International Journal of Economics, Business and Accounting Research (IJEBAR), 2020. **4**(01).

[70] Chaerudin, S.M. and A. Syafarudin, *The effect of product quality, service quality, price on product purchasing decisions on consumer satisfaction.* Ilomata International Journal of Tax and Accounting, 2021. **2**(1): p. 61-70.

[71] Mubaslat, E.A., *Introduction to waste management*. 2021, Jordan.

[72] Liboiron, M. and J. Lepawsky, *Discard studies: Wasting, systems, and power*. 2022: MIT Press.

[73] Sharma, A.K., et al., *Mapping the impact of environmental pollutants on human health and environment: A systematic review and meta-analysis.* Journal of Geochemical Exploration, 2023: p. 107325.

[74] Ajibade, F.O., et al., *Environmental pollution and their socioeconomic impacts*, in *Microbe mediated remediation of environmental contaminants*. 2021, Elsevier. p. 321-354.

[75] Osborne, D. and F. Dempsey, *Supply chain management for bulk materials in the coal industry*, in *The Coal Handbook*. 2023, Elsevier. p. 619-664.

معادلات ریاضی مدل پویایی سیستم

(۱)

Skill=
IF THEN ELSE (Training<50, 0.12, IF THEN ELSE(Training>50:AND:Training<=90, 0.2, IF THEN ELSE(Training>90:AND:Training<=130, 0.23, IF THEN ELSE(Training>140:AND:Training<=190, 0.26, IF THEN ELSE(Training>190:AND:Training<=210, 0.32, IF THEN ELSE(Training>210:AND:Training<=230, 0.52, IF THEN ELSE(Training>230:AND:Training<=260, 0.63, IF THEN ELSE (Training>260:AND:Training<=280, 0.78, 0.96))))))))

(۲)

Training=
IF THEN ELSE (resistance<=0.2, 450, IF THEN ELSE (resistance>0.2:AND: resistance <=0.3, 400, IF THEN ELSE (resistance>0.3:AND: resistance<=0.4, 350, IF THEN ELSE (resistance>0.4:AND: resistance<=0.5, 300, IF THEN ELSE (resistance>0.5:AND: resistance<=0.6, 250, IF THEN ELSE (resistance>0.6:AND: resistance<=0.7, 200, 150))))))

(۳)

(کیفیت استفاده از اینترنت اشیاء*0.95)= استانداردسازی داده‌ها

(۴)

(حمایت مدیریت ارشد*0.75)=اعتماد

تسهیلات

(۵) = RAMP(1.5e+09, 0, 5)+(6e+09*کیفیت استفاده از دوقلوی دیجیتال)

(۶)

خرید مواد اولیه= RAMP(300000, 0, 5)

(۷)

ضایعات= INTEG (نرخ ضایعات-بازیافت-نرخ دفع ضایعات,200000)

(۸)

(تولید)+(هزینه نیروی کار/تولید/تولید)+(هزینه حمل و نقل/(هزینه‌های عمومی/تولید)+(هزینه خرید مواد اولیه=قیمت تمام شده

(۹)

قیمت تمام شده+(قیمت تمام شده*۰,۵)=قیمت نهایی

(۱۰)

مدیریت داده ها= 1.5*استانداردسازی داده ها

(۱۱)

مشتری= INTEG (نرخ جذب مشتری-نرخ از دست دادن مشتری,70)

(۱۲)

منابع مالی= INTEG (آمد-هزینه, 4e+11)

(۱۳)

موجودی انبار= INTEG(حمل و نقل-تولید , 2.6e+06)

(۱۴)

نرخ آموزش کارکنان=RAMP(200000, 0, 0.3)

(۱۵)

نرخ اخراج=INTEGER(0.001*نیروی کار)

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 187-203

Prioritizing Virtual Reality Functions in the B2B Customer Journey Using the Fuzzy SWARA Method

Zahra Nikoosefat Rad[1], Pejman Jafary[2*], Farid Ahmadi[3]

[1]Department of Business Management, Science and Research Branch, Tehran, Iran
[2]Department of Business Management, Science and Research Branch, Tehran, Iran
[3]Department of Information Technology Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Received: 19 April 2024, Revised: 11 February 2025, Accepted: 01 March 2025
Paper type: Research

Abstract

In the last decade, the increasing diffusion of virtual reality technology in the B2B sector has created new and unique values along the customer journey. Therefore, businesses have realized the need to exploit the functions of this technology more and better to remain competitive and meet the new needs and expectations of customers. Since implementing virtual reality in the customer journey requires a lot of time and money, it is necessary to prioritize its functions in the stages of the customer journey. Therefore, the present study was conducted with the aim of prioritizing the functions of virtual reality during the customer journey of B2B businesses. For this purpose, the identified functions were ranked using expert opinion and the fuzzy SWARA method. The results of this study showed that in the pre-purchase stage, digital marketing communications, product development optimization, and virtual meetings were ranked first to third, respectively. Given that VR only had one function in the purchase phase, it was not ranked for this phase, and in the post-purchase phase, employee and customer training and maintenance optimization ranked first and second, respectively. Business leaders can leverage these insights to improve their marketing strategies, especially in the pre-purchase and post-purchase phases, where VR's ability to deliver immersive product experiences significantly enriches customer understanding and builds trust.

Keywords: B2B Customer Journey, Virtual Reality, Fuzzy SWARA.

* Corresponding Author's email: pejman.jafary@gmail.com

دوفصلنامه

فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۸۷ الی ۲۰۳

اولویت‌بندی کارکردهای واقعیت مجازی در سفر مشتری کسب‌وکارهای B2B با استفاده از روش سوارای فازی

زهرا نیکوصفت راد[۱]، پژمان جعفری[۲*]، فرید احمدی[۳]

[۱] گروه مدیریت بازرگانی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه علوم و تحقیقات، تهران، ایران

[۲] گروه مدیریت بازرگانی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه علوم و تحقیقات، تهران، ایران

[۳] گروه مهندسی فناوری اطلاعات ، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۳۱/۰۱/۱۴۰۳ تاریخ بازبینی: ۲۳/۱۱/۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۱/۱۲/۱۴۰۳

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در دهه اخیر، انتشار روزافزون فناوری واقعیت مجازی در بخش B2B باعث خلق ارزش‌های جدید و منحصر به‌فردی در طول سفر مشتری شده است. از این‌رو کسب‌وکارها به لزوم بهره‌برداری هرچه بیشتر و بهتر از کارکردهای این فناوری به منظور باقی‌ماندن در فضای رقابت و برآورده کردن نیازها و انتظارات جدید مشتریان پی برده‌اند. از آنجایی که پیاده‌سازی واقعیت مجازی در سفر مشتری، نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی هست، اولویت‌بندی کارکردهای آن در مراحل سفر مشتری ضرورت دارد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف اولویت‌بندی کارکردهای واقعیت مجازی در طول سفر مشتری کسب‌وکارهای B2B انجام شده است. بدین منظور، کارکردهای شناسایی شده با استفاده از نظر خبرگان و روش سوارای فازی رتبه‌بندی شدند. نتایج این مطالعه نشان دادند که در مرحله پیش از خرید، ارتباطات بازاریابی‌دیجیتال، بهینه‌سازی توسعه محصول و جلسات مجازی به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. با توجه به این که واقعیت مجازی تنها یک کارکرد در مرحله خرید داشت، برای این مرحله رتبه‌بندی انجام نشد و در مرحله پس از خرید، آموزش کارکنان و مشتریان و بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری به ترتیب در در رتبه‌های اول و دوم قرار گرفتند. مدیران کسب‌وکارها می‌توانند از این بینش‌ها برای بهبود استراتژی‌های بازاریابی خود بهره‌برداری کنند، به‌خصوص در مرحله پیش از خرید و پس از خرید، جایی که توانایی واقعیت مجازی در ارائه تجربیات فراگیر محصول، به‌طور قابل‌توجهی درک مشتری را غنی‌تر کرده و اعتماد را تقویت می‌کند.

کلیدواژگان: سفر مشتری B2B، واقعیت مجازی، سوارای فازی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: pejman.jafary@gmail.com

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، انتشار فناوری‌های دیجیتال در بخش B2B[1] به سرعت افزایش یافته است. فن‌آوری‌هایی مانند رسانه‌های اجتماعی، اینترنت اشیا[2] (IoT)، داده‌های بزرگ[3]، هوش مصنوعی[4] (AI)، محاسبات ابری[5]، واقعیت افزوده و مجازی[6] و بلاک‌چین[7]، تعاملات و سفرهای مشتری B2B را تحت تاثیر قرار دادند و هر کدام ارزش‌های جدید و منحصر به‌فردی را در طول سفر مشتری ایجاد می‌کنند [1]. این فناوری‌ها بر هر مرحله از سفر مشتری تأثیر می‌گذارند؛ از نحوه جستجوی خریداران برای کسب اطلاعات در مورد محصولات تا ارزیابی جایگزین‌ها و تصمیم‌گیری برای خرید. علاوه بر این، فناوری‌های دیجیتال می‌توانند مرحله پس از خرید را با ابزارهای بهتر مدیریت ارتباط با مشتری به‌طور قابل توجهی بهبود بخشند [2].

یکی از این فناوری‌های دیجیتال، فناوری واقعیت مجازی[8] (VR) است، «VR یک شبیه‌سازی سه‌بعدی و تولید شده توسط رایانه است که کاربر در آن می‌تواند اطراف خود را پیمایش کند، با آن تعامل داشته باشد و در آن غوطه‌ور شود» به‌طوری‌که حضور فیزیکی خود را در دنیای واقعی فراموش کند [3] و [4]. بر طبق گزارش گارتنر[9] (۲۰۱۷)، VR در میان ده گرایش برتر فناوری استراتژیک برای سازمان‌ها انتخاب شده است و سازمان‌ها در سراسر جهان از ابزارهای VR در استراتژی‌های بازاریابی و فروش خود استفاده می‌کنند [5] و [6].

VR در سفر مشتری به‌عنوان استفاده شرکت‌ها از محیط‌های تعاملی مبتنی بر رایانه تعریف شده است که قادر است به مصرف‌کنندگان بازخورد حسی ارائه کند تا مشتریان را درگیر و روابط مصرف‌کننده /برند را تقویت کند و رفتارهای مطلوب مصرف‌کنندگان را در هر مرحله از سفر آن‌ها پیش ببرد[7]. VR کارکردهای بسیاری در سفر مشتری دارد. به‌عنوان‌مثال، در سفر مشتری B۲B اولین نقطه تماس مشتریان با شرکت، مرحله «تحقیق»، «بررسی و ارزیابی» است. در این مرحله، مشتریان می‌خواهند اطلاعات مربوط به محصولی را دریافت کنند که نیازهای شناسایی شده از قبل را پوشش می‌دهد [8]. مطالعات گارتنر نشان می‌دهد مشتریانی که اطلاعات دریافتی از تأمین‌کنندگان را ابزاری مفید برای سهولت پیشبرد فعالیت‌های فرایند خرید می‌دانند، ۲/۸ برابر راحت‌تر خرید می‌کنند و سه برابر بیشتر از مشتریان دیگر، احتمال دارد که معامله‌ای بزرگ‌تر با کم‌ترین میزان پشیمانی انجام دهند. تجربیات زنده و چندحسی VR، نمایش واقعی‌تری از محصولات ارائه می‌دهد و بررسی ویژگی‌های محصول را امکان‌پذیر می‌کند [5]. فناوری می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در ارائه تجربه‌های غنی‌تر برای خریداران مورد استفاده قرار گیرد [9]. بنابراین، اطلاعات دقیق‌تر و بیشتری را به مشتریان منتقل می‌کند و می‌تواند دانش آن‌ها را در مورد محصول افزایش دهد، این امر عدم اطمینان مشتریان در مورد کیفیت محصول را کاهش داده [8] و تأثیر پایداری بر رفتار تصمیم‌گیری آن‌ها دارد [10].

با توجه به اهمیت موضوع، پژوهشگران تلاش کرده‌اند کارکردهای واقعیت مجازی در طول سفر مشتری را مورد شناسایی قرار دهند. برای نمونه نتایج مطالعه‌ای که تأثیرات VR بر ارتباطات مشتریان در صنعت خرده‌فروشی را مورد مطالعه قرار داده‌بود، نشان داد که فناوری VR می‌تواند به شکل قابل توجهی نظارت و تعامل مشتریان با محصولات را بهبود بخشد و از این طریق وفاداری به برند را افزایش دهد [11]. در مطالعه دیگری، محققان کاربرد VR در بهبود تجربه مشتری در بازارهای B2B را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند که VR می‌تواند تجربه خرید را جذاب‌تر کرده و فرایند فروش را تسهیل کند، آنها همچنین بر اهمیت تکنولوژی‌های نوین در ایجاد ارتباط مؤثرتر بین فروشندگان و خریداران تأکید کردند [12]. علاوه بر این، نتیجه مطالعه تجربی که استراتژی‌های بازاریابی مبتنی بر VR در بخش B2B را مورد بررسی قرار داده بود حاکی از این بود که استفاده از VR می‌تواند به جذب مشتریان جدید و تقویت روابط تجاری کمک کند و نویدبخش آینده‌ای روشن برای تکنیک‌های بازاریابی این‌چنینی است [13]. همچنین، نتایج مطالعه‌ای که قابلیت‌های VR در بهینه‌سازی سفر مشتریان در محیط‌های B2B را مورد بررسی قرار داده بود نشان داد که VR می‌تواند تجربه مشتری را در مراحل مختلف سفر آن‌ها بهبود بخشد و تأثیرات مثبت بر رضایت خریداران داشته باشد [14]. علاوه بر این، در مطالعه‌ای، اولویت‌های کاربرد VR در تجربیات مشتریان B2B با استفاده از منطق فازی مورد بررسی قرار گرفت و یافته‌ها نشان دادند که VR می‌تواند تأثیر مثبتی بر تصمیم‌گیری‌های مشتریان داشته باشد و نقش مهمی در بهبود تجربه کاربری ایفا کند [15]. همچنین، نتیجه مطالعه‌ای که محققان اثرات VR بر روابط مشتریان در B2B را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده بودند حاکی از این بود که فناوری مذکور می‌تواند موجب ایجاد ارتباطات عمیق‌تر و اعتماد بیشتری میان

[1] Business to Business
[2] Internet of Things
[3] Big Data
[4] Artificial intelligence
[5] Cloud Computing
[6] Augmented & virtual reality.
[7] Blockchain
[8] Virtual reality (VR)
[9] Gartner

مشتریان و برندها شود [16]. علاوه بر این، محققانی که نوآوری‌ها در کاربرد VR در بازاریابی B2B را مورد شناسایی قرار دادند استدلال کردند که این فناوری می‌تواند کارایی استراتژی‌های بازاریابی را بهبود بخشد [17]. هم‌چنین، نتایج مطالعه‌ای که چگونگی بهره‌برداری از VR برای تقویت استراتژی‌های تعامل با مشتریان B2B را مورد بررسی قرار داد حاکی از این بود که VR می‌تواند حس اعتماد و تعامل مثبت را در روابط تجاری ایجاد کند [18]. در نهایت، یافته‌های مطالعه‌ای اکتشافی و نظریه‌پردازانه نشان داد که موارد استفاده فعلی واقعیت افزوده (AR) و واقعیت مجازی (VR) در بازاریابی شامل تجسم پروژه و محصول، تعامل مبتنی بر رویداد، پشتیبانی از راه دور و آموزش کارکنان است و به‌ویژه در مراحل اولیه سفر مشتری به کار می‌رود [19].

علی‌رغم کارکردهای فوق‌العاده‌ای که VR در سفر مشتری B2B دارد، این کارکردها تا حد زیادی ناشناخته مانده و دانش منسجمی در این‌باره وجود ندارد. از این رو بسیاری از شرکت‌ها از مزایای استفاده از آن محروم مانده‌اند. علاوه بر این، محققان با مرور سیستماتیک ادبیات موجود، بر نیاز به تحقیقات بیشتر در این حوزه تأکید کردند [20]. در همین راستا نویسندگان مقاله حاضر، پژوهشی مبنی بر شناسایی کارکردهای VR در مراحل پیش از خرید، خرید و پس از خرید سفر مشتری کسب‌وکارهای B2B انجام داده‌اند [21]. در آن پژوهش، یک چارچوب اولیه ارائه گردید و برای تحقق آن مرور نظام‌مند ادبیات این حوزه با رویکرد تحلیل مضمون[10] صورت گرفت. داده‌های به دست آمده از مرور نظام‌مند با روش تحلیل مضمون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و بر مبنای مضامین به دست آمده در قالب چهارچوبی، کارکردهای VR در سفر مشتری کسب‌وکارهای B2B ارائه گردید که به شرح شکل ۱ می‌باشند ؛ در مرحله پیش از خرید، سه کارکرد اصلی و نُه کارکرد فرعی، در مرحله خرید یک کارکرد اصلی و یک کارکرد فرعی، و در مرحله پس از خرید دو کارکرد اصلی و یازده کارکرد فرعی مورد شناسایی قرار گرفت [21].

با توجه به این که پیاده سازی VR در سفر مشتری، نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی هست، لذا شناسایی و اولویت بندی کارکردهای VR در سفر مشتری به منظور آگاهی و بهره برداری هرچه بیشتر و بهتر کسب‌وکارهای B۲B از این کارکردها ضروری است. به منظور دستیابی به این هدف، در این مقاله مراحل سفر مشتری، کارکردهای اصلی و فرعی VR در سفر مشتری کسب‌وکارهای B۲B بر اساس نظرخواهی از خبرگان و روش سوارای فازی رتبه‌بندی می‌شوند.

باید خاطر نشان گردد که این پژوهش، از جنبه‌های موضوع و روش پژوهش دارای نوآوری است. اولاً به رغم بررسی موضوع استفاده از فناوری VR در سفر مشتری در حوزه B2C ،کمتر به کارکردهای این فناوری در حوزه B2B پرداخته شده است؛ دوماً، بررسی ادبیات موضوع نشان داد که در حوزه کسب و کار ایران کمتر به این موضوع پرداخته شده است؛ همچنین موضوع اولویت بندی کارکردها در قالب سه بخش پیش از خرید، خرید و پس از خرید با استفاده از روش سوارای فازی از نوآوری‌های این تحقیق محسوب می‌شود.

شکل ۱. چهارچوب کارکردهای VR در سفر مشتری B2B [اقتباس از21]

[10] Thematic analysis

۲- روش تحقیق

با توجه به هدف تحقیق که رتبه‌بندی کارکردهای VR در هر مرحله از سفر مشتری کسب‌وکارهای B2B است، تحقیق از لحاظ هدف، کاربردی است. از سوی دیگر، به دلیل این که نظرات خبرگان بدون دستکاری و به شکل طبیعی جمع‌آوری شده‌اند، پژوهش حاضر، توصیفی-پیمایشی به شمار می‌رود. رویکرد تحقیق در این بخش، کمی و روش تحقیق از نظر تجزیه و تحلیل داده‌ها، روش سوارای فازی است. این روش، روشی خبره‌محور برای محاسبه وزن نسبی معیارهاست و روشی کاملاً تصادفی می‌باشد.

در این پژوهش، استفاده از روش سوارای فازی به دلیل توانایی این روش در مدیریت عدم قطعیت و پیچیدگی‌های مرتبط با تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، مزیت دارد. واقعیت مجازی به‌عنوان یک فناوری نوپدید و در حال تغییر، با چالش‌هایی از جمله ارزیابی کارکردها و ترجیحات مشتریان مواجه است که ممکن است مبهم و نامشخص باشند. سوارای فازی این امکان را فراهم می‌آورد که نظرات خبرگان در خصوص اهمیت کارکردهای مختلف واقعیت مجازی، به‌خصوص در مراحل متفاوت سفر مشتری، به صورت سیستمی و قوی ترکیب شوند و در نتیجه، تحلیل دقیق‌تری از داده‌ها به دست آید [22]. همچنین، این روش قادر است اطلاعات کیفی را به پارامترهای کمی تبدیل کند که به افزایش قابلیت‌های تصمیم‌گیری کمک می‌کند و می‌تواند در محیط‌های تجاری نامعین و پیچیده، به‌عنوان ابزاری برای اولویت‌بندی موثر عمل کند [23]. روش سوارای فازی تعداد مقایسه‌های زوجی را کمتر می‌کند. در این روش نحوه پاسخگویی برای خبره‌ها راحت تر هست. در روش‌های دیگر مفهومی به‌نام نرخ ناسازگاری وجود دارد اگر این نرخ بالا باشد نیاز است مقایسه‌ها دوباره تغییر کنند. لذا روش سوارای فازی به این دلیل که کاربرد آن آسان است و گردآوری سریع داده را موجب می‌شود [24] و عدم قطعیت را مدیریت می‌کند و همچنین به تفکر انسان نزدیک است و امکان ادغام با سایر تکنیک‌ها را دارد بر روش‌های دیگر برتری دارد.

۲-۱- جامعه آماری و روش نمونه‌گیری

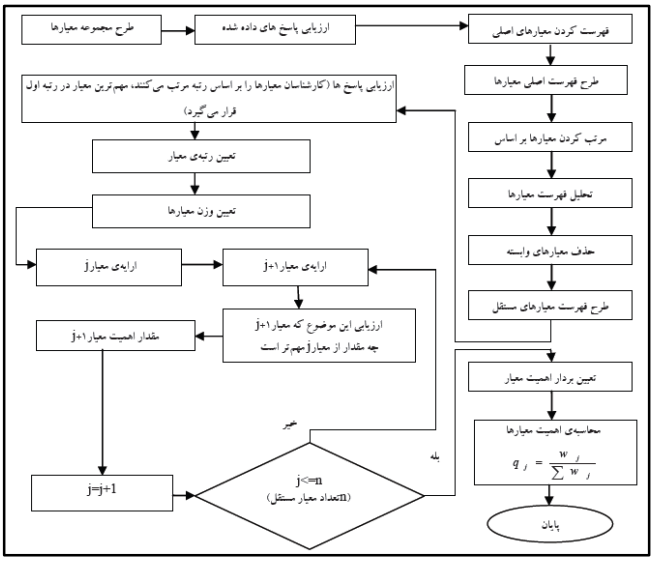
جامعه آماری را متخصصین فعال در حوزه VR و بازاریابی دیجیتال در ایران تشکیل می‌دهند. اعضای پانل یا خبرگان به‌وسیله روش گلوله‌برفی شناسایی شدند. نمونه‌گیری گلوله‌برفی یک روش نمونه‌گیری غیر احتمالی برای مواقعی است که واحدهای مورد مطالعه براحتی قابل شناسایی نباشند. به‌ویژه هنگامی که این واحدها بسیار کمیاب یا بخش کوچکی از یک جامعه خیلی بزرگ را تشکیل می‌دهند [25]. در روش سوارای فازی، سعی می‌گردد نمایندگانی از پنج نوع تفکر منطقی، خلاق، توسعه ای، انتقادی و سیستمی انتخاب گردد. این توزیع نقش‌ها باعث می‌شود که هر فرد بتواند از دیدگاه خاص خود به موضوع نگاه کند و به اتخاذ تصمیم‌های جامع و مؤثر یاری رساند [26]. لذا با توجه به موضوع پژوهش شاخص‌هایی برای انتخاب خبرگان در مرحله طراحی پژوهش در نظر گرفته شد. این شاخص‌ها عبارت بودند از : تخصص و تجربه فرد، پیشینه سنجی و شبکه سازی. لیستی از افراد با سبقه دانشگاهی و داشتن ویژگی‌های مورد نظر آماده شد. سپس افراد در حوزه‌های مرتبط با تفکر منطقی، خلاق، انتقادی، تحلیلی و سیستمی طبقه بندی شدند. این افراد به‌عنوان نمایندگان اولیه عمل کرده و سپس با درخواست از آن‌ها برای معرفی دیگران که در این زمینه‌ها تجربه یا تخصص دارند، دامنه‌ی جستجو گسترش یافت. با ادامه‌ی این فرآیند، بتدریج یک شبکه بزرگ‌تر از افراد شناسایی شد. این روش بدلیل ارتباطات اجتماعی و حرفه‌ای افراد اولیه، امکان دسترسی به متنوع‌ترین تخصص‌ها و دیدگاه‌ها را فراهم کرد و بدین ترتیب، اطمینان حاصل شد که تمامی جنبه‌های فرایند تفکر در این گروه نمایندگی می‌شود. از آنجایی که در تحقیقات کیفی، دستیابی به تنوع دیدگاه‌ها و نظریات مهم است، روش گلوله‌برفی باعث می‌شود که بر اساس ارجاعات متخصصان اولیه، با دقت بیشتری به افرادی با تخصص‌های مرتبط دست یابیم، در حالی که به اشباع نظری در هر طبقه نیز نزدیک می‌شویم. با بررسی نظرات هر طبقه یکی از افراد حاضر در هر طبقه را به‌عنوان نماینده جامع نظرات و خبره اصلی آن طبقه انتخاب گردید و مورد پرسش واقع شد. با توجه به وجود ابهام و عدم قطعیت در موضوع مورد بحث، این روش قادر است تا به ما در گزینش گزیده‌ای از نظرات معتبر و جامع که نمایانگر ابعاد مختلف مسئله باشد، کمک نماید.

۲-۲- تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌ها، بر اساس روش سوارای فازی انجام شده است. در ادامه به تعریف روش سوارای فازی و مراحل انجام آن در این تحقیق، پرداخته می‌شود.

روش سوارا: روش سوارا (SWARA) مخفف Step wise Weight Assessment Ratio Analysis به معنی تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی است. روش سوارا یکی از روش‌های تصمیم گیری چندشاخصه است که هدف آن محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها است. این روش توسط کرسولین، زاوادسکاس و تورکسیس در سال ۲۰۱۰ معرفی شد [27]. در این روش معیارها بر اساس ارزش،

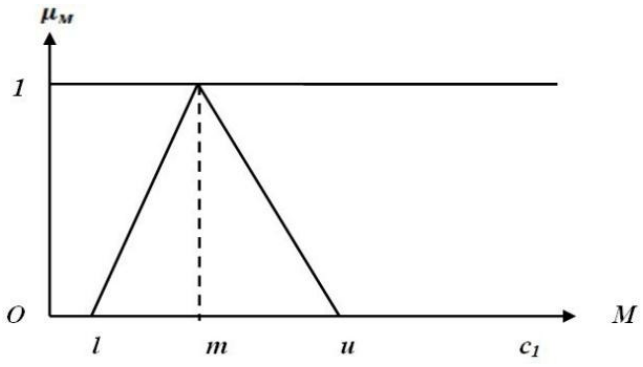
رتبه‌بندی می‌شوند. در این روش به مهمترین معیار رتبه یک و به کم اهمی‌ت‌تری‌ن معیار رتبه آخر داده می‌شود. در نهایت معیارها بر اساس مقادیر متوسط اهمیت نسبی اولویت‌بندی می‌شوند. این تکنیک بر مبنای نظرات خبرگان استوار است و یک روش کاملا قضاوتی است. در این روش کارشناسان (پاسخ دهندگان) نقش مهمی در تعیین وزن معیارها دارند. روند بکارگیری تکنیک سوارا بر اساس شکل ۲ می‌باشد:



شکل ۲. الگوریتم اجرای روش سوارا

۲-۲-۱ تئوری فازی

قضاوت‌های افراد در مورد ارجحیت‌ها اغلب برای تخمین ارزش عددی دقیق غی‌رشفاف است، همچنین منطق فازی برای بدست آوردن مسائلی که دارای ابهام و عدم قطعیت هستند مفید است. تئوری فازی اولین بار توسط لطف علی زاده (۱۹۶۵) برای هماهنگی عدم قطعیت درک بشر از مدل ارائه شد. اعداد فازی را با نماد " ~ " بالای عدد نشان می‌دهند [28]. عدد فازی مثلثی در نمودار ۳ نشان داده‌شده است.



شکل۳. نمایش عدد فازی مثلثی

۲-۲-۲ روش سوارای فازی

الگوریتم این تکنیک همانند روش سوارا است با این تفاوت که در محیط فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که قبلاً بیان شد هدف روش سوارا، محاسبه وزن عوامل است. لذا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با پیاده‌سازی این روش در محیط فازی، ابهامات موجود در کلام پاسخ دهندگان حذف می‌شود و نتایج دقیق‌تر خواهند شد. گام‌های روش سوارای فازی در ادامه آورده‌شده است [29].

۱. گام اول: عوامل تحقیق، بر اساس اهمیتشان بصورت نزولی مرتب می‌گردند.
۲. گام دوم: بر اساس طیف جدول ۱، اهمیت نسبی عامل j را نسبت به عامل j-1 که اهمیت بالاتری دارد تا به آخرین عامل ادامه می‌یابد. پس از تعیین تمام نمرات اهمیت نسبی همه متخصصان، جهت ادغام قضاوت آنها، میانگین هندسی نمرات مربوطه محاسبه می‌گردد. خروجی این گام محاسبه Sj می‌باشد.

جدول ۱. عبارات زبانی و اعداد سوارای فازی [9]

عبارات زبانی	اعداد فازی مثلثی
برابر	(۱ ,۱ ,۱)
نسبتا کم	(۰,۶۷ ,۱ ,۱,۵)
کم	(۰,۴ ,۰,۵ ,۰,۶۷)
خیلی کم	(۰,۲۸۶ ,۰,۳۳ ,۰,۴)
بسیار کم	(۰,۲۲ ,۰,۲۵ ,۰,۲۸۶)

۳. گام سوم: محاسبه ضریب Kj

این ضریب از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\tilde{K}_j = \begin{cases} \tilde{1} & j = 1 \\ \tilde{S}_j + \tilde{1} & j > 1 \end{cases} \quad (۱)$$

۴. گام چهارم: محاسبه وزن‌های فازی (qj)

وزن‌های فازی از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$\tilde{q}_j = \begin{cases} \tilde{1} & j = 1 \\ \frac{\tilde{x}_{j-1}}{\tilde{k}_j} & j > 1 \end{cases} \quad (۲)$$

۵. گام پنجم: محاسبه وزن‌های نسبی

$$\tilde{w}_j = \frac{\tilde{q}_j}{\sum_{k=1}^{n} \tilde{q}_k} \quad (۳)$$

خروجی این گام، وزن‌های نسبی فازی بصورت (w_j^l, w_j^m, w_j^u) هستند. که برای تبدیل این وزن‌ها به اعداد قطعی از رابطه (۴) استفاده می‌شود.

$$W_{crisp} = \frac{(w_j^m - w_j^l) + (w_j^u - w_j^l)}{3} + w_j^l \quad (۴)$$

۳-۲-۲ نتایج روش سوارای فازی

در این بخش، هدف، وزن‌دهی به شاخص‌های تحقیق بر اساس نمودار ۱، در سه مرحله پیش از خرید، خرید و پس از خرید سفر مشتری کسب‌وکارهای B2B است. این وزن‌دهی بر اساس تکنیک سوارای فازی انجام گردید.

۱. گام اول: تعیین رتبه معیارها

در گام اول از ۵ خبره تحقیق خواسته شد که ابتدا ۳ معیار اصلی (پیش از خرید-خرید-پس از خرید) را بر اساس اهمیت، رتبه‌بندی کنند. در جدول ۲ رتبه‌بندی معیارهای اصلی آورده‌شده است.

جدول ۲. رتبه‌بندی معیارهای اصلی

معیارها	رتبه				
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵
پیش از خرید	۱	۱	۱	۲	۱
خرید	۳	۳	۳	۳	۲
پس از خرید	۲	۲	۲	۱	۳

سپس از خبرگان خواسته شد در میان زیرمعیارهای هر معیار اصلی نیز رتبه‌بندی انجام دهند که این رتبه‌بندی در جداول ۳ و ۴ آورده‌شده است. با توجه به این که معیار خرید، دارای یک زیرمعیار بود، رتبه‌بندی برای این معیار انجام نشد.

جدول ۳. رتبه‌بندی زیرمعیارهای پیش از خرید

معیارها	رتبه				
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵
ارتباطات بازاریابی و دیجیتال	۱	۱	۱	۲	۲
جلسات مجازی	۲	۳	۲	۳	۳
بهینه‌سازی توسعه محصول	۳	۲	۳	۱	۱

جدول ۴. رتبه‌بندی زیرمعیارهای پس از خرید

معیارها	رتبه				
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵
آموزش کارکنان و مشتریان	۱	۱	۲	۱	۲
بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری	۲	۲	۱	۲	۱

در نهایت از خبرگان خواسته شد، شاخص‌های زیرمعیارهای هر معیار اصلی را نیز رتبه‌بندی کنند. که این رتبه‌بندی در جداول ۵ الی ۸ آورده‌شده است.

جدول ۵. رتبه‌بندی شاخص‌های ارتباطات بازاریابی‌دیجیتال

معیارها	رتبه				
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵
ارائه و تجسم محصول	۱	۲	۱	۱	۲
نمایشگاه‌های تجاری	۲	۱	۲	۲	۱
داستان‌سرایی	۳	۳	۴	۴	۳
بازاریابی تجربی	۴	۴	۳	۳	۴

جدول ۶. رتبه‌بندی شاخص‌های بهینه‌سازی توسعه محصول

معیارها	رتبه				
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵
تقویت انواع فعالیت‌های طراحی محصول	۴	۳	۴	۴	۴
کاهش پیچیدگی طراحی محصول	۲	۱	۲	۲	۱
افزایش اثربخشی طراحی محصول	۳	۴	۳	۳	۲
نمونه‌سازی مجازی	۱	۲	۱	۱	۳

جدول ۷. رتبه‌بندی شاخص‌های آموزش کارکنان و مشتریان

معیارها	رتبه				
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵
یادگیری تجربی	۴	۳	۴	۴	۲
یادگیری مشارکتی	۶	۴	۱	۶	۶
سرگرمی همراه تحصیل	۸	۸	۷	۸	۸
نرخ ماندگاری بالای مطالب آموزشی	۵	۷	۵	۵	۴
شخصی‌سازی برنامه‌های آموزشی	۲	۱	۲	۲	۵
کاهش هزینه‌های سفر و آموزش	۳	۵	۳	۳	۳
آموزش موقعیت‌های پرخطر و پیچیده	۱	۲	۶	۱	۱
آموزش مداوم مستقل از زمان و مکان	۷	۶	۲	۷	۷

جدول ۸- رتبه‌بندی شاخص‌های بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری

معیارها	رتبه				
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵
بهبود کارایی آموزش تعمیر و نگهداری	۲	۳	۱	۲	۱
بهبود اثربخشی آموزش تعمیر و نگهداری	۳	۲	۳	۳	۲
پشتیبانی از عملیات تعمیر و نگهداری	۱	۱	۲	۱	۳

۲. گام دوم: مقایسه زوجی معیارها بر اساس رتبه مرتب شده

در این گام معیارها به صورت نزولی برای هر ۵ خبره مرتب شد (معیار با رتبه ۱ در بالا و معیار با رتبه آخر در پایین قرار می‌گیرد) سپس اهمیت نسبی هر معیار j را با معیار j-1 بر اساس طیف جدول ۱ بیان گردید که خروجی این گام مقادیر Sj ها شد. به‌عنوان نمونه، Sj ها برای خبره ۱ در جداول ۹ الی ۱۵ آورده‌شده است.

جدول ۹. مقادیر Sj معیارهای اصلی برای خبره اول

معیارها	رتبه	مقدار Sj
پیش از خرید	۱	-
پس از خرید	۲	(۰,۲۲،۰,۲۵،۰,۲۸۶)
خرید	۳	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)

جدول ۱۰. مقادیر Sj زیرمعیارهای پیش از خرید برای خبره اول

معیارها	رتبه	مقدار S_j
ارتباطات بازاریابی و دیجیتال	۱	-
جلسات مجازی	۲	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)
بهینه‌سازی توسعه محصول	۳	(۰,۲۲،۰,۲۵،۰,۲۸۶)

جدول ۱۱. مقادیر Sj زیرمعیارهای پس از خرید برای خبره اول

معیار	رتبه	مقدار Sj
آموزش کارکنان و مشتریان	۱	-
بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری	۲	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)

جدول ۱۲. مقادیر Sj شاخص‌های ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال برای خبره اول

معیارها	رتبه	مقدار Sj
ارائه و تجسم محصول	۱	-
نمایشگاه‌های تجاری	۲	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)
داستان‌سرایی	۳	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)
بازاریابی تجربی	۴	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)

جدول ۱۳. مقادیر Sj شاخص‌های بهینه‌سازی توسعه محصول برای خبره اول

معیار	رتبه	مقدار Sj
نمونه‌سازی مجازی	۱	-
کاهش پیچیدگی طراحی محصول	۲	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)
افزایش اثربخشی طراحی محصول	۳	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)
تقویت انواع فعالیت‌های طراحی محصول	۴	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)

جدول ۱۴. مقادیر Sj شاخص‌های آموزش کارکنان و مشتریان برای خبره اول

معیار	رتبه	مقدار Sj
آموزش موقعیت‌های پرخطر و پیچیده	۱	-
شخصی‌سازی برنامه‌های آموزشی	۲	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)
کاهش هزینه‌های سفر و آموزش	۳	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)
یادگیری تجربی	۴	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)
نرخ ماندگاری بالای مطالب آموزشی	۵	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)
یادگیری مشارکتی	۶	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)
آموزش مداوم مستقل از زمان و مکان	۷	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)
سرگرمی همراه تحصیل	۸	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)

جدول ۱۵. مقادیر Sj شاخص‌های بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری برای خبره اول

معیار	رتبه	مقدار Sj
پشتیبانی از عملیات تعمیر و نگهداری	۱	-
بهبود کارایی آموزش تعمیر و نگهداری	۲	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)
بهبود اثربخشی آموزش تعمیر و نگهداری	۳	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)

۳. گام سوم: تعیین وزن معیارها

در گام بعد با استفاده از روابط (۱)، (۲) و (۳) به محاسبه وزن معیارها بر اساس نظرات هر خبره پرداخته شد. به‌عنوان نمونه، برای معیار پس از خرید، محاسبات به صورت زیر است:

$$K_{\text{پس از خرید}} = (1,1,1) + S_{\text{پس از خرید}} = (1.22,1.25,1.286)$$

$$q_{\text{پس از خرید}} = \frac{q_{j-1}}{K_j} = \frac{q_{\text{پیش از خرید}}}{K_{\text{پس از خرید}}} = \frac{(1,1,1)}{(1.22,1.25,1.286)} = (0.323,0.343,0.365)$$

$$W_{\text{پس از خرید}} = \frac{q_j}{\sum q_j} = \frac{q_{\text{پس از خرید}}}{\sum q_j} = \frac{(0.323,0.343,0.365)}{(2.243,2.333,2.405)} = (0.323,0.343,0.365)$$

همچنین برای محاسبه W غیرفازی بر اساس رابطه زیر داریم:

$$W_{\text{غیرفازی}} = \frac{(w_j^m - w_j^l) + (w_j^u - w_j^l)}{3} + w_j^l = \frac{(0.343 - 0.323) + (0.365 - 0.323)}{3} + 0.323 = 0.344$$

به طریق مشابه برای معیارهای دیگر نیز از نظر خبره اول، محاسبات انجام شد که نتیجه نهایی در پیوست آورده‌شده است.

۴-۲-۲ اوزان نهایی معیارها

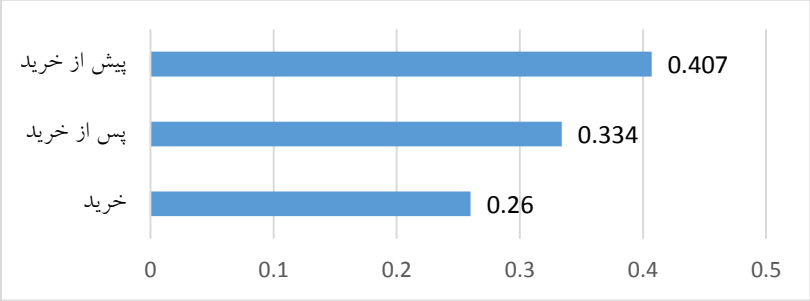
به‌طریق مشابه برای خبره‌های دیگر نیز محاسبات سوارای فازی انجام و وزن معیارها حاصل می‌شود، وزن نهایی نیز از میانگین حسابی وزن تمامی خبره‌ها حاصل می‌شود که در ادامه آورده‌شده است.

- وزن نهایی معیارهای اصلی

بر اساس جدول ۱۶ در بین معیارهای اصلی، پیش از خرید با وزن ۰/۴۰۷ رتبه اول را کسب‌کرده است. پس از خرید با وزن ۰/۳۳۴ رتبه دوم و خرید با وزن ۰/۲۶رتبه سوم را کسب‌کرده است که در نمودار۱ نیز نشان داده‌شده است.

جدول ۱۶. وزن نهایی معیارهای اصلی

معیار	اوزان					میانگین وزن نهایی
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵	
پیش از خرید	۰/۴۳۰	۰/۴۳۴	۰/۴۲۷	۰/۳۱۹	۰/۴۲۷	۰/۴۰۷
خرید	۰/۲۲۸	۰/۲۴۳	۰/۲۵۵	۰/۲۵۵	۰/۳۱۹	۰/۲۶۰
پس از خرید	۰/۳۴۴	۰/۳۲۵	۰/۳۱۹	۰/۴۲۷	۰/۲۵۵	۰/۳۳۴



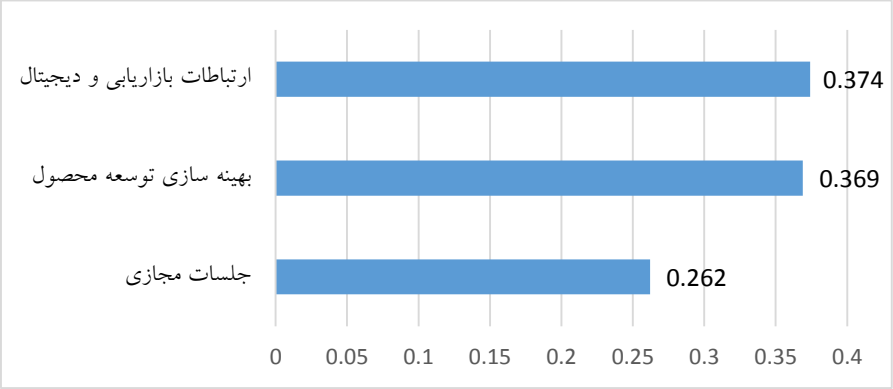
شکل۴. اولویت و وزن معیارهای اصلی

- وزن نهایی زیرمعیارهای پیش از خرید

بر اساس جدول ۱۷ در بین زیرمعیارهای پیش از خرید، ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال با وزن ۰/۳۷۴ رتبه اول را کسب‌کرده است. بهینه‌سازی‌توسعه محصول با وزن ۰/۳۶۹ رتبه دوم و جلسات‌مجازی با وزن ۰/۲۶۲ رتبه سوم را کسب‌کرده است که در نمودار ۲ نیز نشان داده‌شده است.

جدول ۱۷. وزن نهایی زیرمعیارهای پیش از خرید

معیار	اوزان					میانگین وزن نهایی
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵	
ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال	۰/۴۲۷	۰/۴۲۷	۰/۴۲۷	۰/۳۱۷	۰/۲۷۲	۰/۳۷۴
جلسات مجازی	۰/۳۱۹	۰/۲۵۵	۰/۳۱۹	۰/۲۱۱	۰/۲۰۵	۰/۲۶۲
بهینه‌سازی‌توسعه محصول	۰/۲۵۵	۰/۳۱۹	۰/۲۵۵	۰/۴۷۸	۰/۵۳۷	۰/۳۶۹



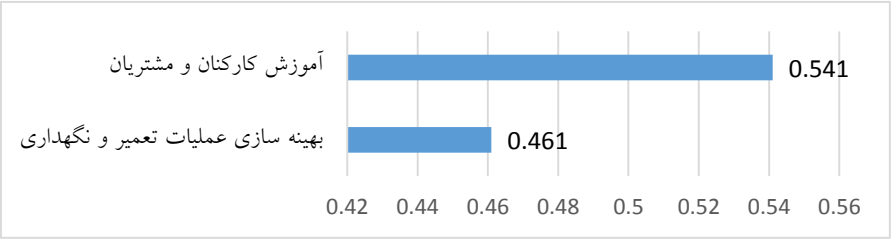
شکل ۵. اولویت و وزن زیرمعیارهای پیش از خرید

- وزن نهایی زیرمعیارهای پس از خرید

بر اساس جدول ۱۸ در بین زیرمعیارهای پس از خرید، آموزش کارکنان و مشتریان با وزن ۰/۵۴۱ رتبه اول و بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۴۶۱رتبه دوم را کسب‌کرده است که در نمودار ۳ نیز نمایش داده‌شده است.

جدول ۱۸. وزن نهایی زیرمعیارهای پس از خرید

معیار	اوزان					میانگین وزن نهایی
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵	
آموزش کارکنان و مشتریان	۰/۵۷۲	۰/۵۵۶	۰/۳۳۷	۰/۶۶۹	۰/۵۷۲	۰/۵۴۱
بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری	۰/۴۲۸	۰/۴۴۴	۰/۶۶۹	۰/۳۳۷	۰/۴۲۸	۰/۴۶۱



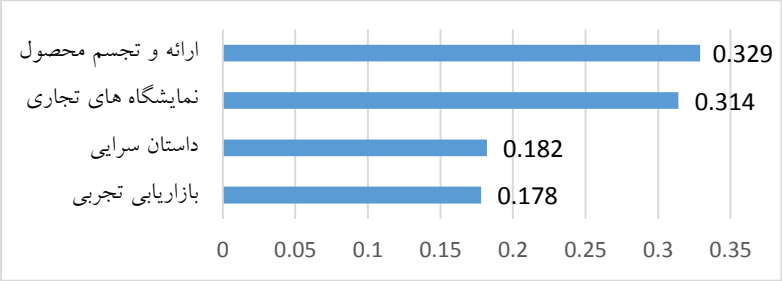
شکل ۶. اولویت و وزن زیرمعیارهای پس از خرید

- وزن نهایی شاخص‌های ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال

بر اساس جدول ۱۹ در بین شاخص‌های ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال، ارائه و تجسم محصول با وزن ۰/۳۲۹ رتبه اول را کسب‌کرده است. نمایشگاه‌های تجاری با وزن ۰/۳۱۴ رتبه دوم و داستان‌سرایی با وزن ۰/۱۸۲ رتبه سوم را کسب‌کرده است که در نمودار ۴ نیز نشان داده‌شده است.

جدول ۱۹. وزن نهایی شاخص‌های ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال

معیار	اوزان					میانگین وزن نهایی
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵	
ارائه و تجسم محصول	۰/۳۶۷	۰/۲۷۴	۰/۳۵۴	۰/۳۸۶	۰/۲۶۵	۰/۳۲۹
نمایشگاه‌های تجاری	۰/۲۷۵	۰/۳۶۵	۰/۲۶۵	۰/۳۰۹	۰/۳۵۴	۰/۳۱۴
داستان‌سرایی	۰/۲۰۶	۰/۲۱۹	۰/۱۷۰	۰/۱۰۵	۰/۲۱۲	۰/۱۸۲
بازاریابی تجربی	۰/۱۵۵	۰/۱۴۵	۰/۲۱۲	۰/۲۰۵	۰/۱۷۰	۰/۱۷۸



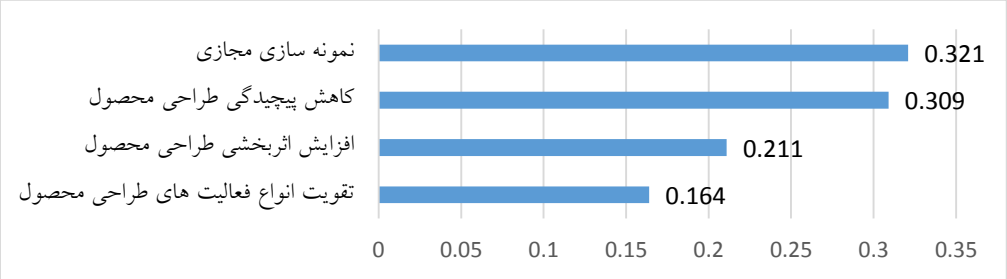
شکل ۷. اولویت و وزن شاخص‌های ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال

- وزن نهایی شاخص‌های بهینه‌سازی توسعه محصول

بر اساس جدول ۲۰ در بین شاخص‌های بهینه‌سازی توسعه محصول، نمونه‌سازی مجازی با وزن ۰/۳۲۱رتبه اول را کسب‌کرده است. کاهش پیچیدگی طراحی محصول با وزن ۰/۳۰۹رتبه دوم و افزایش اثربخشی طراحی محصول با وزن ۰/۲۱۱ رتبه سوم را کسب‌کرده است که در نمودار ۵ نیز نمایش داده‌شده است.

جدول ۲۰. وزن نهایی شاخص‌های بهینه‌سازی توسعه محصول

معیار	اوزان					میانگین وزن نهایی
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵	
تقویت انواع فعالیت‌های طراحی محصول	۰/۱۳۸	۰/۲۱۹	۰/۱۷۰	۰/۱۴۰	۰/۱۵۱	۰/۱۶۴
کاهش پیچیدگی طراحی محصول	۰/۲۷۵	۰/۳۴۳	۰/۲۶۵	۰/۲۸۰	۰/۳۸۰	۰/۳۰۹
افزایش اثربخشی طراحی محصول	۰/۱۸۳	۰/۱۶۵	۰/۲۱۲	۰/۲۱۰	۰/۲۸۵	۰/۲۱۱
نمونه‌سازی مجازی	۰/۴۱۴	۰/۲۷۴	۰/۳۵۴	۰/۳۷۴	۰/۱۸۹	۰/۳۲۱



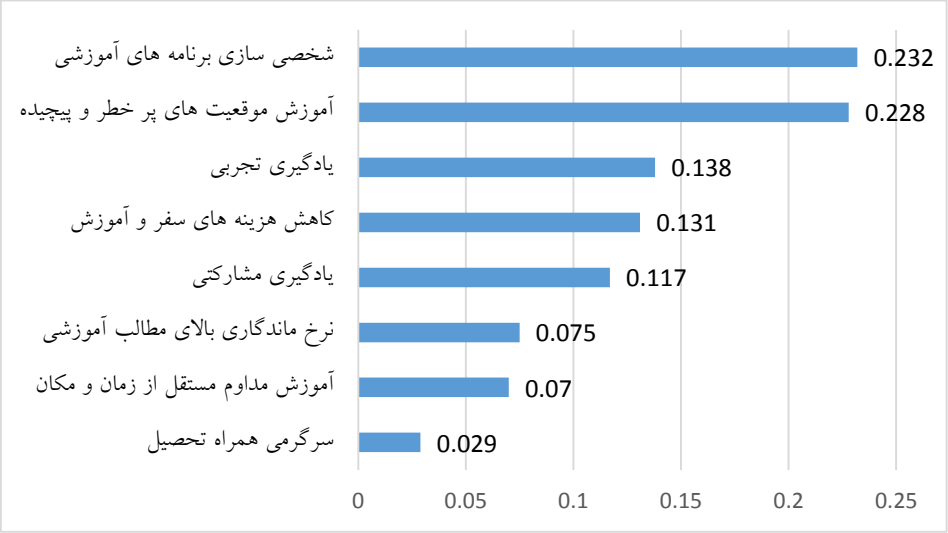
شکل ۸. اولویت و وزن شاخص‌های بهینه‌سازی توسعه محصول

- وزن نهایی شاخص‌های آموزش کارکنان و مشتریان

بر اساس جدول ۲۱ در بین شاخص‌های آموزش کارکنان و مشتریان، شخصی‌سازی برنامه‌های آموزشی با وزن ۰/۲۳۲ رتبه اول را کسب‌کرده است. آموزش موقعیت‌های پرخطر و پیچیده با وزن ۰/۲۲۸ رتبه دوم و یادگیری تجربی با وزن ۰/۱۳۸رتبه سوم را کسب‌کرده است که در نمودار ۶ نیز نشان داده‌شده است.

جدول ۲۱. وزن نهایی شاخص‌های آموزش کارکنان و مشتریان

معیار	اوزان					میانگین وزن نهایی
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵	
یادگیری تجربی	۰/۱۲۳	۰/۱۴۶	۰/۰۹۰	۰/۱۱۲	۰/۲۲۱	۰/۱۳۸
یادگیری مشارکتی	۰/۰۶۲	۰/۱۱۰	۰/۲۷۹	۰/۰۶۱	۰/۰۷۱	۰/۱۱۷
سرگرمی همراه تحصیل	۰/۰۳۲	۰/۰۱۸	۰/۰۳۱	۰/۰۳۵	۰/۰۳۲	۰/۰۲۹
نرخ ماندگاری بالای مطالب آموزشی	۰/۰۸۲	۰/۰۳۳	۰/۰۶۰	۰/۰۹۰	۰/۱۱۱	۰/۰۷۵
شخصی‌سازی برنامه‌های آموزشی	۰/۲۱۸	۰/۴۲۲	۰/۲۰۹	۰/۲۲۴	۰/۰۸۹	۰/۲۳۲
کاهش هزینه‌های سفر و آموزش	۰/۱۶۴	۰/۰۵۹	۰/۱۳۴	۰/۱۴۹	۰/۱۴۷	۰/۱۳۱
آموزش موقعیت‌های پرخطر و پیچیده	۰/۲۹۰	۰/۲۱۶	۰/۰۴۰	۰/۲۹۹	۰/۲۹۵	۰/۲۲۸
آموزش مداوم مستقل از زمان و مکان	۰/۰۴۲	۰/۰۴۷	۰/۱۶۸	۰/۰۴۶	۰/۰۴۸	۰/۰۷۰



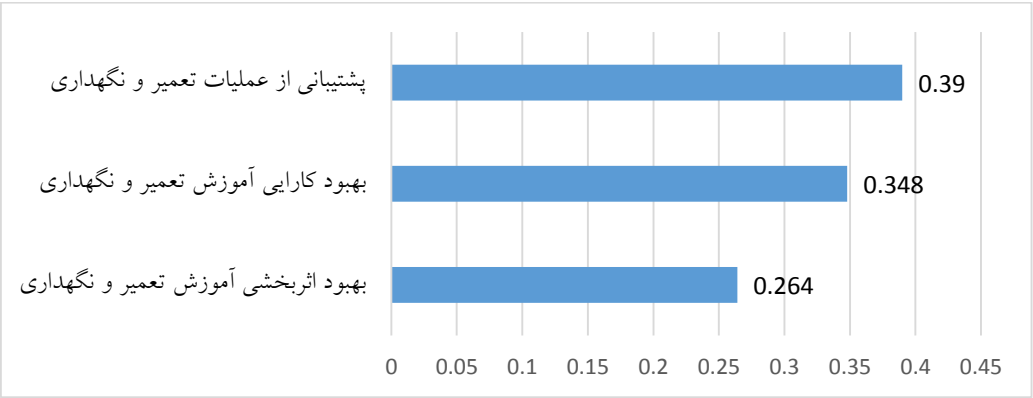
شکل ۹. اولویت و وزن شاخص‌های آموزش کارکنان و مشتریان

- وزن نهایی شاخص‌های بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری

بر اساس جدول ۲۲ در بین شاخص‌های بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری، پشتیبانی از عملیات تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۳۹ رتبه اول را کسب‌کرده است. بهبود کارایی آموزش تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۳۴۸ رتبه دوم و بهبود اثربخشی آموزش تعمیر و نگهداری با وزن ۰/۲۶۴ رتبه سوم را کسب‌کرده است که در نمودار ۷ نیز نشان داده‌شده است.

جدول ۲۲. وزن نهایی شاخص‌های بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری

معیار	اوزان					میانگین وزن نهایی
	خبره۱	خبره۲	خبره۳	خبره۴	خبره۵	
بهبود کارایی آموزش تعمیر و نگهداری	۰/۳۳۴	۰/۲۴۳	۰/۴۳۰	۰/۳۱۷	۰/۴۱۷	۰/۳۴۸
بهبود اثربخشی آموزش تعمیر و نگهداری	۰/۲۲۲	۰/۳۲۵	۰/۲۲۸	۰/۲۱۱	۰/۳۳۴	۰/۲۶۴
پشتیبانی از عملیات تعمیر و نگهداری	۰/۴۴۶	۰/۴۳۴	۰/۳۴۴	۰/۴۷۸	۰/۲۵۰	۰/۳۹۰



شکل ۱۰. اوزان نهایی شاخص‌های بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری

۳- نتیجه گیری

فناوری‌های دیجیتال که طی سال‌های اخیر به سرعت در حال انتشار در بخش B۲B هستند، امکانات منحصر به‌فردی را در طول سفر مشتری ارائه می‌کنند و نیازها و انتظارات جدیدی را در مشتریان به‌وجود آورده‌اند. با توجه به محیط رقابتی روزافزون که کسب‌وکارها در آن فعالیت می‌کنند، استفاده از فناوری‌های دیجیتال به یک ضرورت برای داشتن مزیت رقابتی و باقی ماندن در میدان رقابت تبدیل شده است. VR یکی از فناوری‌های دیجیتال است که با کارکردها و قابلیت‌های منحصر بفردی که دارد می‌تواند ارزش‌های جالب توجهی برای مشتریان و کسب‌وکارهای B2B در طول سفر مشتری به‌وجود آورد و با ایجاد تجربه‌ای لذت‌بخش و به یادماندنی، پاسخگوی نیازها و انتظارات جدید مشتریان باشد. اما به دلیل کمتر شناخته شده بودن این کارکردها و پراکندگی آنها در ادبیات، کسب‌وکارهای B2B، از مزایای استفاده از فناوری‌های VR محروم مانده‌اند و در صورت همه‌گیری این فناوری در خطر از دست دادن مشتریان خود قرار دارند. زیرا امروزه مشتریان برای داشتن تجربه بهتر، هراسی از تغییر برند ندارند و رقابت میان کسب‌وکارها بیشتر بر سر ایجاد تجربه بهتر و کامل‌تر برای مشتری است تا قیمت و کیفیت. به‌خصوص در کسب‌وکارهای B2B که سفر مشتری به‌واسطه وجود بازیگران متعدد، سخت‌تر و طولانی‌تر از سفر مشتری کسب‌وکارهای B2C است، از طرفی، پیاده‌سازی VR در سفر مشتری، نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی هست، لذا شناسایی و اولویت‌بندی کارکردهای VR در سفر مشتری به منظور آگاهی و بهره‌برداری هرچه بیشتر و بهتر کسب‌وکارهای B2B از این کارکردها ضروری بوده است. در همین راستا محققان حاضر، در پژوهش پیشین، کارکردهای VR در مراحل پیش از خرید، خرید و پس از خرید سفر مشتری کسب‌وکارهای B۲B با روش مرور نظام‌مند ادبیات این حوزه و با رویکرد تحلیل مضمون شناسایی و در قالب چهارچوبی اولیه ارائه دادند [30]. با توجه به اهمیت رتبه‌بندی این کارکردها، پژوهش حاضر با هدف رتبه‌بندی مراحل سفر مشتری، کارکردهای اصلی و فرعی VR در سفر مشتری کسب‌وکارهای B2B بر اساس نظرخواهی از خبرگان و روش سوارای فازی انجام شد.

یافته‌های این مطالعه نشان دادند که در میان معیارهای اصلی، معیار پیش از خرید رتبه اول، پس از خرید رتبه دوم، و خرید رتبه سوم را کسب کردند. علاوه بر این، در میان، زیرمعیارهای پیش از خرید، ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال در رتبه اول، بهینه‌سازی توسعه محصول، در رتبه دوم و جلسات مجازی، در رتبه سوم قرار گرفتند. همچنین، در میان زیرمعیارهای پس از خرید، آموزش کارکنان و مشتریان رتبه اول و بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری رتبه دوم را کسب کردند. باید خاطر نشان گردد که با توجه به این که مرحله خرید، دارای یک زیرمعیار بود، برای این مرحله رتبه‌بندی انجام نشد.

علاوه بر این، نتایج تجزیه و تحلیل نشان دادند که در مرحله پیش از خرید از میان چهار زیرمعیار ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال، ارائه و تجسم محصول، نمایشگاه‌های تجاری و داستان‌سرایی، به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. همچنین در بین زیرمعیارهای بهینه‌سازی توسعه محصول، نمونه‌سازی مجازی رتبه اول، کاهش پیچیدگی طراحی محصول رتبه دوم و افزایش اثربخشی طراحی محصول رتبه سوم را کسب کردند.

همچنین نتایج نشان دادند که در مرحله پس از خرید از میان هشت زیرمعیار آموزش کارکنان و مشتریان، شخصی‌سازی برنامه‌های آموزشی رتبه اول، آموزش موقعیت‌های پرخطر و پیچیده، رتبه دوم و یادگیری تجربی رتبه سوم را کسب کردند. همچنین در بین زیرمعیارهای بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری، پشتیبانی از عملیات تعمیر و نگهداری رتبه اول، بهبود کارایی آموزش تعمیر و نگهداری رتبه دوم و بهبود اثربخشی آموزش تعمیر و نگهداری رتبه سوم را کسب کردند.

با توجه به گسترش فناوری واقعیت مجازی (VR) در دهه اخیر و توانایی آن در خلق تجربیات جدید و منحصر به‌فرد در سفر مشتری، بهره‌برداری مؤثر از VR برای کسب‌وکارهای B2B امری ضروری است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که در مرحله پیش از خرید، اولویت‌های بالای ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال، بهینه‌سازی توسعه محصول و جلسات مجازی، به وضوح نیاز به تغییرات استراتژیک در روندهای بازاریابی را نشان می‌دهد. این نتایج با یافته‌های پژوهش پیشین هم‌راستا است که نشان می‌دهند تکنولوژی VR می‌تواند تجربه کاربری را بهبود بخشد و ارتباطات تجاری را تقویت کند [11].

بسیاری از مطالعات به نقش حیاتی VR در ایجاد تعاملات عمیق‌تر و غنی‌تر در بازار B2B اشاره دارند. برای نمونه، نتایج مطالعه [12] حاکی از آن بود که VR می‌تواند در فرایند فروش و جذب مشتریان جدید تأثیر مثبتی داشته باشد، که این یافته‌ها با یافته‌های این پژوهش همسو است که باید به مرحله پیش از خرید و کارکردهای مرتبط با آن توجه بیشتری شود. علاوه بر این، مطالعات پیشین، به دلیل اهمیت استراتژیک VR در بازاریابی B2B استدلال می‌کنند که کسب‌وکارها می‌توانند از این تکنولوژی برای بهبود تاکتیک‌های جذب مشتری استفاده کنند [13].

در مرحله پس از خرید، نتایج حاکی از اهمیت آموزش کارکنان و مشتریان و بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری بود. این یافته‌ها با نتایج مطالعه [14] همخوانی دارد که بر تأثیر VR در بهینه‌سازی

تجربه مشتری تأکید می‌کرد و مبین نیاز به تمرکز بر فرایندهای آموزش و توانمندسازی است. علاوه بر این، مطالعه پیشین [16] نیز بر اهمیت استفاده از VR برای بهینه‌سازی دسترسی به اطلاعات و تسهیل تعاملات بین کسب‌وکار و مشتریان، تأکید کرده بود.

در این زمینه، استدلال شده است که علاوه بر صرف هزینه و زمان، بررسی دقیق اولویت‌ها و اهداف می‌تواند به بهبود و توسعه استراتژی‌های بازاریابی کمک کند [20]. بنابراین، به مدیران کسب‌وکارها توصیه می‌شود که با تمرکز بر کارکردهای مشخص VR و در نظر گرفتن مراحل مختلف سفر مشتری، استراتژی‌های خود را به‌روز کنند؛ چرا که با بهره‌گیری از VR، نه تنها می‌توانند درک مشتریان را غنی‌تر کنند، بلکه می‌توانند اعتماد بیشتری را نیز در روابط تجاری ایجاد نمایند.

علاوه بر این، با توجه به نتایج حاصل از رتبه‌بندی، کسب‌وکارهای B2B می‌توانند بر اساس اولویت، از این کارکردها بهره برده و از مزایای آن بهره‌مند شوند. با توجه به رتبه‌های کسب‌شده توسط زیرمعیارهای مرحله پیش از خرید، کسب‌وکارهای B۲B باید استفاده از VR را به‌عنوان ابزاری برای ارتباطات‌بازاریابی‌دیجیتال موثرتر در اولویت قرار دهند. این کسب‌وکارها می‌توانند از مزایای VR در هر سه بُعد ارتباطات بازاریابی‌دیجیتال یعنی؛ نوع پیام، تعامل با محتوا و نمایش پیام بهره‌مند شوند. بدین ترتیب که با استفاده از VR می‌توان پیام را از طریقِ تجربه لذت‌بخش و فراموش نشدنیِ استفاده از محصول، توسط مشتری، انتقال داد. همچنین محتوای تولید شده توسط VR، محتوایی، تعاملی است و توانایی بزرگنمایی و کوچک‌نمایی، چرخش و جابجایی محصولات را برای مشتری فراهم می‌کند. بنابراین، مشتری می‌تواند ویژگی‌ها و ابعاد محصول را با بهترین جزئیات ببیند و تجسم کند [31] و [32]. این امر عدم اطمینان مشتری را در مورد کیفیت محصول کاهش می‌دهد [33]. پیام نیز در VR به صورت سه بعدی و در محیطی مجازی نمایش داده می‌شود. در محیط مجازی که توسط VR تولید می‌شود، مشتری به هیچ وجه نمی‌تواند دنیای واقعی را ببیند این مورد، باعث درگیر شدن کامل مشتری با تجربه (یا غوطه‌ور شدن در تجربه) می‌شود به‌گونه‌ای که احساس می‌کند گویی در دنیای دیگری حضور دارد و به‌طور موقت، ارتباطش با دنیای واقعی قطع می‌شود [34].

از آنجایی که در بین زیرمعیارهای مرحله پس از خرید، استفاده از VR در آموزش کارکنان و مشتریان برای کسب‌وکارهای B۲B از اهمیت بیشتری برخوردار است. این کسب‌وکارها می‌توانند از VR به منظور بهبود آموزش به کارکنان پشتیبانی استفاده کنند و با ارائه دستورالعمل‌های مفید به مشتریان از فرآیند یادگیری، پشتیبانی نمایند [35].

همچنین کسب‌وکارهای B۲B می‌توانند با سفارشی‌سازی محتوای آموزشی موجبات هر چه بیشتر رضایت و در نتیجه وفاداری مشتریان را فراهم کنند.

مراجع

[1] A.Rindfleisch, M. O'Hern, and V. Sachdev, “The digital revolution, 3D printing, and innovation as data”. Product Innovation Management. vol. 34, pp. 681-690.Sept 2017

[2] Y. Libai, Bart, S. Gensler, C.F. Hofacker, A. Kaplan, K. Kotterheinrich, E.B. Kroll, “Brave new world? On AI and the management of customer relationships”, Journal of Interactive Marketing, Vol. 51, pp. 44-56, 2020.

[3] R. Blach, J. Landauer, A. Rosch, A. Simon, “A highly flexible virtual reality system”, Future Generat. Comput. Syst. 14 (3–4), 167–178. 1998

[4] D.E. Boyd, and B. Koles, “Virtual reality and its impact on B2B marketing: A value-in-use perspective”, Journal of Business Research, 100, 590-598. 2019.

[5] Gartner, “New B2B Buying Journey & Its Implications for Sales” [online] Available: https://www.gartner.com/en/sales/insights/b2b-buying-journey [Accessed 14th Match 2021].

[6] R. Hagl, and A. Duane, “Exploring how augmented reality and virtual reality technologies impact business model innovation in technology companies in Germany” In Augmented Reality and Virtual Reality, Springer, Cham. pp. 75-84, 2020.

[7] L. D. Hollebeek, M. K. Clark, T. W. Andreassen, V. Sigurdsson, D. Smith, “Virtual reality through the customer journey: Framework and propositions”, Journal of Retailing and Consumer Services, Volume 55, 2020

[8] T. K. Pahnke, “Implementation of virtual reality in B2B marketing” Ph.D. dissertation, Dept. Econo., Hamburg University of Applied Sciences Univ., Hamburg, 2017

[9] L. H. Alsharif, "Impacts of virtual reality on customer decision-making in the B2B marketplace," Computers in Industry, vol. 132, pp. 103-111, 2022

[10] L.P. Lin, Sh.Ch. Huang, and Y.Ch. Ho, “Could virtual reality effectively market slow travel in a heritage destination?” Tourism Management, 78, 104027, 2020.

[11] A. C. Y. Cheong, W. H. Ng, and C. Y. Yung, "Exploring the impacts of virtual reality on customer engagement in the retail industry," Journal of Retailing and Consumer Services, vol. 53, pp. 102-111, 2020

[12] M. A. Khan and A. J. Qadeer, "Application of virtual reality technology in enhancing customer experience in B2B markets," Computers in Human Behavior, vol. 113, pp. 106-114, 2020

[13] P. T. Tran, "VR-based marketing strategies in B2B sectors: An empirical study," International Journal of Information Management, vol. 55, pp. 102-115, 2020.

[14] A. E. El-Sherif, "Leveraging virtual reality to enhance customer journeys in B2B environments," Business Horizons, vol. 64, pp. 645-653, 2021

[15] J. F. Ismail, D. Z. Amir, and M. Y. Rahman, "Prioritizing the adoption of virtual reality in B2B customer experiences using fuzzy logic," Expert Systems with Applications, vol. 178, pp. 115-128, 2021

[16] S. J. Lee and C. Y. Kwan, "The role of virtual reality in enhancing B2B customer relationships," Journal of Business Research, vol. 129, pp. 283-290, 2021

[17] T. N. Maynard and K. R. Mendez, "Innovations in B2B marketing through virtual reality technologies," Journal of Business & Industrial Marketing, vol. 36, pp. 456-470, 2021

[18] R. German and T. B. Jones, "Utilizing virtual reality for effective B2B customer engagement strategies," The Journal of Business Strategy, vol. 43, pp. 629-645, 2022

[19] D. Wieland, B. Ivens, E.Kutschma, P. A. Rauschnabel, “Augmented and virtual reality in managing B2B customer experiences”, Industrial Marketing Management,Volume 119, pp. 931-205, 2024

[20] M. C. Y. de Oliveira and A. Gamez, "Virtual reality in business: A systematic literature review," VR & Augmented Reality in Business, vol. 4, pp. 45-64, 2021

[21] Z. Nikoosefat, P. Jafary, and F. Ahmadi, “Providing a Framework for Virtual Reality Functions in B2B Business Customer Journey with a Focus on Immersion Features”, International Journal of Digital Content Management” 4(6), 197-224, 2023.

[22] M. Rostami, H. Rahimi, and M. Malekpour, "Application of fuzzy logic in evaluation and selection of projects: A review," European Journal of Operational Research, vol. 291, no. 2, pp. 421-438, 2021.

[23] H. Keshavarz, M. Rahmanzadeh, and A. Moshksar, "Fuzzy AHP method for equipment selection in sustainable manufacturing," Journal of Cleaner Production, vol. 243, p. 118606, 2020.

[24] Christiansen, B. & Shuwaikh, F.,“Theoretical and Applied Mathematics in International Business. IGI Global”, 2020 DOI: 10.4018/978-1-5225-8458-2.ch008

[۲۵] غ. خاکی، "روش تحقیق با رویکردی به پایان نامه نویسی" تهران: انتشارات فوژان، ۱۳۹۱

[26] A. Sadeghi, "Fuzzy logic in decision-making and problem-solving: A survey of applications," Review of Economic Perspectives, vol. 19, no. 1, pp. 23-35, 2019.

[27] V. Keršuliene, E.K. Zavadskas and Z. Turskis, “Selection of rational dispute resolution method by applying new step- wise weight assessment ratio analysis (SWARA)” Journal of business economics and management, 11(2), pp.243-258, 2010.

[28] R.K. Mavi, M.Goh, and N. Zarbakhshnia, “Sustainable third-party reverse logistic provider selection with fuzzy SWARA and fuzzy MOORA in plastic industry”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91(5-8), pp.2401-2418, 2017.

[29] L.A. Zadeh, “Fuzzy sets. Information and control”, 8(3), 338-353, 1965.

[30] z. Nikoosefat Rad, P. Jafari, and F. Ahmadi, "Providing a Framework for VR Functions in the Customer Journey of B2B Businesses", International Journal of Management, Accounting and Economics, Accepted for publication, 2024.

[31] H. Fischer, S. Seidenstricker, T. Berger, T. Holopainen, “Digital Sales in B2B: Status and Application. In International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics” Springer, Cham pp. 369-375, July 2021.

[32] W. J. Lee, “Use of Immersive Virtual Technology in Consumer Retailing and Its Effects to Consumer”, The Journal of Distribution Science, 18(2), 5-15, 2020.

[33] J. Scholz, and A.N. Smith, “Augmented reality: designing immersive experiences that maximize consumer engagement”, Business Horizons, 59(2), 149-161, 2016.

[34] D. Flinn, “VR…AR…MR…XR? WTFR They?” 2019. Retrieved April 2019 from: https://medium.com/desn325-emergentdesign/vr-ar-mr-xr-wtfr-they ce077312268a

[35] P. M. Markopoulos, K. Hosanagar, “A model of product design and information disclosure investments”, Management Science., vol. 64, pp. 495-981, Feb 2018.

پیوست

جدول ۱۶. وزن معیارهای اصلی برای خبره اول

معیار اصلی	Sj	Kj	Qj	وزن فازی	وزن غیرفازی
پیش از خرید	-	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۰,۴۱۶،۰,۴۲۹،۰,۴۴۶)	۰,۴۳۰
پس از خرید	(۰,۲۲،۰,۲۵،۰,۲۸۶)	(۱,۲۲،۱,۲۵،۱,۲۸۶)	(۰,۷۷۸،۰,۸،۰,۸۲)	(۰,۳۲۳،۰,۳۴۳،۰,۳۶۵)	۰,۳۴۴
خرید	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)	(۱,۴،۱,۵،۱,۶۷)	(۰,۴۶۶،۰,۵۳۳،۰,۵۸۵)	(۰,۱۹۴،۰,۲۲۹،۰,۲۶۱)	۰,۲۲۸

جدول ۱۷. وزن زیرمعیارهای معیارهای اصلی برای خبره اول

معیار اصلی	زیرمعیار	Sj	Kj	qj	وزن فازی	وزن غیرفازی
پیش از خرید	ارتباطات بازاریابی و دیجیتال	-	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۰,۴۱۴،۰,۴۲۵،۰,۴۴۱)	۰,۴۲۷
	جلسات مجازی	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۷۱۴،۰,۷۵۲،۰,۷۷۸)	(۰,۲۹۶،۰,۳۱۹،۰,۳۴۳)	۰,۳۱۹
	بهینه‌سازی توسعه محصول	(۰,۲۲،۰,۲۵،۰,۲۸۶)	(۱,۲۲،۱,۲۵،۱,۲۸۶)	(۰,۵۵۵،۰,۶۰۲،۰,۶۳۷)	(۰,۲۳،۰,۲۵۶،۰,۲۸۱)	۰,۲۵۵
پس از خرید	آموزش کارکنان و مشتریان	-	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۰,۵۶۳،۰,۵۷۱،۰,۵۸۳)	۰,۵۷۲
	بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۷۱۴،۰,۷۵۲،۰,۷۷۸)	(۰,۴۰۲،۰,۴۲۹،۰,۴۵۴)	۰,۴۲۸

جدول ۱۸. وزن شاخص‌های زیرمعیارهای پیش از خرید برای خبره اول

زیرمعیار	شاخص	Sj	Kj	qj	وزن فازی	وزن غیرفازی
ارتباطات بازاریابی‌دیجیتال	ارائه و تجسم محصول	-	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۰,۳۵۱،۰,۳۶۵،۰,۳۸۶)	۰,۳۶۷
	نمایشگاه‌های تجاری	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۷۱۴،۰,۷۵۲،۰,۷۷۸)	(۰,۲۵،۰,۲۷۴،۰,۳)	۰,۲۷۵
	داستان سرایی	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۵۱،۰,۵۶۵،۰,۶۰۵)	(۰,۱۷۹،۰,۲۰۶،۰,۲۳۴)	۰,۲۰۶
	بازاریابی تجربی	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۳۶۴،۰,۴۲۵،۰,۴۷)	(۰,۱۲۸،۰,۱۵۵،۰,۱۸۲)	۰,۱۵۵
جلسات مجازی	کنفرانس و همکاری	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۷۱۴،۰,۷۵۲،۰,۷۷۸)	(۰,۲۹۶،۰,۳۱۹،۰,۳۴۳)	۰,۳۱۹
هینه‌سازی توسعه محصول	نمونه‌سازی مجازی	-	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۰,۳۸۲،۰,۴۰۹،۰,۴۵۲)	۰,۴۱۴
	کاهش پیچیدگی طراحی محصول	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)	(۱,۴،۱,۵،۱,۶۷)	(۰,۵۹۹،۰,۶۶۷،۰,۷۱۴)	(۰,۲۲۸،۰,۲۷۳،۰,۳۲۳)	۰,۲۷۵
	افزایش اثربخشی طراحی محصول	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)	(۱,۴،۱,۵،۱,۶۷)	(۰,۳۵۹،۰,۴۴۴،۰,۵۱)	(۰,۱۳۷،۰,۱۸۲،۰,۲۳)	۰,۱۸۳
	تقویت انواع فعالیت‌های طراحی محصول	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۲۵۶،۰,۳۳۴،۰,۳۹۷)	(۰,۰۹۸،۰,۱۳۷،۰,۱۷۹)	۰,۱۳۸

جدول ۱۹. وزن شاخص‌های زیرمعیارهای پس از خرید برای خبره اول

معیار	شاخص	Sj	Kj	qj	وزن فازی	وزن غیرفازی
شاخص‌های آموزش کارکنان و مشتریان	آموزش موقعیت‌های پرخطر و پیچیده	-	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۰,۲۶۴،۰,۲۸۷،۰,۳۲)	۰,۲۹۰
	شخصی‌سازی برنامه‌های آموزشی	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۷۱۴،۰,۷۵۲،۰,۷۷۸)	(۰,۱۸۹،۰,۲۱۶،۰,۲۴۹)	۰,۲۱۸
	کاهش هزینه‌های سفر و آموزش	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۵۱،۰,۵۶۵،۰,۶۰۵)	(۰,۱۳۵،۰,۱۶۲،۰,۱۹۴)	۰,۱۶۴
	یادگیری تجربی	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۳۶۴،۰,۴۲۵،۰,۴۷)	(۰,۰۹۶،۰,۱۲۲،۰,۱۵۱)	۰,۱۲۳
	نرخ ماندگاری بالای مطالب آموزشی	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)	(۱,۴،۱,۵،۱,۶۷)	(۰,۲۱۸،۰,۲۸۳،۰,۳۳۶)	(۰,۰۵۸،۰,۰۸۱،۰,۱۰۸)	۰,۰۸۲
	یادگیری مشارکتی	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۱۵۶،۰,۲۱۳،۰,۲۶۱)	(۰,۰۴۱،۰,۰۶۱،۰,۰۸۴)	۰,۰۶۲
	آموزش مداوم مستقل از زمان و مکان	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)	(۱,۴،۱,۵،۱,۶۷)	(۰,۰۹۳،۰,۱۴۲،۰,۱۸۷)	(۰,۰۲۵،۰,۰۴۱،۰,۰۶)	۰,۰۴۲
	سرگرمی همراه تحصیل	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۰۶۷،۰,۱۰۷،۰,۱۴۵)	(۰,۰۱۸،۰,۰۳۱،۰,۰۴۶)	۰,۰۳۲
شاخص‌های بهینه‌سازی عملیات تعمیر و نگهداری	پشتیبانی از عملیات تعمیر و نگهداری	-	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۰,۴۲۹،۰,۴۴۴،۰,۴۶۷)	۰,۴۴۶
	بهبود کارایی آموزش تعمیر و نگهداری	(۰,۲۸۶،۰,۳۳،۰,۴)	(۱,۲۸۶،۱,۳۳،۱,۴)	(۰,۷۱۴،۰,۷۵۲،۰,۷۷۸)	(۰,۳۰۶،۰,۳۳۴،۰,۳۶۳)	۰,۳۳۴
	بهبود اثربخشی آموزش تعمیر و نگهداری	(۰,۴،۰,۵،۰,۶۷)	(۱,۴،۱,۵،۱,۶۷)	(۰,۴۲۸،۰,۵۰۱،۰,۵۵۵)	(۰,۱۸۳،۰,۲۲۲،۰,۲۵۹)	۰,۲۲۲

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 204-218

Online Estimation and Improvement of Cache Soft Error Vulnerability

Mohammad Moeini Jahromi[1], Mohammad Hasan Ahmadilivani[2], Mostafa E.Salehi Nasab[3]*

[1]School of Electrical and Computer Engineering, Engineering Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran
[2]School of Electrical and Computer Engineering, Engineering Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran
[3]School of Electrical and Computer Engineering, Engineering Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 10 November 2024, Revised: 19 February 2025, Accepted: 17 March 2025
Paper type: Research

Abstract

Due to the high density of transistors, memories are highly susceptible to soft errors. The processor's cache, by holding execution data and having frequent interactions with it, greatly impacts system reliability. This importance is even higher in embedded systems and safety-critical applications. One of the most significant factors affecting the reliability of the cache is its size. Smaller caches have better reliability due to their smaller area and shorter data retention, but reducing the cache size makes program execution times longer. This increases the probability of a soft error. Furthermore, reliability of cache is not uniform during program execution, and fixed size of memory cannot optimize its reliability during this time. In this regard, the main issue in improving cache vulnerability is to determine an optimum size of cache and its change time according to change overhead. Accordingly, this paper defines a model for estimating cache vulnerability, which determines vulnerability based on cache data and the type of access to it. Based on the proposed model, an algorithm has been implemented that estimates cache vulnerability online during execution. To model time in this approach, counters are used that model access times during decision-making intervals. By estimating based on blocks instead of memory words and determining the sizes of the counters and decision intervals, the proposed method has been optimized. The accuracy of the vulnerability trend estimation compared to the reference model is 95.22%. Additionally, by using the estimated vulnerability trend during execution and the effective cache size of each program, an algorithm for reconfiguring the cache to improve its vulnerability has been proposed. Implementation showed that with only 5.4% area overhead and 6% time overhead, we can have a reconfigurable memory equipped with a vulnerability management algorithm, which has a lower runtime vulnerability than a fixed cache size and overall vulnerability improvement of 36%.

Keywords: Reliability, Soft Error, Error Masking, Cache, Cache Vulnerability, Reliability-Performance Trade-off, Cache Size, Online Cache Vulnerability Estimation.

* Corresponding Author's email: mersali@ut.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۲۰۴ الی ۲۱۸

تخمین و بهبود آنلاین آسیب پذیری خطای نرم حافظه نهان

محمد معینی جهرمی[۱]، محمد حسن احمدی لیوانی[۲]، مصطفی ارسالی صالحی نسب[۳]*

[۱] دانشجو مقطع دکترا، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۳] استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

حافظه‌ها به دلیل چگالی بالای ترانزیستورها در آن‌ها به شدت در معرض خطاهای نرم قرار دارند. حافظه نهان پردازنده به دلیل نگه داشتن اطلاعات اجرایی و تعاملات زیاد با آن، قابلیت اطمینان سیستم را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سیستم‌های نهفته و کاربردهای ایمنی-بحرانی، اهمیت آن به مراتب بیشتر می‌شود. از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر قابلیت اطمینان حافظه نهان، حجم آن است. حافظه نهان با حجم کم‌تر، به واسطه مساحت کوچک‌تر و ماندگاری کم‌تر داده‌ها در آن قابلیت اطمینان بیشتری دارد اما، کاهش حجم حافظه نهان، مدت اجرای برنامه‌ها را طولانی‌تر می‌کند. این افزایش زمان اجرای برنامه‌ها، احتمال بروز خطای نرم را افزایش می‌دهد. از سویی، قابلیت اطمینان حافظه نهان در طول اجرای یک برنامه یکنواخت نیست و ثابت بودن حجم حافظه نمی‌تواند قابلیت اطمینان آن را در طول اجرا بهینه کند. در این راستا، مسأله اصلی در بهبود آسیب‌پذیری حافظه نهان، تعیین اندازه حافظه نهان و زمان تغییر آن با توجه به سربار تغییرات است. بر همین مبنا، در این مقاله مدلی برای تخمین آسیب‌پذیری حافظه نهان تعریف شده است که بر اساس داده‌های حافظه نهان و نوع دسترسی به آنها، آسیب‌پذیری آن تعیین می‌شود. بر اساس مدل ارائه شده، الگوریتمی پیاده‌سازی شده است که آسیب‌پذیری حافظه نهان را در زمان اجرا به صورت آنلاین تخمین می‌زند. برای مدل‌سازی زمان در این روش، از شمارنده‌هایی استفاده شده است که در طول بازه‌های تصمیم‌گیری، زمان دسترسی‌ها را مدل می‌کنند. با استفاده از تخمین بلوک بجای کلمات حافظه و تعیین اندازه شمارنده‌ها و بازه‌های تصمیم‌گیری، روش ارائه شده، بهینه‌سازی شده است. دقت تخمین روند آسیب‌پذیری نسبت به مدل رفرنس، ۹۵/۲۲٪ می‌باشد. همچنین با استفاده از تخمین روند آسیب‌پذیری در زمان اجرا و اندازه موثر حافظه نهان هر برنامه، الگوریتمی جهت بازپیکربندی حافظه نهان در جهت بهبود آسیب‌پذیری آن ارائه شده است. پیاده‌سازی این طراحی نشان داده است که تنها با سربار مساحت ۵/۴٪ و سربار زمانی ۶٪ می‌توان یک حافظه با قابلیت بازپیکربندی و مجهز به الگوریتم مدیریت آسیب‌پذیری داشت که آسیب‌پذیری آن در زمان اجرا از آسیب‌پذیری حافظه نهان با حجم ثابت کم‌تر و آسیب‌پذیری کل آن نیز ۳۶٪ بهتر باشد.

کلیدواژگان: قابلیت اطمینان، خطای نرم، پوشش خطاها، حافظه نهان، آسیب‌پذیری حافظه نهان، مصالحه قابلیت اطمینان و کارآیی، حجم حافظه نهان، تخمین آسیب‌پذیری در زمان اجرا.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: mersali@ut.ac.ir

۱- مقدمه

پیشرفت تکنولوژی ساخت ترانزیستورها و کاهش ابعاد آن‌ها بر اساس قانون مور، علاوه بر افزایش کارآیی و سرعت پردازش پردازنده‌ها، محدودیت‌ها و مخاطراتی را از قبیل نقطه‌ی داغ، افزایش توان و انرژی مصرفی، محدودیت ولتاژ و فرکانس، افزایش آسیب‌پذیری تراشه‌ها و بروز اشکال و خطا برای آن‌ها به همراه آورده است [۱]. از جمله خطراتی که یک سیستم را خصوصاً در کاربردهای بحرانی-ایمنی[1] تهدید می‌کند و می‌تواند منجر به عملکرد نادرست آن شود، بروز اشکال در منطق محاسباتی و یا داده‌های ذخیره شده سیستم است. برخورد ذرات پرانرژی به قطعات الکترونیکی و القای انرژی به آن‌ها، ممکن است در مسیر محاسبات منطقی، اشکال ایجاد کند و یا تغییر مقادیر ذخیره شده را در پی داشته باشد و در نهایت خروجی را دستخوش تغییر کند [۲]. بروز چنین اشکالاتی که به آن‌ها خطای نرم[2] گفته می‌شود، ممکن است منجر به ایجاد خروجی اشتباه در سیستم شود که امری نامطلوب است.

قابلیت اطمینان[3]، احتمال کار کردن صحیح یک سیستم در بازه زمانی مشخصی را بیان می‌دارد. با روند پیش‌گفته در پیشرفت تکنولوژی، طراحی سیستم‌ها با در نظرگیری قابلیت اطمینان، اهمیت بالایی پیدا کرده است. صحت داده‌های پردازش شده در یک پردازنده، تأثیر مستقیم بر عملکرد صحیح آن از دید کاربر دارد. لذا اهمیت و تأثیر حفاظت از صحت داده‌ها بر قابلیت اطمینان پردازنده واضح است. حافظه نهان پردازنده از جمله عناصر یک سیستم روی تراشه است که به دلیل مساحت زیاد، تراکم ترانزیستورها و ساخته شدن از سلول‌های SRAM، با کاهش ابعاد ترانزیستورها بیش از پیش در معرض خطاهای نرم قرار دارد و ارائه طراحی‌های گوناگون برای حفاظت از داده‌های آن متناسب با روند تکنولوژی در حال پیش‌روی است [۳].

از روش‌های رایج محافظت از داده‌های حافظه، استفاده از کدهای تشخیص و تصحیح خطا است [۴،۵] که سربارهای مساحت، انرژی و کارآیی به سیستم تحمیل می‌کند و استفاده از آن‌ها در حافظه نهان با محدودیت‌های جدی روبه‌روست. به عنوان مثال، تکنیک ساده تصحیح خطای تکی و تشخیص خطای دوگانه (SECDED[4]) نیاز به هفت ستون اضافه برای محافظت از حافظه ۳۲ بیتی دارد که منجر به سربار ۲۱/۹٪ مساحت می‌شود و توان را نیز به صورت نسبی افزایش می‌دهد [۶]. برای کاهش سربارهای ناشی از استفاده کدهای تشخیص و تصحیح خطا، بهینه‌سازی‌هایی در پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها انجام شده است [۷-۱۱]. همچنین، تکنیک‌هایی در سطح ریزمعماری برای استفاده کاراتر از این کدها ارائه شده است تا از داده‌های حافظه نهان، به صورت غیریکنواخت و با سربارهای کمتری محافظت شود [۱۲-۱۵]. با این حال، روش‌های متعددی از روش‌های تکرار[5] برای بالا بردن قابلیت اطمینان حافظه استفاده کرده‌اند و تعدادی نیز سعی در کاهش احتمال بروز خطای نرم در حافظه کرده‌اند. در تکنیک‌های آنلاین بهینه‌سازی قابلیت اطمینان در سطح سیستم، آسیب‌پذیری خطای نرم در زمان اجرا تخمین زده می‌شود و اقدامات حفاظتی مانند تکرار کار یا فعال‌سازی انتخابی کدهای تشخیص و تصحیح خطا برای کارهای حیاتی با آسیب‌پذیری نسبتاً بالا، استفاده می‌شود. در [۱۶] ایده‌ای برای تشخیص آنلاین آسیب‌پذیری حافظه و استفاده از کدهای تشخیص چند سطحی ارائه شده است که به دلیل سربار و روش ارائه شده، بیشتر برای حافظه اصلی مناسب است. با این حال، سربارهای ناشی از این کدها بر عملکرد پردازنده پابرجاست و بسیاری از آن‌ها قابلیت پیاده‌سازی در حافظه نهان سطح اول را ندارند.

در روش‌های آنلاین بهینه‌سازی آسیب‌پذیری حافظه نهان، نیاز به تخمین آسیب‌پذیری حافظه نهان است. ضریب آسیب‌پذیری حافظه نهان، معیاری است که از آن برای مدل کردن قابلیت اطمینان حافظه نهان استفاده می‌شود [۱۷]. آسیب‌پذیری حافظه نهان، بر اساس الگوی دسترسی‌ها به این حافظه تعیین می‌شود و داده‌ها بین بازه‌های خواندن و پس‌نویسی در حافظه سطح پایین‌تر، آسیب‌پذیر هستند. لذا نوع برنامه و ساختار حافظه نهان بر این معیار اثرگذار است. کاهش آسیب‌پذیری حافظه نهان، افزایش قابلیت اطمینان آن را در پی دارد و بررسی‌ها درمورد این معیار نشان می‌دهد که حجم حافظه نهان، بیشترین اثرگذاری را بر آسیب‌پذیری دارد [۱۸-۲۰]. حافظه نهان بزرگ‌تر، ضریب آسیب‌پذیری بالاتری دارد اما از طرفی باعث کاهش زمان اجرای برنامه‌ها و کاهش احتمال بروز خطای نرم می‌شود. لذا، بین قابلیت اطمینان حافظه نهان و کارآیی آن یک مصالحه[6] در رابطه با حجم حافظه برقرار است.

با توجه به مصالحه بین مدت زمان اجرای برنامه‌ها و آسیب‌پذیری حافظه نهان، بررسی کاملی جهت انتخاب حجم حافظه نهان و رفتار این دو پارامتر با تغییر حجم حافظه برای برنامه‌های مختلف انجام شده است و از این طریق بر اساس خواص برنامه‌ها، معیاری برای

[1] Safety-critical
[2] Soft Error
[3] Reliability
[4] Single Error-Correction Double Error-Detection
[5] Redundancy
[6] Trade-off

تعیین حجم حافظه نهان ارائه شده است که بر اساس آن رفتار آسیب‌پذیری حافظه نهان برای کاربردهای مختلف مشابه شود [۲۱]. با استفاده از این معیار می‌توان مصالحه‌ای بین قابلیت اطمینان و کارآیی سیستم برقرار کرد.

در کنار مسأله تأثیر حجم حافظه نهان بر کل آسیب‌پذیری آن، آسیب‌پذیری حافظه نهان در طول اجرای یک برنامه نیز غیریکنواخت است [۲۲]. به این معنی که در بخش‌هایی از برنامه به دلیل نوع دسترسی‌ها به آدرس‌های آن، ماندگاری داده‌ها در حافظه نهان به نحوی است که آسیب‌پذیری حافظه بیشتر یا کم‌تر می‌شود. در نتیجه، ثابت بودن حجم حافظه نهان در تمام طول اجرا لزوماً از لحاظ پایین بودن آسیب‌پذیری کارا نیست و کاهش حجم حافظه نهان در شرایط مشخصی، می‌تواند به پایین نگه داشتن آسیب‌پذیری و پوشش خطاهای احتمالی کمک کند. در این راستا، به دست آوردن تخمینی مناسب از وضعیت آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا، ضروری می‌نماید.

در بیشتر ایده‌های مطرح شده در این راستا، تأثیر پارامترهای مختلف حافظه نهان بر روی آسیب‌پذیری آن به صورت آفلاین بررسی می‌شود و بر اساس پیش‌پردازش انجام شده، در زمان اجرا از نتایج آن استفاده می‌شود [۲۳-۲۵]. مشکل اصلی این روش‌ها، هزینه بالای زمانی و پردازشی محاسبات آفلاین است به طوری که گاهی انجام کامل آن غیر ممکن بوده و قابل انجام نیست. ایده‌هایی از جمله حالت شبه بهینه و استفاده از شبکه عصبی برای کاهش این زمان و قابل انجام بودن این روش‌ها ارائه شده است [۲۵]. با این وجود، در این روش‌ها با تغییر برنامه کاربردی نیاز است تمام پردازش‌های اولیه مجدد انجام شود.

با توجه به تفاوت آسیب‌پذیری حافظه نهان در ارتباط با حجم حافظه، تا کنون تمامی مقالاتی که در این حوزه کار کرده‌اند به بررسی آسیب‌پذیری حافظه نهان با در نظر گیری حجم ثابتی از حافظه برای برنامه‌های مختلف پرداخته‌اند. در حالی که برنامه‌های مختلف، به حجم‌های حافظه متفاوتی برای اجرا نیاز دارند و تخصیص نامتناسب حجم حافظه به آن‌ها سربار انرژی و آسیب‌پذیری به سیستم تحمیل می‌کند. همچنین با توجه به تفاوت رفتار آسیب‌پذیری حافظه در طول اجرای برنامه‌ها و چالش‌های مربوط به تخمین آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا، تا کنون روشی مبتنی بر تخمین میزان آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا و تغییر حجم حافظه نهان بر مبنای آن برای بهبود آسیب‌پذیری یا مدت زمان اجرای برنامه‌ها ارائه نشده است. در این مقاله الگوریتمی جهت بهبود آسیب‌پذیری حافظه نهان ارائه و پیاده‌سازی شده است که با تغییر حجم حافظه نهان در زمان اجرا، احتمال بروز خطای نرم را کاهش می‌دهد.

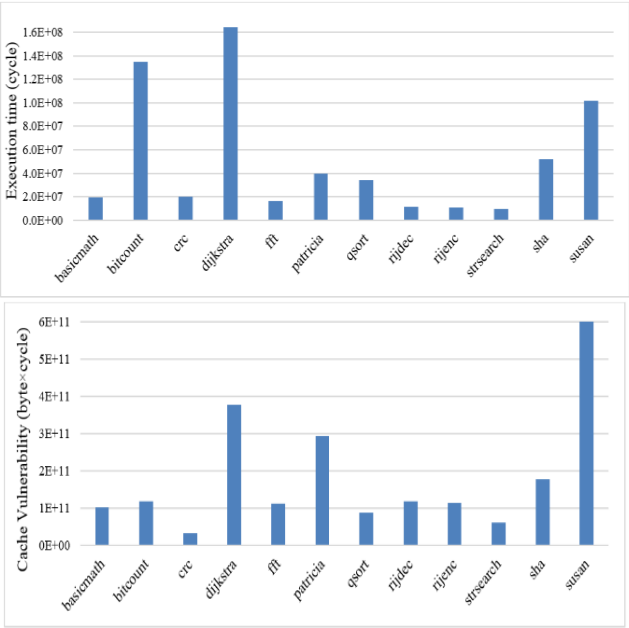
نوآوری‌های مقاله را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

- ارائه مدلی برای محاسبه آسیب‌پذیری حافظه نهان
- تخمین آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا
- استفاده از تغییر حجم حافظه نهان برای بهبود آسیب‌پذیری آن
- استفاده از اندازه موثر هر برنامه در جهت بهبود آسیب‌پذیری حافظه نهان
- ارائه الگوریتمی برای تخمین و تغییر حافظه نهان در جهت بهبود آسیب‌پذیری حافظه نهان

ساختار این مقاله به شرح زیر سازماندهی‌شده است: در بخش دو به انگیزه‌ای که باعث شد این تحقیق انجام شود خواهیم پرداخت و در بخش سوم به بیان کارهایی که در پژوهش‌های پیشین در این حوزه انجام شده می‌پردازیم. ادبیات و مفاهیم پایه را در بخش چهارم بیان می‌کنیم و در بخش پنجم، روش پیشنهادی ارائه می‌شود. در نهایت، نتایج را در بخش ششم بررسی و تحلیل می‌کنیم و در انتها در بخش‌های هفتم و هشتم به ترتیب، نتیجه‌گیری و مراجع آورده می‌شود.

۲- انگیزه پژوهش

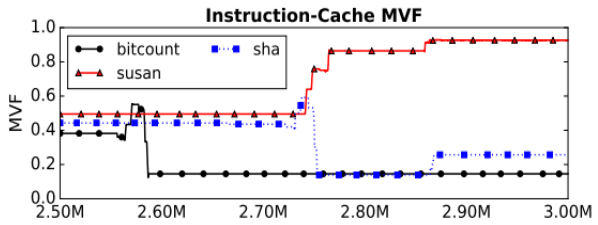
به دلیل تفاوت در برنامه‌های مختلف و نحوه دسترسی متفاوت آنها به حافظه، به ازای حجم یکسانی از حافظه نهان داده یا دستورات، زمان اجرای برنامه‌های مختلف نسبت به یکدیگر متفاوت است. همین دسترسی‌های متفاوت برنامه‌ها به حافظه باعث می‌شود آسیب‌پذیری حافظه نهان برنامه‌های مختلف متفاوت باشد. از طرفی، آسیب‌پذیری حافظه نهان با زمان اجرای برنامه‌ها رابطه مشخصی ندارد. این مسأله در شکل ۱ نشان داده شده است. بر طبق این نمودارها، آسیب‌پذیری برنامه‌ها با یک حافظه نهان یکسان با یکدیگر متفاوت است که با زمان اجرای برنامه‌ها نیز رابطه مستقیمی ندارد. بدین معنی که برنامه‌ای با زمان اجرای بالاتر، لزوماً آسیب‌پذیری بالاتری در مقایسه با برنامه‌ای با زمان اجرای کم‌تر ندارد (مقایسه آسیب‌پذیری حافظه نهان داده و زمان اجرای برنامه‌های patricia و dijkstra) و همچنین برنامه‌ای با زمان اجرای کم‌تر، آسیب‌پذیری بالاتری نسبت به برنامه‌ای با زمان اجرای بالاتر ندارد (مقایسه آسیب‌پذیری حافظه نهان داده و زمان اجرای برنامه‌های bitcount و susan). با این اوصاف لازم است اندازه حافظه نهان مناسبی متناسب با برنامه‌های کاربردی مختلف مشخص شود.



شکل ۱. زمان اجرا و آسیب‌پذیری حافظه نهان داده برنامه‌های محک مختلف در شبیه‌ساز gem5

از طرفی، آسیب‌پذیری داده‌های حافظه نهان به الگوی دسترسی‌ها به آدرس‌های مختلف آن بستگی دارد و از آن‌جایی که برنامه‌های مختلف الگوهای متفاوتی در دسترسی به حافظه دارند، تخمین و یا پیش‌بینی مقدار آسیب‌پذیری کار پیچیده و چالش‌برانگیزی است. در شکل ۲، آسیب‌پذیری چند برنامه در حین زمان اجرا نمایش داده شده است [۲۲]. این نمودار نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان حافظه نهان در طول اجرای برنامه ثابت نیست. این تغییرات برای برنامه‌های مختلف نیز متفاوت است و هر برنامه می‌تواند در فازهای مختلفی از آسیب‌پذیری قرار گیرد. در نتیجه، علاوه بر اینکه اندازه حافظه نهان می‌تواند آسیب‌پذیری را تغییر دهد، آسیب‌پذیری در زمان اجرا نیز می‌تواند متفاوت باشد و مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به تغییر آسیب‌پذیری حافظه نهان در طول اجرای برنامه‌ها و ارائه معیار اندازه موثر حافظه نهان برای برنامه‌های کاربردی مختلف [۲۱]، این ایده به ذهن رسید که از تغییر حجم حافظه نهان در جهت بهبود قابلیت اطمینان آن استفاده کنیم. با توجه به تفاوت رفتار آسیب‌پذیری حافظه در طول اجرای برنامه‌ها و چالش‌های مربوط به تخمین آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا، تا کنون روشی مبتنی بر تخمین میزان آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا و تغییر حجم حافظه نهان بر مبنای آن برای بهبود آسیب‌پذیری یا مدت اجرای برنامه ارائه نشده است.



شکل ۲. فازهای مختلف ضریب آسیب‌پذیری حافظه نهان دستورات در طول اجرا برای برنامه‌های مختلف [۲۲]

۳- کارهای پیشین

پیشرفت تکنولوژی باعث افزایش میزان حافظه نهان هر پردازنده و افزایش چگالی تعداد هسته‌های یک سیستم شده است. افزایش حافظه نهان، خطای نرم آن را به صورت ابرخطی[۱] افزایش می‌دهد [۲۰،۲۶،۲۷]. علاوه بر این، با افزایش اندازه حافظه نهان، سربار تکنیک‌های حفاظتی افزایش می‌یابد، زیرا برای حفظ نرخ خطای نرم در حد معقول باید به تعداد فزاینده‌ای از بلوک‌ها در مدت زمان ثابتی دسترسی داشت [۲۸،۲۹]. استفاده از کدهای تشخیص و تصحیح خطا، روش غالب محافظت در برابر خطای نرم در سلول‌های حافظه است [۳۰]. با این حال، روش‌های متعددی از روش‌های تکرار[۲] برای بالا بردن قابلیت اطمینان حافظه استفاده کرده‌اند و تعدادی نیز سعی در کاهش احتمال بروز خطای نرم در حافظه کرده‌اند.

در [۳۱] یک رویکرد حفاظت در برابر خطا برای حافظه نهان سطح ۱ پیشنهاد می‌شود که از محلیت مکانی[۳] حافظه نهان استفاده می‌کند. از آنجایی که در حافظه نهان، بخش کوچکی از داده‌ها متناوباً مورد دسترسی قرار می‌گیرند، در این تکنیک، از مدارهای جداگانه‌ای تنها برای محافظت از آن بخش استفاده می‌شود. در مقایسه با رویکرد مرسوم ارائه تصحیح خطا برای همه بلوک‌های حافظه نهان، این تکنیک سطح بالاتری از حفاظت را ارائه می‌کند. گروه Zhang، یک طرح تکرار درون حافظه‌ای برای محافظت از حافظه نهان پیشنهاد کرده است [۳۲]. در این تکنیک، بلوک‌هایی که برای مدت معینی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند به عنوان بلوک‌های مرده تعیین می‌شوند و از فضای این بلوک‌ها برای نگهداری کپی بلوک‌های فعال حافظه نهان استفاده می‌شود. آنها دو استراتژی تکرار را بررسی کرده‌اند. در استراتژی اول، یک بلوک در موارد باخت[۴] و دسترسی نوشتن به حافظه نهان، تکرار می‌شود در حالی که در استراتژی دوم، یک بلوک تنها در دسترسی‌های نوشتن تکرار می‌شود. استراتژی دوم، داده‌های فقط خواندنی را تکرار نمی‌کند و از این رو، می‌تواند درصد بیشتری از داده‌های دستکاری

[۱] Superlinear
[۲] Redundancy
[۳] Temporal locality
[۴] Miss

شده را تکرار کند. به همین دلیل، تعادل خوبی از کارآیی و قابلیت اطمینان را فراهم می‌کند.

همین گروه در [۳۳] حافظه نهان تکراری (R-cache[۱]) را ارائه کرده‌اند که در آن از یک حافظه نهان تداعیگر[۲] کوچک اضافه استفاده شده است تا در هر بار نوشتن در حافظه نهان داده سطح ۱، یک کپی از داده‌ها را در آن نگهداری کنند. با توجه به محلیت ارجاع بالا در حافظه نهان سطح ۱، کپی تنها چند بلوک (مثلاً ۸ بلوک) می‌تواند برد دسترسی خواندن مورد دسترسی را فراهم کند. با این حال، استفاده از حافظه نهان تکراری برای حافظه نهان سطح ۲ و بالاتر، به دلیل کاهش محلیت مکانی و زمانی غیرممکن می‌شود [۳۴،۳۵]. به همین دلیل، یک حافظه نهان تکرار با اندازه بزرگ مورد نیاز است که به دلیل طراحی کاملاً تداعیگر آن، سربار بالای انرژی دینامیکی را تحمیل می‌کند.

در [۳۶] رویکردی برای اطمینان از قابلیت اطمینان حافظه نهان با حداقل سربار پیشنهاد شده است. در این طرح، تنها بلوک‌های کثیف حافظه نهان با استفاده از کدهای تصحیح خطا محافظت می‌شوند. در مقابل، بلوک‌های تمیز فقط با استفاده از کد توازن[۳] محافظت می‌شوند که نیازمندی‌های کدهای تصحیح خطا را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، به طور دوره‌ای بلوک‌های کثیف حافظه نهان که انتظار نمی‌رود در آینده نزدیک دسترسی شوند، در حافظه نهان سطح بالاتر نوشته می‌شوند. این مسأله تعداد بلوک‌های کثیف حافظه نهان را کاهش می‌دهد و ترافیک حافظه اصلی را نیز به میزان قابل توجهی افزایش نمی‌دهد.

در [۳۷] رویکردی برای حفاظت در برابر خطا با استفاده از حافظه نهان محافظت شده جزئی ارائه شده است. در این روش چندین (مثلا دو) حافظه در یک سطح سلسله مراتب حافظه استفاده می‌شود و هر آدرس حافظه منحصراً به یکی از این حافظه‌ها نگاشت می‌شود. یکی از حافظه‌ها با استفاده از کدهای تشخیص و تصحیح خطا در برابر خطاهای نرم محافظت می‌شود و دیگری در برابر خطاهای نرم محافظت نمی‌شود. داده‌های برنامه به بخش‌های بحرانی و غیر بحرانی تقسیم می‌شود و اولی در حافظه نهان محافظت شده و دومی به حافظه نهان محافظت نشده نگاشت می‌شود. نشان داده شده است که با این روش، نرخ خرابی برنامه‌های چندرسانه‌ای را می‌توان همانند معماری با یک حافظه نهان محافظت شده حفظ کرد در حالی که هزینه‌های سربار را با حداقل کاهش کیفیت خدمات به حداقل رساند.

تعداد زیادی از بلوک‌های حافظه نهان، داده‌های «مرده» را ذخیره می‌کنند که در آینده مورد استفاده قرار نخواهند گرفت [۲۹،۳۵،۳۸]. این بلوک‌های داده در برابر خطاهای نرم آسیب‌پذیر باقی می‌مانند. برای رفع این مشکل، برخی از محققان تکنیک‌هایی را برای بازنویسی داده‌های کثیف یا خالی کردن حافظه نهان ارائه می‌کنند تا احتمال خراب شدن بلوک‌های آسیب‌پذیر در حافظه نهان را کاهش دهند. اسدی و همکاران، نوشتن داده‌های کثیف حافظه نهان سطح ۱ به حافظه نهان سطح ۲ به صورت دوره‌ای (مثلا هر یک میلیون سیکل) را پیشنهاد داده‌اند [۲۷]. لی و همکاران یک سیاست بازنویسی اولیه را پیشنهاد کرده‌اند که داده‌های کثیف حافظه نهان سطح ۱ را پس از گذشت یک دوره زمانی ثابت (مثلاً ۱۰ هزار چرخه) از آخرین عملیات نوشتن در یک بلوک، بازنویسی می‌کنند [۳۹]. گلد و همکاران یک مکانیزم پیش‌بینی ارائه کرده‌اند که به‌دقت تعیین می‌کند یک بلوک حافظه نهان برای آخرین بار چه زمانی نوشته می‌شود و در همان زمان بازنویسی داده‌ها را آغاز می‌کند [۴۰].

کادایف و همکاران تکنیک‌هایی را برای بهبود قابلیت اطمینان حافظه نهان ارائه کرده‌اند [۴۱]. اولین تکنیک آنها فقط کلمات اصلاح شده یک بلوک حافظه نهان را بازنویسی می‌کند تا از انتشار خطا به سطوح پایین‌تر سلسله مراتب حافظه جلوگیری کند. تکنیک دوم آن‌ها به‌طور انتخابی بلوک‌های حافظه نهان را نامعتبر می‌کند تا دوره‌های آسیب‌پذیر آن‌ها را کم کند و شانس آن‌ها را برای گرفتن خطاهای نرم کاهش دهد. برای به حداقل رساندن سربار کارآیی نامعتبر کردن بلوک‌های حافظه نهان، آنها تکنیک دیگری را پیشنهاد کرده‌اند که تلاش می‌کند نسخه جدیدی از بلوک نامعتبر را از طریق واکشی اولیه به حافظه نهان بیاورد. هرچند این تکنیک بخشی از افزایش قابلیت اطمینان حاصل از نامعتبر کردن بلوک‌های حافظه را کاهش می‌دهد.

در [۴۲] تکنیکی برای حافظه نهان سطح ۱ مستقیم نویسی[۴] که توسط کدهای تصحیح خطا محافظت نمی‌شود ارائه شده است. در این روش فرض شده است که حافظه نهان سطح ۲ و حافظه اصلی توسط کدهای تصحیح خطا محافظت می‌شوند. آنها نشان داده‌اند که افزایش استفاده از گذرگاه سطح ۲ به دلیل افزایش دسترسی به آن جهت کاهش آسیب‌پذیری حافظه سطح ۱ اندک است. تکنیک آنها به طور انتخابی بلوک‌های حافظه نهان را از حافظه نهان سطح ۲ به حافظه نهان سطح ۱ واکشی می‌کند تا بلوک‌های حافظه نهان را تازه

[۱] Replication cache
[۲] Fully associative
[۳] Parity
[۴] Write through

کند و آسیب‌پذیری حافظه نهان سطح ۱ را کاهش دهد. آنها دو استراتژی بازیابی را پیشنهاد کرده‌اند. استراتژی «استاتیک» بلوک‌های حافظه نهان انتخابی را با فرکانس ثابت بازیابی می‌کند. استراتژی «رویداد محور[۱]» یک واکشی مجدد را در یک برد در دسترسی خواندن سطح ۱ به بلوک‌هایی که انتظار می‌رود در آینده نزدیک به آن‌ها دسترسی پیدا کنند، راه‌اندازی می‌کند. در مقایسه با استراتژی اول، استراتژی دوم با هدف در نظر گرفتن الگوی دسترسی برای کاهش موثر آسیب‌پذیری انجام می‌شود.

۴- ادبیات و مفاهیم پایه‌ای

۴-۱- مدل قابلیت اطمینان حافظه نهان

قابلیت اطمینان رابطه معکوسی با آسیب‌پذیری حافظه نهان دارد. آسیب‌پذیری حافظه نهان به صورت احتمال بروز خطا در خروجی سیستم در صورت تغییر ناخواسته در هر یک از بیت‌های حافظه نهان تعریف می‌شود. برای تخمین قابلیت اطمینان حافظه نهان، نیاز به مدل جامعی از قابلیت اطمینان حافظه نهان است. برای این منظور، در این مقاله از مدل تحلیلی برای محاسبه قابلیت اطمینان استفاده شده است. قابلیت اطمینان یک ساختار در سیستم‌های دیجیتال با رابطه ۱ مدل می‌شود [۴۳]:

$$FIT_{structure} = FIT_{intrinsic} \times N \times AVF_{structure} \qquad (۱)$$

که $FIT_{intrinsic}$، ثابت وابسته به تکنولوژی است و تعداد خطا در واحد زمان آن را نشان می‌دهد. N اندازه ساختار را بر اساس تعداد بیت‌های آن نشان می‌دهد و AVF[۲] ضریب آسیب‌پذیری معماری است. این معیار، خطاهای قابل مشاهده از سوی کاربر را مشخص می‌کند و احتمال تأثیر خرابی بیت‌ها را در خروجی بیان می‌دارد [۴۳]. در مورد حافظه نهان، ضریب آسیب‌پذیری حافظه نهان CVF[۳] که در [۴۴] معرفی شده است، نشان دهنده AVF آن است. این معیار بیان کننده احتمال انتشار خطا از حافظه نهان به دیگر اجزاء سیستم از جمله پردازنده و دیگر سطح‌های حافظه است. CVF را به صورت رابطه ۲ می‌توان بیان کرد:

$$CVF = \frac{cache\ vulnerability}{execution\ time \times cache\ size} \qquad (۲)$$

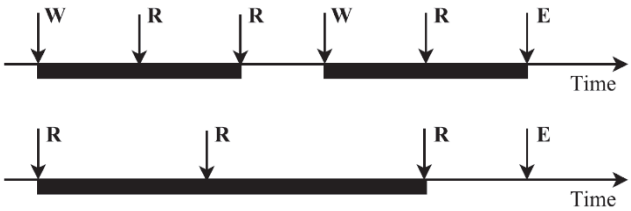
گروه Biswas در [۴۵] روش آنالیز طول عمر[۴] را برای ساختارهای بر پایه آدرس همانند حافظه نهان داده، ارائه کرده‌اند. در این روش، آسیب‌پذیری یک بیت در حافظه نهان به ترتیب دسترسی به آن بیت وابسته است. آسیب‌پذیری حافظه نهان، به صورت مجموع آسیب‌پذیری بیت‌های آن لحاظ می‌شود. در مورد حافظه نهان با مکانیزم پس‌نویسی، آسیب‌پذیری به صورت مجموع سیکل‌های آسیب‌پذیر که به خواندن یا خروج منتهی می‌شوند، تعریف می‌شود. شکل ۳ این مسأله را به صورت دقیق نشان می‌دهد. خطاهایی که در بازه‌های آسیب‌پذیر حافظه نهان اتفاق می‌افتد، احتمال دارد به دیگر اجزاء سیستم انتشار یافته و به صورت خطا خود را نشان دهد. بنابراین، با توجه به رابطه ۱ و رابطه ۲، مدل قابلیت اطمینان حافظه نهان را به صورت رابطه ۳ می‌توان بیان کرد:

$$FIT_{Cache} = FIT_{intrinsic} \times Cache\ Size \times CVF \qquad (۳)$$

با جایگزینی رابطه CVF در رابطه ۳، قابلیت اطمینان حافظه نهان به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود:

$$FIT_{Cache} = \frac{FIT_{intrinsic} \times vulnerability}{execution\ time} \qquad (۴)$$

بر اساس رابطه ۴، قابلیت اطمینان حافظه نهان، رابطه مستقیمی با آسیب‌پذیری آن دارد. در این مقاله، منظور از قابلیت اطمینان حافظه نهان، FIT_{Cache} است. برای تخمین میزان آسیب‌پذیری، از روش ارائه شده در [۴۶] استفاده شده است.



شکل ۳. بازه‌های آسیب‌پذیر داده‌ها (بازه‌های تیره) در حافظه نهان [۲۵]

۴-۲- اندازه موثر حافظه نهان[۵]

برنامه‌های مختلف، نیازمندی‌ها و دسترسی‌های متفاوتی به حافظه دارند که همین موضوع باعث می‌شود رفتار آسیب‌پذیری متفاوتی در اندازه یکسان حافظه نهان نسبت به هم داشته باشند. از طرفی، افزایش و کاهش حافظه نهان برای هر برنامه‌کاربردی، آسیب‌پذیری حافظه نهان آن را در یکی از حالت‌های پایین، گذرا[۶] و بالا قرار می‌دهد [۲۱]. بنابراین، استفاده از حافظه نهان یکسان برای برنامه‌های مختلف، رفتار و فاز آسیب‌پذیری حافظه نهان آنها را یکسان نمی‌کند. در [۲۱] همچنین معیارهای مختلفی برای یکسان کردن رفتار آسیب‌پذیری حافظه نهان برنامه‌های کاربردی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، بر اساس تعداد دسترسی‌هایی که هر برنامه کاربردی به آدرس‌های مختلف دارد، معیاری به نام

[۱] Event-driven
[2] Architectural Vulnerability Factor
[۳] Cache Vulnerability Factor
[۴] Lifetime Analysis
[5] Effective Cache Size
[۶] Transient

اندازه موثر حافظه نهان معرفی شد. این معیار که ٪۹۵ بیشترین دسترسی‌ها در برنامه را شامل می‌شود، به راحتی و با اجرای یک بار برنامه کاربردی قابل محاسبه بوده و با افزایش و کاهش حافظه نهان بر اساس ضرایبی از آن باعث رفتار مشابه آسیب‌پذیری حافظه نهان برنامه‌ها می‌شود.

۵- ارائه روش پیشنهادی

۵-۱- تخمین آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا

محاسبه آسیب‌پذیری حافظه نهان، کاری پیچیده است و به راحتی از مشخصات سیستم همانند نرخ باخت، نرخ برد و ... قابل محاسبه نبوده و نیازمند اطلاعات دسترسی به حافظه نهان است [۲۲]. همان‌طور که بیان شد، آسیب‌پذیری حافظه نهان به صورت مجموع سیکل‌های آسیب‌پذیر بین دسترسی‌های مختلفی که به خواندن یا خروج منتهی می‌شوند، تعریف می‌شود. در این روش می‌بایست بازه‌های آسیب‌پذیر حافظه محاسبه و جمع شوند. بر این اساس، محاسبات آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا به صورت دقیق ممکن نیست و می‌بایست با روش‌هایی تخمین زده شود و بر اساس آن رفتار قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله، برای تخمین آسیب‌پذیری حافظه نهان از تعریف آن استفاده شده است. بر اساس تعریف، بازه‌های آسیب‌پذیر برای داده‌ها بر اساس نوع دسترسی‌ها به حافظه نهان داده مشخص می‌شود و عبارتند از:

۱. بازه‌هایی که منتهی به دسترسی خواندن هستند (که به عنوان بازه‌های access-read نام برده می‌شود)
۲. بازه‌های بین آخرین دسترسی یک داده کثیف تا خروج آن از حافظه نهان (که به عنوان بازه‌های dirty-evict شناخته می‌شوند).

در این راستا برای کاهش سربار پیاده‌سازی، تکنیک‌هایی رائه شده است که در ادامه تشریح می‌شوند.

۵-۱-۱- تخمین محاسبه بازه‌های dirty-evict

بازه‌های dirty-evict، بازه‌های زمانی آسیب‌پذیر بین آخرین دسترسی به یک آدرس کثیف تا خروج آن داده از حافظه نهان هستند. برای محاسبه چنین بازه‌هایی در سطح کلمات، نیاز به ثبت زمان آخرین دسترسی به ازائ هر کلمه کثیف می‌باشد تا در زمان خروج، زمان آسیب‌پذیری محاسبه شود. با توجه به سربار پیاده‌سازی چنین روالی، تخمینی معادل برای آن در نظر گرفته شده است. در این تخمین، زمان اولین دستور نوشتن[1] در آن آدرس، ثبت شده و در زمان خروج، کل بازه اولین نوشتن تا خروج داده به عنوان بازه آسیب‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. در چنین شرایطی، آسیب‌پذیری دسترسی‌های خواندن به یک آدرس کثیف در حافظه نهان لحاظ نمی‌شود، چرا که با بازه اولین نوشتن در آن آدرس تا خروج از حافظه نهان هم‌پوشانی دارد.

۵-۱-۲- تخمین محاسبات در سطح بلوک

با توجه به سربار ناشی از محاسبات آسیب‌پذیری در سطح کلمات، این محاسبات در سطح بلوک‌های حافظه نهان انجام شده است. هر دسترسی به یکی از آدرس‌های یک بلوک به منزله دسترسی به آن بلوک در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط هر دسترسی خواندن به آدرسی در یک بلوک، مدت زمان بین دسترسی قبلی به این بلوک تا دسترسی فعلی به عنوان بازه آسیب‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. همچنین، نوشتن در یک آدرس به معنای کثیف بودن کل داده‌ها است و بازه بین اولین دسترسی نوشتن به یکی از آدرس‌های آن بلوک تا خروج آن از حافظه به عنوان بازه آسیب‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. در شرایط کثیف بودن داده‌ها، دسترسی‌های خواندن با dirty-evict تخمین‌زده شده هم‌پوشانی دارند. لذا فقط بازه dirty-evict در نظر گرفته می‌شود و دسترسی خواندن به داده کثیف، مورد محاسبه قرار نمی‌گیرد.

۵-۱-۳- تخمین در بازه‌های زمانی مشخص

برای تخمین آسیب‌پذیری در زمان اجرا، بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده است که محاسبات مربوطه در این بازه‌ها انجام می‌شود. پیاده‌سازی این بازه‌های زمانی به وسیله شمارنده‌ای با تعداد بیت مشخص انجام شده که تعداد بیت شمارنده، مشخص کننده بازه زمانی تخمین آسیب‌پذیری حافظه است. مدت زمان این بازه‌ها باید به نحوی انتخاب شود که سربار محاسبات در آن دیده شود. بنابراین، این بازه‌ها نباید آن‌قدر بزرگ باشند که روند اصلی آسیب‌پذیری غیرقابل مشاهده باشد و نه آن‌قدر کوچک که محاسبات نوسانات آن زیاد و با اختلاف زیاد باشد.

۵-۲- تغییر حجم حافظه نهان در زمان اجرا

قابلیت اطمینان برنامه در طول زمان اجرا متغیر است. با به دست آمدن اندازه موثر حافظه نهان هر برنامه، می‌توان حجم مشخص شده از حافظه نهان بر مبنای این معیار در نظر گرفته شود. با به دست آمدن تخمینی از وضعیت آسیب‌پذیری در طول زمان اجرای برنامه، در صورتی که آسیب‌پذیری روندی رو به بالا داشته و برنامه در شرف ورود به فازی بود که آسیب‌پذیری آن بالا است، می‌توان با نصف

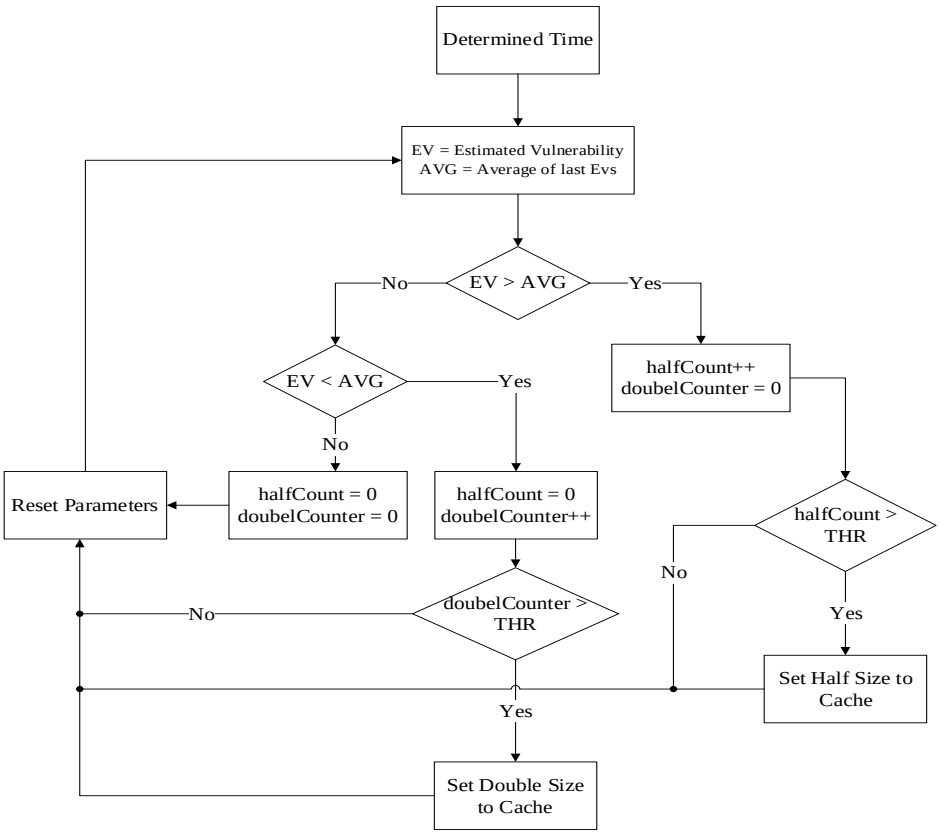
[1] Write

کردن حجم حافظه نهان، آسیب‌پذیری را کاهش داد تا برنامه در شرایط امن‌تری به کار خود ادامه دهد. در مقابل، در صورتی که روند آسیب‌پذیری رو به کاهش تشخیص داده شد، می‌توان حجم حافظه را دو برابر کرد تا برنامه که در فاز کم‌آسیب‌پذیر خود است، با سرعت بیشتری اجرا شود. برای نحوه بررسی روند آسیب‌پذیری بر مبنای تخمین به دست آمده در زمان اجرا، بازه زمانی ثابتی در نظر گرفته می‌شود. این بازه باید اولاً به اندازه‌ای بزرگ باشد که دسترسی‌های برنامه به حافظه نهان به تعدادی باشد که تخمین آسیب‌پذیری بر مبنای مدل ارائه شده قابل قبول باشد و ثانیاً، باید به حدی کوچک باشد که سربار پیاده‌سازی زیادی را تحمیل نکند. علاوه بر این، باید بتواند روند کاهشی یا افزایشی بودن آسیب‌پذیری را به خوبی مدل کند. در این بازه زمانی، تخمین آسیب‌پذیری بر مبنای مدل ارائه‌شده به دست می‌آید و با مقادیر آسیب‌پذیری تخمین زده شده در بازه‌های قبل مقایسه می‌شود تا کاهشی/افزایشی بودن روند مشخص شود. برای به دست آوردن بهتر روند آسیب‌پذیری، از روش پنجره لغزان و مقایسه آسیب‌پذیری با میانگین چند بازه قبل استفاده شده است تا نوسانات احتمالی بین بازه‌ها نیز به نوعی کاهش یابد. برای صدور دستور کاهش یا افزایش حجم حافظه نهان، باید چند کاهش یا افزایش متوالی صورت گیرد. لذا تعداد افزایش/کاهش‌های متوالی شمرده شده و در صورت بیشتر شدن آن از حدی مشخص، دستور مربوطه برای بازپیکربندی حافظه نهان صادر می‌شود. این روند در شکل ۴ به صورت فلوچارت نشان داده شده است.

۶- نتایج

۶-۱- شبیه‌سازی

در این کار از شبیه‌ساز Gem5 [۴۷] در حالت شبیه‌سازی SE[۱] برای اجرای برنامه‌ها استفاده شده است. سیستم پیکربندی شده دارای یک پردازنده تک هسته‌ای X86 با فرکانس ۱ گیگا هرتز است. این پردازنده دو حافظه نهان سطح اول، یکی برای دستورات و دیگری برای داده‌ها و یک حافظه اصلی دارد. با توجه به اینکه استخراج داده‌های تبادل شده در حافظه نهان مد نظر است، از مدل حافظه کلاسیک[۲] در حافظه نهان استفاده شده است. مکانیزم جایگزینی در حافظه نهان، LRU با روش پس‌نویسی[۳] و اندازه بلوک حافظه ۶۴ کلمه است.



شکل ۴. فلوچارت تغییر حجم حافظه نهان با توجه به شرایط آسیب‌پذیری

[۱] Syscall Emulator
[۲] Classic
[۳] Write Back

برای پردازنده‌های نهفته شده معمولاً از برنامه‌های محک[1] مجموعه MiBench استفاده می‌شود [۴۸]. در این مقاله نیز چند برنامه این مجموعه بر اساس جدول ۱ انتخاب شده است. این جدول دسته-بندی هر برنامه و توضیح کوتاهی در مورد هر یک را نشان می‌دهد. علاوه بر این، ردپای حافظه برنامه‌ها بر اساس فضای دسترسی آدرس‌ها در شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است. همان‌طور که در جدول قابل مشاهده است، ردپای حافظه برنامه‌ها از 443.5×10^3 تا 8.4×10^6 متغیر است. برنامه‌های آزمایش شده دارای طیف گسترده‌ای از ردپای حافظه در برنامه‌های تعبیه شده هستند و همچنین بیشتر آنها در مطالعات مربوط به قابلیت اطمینان حافظه نهان در پردازنده‌های نهفته استفاده می‌شوند [۱۲،۱۷،۱۸]. در این مقاله، مطالعه بر روی داده‌های ورودی پیش فرض برنامه ها انجام انجام شده است. تمام آزمایش‌ها بر روی یک پردازنده Intel® Core™ i5-4460 با فرکانس ۳٫۲ گیگاهرتز انجام شده است.

جدول ۱: برنامه‌های محک استفاده شده در شبیه‌سازی و اطلاعات مربوط به آنها

برنامه کاربردی	دسته	توضیحات	ردپای حافظه
basicmath	Auto./ industrial	عملیات ساده ریاضی	443.5 K
bitcount	Auto./ industrial	تست قابلیت دستکاری پردازنده با شمارش بیت‌های یک آرایه	825 K
CRC	Telecomm./ network	بررسی افزونگی چرخه ای ۳۲ بیتی بر روی فایل	4.3 M
dijkstra	Network	الگوریتم پیدا کردن کوتاه-ترین مسیر در ماتریس	941 K
FFT	Telecomm.	الگوریتم تبدیل فوریه سریع بر روی آرایه‌ای از داده‌ها	986.7 K
particia	Network	جستجوی درخت برای ارائه جدول مسیریابی شبکه	2 M
qsort	Auto./ industrial	الگوریتم جستجوی سریع	8.4 M
stringsearch	Office	جستجوی کلمه در ورودی	0.99 M
sha	Network/ security	الگوریم درهم‌آمیزی برای عملیات رمزنگاری	1.4 M
susan	Auto./ industrial	تشخیص گوشه/ لبه تصویر	1.4 M

۶-۲- نتایج بازه‌های زمانی تخمین آسیب‌پذیری

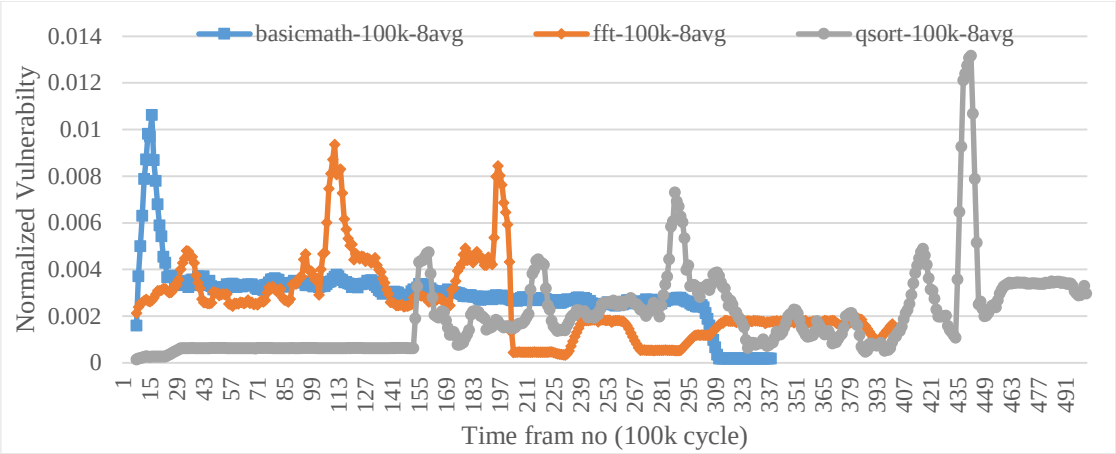
برای به دست آوردن بازه زمانی مناسب، یک بررسی روی تغییرات آسیب‌پذیری برنامه‌ها انجام شده است. در این بررسی که بر روی سه برنامه محک basicmath، FFT و qsort انجام شده، آسیب‌پذیری حافظه نهان در بازه‌های ده هزار سیکل (شمارنده ۱۴ بیتی)، پنجاه هزار سیکل (شمارنده ۱۶ بیتی)، صد هزار سیکل (شمارنده ۱۷ بیتی)، دویست و پنجاه هزار سیکل (شمارنده ۱۸ بیتی) و پانصد هزار سیکل (شمارنده ۱۹ بیتی) مورد بررسی قرار گرفته است.

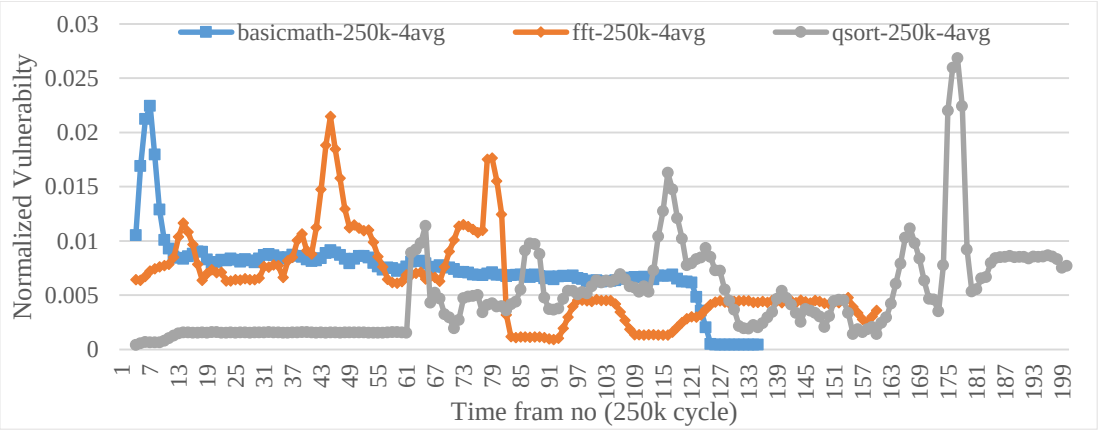
با بررسی نمودارهای مربوطه، بازه‌های زمانی صد هزار سیکل و دویست و پنجاه هزار سیکل به دلیل نمایش روند آسیب‌پذیری و سربار محاسباتی مناسب، انتخاب شدند. برای دخیل کردن سابقه آسیب‌پذیری در تصمیم‌گیری‌ها، از مکانیزم میانگین‌گیری پنجره لغزان به اندازه ۸ و ۴ به ترتیب برای بازه‌های صد هزار سیکل و دویست و پنجاه هزار سیکل استفاده شده است. شکل ۵ نتیجه را برای کل زمان اجرای سه برنامه محک نشان می‌دهد. بر اساس این شکل‌ها، در هر دو حالت، هر نقطه روند آسیب‌پذیری برنامه‌ها را به صورتی نمایش می‌دهد که روند آسیب‌پذیری حافظه به خوبی قابل تشخیص است. حال این‌که کدام یک از این دو بازه مناسب برای طراحی نهایی خواهند بود، باید از نظر دقت و سربارهای زمانی و مساحت، مورد بررسی قرار گیرند.

۶-۳- نتایج تخمین آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا

بر اساس بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده برای محاسبه آسیب‌پذیری در زمان اجرا (صد هزار و دویست و پنجاه هزار سیکل)، یک شبیه‌سازی برای محاسبه دقت تخمین آسیب‌پذیری در زمان اجرا انجام شده است. براساس الگوریتم گفته شده، یک جدول برای ثبت زمان دسترسی‌ها بر مبنای یک شمارنده ۱۶ بیتی در نظر گرفته شده است. هر سطر این جدول مربوط به یک بلوک از حافظه نهان است که در آن مقدار شمارنده بازه زمانی (به عنوان زمان دسترسی به بلوک متناظر با آن سطر از حافظه نهان) ثبت می‌شود. با دسترسی بعدی به هر بلوک، متناسب با نوع دسترسی و روش گفته شده، میزان آسیب‌پذیری به‌روز می‌شود. در انتهای یک دوره کامل از بازه زمانی، برای تمامی بلاک‌های کثیف، بازه دسترسی ثبت شده در جدول تا پایان بازه، به عنوان بازه‌های آسیب‌پذیر به مجموع آسیب‌پذیری این بازه اضافه می‌شود.

[1] Benchmark





شکل ۵. تغییرات آسیب‌پذیری حافظه نهان سه برنامه در زمان اجرا با بازه‌های زمانی صد هزار سیکل و میانگین‌گیری هشت تایی و دویست و پنجاه هزار سیکل و میانگین‌گیری چهار تایی در هر نقطه

برای بررسی دقت محاسبات در شبیه‌سازی انجام شده، حجم حافظه نهان هر برنامه بر اساس معیار اندازه موثر آن برنامه در نظر گرفته شده است و پیکربندی آن نگاشت مستقیم است.

جدول ۲جدول ۲ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی محاسبات بلوکی نسبت به حالت ایده‌آل را برای بازه‌های زمانی صد هزار و دویست و پنجاه هزار سیکل نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جدول، دقت محاسبات بلوکی در بازه‌های صد هزار سیکل در بدترین حالت ۵۰٪ و در بهترین حالت ۶۵٪ است. در بازه‌های دویست و پنجاه هزار سیکل نیز دقت تخمین آسیب‌پذیری بین ۵۳٪ تا ۷۳٪ است. بر اساس این نتایج مشاهده می‌شود که دقت محاسبات در بازه‌های دویست و پنجاه هزار سیکل به صورت کلی بهتر است. کاهش دقت محاسبات ناشی از انجام محاسبات در سطح بلوک به جای کلمه و محدود کردن سطرهای جدول به ۱۶ بیت برای کاهش سربار پیاده-سازی سخت‌افزاری می‌باشد.

جدول ۲: نتایج دقت محاسبات تخمین آسیب‌پذیری بیتی

program	100k cycles estimation accuracy	250k cycles estimation accuracy
basicmath	63%	73%
bitcount	50%	55%
crc	61%	55%
dijkstra	50%	52%
fft	61%	54%
patricia	60%	53%
qsort	50%	53%
rijenc	62%	64%
strsearch	59%	55%
sha	65%	58%
susan	50%	56%

۶-۴- نتایج تخمین روند آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا

پس از بررسی تخمین آسیب‌پذیری حافظه نهان، الگوریتم ارائه شده برای تشخیص روند آسیب‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که بیان شد، هدف در این کار، تشخیص درست روند آسیب‌پذیری حافظه نهان برای تغییر اندازه حافظه نهان با حداقل سربار پیاده-سازی است. بر اساس الگوریتم ارائه شده، روند آسیب‌پذیری برای

دو بازه زمانی صد هزار و دویست و پنجاه هزار سیکل مورد بررسی قرار گرفت. روش بررسی به این شکل است که در انتهای هر بازه زمانی، مقدار تخمین زده شده برای آسیب‌پذیری با میانگین مقادیر بازه‌های قبل با تعداد مشخص، مقایسه می‌شود. برای تشخیص روند در بازه‌های صد هزار سیکل، مقدار محاسبه شده آسیب‌پذیری با ضریب ۰/۷۵، با میانگین ۸ بازه قبل مقایسه می‌شود. در بازه‌های با طول دویست و پنجاه هزار سیکل، مقدار تخمینی با میانگین ۴ تخمین قبل مقایسه می‌گردد.

جدول ۳ نتیجه شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج جدول، دقت تشخیص روند در بازه دویست و پنجاه هزار سیکل بین ۸۷/۹٪ تا ۹۹/۳۸٪ با میانگین ۹۵/۲۲٪ و دقت تصمیم‌گیری برای بازه‌های صد هزار سیکل بین ۷۵/۲۵٪ تا ۹۹/۰۲٪ با میانگین ۹۰/۲۴٪ است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تشخیص روند آسیب‌پذیری حافظه نهان برای هر دو بازه قابل قبول است ولی از آنجایی که نتایج برای بازه‌های دویست و پنجاه هزار سیکلی بهتر است، برای پیاده‌سازی، بازه‌های دویست و پنجاه هزار سیکلی در نظر گرفته شده است.

۶-۵- پیاده‌سازی ماژول تخمین و مدیریت آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا

الگوریتم تخمین و مدیریت آسیب‌پذیری در زمان اجرای ارائه شده با در نظر گیری بازه‌های زمانی دویست و پنجاه هزار سیکل، در VHDL پیاده‌سازی شده و سربارهای مساحت آن با ابزار Design Compiler به دست آمده است. همچنین جدول مورد نیاز این الگوریتم به صورت حافظه در نظر گرفته شده که مساحت آن از طریق شبیه‌ساز CACTI 6.5 به دست آمده است. در این پیاده‌سازی، از رجیسترهای ۳۲ بیتی برای نگهداری آسیب‌پذیری و رجیسترهای ۱۶ بیتی برای نگهداری زمان استفاده شده است.

جدول ۳: نتایج دقت تصمیم‌گیری الگوریتم تخمین و مدیریت آسیب‌پذیری در زمان اجرا

program	100k cycles decision accuracy	250k cycles decision accuracy
basicmath	97.33%	97.76%
bitcount	97.83%	98.04%
crc	99.02%	99.38%
dijkstra	93.56%	97.735%
fft	90.56%	91.75%
patricia	82.43%	94.5%
qsort	75.25%	87.9%
rijenc	91.9%	92.47%
strsearch	74.06%	89.1%
sha	95.13%	99.5%
susan	95.54%	99.3%
Average	**90.24%**	**95.22%**

مطابق نتایج به دست آمده، سربار مساحت پیاده‌سازی ماژول تخمین و مدیریت آسیب‌پذیری در زمان اجرا، برای حافظه نهان با حجم ۱ کیلوبایت (کوچک‌ترین حافظه مورد نیاز برنامه‌های این مقاله) ۵۴٪ و برای حافظه نهان با حجم ۶۴ کیلوبایت برابر ۵/۴٪ است. کم‌ترین طول سیکل اجرا برای این پیاده‌سازی برابر ۱/۱۴ نانو ثانیه به دست آمده است.

۶-۶- نتایج شبیه‌سازی مدیریت آسیب‌پذیری در زمان اجرا

برای بررسی اثر تغییر حجم حافظه نهان داده بر کارآیی اجرای برنامه‌ها و آسیب‌پذیری بر اساس الگوریتم ارائه شده، یک شبیه‌ساز حافظه نهان به زبان پایتون پیاده‌سازی شده است. ورودی این شبیه‌ساز، آدرس‌های مورد دسترسی برنامه‌ها است که از شبیه‌ساز Gem5 به دست آمده است. این شبیه‌ساز می‌تواند در زمان اجرا، بر اساس الگوریتم ارائه شده، برای تخمین و مدیریت آسیب‌پذیری در زمان اجرا، حجم حافظه نهان را کم یا زیاد کند و سربارهای زمانی را با توجه به پیاده‌سازی انجام شده در بخش قبل لحاظ کند. برای اجرای هر برنامه در این شبیه‌ساز فرض شده است که هر برنامه حجمی مناسب از نظر برقراری مصالحه قابلیت اطمینان و کارآیی بر مبنای معیار اندازه موثر حافظه نهان دارد. بنابراین، در ابتدای شروع اجرای هر برنامه، حجم حافظه نهان داده بر اساس اندازه موثر هر برنامه انتخاب شده است و حجم حافظه نهان فقط می‌تواند نصف یا دو برابر مقدار اولیه شود.

در شبیه‌سازی تغییر حجم حافظه نهان در زمان اجرا، چند مسئله در رابطه با سربار اجرایی برنامه‌ها مطرح می‌شود. در انتهای هر بازه زمانی، سربار محاسبات ناشی از داده‌های کثیف برای تخمین آسیب‌پذیری وجود دارد. در این مورد، در بدترین حالت، حجم جدول برای بزرگ‌ترین حافظه برابر ۱۰۲۴ خانه است که اگر داده همه خانه‌ها کثیف باشد، سربار زمانی محاسبات آن حدود ۰/۴٪ است.

سربار دیگر می‌تواند ناشی از صدور دستور تغییر حجم حافظه نهان باشد. در این شرایط، داده‌های کثیف باید در حافظه پس‌نویسی شوند. پس از تغییر حجم حافظه نهان، برنامه از آخرین داده قبلی ادامه می‌یابد، اما حافظه نهان جدید خالی است که به مرور و با دسترسی‌های بعد پر می‌شود. همچنین بازپیکربندی حافظه نهان و کنترلر آن نیز ممکن است چند سیکل اضافه به سیستم تحمیل کند. این موضوع بر اساس مرجع [۴۹]، ۱۰۰ سیکل در نظر گرفته شده است. لذا به صورت خلاصه سربارهای زمانی ماژول مدیریت آسیب‌پذیری در زمان اجرا عبارتند از:

۱. سربار ناشی از تخمین آسیب‌پذیری در انتهای هر بازه ۲۵۰ هزار سیکل (حدود ۰/۴ درصد)

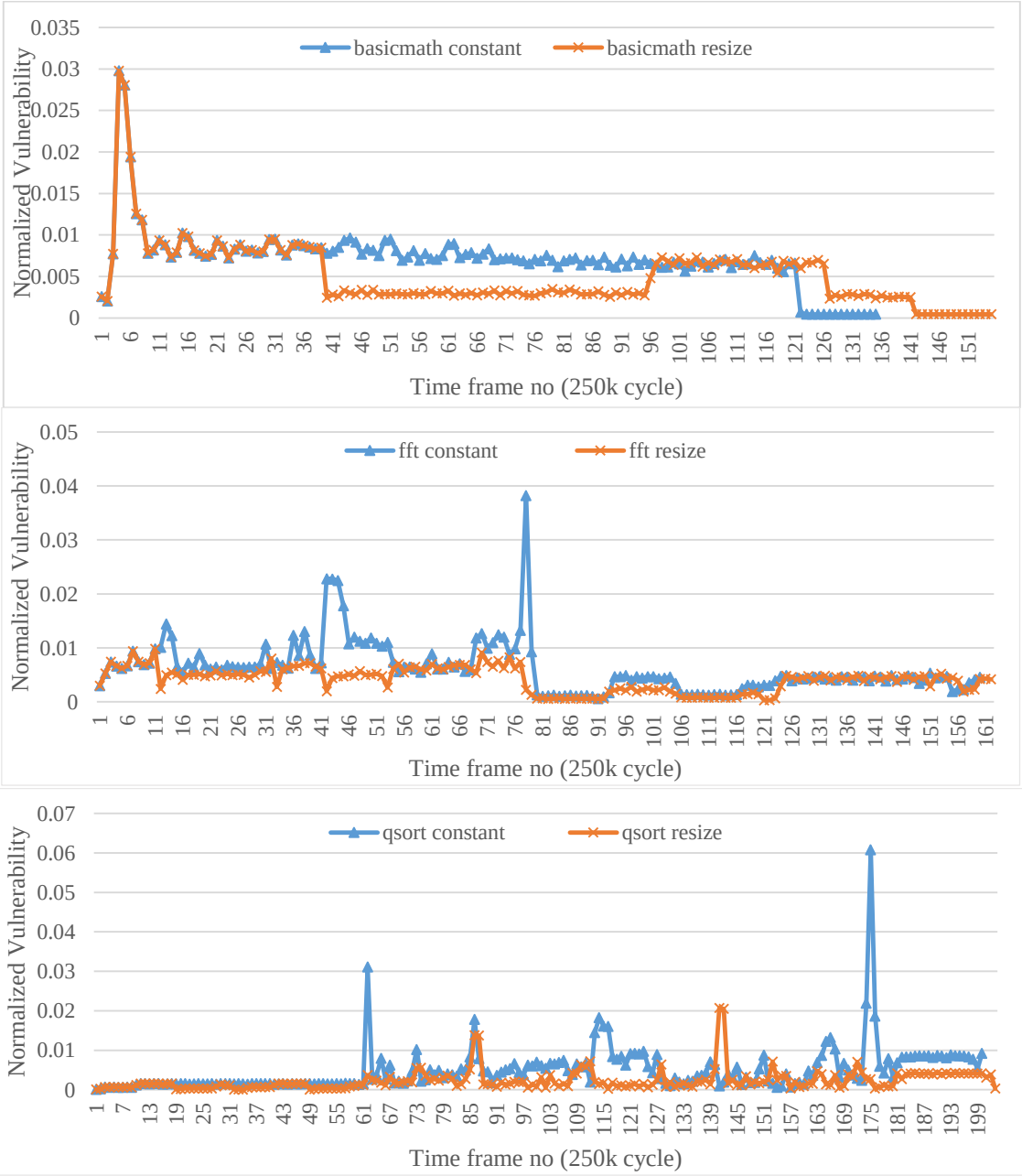
۲. سربار ناشی از پس‌نویسی داده‌های کثیف پیش از تغییر حجم حافظه

۳. سربار ناشی از بازپیکربندی حجم حافظه نهان در زمان اجرای برنامه که ۱۰۰ سیکل است.

۴. سربار ناشی از ادامه برنامه با حافظه نهان جدید.

هر کدام از این سربارها در شبیه‌ساز لحاظ شده است. جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی برنامه‌های محک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان اجرای برنامه‌ها به صورت میانگین ٪۶ طولانی‌تر می‌شود اما در مقابل، آسیب‌پذیری کل ٪۳۶ کاهش می‌یابد.

در شکل ۶ مقایسه تغییرات آسیب‌پذیری در زمان اجرا برای سه برنامه basicmath، FFT و qsort در دو حالت اجرا با حافظه نهان داده ثابت و اجرا با الگوریتم تخمین و مدیریت آسیب‌پذیری رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هرگاه آسیب‌پذیری در حجم ثابت (خط آبی با علامت مثلث) روندی رو به افزایش یا کاهش داشته است، حجم حافظه تغییر یافته و سطح آسیب‌پذیری برنامه در اجرا با الگوریتم مدیریت آسیب‌پذیری (خط قرمز با علامت ضربدر) کم یا زیاد شده است. همچنین در تمام طول اجرا، آسیب‌پذیری حافظه نهان در اجرا با الگوریتم مدیریت آسیب‌پذیری پایین‌تر از آسیب‌پذیری در اجرا با حجم ثابت بوده است.



شکل ۶. مقایسه آسیب‌پذیری برنامه‌های basicmath، FFT و qsort در زمان اجرا، در اجرا با حجم حافظه نهان داده ثابت و اجرا با الگوریتم تخمین و مدیریت آسیب‌پذیری در زمان اجرا

جدول ۴: نتایج به دست آمده از شبیه‌ساز تغییر حجم حافظه نهان بر اساس مدیریت آسیب‌پذیری در زمان اجرا

program	Execution time increase	Vulnerability decrease
basicmath	1.14	0.79
bitcount	1.02	0.61
crc	1.06	0.85
dijkstra	1.03	0.83
fft	1.01	0.72
patricia	1.07	0.72
qsort	1.02	0.53
rijenc	1.01	0.90
strsearch	1.08	0.58
sha	1.05	0.87
susan	1.15	0.77
average	1.06	0.74

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتمی برای تخمین و مدیریت آسیب‌پذیری حافظه نهان در زمان اجرا ارائه شد. مطابق این الگوریتم ماژولی در کنار حافظه نهان قرار می‌گیرد که در بازه‌های زمانی مشخص، تخمینی از آسیب‌پذیری آن ارائه می‌کند و با رصد کردن روند تغییرات آسیب‌پذیری در زمان اجرا، دستوری برای بازپیکربندی حافظه نهان می‌دهد. این ماژول در صورت تشخیص افزایش آسیب‌پذیری، حجم حافظه نهان را کاهش و در صورت کم شدن آسیب‌پذیری، دستور به افزایش حجم آن می‌دهد. دقت تصمیم‌گیری این الگوریتم نسبت به حالت ایده‌آل بین ٪۸۷/۹ تا ٪۹۹/۳۸ است.

بر اساس پیاده‌سازی صورت گرفته از الگوریتم تخمین و مدیریت آسیب‌پذیری حافظه نهان، سربار مساحت پیاده‌سازی این ماژول برای بزرگ‌ترین حافظه نهان ٪۵/۴ است. مطابق نتایج شبیه‌سازی، این ماژول تنها با ٪۶ افزایش میانگین زمان اجرای برنامه‌ها می‌تواند میانگین آسیب‌پذیری کل برنامه‌ها را ٪۳۶ بهبود بخشد و سطح آسیب‌پذیری حافظه نهان را در تمام طول اجرای برنامه از سطح آسیب‌پذیری در حجم حافظه ثابت پایین‌تر نگه دارد.

مراجع

[1] Shekhar Borkar, "Designing Reliable Systems from Unreliable Components: The Challenges of Transistor Variability and Degra dation," *IEEE Micro*, vol. 25, no. 6, pp. 10-16, Nov. 2005.

[2] B. W. Johnson, "Fault-Tolerant Microprocessor-Based Systems," *IEEE Micro*, vol. 4, no. 6, pp. 6-21, Dec. 1984.

[3] C. Slayman, "Soft error trends and mitigation techniques in memory devices," *in Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Lake Buena Vista, FL, USA, 24-27 Jan. 2011.

[4] Isreal Koren and C. Mani Krishna, Fault-Tolerant Systems, Elsevier, 2007.

[5] Michael Nicolaidis, Soft Errors in Modern Electronic Systems, Springer, 2010.

[6] Lukasz G Szafaryn, Brett H Meyer, and Kevin Skadron. Evaluating overheads of multibit soft-error protection in the processor core. IEEE Micro, (4):56–65, 2013.

[7] Adam Neale, Maarten Jonkman, Manoj Sachdev, "Adjacent-MBU Tolerant SEC-DED-TAEC-yAED Codes for Embedded SRAMs," *IEEE Transactions on Circuit and Systems II*, vol. 62, no. 4, pp. 387-391, Apr. 2015.

[8] Seungyeob Lee, Joon-Sung Yang, "MVP ECC: Manufacturing process Variation aware unequal Protection ECC for memory reliability," *in Proceedings of Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, Switzerland, Mar. 27-31 2017.

[9] A. klockMann, G. Geogakos, M. Goessel, "A new 3-bit Burst-Error Correcting Code," *in Proceedings of IOLTS*, Greece, 3-5 Jul. 2017.

[10] R. Afrin and M. S. Sadi, "An efficient approach to enhance memory reliability," *in Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, Dhaka, Bangladesh, 28-30 Sep. 2017.

[11] I. Alam, C. Schoeny, L. Dolecek and P. Gupta, "Parity++: Lightweight Error Correction for Last Level Caches," *in Proceedings of the 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W)*, Luxembourg, 25-28 Jun. 2018.

[12] Alaa R. Alameldeen, Ilya Wagner, Zeshan Chishti, Wei Wu, Chris Wilkerson, Shih-Lien Lu, "Energy-Efficient Cache Design Using Variable-Strength Error-Correcting Codes", *in Proceedings of the 38th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, CA, USA, 4-8 Jun. 2011.

[13] JeongKyu Hong, Soontae Kim, "Smart ECC Allocation Cache Utilizing Cache Data Space," *IEEE Transaction on Computers*, vol. 66, issue 2, pp. 368-374, Feb. 2017.

[14] Henry Duve, Xun Jian, Rakesh Kumar, "Correction Prediction: Reducing Error Correction Latency for On-chip Memories," *in Proceedings of 21st International International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*, CA, USA, 7-11 Feb. 2015.

[15] P. Benedicte, C. Hernandez, J. Abella and F. J. Cazorla, "LAEC: Look-Ahead Error Correction Codes in Embedded Processors L1 Data Cache," *in Proceedings of Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, Florence, Italy, 2019.

[16] Luc Jaulmes, Miquel MoretÃ³, Mateo Valero, Mattan Erez and Marc Casas. 'Runtime-Guided ECC Protection Using Online Estimation of Memory Vulnerability'. In: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. SC '20 (Atlanta, GA, US, Nov. 2020).

[17] Wei Zhang, "Computing cache vulnerability to transient errors and its implication," in Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DTF'05), USA, 3-5 October 2005.

[18] Kooli, M., Di Natale, G. & Bosio, A. "Memory-Aware Design Space Exploration for Reliability Evaluation in Computing Systems," *Journal of Electronic Testing 35*, pp. 145–162, 2019.

[19] Jun Yan and Wei Zhang. "Evaluating instruction cache vulnerability to transient errors," *In Proceedings of the 2006 workshop on MEmory performance: DEaling with Applications, systems and architectures (MEDEA '06)*, New York, USA, Sep. 2006.

[20] Yuan Cai, M. T. Schmitz, A. Ejlali, B. M. Al-Hashimi and S. M. Reddy, "Cache size selection for performance, energy and reliability of time-constrained systems," *in Proceesings of Asia and South Pacific Conference on Design Automation*, Yokohama, Japan, 24-27 Jan. 2006.

[21] M.H. Ahmadilivani, M. M. Jahromi, M.E. Salehi, M. Kargar, "ECS an endeavor towards providing similar cache reliability behavior in

different programs", *Microelectronics Reliability*, Volume 152, January 2024.

[22] A. Vijayan, S. Kiamehr, M. Ebrahimi, K. Chakrabarty and M. B. Tahoori, "Online Soft-Error Vulnerability Estimation for Memory Arrays and Logic Cores," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 37, no. 2, pp. 499-511, Feb. 2018.

[23] WeixunWang and Prabhat Mishra. 2011. Dynamic reconfiguration of two-level cache hierarchy in real-time embedded systems. J. Low Power Electron. 7, 1 (2011), 17–28.

[24] Weixun Wang, Prabhat Mishra, and Ann Gordon-Ross. 2012. Dynamic cache reconfiguration for soft real-time systems. ACM Trans. Embedded Comput. Syst. 11, 2 (2012), 28.

[25] Alif Ahmed, Yuanwen Huang, and Prabhat Mishra. 2019. Cache reconfiguration using machine learning for vulnerability-aware energy optimization. ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS) 18, 2 (2019), 15.

[26] A. Biswas et al., "Explaining cache SER anomaly using DUE AVF measurement," in International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA), 2010, pp. 1–12.

[27] G.-H. Asadi et al., "Balancing performance and reliability in the memory hierarchy," in International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS), 2005, pp. 269–279.

[28] S. S. Mukherjee et al., "Cache scrubbing in microprocessors: Myth or necessity?" in IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, 2004, pp. 37–42.

[29] S. Mittal et al., "Improving energy efficiency of Embedded DRAM Caches for High-end Computing Systems," in 23rd International ACM Symposium on High Performance Parallel and Distributing Computing (HPDC), 2014, pp. 99–110.

[30] S. Mittal and J. S. Vetter, ''A survey of techniques for modeling and improving reliability of computing systems,'' IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol. 27, no. 4, pp. 1226–1238, Apr. 2016.

[31] S. Kim et al., "Area efficient architectures for information integrity in cache memories," ACM SIGARCH Computer Architecture News, vol. 27, no. 2, pp. 246–255, 1999.

[32] W. Zhang et al., "ICR: In-Cache Replication for Enhancing Data Cache Reliability," in DSN, 2003, pp. 291–300.

[33] W. Zhang, "Replication cache: a small fully associative cache to improve data cache reliability," IEEE Transactions on Computers, vol. 54, no. 12, pp. 1547–1555, 2005.

[34] S. Mittal et al., "MASTER: A Multicore Cache Energy Saving Technique using Dynamic Cache Reconfiguration," IEEE Transactions on VLSI Systems, 2014.

[35] S. Mittal et al., "A Survey of Architectural Approaches for Managing Embedded DRAM and Non-volatile On-chip Caches," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 2014.

[36] S. Kim, "Area-efficient error protection for caches," in Design, automation and test in Europe, 2006, pp. 1282–1287.

[37] K. Lee et al., "Mitigating soft error failures for multimedia applications by selective data protection," in international conference on Compilers, architecture and synthesis for embedded systems, 2006, pp. 411–420.

[38] S. Kaxiras et al., "Cache decay: exploiting generational behavior to reduce cache leakage power," in International symposium on Computer architecture (ISCA), 2001, pp. 240–251.

[39] L. Li et al., "Soft error and energy consumption interactions: a data cache perspective," in International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED), 2004, pp. 132–137.

[40] B. T. Gold et al., "Mitigating multi-bit soft errors in L1 caches using last-store prediction," in Proceedings of the Workshop on Architectural Support for Gigascale Integration, 2007.

[41] I. Kadayif et al., "Modeling and improving data cache reliability," in ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, vol. 35, no. 1, 2007.

[42] V. Sridharan et al., "Reducing data cache susceptibility to soft errors," IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, vol. 3, no. 4, pp. 353–364, 2006.

[43] Shubu Mukhrejee, Architecture design for soft errors, Elsevier, 2008.

[44] S. Mukhejee, J. Emer, S.K. Reinhardt, The soft error problem: an architectural perspective, in: Proceedings of 11th International Symposium on High-performance Architecture, USA, 12–16 Feb, 2005, https://doi.org/10.1109/ HPCA.2005.37.

[45] A. Biswas *et al.*, "Computing architectural vulnerability factors for address-based structures," in *International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, 2005, pp. 532–543.

[46] M.H. Ahmadilivani, M.E. Salehi, M. Kargar, Effect of cache run-time parameters on the reliability of embedded systems, in: 2020 CSI/CPSSI International Symposium on Real-Time and Embedded Systems and Technologies (RTEST), Tehran, Iran, 10–11 Jun, 2020.

[47] Gem5 Simulator (2019). Gem5 home page [online]. Available: https://www.gem5. org/.

[48] Matthew R Guthaus, Jeffrey S Ringenberg, Dan Ernst, Todd M Austin, Trevor Mudge, and Richard B Brown. MiBench: A free, commercially representative embedded benchmark suite. In International Workshop on Workload Characterization, pages 3–14, 2001.

[49] F. Kriebel, A. Subramaniyan, S. Rehman, S. J. B. Ahandagbe, M. Shafique and J. Henkel, "R2Cache: Reliability-aware reconfigurable last-level cache architecture for multi-cores," *in proceedings of International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS)*, Amsterdam, Netherlands, 4-9 Oct. 2015.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 219-237

A Framework for Technology Priority-Setting Using Fuzzy Inference Systems (Case study: Information Technology in Iran)

Amir Khodadadi[1], Gholamali Montazer[2*], Sepehr Ghazinoory[3], Mohammad Hoseini Moghaddam[4]

[1] Ph.D. Student, Information Technology Management Group, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[2] Information Technology Engineering Group, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[3] Information Technology Management Group, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[4]Institute for Social and Cultural Studies (ISCS),Tehran, Iran

Received: 08 January 2025, Revised: 17 March 2025, Accepted: 25 March 2025
Paper type: Research

Abstract

Technology priority-setting is one of the most important aspects of science and technology policy-making. Due to their shortcomings, the existing methods and frameworks for technology priority-setting face limitations in providing policy recommendations to policymakers. One of these shortcomings is neglecting the future's uncertainties and the scenarios drawn for technological development. Another shortcoming is ambiguity among technological stakeholders regarding the parameters of evaluating technologies and their criteria. Fixing these defects requires revising the previous frameworks and introducing a new framework for priority-setting. On the other hand, considering the benefits of using intelligent systems in policymaking, the question is how to equip priority-setting with intelligence tools. In this article, by introducing a new framework for technology priority-setting that includes all three policy intelligence tools (forecasting, evaluation, foresight), the method of adding computational intelligence is explained with the help of fuzzy set theory. For this purpose, instead of conventional methods such as survey and multi-criteria decision-making, we use a fuzzy inference system to score the alternatives in the capability-attractiveness model, which helps to resolve the ambiguity of the range of criteria and provides a degree of intelligence for priority-setting. The criteria are also selected from among the dimensions of the uncertainty of the scenarios to consider the impact of future developments in the analysis of priorities. The achievement of the present research is an artifact that, with a degree of intelligence, can be used for information technology priority-setting at the national level.

Keywords: Technology Priority-setting, Capability-Attractiveness Criterion, Scenario Planning, Information Technology, Fuzzy Inference System.

* Corresponding Author's email: montazer@modares.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۲۱۹ الی ۲۳۷

اولویت‌گذاری هوشمند فنّاوری به کمک سامانهٔ استنتاج فازی (موردکاوی: فنّاوری اطلاعات در ایران)

امیر خدادادی[۱]، غلامعلی منتظر[۲*]، سپهر قاضی نوری [۳]، محمد حسینی مقدم[۴]

[۱] دانشجوی دکتری سیاستگذاری علم و فنّاوری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

[۲] گروه مهندسی فناوری اطلاعات، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

[۳] گروه مدیریت فناوری اطلاعات، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

[۴] گروه مطالعات آینده‌نگر، پژوهشگاه مطالعات فرهنگی، اجتماعی و تمدنی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

اولویت‌گذاری فنّاوری یکی از مهم‌ترین جنبه‌های سیاست‌گذاری علم و فنّاوری است. روش‌ها و چارچوب‌های موجود برای اولویت‌گذاری فنّاوری به دلیل نقایص موجود در آنها، در ارائهٔ توصیه‌های سیاستی به سیاست‌گذاران با محدودیت‌هایی مواجهند. یکی از این نقیصه‌ها، غفلت از عدم‌قطعیت‌های آینده و سناریوهایی است که برای توسعهٔ فنّاوری ترسیم می‌شود. نقیصهٔ دیگر، بروز ابهام در میان ذی‌نفعان فنّاوری نسبت به پارامترهای ارزیابی فنّاوری‌ها و معیارهای آنهاست. رفع این نقایص مستلزم تجدیدنظر در چارچوب‌های پیشین و معرفی چارچوب جدیدی برای اولویت‌گذاری است. از سوی دیگر، با توجه به مزایای بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند در سیاستگذاری، این سؤال مطرح است که چگونه می‌توان اولویت‌گذاری را به ابزارهای هوشمندی مجهّز کرد؟ در این مقاله، با معرفی چارچوب جدیدی برای اولویت‌گذاری فنّاوری که هر سه ابزار هوشمندی سیاستی(آینده‌نگاری، ارزیابی، پیش‌بینی) را در خود جای داده، نحوهٔ افزودن هوشمندی محاسباتی به کمک نظریهٔ مجموعه‌های فازی تبیین می‌شود. بدین منظور برای امتیازدهی به گزینه‌ها در الگوی جذابیت-توانمندی به جای روش‌های مرسومِ پیمایش و تصمیم‌گیری چندمعیاره، از سامانهٔ استنتاج فازی استفاده می‌کنیم که به رفع ابهام از محدودهٔ معیارها کمک می‌کند و درجه‌ای از هوشمندی را برای اولویت‌گذاری فراهم می‌کند. معیارها نیز از میان ابعاد عدم‌قطعیت سناریونگاری‌ها انتخاب می‌شوند تا تأثیر تحوّلات آینده در تحلیل اولویت‌ها مدنظر قرار گیرد. نتایج حاکی از این است که از بین پنج فنّاوری انقلاب صنعتی چهارم، فنّاوری هوش مصنوعی در کشور با وجود برخورداری از جذابیت بالا، توانمندی پایینی دارد و نیازمند توسعهٔ بیشتری از حیث توجه به ارتقای معیارهای توانمندی فنّاورانه است. دستاورد تحقیق حاضر، یک مصنوع است که با برخورداری از درجه‌ای از هوشمندی می‌تواند برای اولویت‌گذاری فنّاوری اطلاعات در سطح ملّی به کار رود.

کلیدواژگان: اولویت‌گذاری فنّاوری، معیار جذابیت-توانمندی، سناریونگاری، فنّاوری اطلاعات، سامانهٔ استنتاج فازی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: montazer@modares.ac.ir

۱- مقدمه

نیاز به اولویت‌گذاری در علم و فنّاوری از یک قرارداد اجتماعی نوین میان علم و فنّاوری و جامعه در زمینهٔ خلق دانش جدید سرچشمه می‌گیرد. به عبارت دیگر تعیین اولویت‌ها را می‌توان پاسخی دانست که نهاد سیاست‌گذار علم و فنّاوری به نیازها، انتظارات و چالش‌های جامعه می‌دهد. علم و فنّاوری از طریق تولید گونه‌های جدید دانش به نیازهای جامعه پاسخ می‌دهد و متقابلاً جامعه نیز به دلیل ظهور نیازهای جدید و متغیر، همواره پاسخ‌گویی به نیازها و حل مسائل جدید را از علم و فنّاوری می‌طلبد. اینکه پاسخ‌گویی به کدام دسته از نیازهای جامعه به بقیه برتری دارد و اینکه حل کدام دسته از مسائل پیش روی جامعه بر دیگران تقدم دارد، خردمایهٔ[1] اولویت‌گذاری است. بنابراین با توجه به اینکه فرایند و نتایج خلق دانش جدید، تحت تأثیر محیط بیرونی است، نیاز به فرایندی بازخوردی بین این دو وجود دارد[1]. اولویت‌گذاری را می‌توان فعالیتی در نظر گرفت که خردمایه و دید کلی به سیاست را از طریق شناسایی و برجسته کردن سازوکارهای سیاستی و هشدار دربارهٔ تغییرات سیاستی ایجاد می‌کند[2]. از سوی دیگر اولویت‌گذاری فرایند سیاستی پیچیده‌ای است که عوامل مختلفی در آن نقش دارند و بر یکدیگر تأثیر متقابل می‌گذارند. در فرایند انتخاب اولویت‌ها، تعارض‌های گوناگونی بین نیازهای اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و فرهنگی بروز می‌یابد؛ همین پیچیدگی‌هاست که کار اولویت‌گذاری را نیازمند سازماندهی خاص بر اساس بهره‌گیری از الگوها وتجارب متنوع کرده است. یکی از این پیچیدگی‌ها، بروز ابهام در بین ذی‌نفعان مختلف در خصوص معیارهای اولویت‌گذاری است. مفهوم ابهام و چگونگی مدل کردن آن یکی از شکاف‌های موجود در حوزهٔ اولویت‌گذاری علم و فنّاوری است که رفع آن کمک شایانی به افزایش دقت اسناد سیاستی در حوزهٔ علم‌وفنّاوری می‌کند. مقالهٔ حاضر در پی توسعهٔ دانش نظری و تجربی در زمینهٔ حل مسئلهٔ اولویت‌گذاری فنّاوری در سطح ملّی با استفاده از ابزارها و روش‌های هوشمند است. به همین دلیل، با مطالعهٔ چارچوب‌های موجود، نظریهٔ مجموعه‌های فازی به عنوان راه‌حل پیشنهادی در بخشی از چارچوب اولویت‌گذاری مورد استفاده قرارمی‌گیرد.

۲- پیشینهٔ پژوهش

مراد از «اولویت‌گذاری[2]»، تعیین و انتخاب آگاهانهٔ بخش‌های خاصی از صنعت، تحقیق و توسعه و نیز فنّاوری‌هایی است که نهادهای عمومی آنها را مهم و ضروری تشخیص داده و در توسعه، تجاری سازی و به‌کارگیری آنها با انواع ابزارها مداخله می‌کنند[3].

فرایند اولویت‌گذاری عمدتاً شامل دو مرحله است[4]:

الف-تعیین اولویت‌ها، که به فهرستی از حوزه‌های پژوهشی یا موضوعات فنّاورانه ختم می‌شود،

ب- پیاده‌سازی اولویت‌ها که از طریق دریافت، توسعه و انتخاب پیشنهاده‌های پژوهشی/فنّاورانه در راستای اولویت‌های تعیین‌شده در مرحلهٔ پیشین انجام می‌شود.

در واقع اولویت‌گذاری علم و فنّاوری شامل دو بُعد اصلی است[5]: بُعد اول تصمیم‌گیری دربارهٔ چگونگی تخصیص منابع با هدف تحقق اثربخشی، و بُعد دوم هماهنگ‌سازی بازیگران و فعالیت‌های مختلف سیاستگذاری علم و فنّاوری با هدف تحقق کارایی. این دو مرحله با توجه به اهداف و ضرورت‌ها، هر یک نیازمند الگوی روش‌شناختی خاص خود است: مرحلهٔ تعیین اولویت‌ها به طور معمول نیازمند روش‌های مسئله‌یابی برای توصیف اهداف و موضوعات فنّاورانه است اما مرحلهٔ پیاده‌سازی به نوبهٔ خود نیازمند توان ارزیابی پیشنهاده‌ها طبق شاخص‌هایی مشخص است. با این حال، مرحلهٔ تعیین اولویت‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است زیرا نتایج این مرحله اثر مهمی بر انواع پیشنهاده‌های دریافتی دارد[5]. جدول ۱ دسته‌بندی مطالعات انجام شده در حوزهٔ اولویت‌گذاری علم و فنّاوری را نشان می‌دهد.

جدول ۱. پیشینهٔ پژوهش در اولویت‌گذاری علم‌وفنّاوری(یافته‌های محقق)

محور مطالعاتی		پژوهش‌های مرتبط
تهیهٔ فهرست فنّاوری‌های کلیدی/حیاتی		(Georghiou & Harper, 2011) [6]
تمرکز بر فرایند تعیین اولویت‌ها		NSB, 2001) [7](Rosenstock et al., 1998)[8](
مطالعهٔ موردی اولویت‌گذاری در یک کشور یا یک صنعت خاص		Benner, 2012)[9](Bengisu, 2003)[10](Suh, 1994)[11](Haan, 2015)[12](Stenberg, 2009)[13](
مقایسه‌های تطبیقی بین کشورها		BILAT-USA, 2012)[14](Gassler, 2004)[15](Sokolov, et al., 2018)[16](
روش‌های به‌کار رفته در اولویت‌گذاری	تصمیم‌گیری چندمعیاره	Salo et al,2003)[17](
	ارزش‌گذاری پژوهش	(Fleurence & Torgerson, 2004) [18]
	مدیریت سبد	(McGeary, 1996) [19]
ترکیب اولویت‌گذاری و روش‌های آینده-نگاری		Cuhls, 2004) [20](Glod et al, 2008) [21](Haegman, et al., 2015 [22] Hashemkhani , 2015 [23]
اولویت‌گذاری با تمرکز بر مسائل جهانی و چالش‌های ملّی		Jarvis , 2019)[24](Moore et al, 2018)[25](Shepherd et al, 2020)[26](

[1] Rationale

[2] Priority Setting

در تحقیق حاضر در پی پاسخ به این سؤال هستیم که چارچوب‌های پیشین اولویت‌گذاری چه ویژگی‌هایی دارند و نقایص آنها چیست؟ رفع این نقایص مستلزم چه تجدیدنظری در این چارچوب‌هاست و به ویژه ارتباط آنها با مفهوم هوشمندی، اقسام و ابزارهای آن چیست و چگونه می‌توان این چارچوب‌ها را به ابزارهای هوشمندی مجهز کرد؟

۳- هوشمندی در اولویت‌گذاری

مفهوم «هوشمندی[1]» با رویکردهای روانشناسانه یا فرهنگی در سطوح فردی و سازمانی به تفصیل در بین محققان مختلف مطرح شده و به خلق مفاهیمی چون «هوش عام[2]»، «هوش انطباقی[3]»، «هوش سازمانی[4]»، «هوش راهبردی[5]»، «هوش تاکتیکی[6]» و ... منجر شده است. در حکمرانی و سیاستگذاری علم و فنّاوری در سطح ملّی، مفهومی با عنوان «هوشمندی سیاستی[7]» یا «هوشمندی راهبردی در سیاست‌گذاری[8]» مطرح می‌شود که هدف از آن عبارت است از: جستجو، پردازش، تحلیل هوشمند، خلق، حفاظت و اشاعهٔ اطلاعات راهبردی و انتقال آنها به فرد/نهاد مناسب در زمان مناسب برای اتخاذ سیاستی مناسب [27]. به عبارت دیگر، هوشمندی راهبردی در سیاست‌گذاری به فرایند مستمر جمع‌آوری اطلاعات قانونی و اخلاقی، تجزیه و تحلیل هوشیارانهٔ آنها و انتشار کنترل‌شدهٔ هوشمندی سطح عملیاتی به سیاست‌گذاران اطلاق می‌شود[28]. هوشمندی راهبردی سبب ایجاد سه قابلیت در سیاست‌گذاری می‌شود[29] :

الف) درک وابستگی‌ها به مسیر، انگیزه‌های متنوع و همچنین اولویت‌ها و قابلیت‌ها در موقعیت‌های سیاست‌گذاری؛

ب) درک عناصر ناسازگار، مخرب، نوآیند و شگفتی‌سازهای ممکن در این موقعیت‌ها؛

ج) درک سناریوها، راهبردها و چشم‌اندازهای جایگزین برای مدیریت عوامل کلیدی در موقعیت‌های سیاست‌گذاری.

پیش‌بینی فنّاوری[9]، ارزیابی فنّاوری[10] و آینده‌نگاری[11] برخی از مهم‌ترین ابزارهای هوشمندی سیاستی هستند که با توجه به جدول ۲ می‌توان به مقایسهٔ آنها پرداخت [27, 28, 30].

جدول۲. مقایسه ابزارهای مختلف هوشمندی راهبردی در سیاستگذاری [28]

ابزارهای هوشمندی	هدف	زمینه‌های استفاده	نوع موضوعات مورد توجه	نتایج
پیش‌بینی فنّاوری	ویژگی آتی مکانیزم‌های فنّاورانه، رویه‌ها و فنون کلیدی	انسجام‌بخشی به چارچوب فنّاورانه، کاربرد در بخش خصوصی	شرایط و پیامدهای عام توسعهٔ فنّاوری، شناسایی پیشرفت‌های عمده و هشدارهای زودهنگام در یک چارچوب فنّاورانهٔ خاص	شناسایی پیشرفت‌های عمده و هشدار زودهنگام
ارزیابی فنّاوری	اثرات فنّاورانه، اجتماعی، اقتصادی، محیطی و انسانی یک فنّاوری خاص؛ پشتیبانی از سیاست‌ها	تمرکز بر فنّاوری یا مسئله‌ای خاص، کاربرد در ارائهٔ مشاوره به مجالس قانونگذاری ملّی کشورها	قابلیت‌های یک فنّاوری خاص یا مشکلات ناشی از آن؛ گاهی نیز با یک نیاز عمومی بنیادی مرتبط است	تدوین سیاست‌های یکپارچهٔ علم و فنّاوری برپایهٔ دانش دقیق
آینده‌نگاری فنّاوری	چشم‌اندازهای بلندمدت از آینده علم و فنّاوری از طریق شناسایی حوزه‌های راهبردی	پشتیبانی از سیاستگذاری ملّی یا فراملّی	آثار گسترده‌تر توسعهٔ فنّاوری، شناسایی پیشزفت‌ها و هشدار زودهنگام در بافتی گسترده‌تر، شناسایی موضوعات دارای اثرات متقابل	جلوگیری از بروز خطاهای ناشی از در نظرنگرفتن پیچیدگی‌های پیشرفت و تأثیرات جانبی ناشی از یک تصمیم

از سوی دیگر، تعیین اولویت‌های علم و فنّاوری با استفاده از روش‌هایی انجام می‌شود که ذیل روش‌های آینده‌نگاری قرار می‌گیرند [31]. یکی از این روش‌ها، روش «فنّاوری‌های حیاتی[12]» است که مبتنی بر «الگوی توانمندی-جذابیت[13]» به ارزیابی فنّاوری می‌پردازد [32]. در واقع اولویت‌گذاری علم و فنّاوری به دلیل بهره‌گیری از ابزارهای هوشمندی سیاستی (آینده‌نگاری فنّاوری و ارزیابی فنّاوری) نشانه‌ای از هوشمندی راهبردی در سیاستگذاری

[1] Intelligence
[2] General Intelligence
[3] Adaptive Intelligence
[4] Organizational Intelligence
[5] Strategic Intelligence
[6] Tactical Intelligence
[7] Policy Intelligence
[8] Strategic Intelligence in Policy Making
[9] Technology Forecast
[10] Technology Assessment
[11] Foresight
[12] Critical Technologies
[13] Capability-Attractiveness Model

است اما لزوماً در فرایند خود هوشمند نیست. فرایند اولویت‌گذاری به خصوص زمانی که از مدل جذابیت-توانمندی بهره می‌برد، مبتنی بر محاسبات است. در اینجا لازم است به تفاوت میان هوشمندی سیاستی و هوشمندی محاسباتی[1] دقت شود. در سال ۱۹۹۲ میلادی، در سه کنفرانس همزمان در اروپا، ژاپن و ایالات متحده، سه زمینهٔ «نظریهٔ مجموعه‌های فازی[2]»، «شبکه‌های عصبی[3]» و «محاسبات تکاملی(الگوریتم ژنتیک)[4]» ادغام شدند و از آن زمان تاکنون ذیل عنوان کلی «هوش محاسباتی[5]» طبقه‌بندی می‌شوند [33].

در اولویت‌گذاری، ابزاری که می‌تواند اولویت‌های موضوعی[6] و کارکردی[7] را به طور همزمان در نظر بگیرد، «ماتریس توانمندی-جذابیت[8]» است. مزیت این ماتریس این است که به ارائهٔ فهرست فنّاوری‌ها اکتفا نمی‌کند بلکه راهبرد فنّاوری‌ها را نیز تعیین می‌کند. وجه تمایز این ماتریس با برخی ابزارهای تحلیل راهبردی مشابه مانند تحلیل «اجتماعی-فنّاوری-اقتصادی-زیست‌محیطی-سیاسی-ارزش‌ها (STEEPV)» و تحلیل «قوّت-ضعف-فرصت-تهدید (SWOT)» پرداختن به سیاست‌های خاص(معطوف به هر حوزهٔ فنّاوری) به جای سیاست‌های عام(مستقل از حوزه‌های فنّاوری) است. به علاوه، واحد تحلیل ماتریس جذابیت-توانمندی، «یک فنّاوری خاص» است در حالی که واحد تحلیل SWOT «یک بنگاه/کشور» است؛ واحد تحلیل STEEPV نیز «یک یا چند پارامتر» است. البته ماتریس جذابیت-توانمندی و تحلیل قوّت-ضعف-فرصت-تهدید (SWOT) به طور مستقیم راهبردها را تعیین می‌کنند در حالی که تحلیل STEEPV از طریق پیش‌بینی، به طور غیرمستقیم به تعیین راهبردها کمک می‌کند. از سوی دیگر، ماتریس جذابیت-توانمندی می‌تواند تعدادی از فنّاوری‌ها را مقایسه و اولویت آنها را نسبت به یکدیگر با تعیین راهبرد هر یک مشخص کند؛ لذا می‌توان گفت ماتریس جذابیت-توانمندی ابزاری مناسب برای اولویت‌گذاری است[34-35].

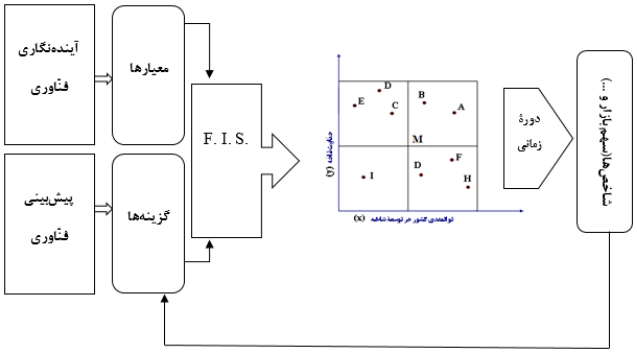
به‌رغم مزایای پیش‌گفته، یکی از کاستی‌های ماتریس جذابیت-توانمندی، به روش‌های امتیازدهیِ کاربردی در آن مربوط می‌شود. محاسبهٔ امتیاز جذابیت و توانمندی گزینه‌ها (فنّاوری‌ها) به‌طور معمول با روش‌هایی چون تصمیم‌گیری چندمعیاره یا نظرسنجی از خبرگان و ... حاصل می‌شود. با این فرض که بتوان معیارهای جذابیت و توانمندی را به صورت شاخص‌های کمّی بیان کرد، امتیازدهی خبرگان به این شاخص‌ها ممکن است با بروز ابهام در میان آنها همراه باشد. این ابهام به تعریف هر خبره از محدودهٔ امتیازهای کمّی هر شاخص برمی‌گردد. رفع این ابهام با اطلاق عنوان «متغیّر زبانی» به شاخص‌ها و تعریف قواعد «اگر-آنگاه» امکان‌پذیر می‌شود و ابزار آن سامانهٔ استنتاج فازی[9] در نظریهٔ مجموعه‌های فازی[10] است[36-37]. خروجی این سامانه، «امتیاز»های جذابیت و توانمندی هر فنّاوری و در نتیجه، «موقعیت» آن فنّاوری در فضای جذابیت-توانمندی است. هوشمندی این سامانه از آنجا ناشی می‌شود که توانایی استفاده از دانش و روش‌های استنتاج برای حل مسائلی را دارد که به دلیل مشکل بودن، نیاز به تجربه و مهارت انسان دارند. ازسوی دیگر، هوشمندی این سامانه ناشی از استفاده از فنّاوری‌های هوش مصنوعی در طرّاحی سامانه است، زیرا طرّاحی سامانه‌های هوشمند ناشی از دو رویکرد اصلی است [38-39]: هوش مصنوعی انسان‌گرا[11] و هوش مصنوعی منطق‌گرا[12]. هوش مصنوعی انسان‌گرا ماشین‌هایی را مطالعه می‌کند که مانند انسان فکر و عمل می‌کنند؛ در مقابل، هوش مصنوعی منطق‌گرا ماشین‌هایی را بررسی می‌کند که می‌توانند براساس درک رفتار هوشمند انسان ساخته شوند. هوش مصنوعی انسان‌گرا هنر خلق ماشین‌هایی است که عملکردهایی را انجام می‌دهند که در صورت انجام توسط افراد، نیاز به هوش دارند. این مطالعه در مورد چگونگی ساخت رایانه‌ها برای انجام کارهایی است که در حال حاضر افراد(انسان‌ها) در آن بهتر هستند. هوش مصنوعی منطق‌گرا به دنبال توضیح و تقلید رفتار هوشمند از نظر فرایندهای محاسباتی است[38-39]. از این رو می‌توان گفت در تحقیق حاضر، هوشمندیِ اولویت‌گذاری از نوع هوش مصنوعی منطق‌گرا است.

نکتهٔ دیگر دربارهٔ کاستی‌های ماتریس توانمندی-جذابیت، این است که اولویت‌گذاری فنّاوری نوعی مداخله در توسعهٔ فنّاوری است و می‌تواند وضعیت توسعهٔ فنّاوری و در نتیجه شاخص‌هایی مثل بودجهٔ تخصیصی به موضوعات، سهم بازار و میزان تمرکز سازمان‌ها بر موضوعی خاص را تحت تأثیر قرار دهد. چنانچه وضعیت این شاخص‌ها در شرایط مداخله و عدم مداخله یکسان باشد یا مداخله تأثیری در وضعیت این شاخص‌ها نداشته باشد، به معنی آن است

[1] Computational Intelligence
[2] Fuzzy Sets Theory
[3] Neural Nets
[4] Evolutionary Computing (Genetic Algorithms)
[5] Computational intelligence
[6] Thematic Priorities
[7] Functional Priorities
[8] Capability-Attractiveness Matrix
[9] Fuzzy Inference System
[10] Fuzzy Sets Theory
[11] Humanistic AI (HAI)
[12] Rationalistic AI (RAI)

که اهداف و نتایج مورد انتظار از اولویت‌گذاری محقق نشده است. به عبارت دیگر چارچوب اولویت‌گذاری باید توأم با ارزیابی اولویت‌ها باشد تا در صورت انحراف شاخص‌ها از آنچه مطلوب مداخله‌گر بوده، اقدام اصلاحی ناظر به معیارهای جذابیت و توانمندی یا ابعاد عدم قطعیت آینده و یا گزینه‌ها انجام شود. این ارزیابی به صورت یک حلقهٔ بازخورد در چارچوب اولویت‌گذاری نقش دارد.

با توجه به آنچه بیان شد، به منظور رفع کاستی‌های ماتریس جذابیت-توانمندی در این مقاله چارچوب جدیدی مطابق شکل ۱ معرفی می‌شود.



شکل ۱. چارچوب پیشنهادی اولویت‌گذاری فنّاوری

مهم‌ترین ویژگی‌های این چارچوب به شرح زیر است:

۱- گزینه‌های فنّاوری را با استفاده از روش‌های پیش‌بینی فنّاوری به دست می‌آورد.

۲- معیارهایی را از آینده‌نگاری‌های فنّاوری برای جذابیت و توانمندی استخراج می‌کند.

۳- امتیاز هر گزینه از لحاظ عوامل جذابیت و توانمندی با طرّاحی سامانهٔ استنتاج فازی تعیین‌می‌شود و این سامانه، موقعیت هر فنّاوری را در ماتریس جذابیت-توانمندی تعیین می‌کند.

۴- پس از یک دورهٔ زمانی با اندازه‌گیری شاخص‌هایی چون سهم بازار، اولویت‌های تعیین شده ارزیابی می‌شوند و در صورت نیاز، اقدام اصلاحی ناظر به «معیارها» یا «گزینه‌ها» انجام می‌شود.

شایان ذکر اینکه چارچوب شکل ۱ علاوه بر بهره‌گیری از سه ابزار هوشمندی سیاستی(پیش‌بینی فنّاوری، آینده‌نگاری و ارزیابی فنّاوری با الگوی جذابیت-توانمندی)، در پرتو به کار بردن سامانهٔ استنتاج فازی، از هوشمندی محاسباتی نیز در فرایند خود برخوردار است.

۴- شناسایی معیارهای توانمندی و جذابیت فنّاوری اطلاعات

در مقالهٔ حاضر، به عنوان مطالعهٔ موردی بر فنّاوری اطلاعات تمرکزشده‌است. در مرور متون مربوط به سناریوهای آیندهٔ فنّاوری اطلاعات، چهار دسته پژوهش قابل شناسایی است: دستهٔ اول پژوهش‌هایی است که تغییر سبک زندگی و کارکردن مردم در اثر توسعهٔ فنّاوری اطلاعات را مطالعه کرده‌اند. دستهٔ دیگر، به تحوّلات حکمرانی تحت تأثیر فنّاوری اطلاعات پرداخته‌اند و دستهٔ سوم، تأثیر فنّاوری اطلاعات بر مقولهٔ توسعه را بررسی کرده‌اند. برخی پژوهش‌ها نیز بر خلاف سه دستهٔ قبلی، به مطالعهٔ آیندهٔ فنّاوری اطلاعات متأثر از تحوّلات اجتماعی پرداخته‌اند. در جدول ۳ مهم‌ترین پژوهش‌های هردسته خلاصه شده است.

طبق چارچوب شکل ۱، به جستجوی معیارهایی از جدول ۳ برای جذابیت و توانمندی می‌پردازیم که دربرگیرندهٔ مفاهیمی جامع بوده، مناسب برای اولویت‌گذاری فنّاوری اطلاعات در سطح ملّی باشند. با این شرط، ابعاد عدم قطعیت هر دسته از پژوهش‌های جدول ۳ را غربال می‌کنیم. از میان پژوهش‌های دستهٔ اول، پژوهش «سناریوهای اینترنت برای مردم» ابعاد عدم قطعیتی را به عنوان معیارهای سناریونویسی برای آینده در نظر گرفته است که دربردارندهٔ مفاهیمی کلان بوده و مناسب تصمیم‌گیری‌های سطح ملّی هستند. این دو بُعد عدم قطعیت عبارتند از: «بوم‌سازگان نوآوری» و «بافت اجتماعی». در بین پژوهش‌های دستهٔ دوم، پژوهش «سناریوهای تأثیر فنّاوری اطلاعات بر حکمرانی و سیاستگذاری» و ابعاد عدم قطعیت آن یعنی «یکپارچگی هوشمندی سیاستی» و «نظام ارزشی-اجتماعی» از جامعیت لازم برای کاربرد در اولویت‌گذاری فنّاوری در سطح ملّی برخوردارند. در میان پژوهش‌های دستهٔ سوم، پژوهش«سناریوهای تحوّل و توسعهٔ جهانی در اثر دیجیتالی‌شدن» با نگرشی فرابخشی، ابعاد عدم‌قطعیتی با عنوان «تأثیر قلمرویی تغییر» و «مشارکت اجتماعی» را مبنای سنجش آینده قرارداده‌است که عناوینی کلان محسوب می‌شوند.

جدول ۳ دسته‌بندی پژوهش‌های مربوط به سناریوهای آیندهٔ فنّاوری اطلاعات [40]

	موضوع پژوهش	ابعاد عدم‌قطعیت	حیطهٔ موضوعی
دسته اول	سناریوهای آیندهٔ فنّاوری اطلاعات و رسانه در یکی از شهرهای آلمان	- باز بودن به روی نوآوری - همراهی و همبستگی اجتماعی	تأثیر فنّاوری اطلاعات بر سبک زندگی فردی و اجتماعی
	سناریوهای پیکربندی مجدد شهری با ظهور زیرساخت همتابه‌همتا	- کنترل متمرکز یا توزیع یافتهٔ زیرساخت - انباشت/چرخش سرمایه و کمون	
	سناریوهای آیندهٔ سالمندی در محیط‌های هوشمند	- انتخاب انفرادی دربارهٔفنّاوری - یکپارچگی اجتماعی	
	سناریوهای اینترنت برای مردم	بوم‌سازگان نوآوری و بافت‌اجتماعی	
دسته دوم	سناریوهای آیندهٔ سیاستگذاری صنعت ساخت‌وساز در فرایند دیجیتالی‌شدن	- تمرکز تصمیم‌گیری - بازبودن انتشار اطلاعات	تأثیر فنّاوری اطلاعات بر حکمرانی دولت
	سناریوهای تأثیر «نوآوری‌های دیجیتالی اجتماعی» بر حکمرانی شهری	- سطح شمول دیجیتالی - وجود و عملکرد چشم‌انداز مشترک	
	سناریوهای تأثیر فنّاوری اطلاعات بر حکمرانی و سیاستگذاری	- یکپارچگی هوشمندی سیاستی - نظام ارزشی‌اجتماعی	
دسته سوم	سناریوهای دیجیتالی‌شدن در توسعهٔ بخش کشاورزی اروپا	- محیط مساعد فنّاوری - همگنی نهادها و فنّاوری‌ها	تأثیر فنّاوری اطلاعات بر توسعهٔ جوامع
	سناریوهای تحوّل و توسعهٔ بخش حمل-ونقل جاده‌ای بار در اثر دیجیتالی‌شدن	- گفتمان جدید یا قدیم پایداری - سازمان صنعتی یا شبکه‌ای	
	سناریوهای تحوّل و توسعهٔ جهانی در اثر دیجیتالی‌شدن	- تأثیر قلمرویی تغییر - مشارکت اجتماعی در اولویت-بندی اهداف تغییر	
دسته چهارم	چگونگی شکل‌گیری جنبه‌های افق ۲۰۲۰ اروپا برای پشتیبانی از توسعهٔ ظرفیت پژوهش و نوآوری در ده موضوع کلیدی فنّاوری دیجیتالی	- وضعیت رشد اقتصادی - میزان هماهنگی بخش خصوصی/عمومی و امکان ظهور سیاست‌های آینده از فرایندی تکاملی یا برنامه‌ریزی‌شده	تأثیر تحوّلات اجتماعی بر فنّاوری اطلاعات

مفهوم «بوم‌سازگان» به وجود مبنای مناسب برای خلّاقیت و چگونگی تأمین آن اشاره‌دارد و پاسخگوی این پرسش‌هاست: آیا منابع کافی برای ایده‌های جدید، فنّاوری‌های دیجیتالی و نوآوری و پشتیبانی از آنها وجود دارد؟ این موضوع چگونه مدیریت می‌شود؟ آیا حکمرانی و تسهیل منابع، توسط یک قدرت مرکزی انجام می‌شود یا به صورت غیرمتمرکز و خودگردان مدیریت می‌شود؟ آیا آزادی کافی برای خلّاقیت وجود دارد یا مداخلهٔ دولت و عوامل بیرونی، خلاقیت را متوقف یا برای آن مانع ایجاد می‌کنند؟

مفهوم «بافت اجتماعی» شامل عواملی مانند مشارکت اجتماعی است و با توسعهٔ مدل‌های اجتماعی کسب‌وکار و چگونگی ارزش-گذاری آن قرابت دارد و پاسخگوی این پرسش‌هاست:ما دربارهٔ چه چیزی دغدغه داریم و به چه چیز ارزش می‌نهیم؟ از سوی دیگر، بافت اجتماعی شامل استفاده از فنّاوری برای ایجاد پیوندهای قوی و اصیل با دیگران می‌شود که می‌تواند افراد را به یکدیگر نزدیک‌تر کند یا تنهایی و جدایی آنها را بیشتر کند. بنابراین بافت اجتماعی می‌تواندجداازهم[1]، ناپیوسته[2]، منفرد[3] و فردگرا[4] باشد یا در مقابل، متّصل[5]، همکارانه[6] و جامعه‌محور[7] لحاظ شود. «نظام ارزشی-

[1] Separated
[2] Disconnected
[3] Isolated
[4] Over-individualistic
[5] Connected
[6] Cooperative
[7] Community oriented

اجتماعی» به ویژگی‌هایی چون باز بودن و شفافیت در یک جامعه از لحاظ حکمرانی دموکراتیک و مشارکتی مربوط می‌شود که فنّاوری اطلاعات بر میزان آن اثرگذار خواهد بود. بازترین و شفاف‌ترین جامعه، جامعه‌ای است که حتی کارکردهای سنّتی دولت نیز به طور کامل با بازیگران غیردولتی جایگزین شوند، بنابراین نظام ارزشی-اجتماعی می‌تواند فراگیر، باز و شفاف یا در مقابل، انحصاری، بسته و شکننده باشد.

«هوشمندی سیاستی» به یکپارچگی داده و دانش و چگونگی تسهیل مشارکت بین همهٔ ذی‌نفعان در طراحی سیاست و سازوکارهای تصمیم‌گیری بازمی‌گردد. این مفهوم عبارت است از امکان ترکیب داده و اطلاعات در دسترس از منابع مختلف به «شیوه‌ای هوشمند» (یعنی مؤثر، کارا و قادر به تولید ارزش عمومی).

«تأثیرقلمرویی تغییر» به تفاوت و تضادّ نسخه‌هایی از توسعه اشاره دارد که برخلاف نسخه‌های جهانی و صنعت‌محور، بر شرایط و نیازهای جوامع محلّی تأکیدمی‌کنند. روی این محور، «پروژهٔ فنّاوری اطلاعات برای توسعه[1]» که بر نیازهای جامعه تأکیدمی‌کند، در مقابل پروژهٔ جامع، جهانی، دولت و صنعت‌محور راهبردی مانند «برنامهٔ فنّاوری اطلاعاتی سوئد برای مناطق در حال توسعه[2]» قرارمی‌گیرد.

«میزان مشارکت اجتماعی در اولویت‌بندی اهداف تغییر» به تضادّ نسخه‌هایی از توسعه می‌پردازد که رویکردی فراگیر (درمقابل رویکردی انحصاری) دارند. بر این محور، دو دسته رهیافت در مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند: یک دسته رهیافت‌های فراگیر مانند آنهایی که از نشانگرهای اهداف توسعهٔ پایدار الهام گرفته و نیازهای همه را بخشی از فرایند تصمیم‌گیری قرارمی‌دهند و دستهٔ دیگر رهیافت‌های انحصاری مانند انقلاب‌صنعتی‌چهارم که بر مصرف‌کنندگان در کشورهای با درآمد بالا تمرکز دارند.

سه بعد «بوم‌سازگان نوآوری»، «یکپارچگی هوشمندی سیاستی» و «تأثیر قلمرویی تغییر» را می‌توان مصداق یا بیانی از زیرساخت و امکان‌پذیری یا توانمندی در نظر گرفت و سه بعد «بافت اجتماعی»، «نظام ارزشی-اجتماعی» و «مشارکت اجتماعی در اولویت‌بندی اهداف تغییر» مصادیقی از جذابیت فنّاوری محسوب می‌شوند.

بنابراین ابعاد عدم قطعیت را می‌توان به صورت معیارهای توانمندی و جذابیت در قالب جدول ۴ بیان کرد.

جدول۴ معیارهای جذابیت/ توانمندی معادل ابعاد عدم قطعیت

بعد عدم قطعیت	معیار توانمندی/جذابیت متناظر
بوم‌سازگان	زیرساخت مناسب خلّاقیت و نوآوری
بافت اجتماعی	انسجام اجتماعی
یکپارچگی هوشمندی سیاستی	توانمندی ترکیب هوشمندانهٔ داده و اطلاعات
نظام ارزشی اجتماعی	شفافیت و باز بودن در حکمرانی
تأثیر قلمرویی تغییر	وجود زیرساخت‌های اولیهٔ‌توسعه
مشارکت اجتماعی	افزایش مشارکت اجتماعی

معیارهای جدول ۴ اگر در حد مفاهیم کیفی باقی بمانند، نمی‌توانند مورد استفادهٔ سیاست‌گذاران قرارگیرند. می‌توان این معیارها را متناظر با برخی شاخص‌های کمّی دانست که آمار آن به صورت سالانه توسط مراجع جهانی (مثل بانک جهانی و مجمع جهانی اقتصاد) منتشر می‌شود و به این ترتیب به جای کار با مفاهیم کیفی، با مقادیر کمّی سروکار خواهیم داشت.

جدول ۵ نزدیک‌ترین شاخص‌های کمّی متناظر با معیارهای کیفی را بیان می‌کند و نشان می‌دهد هر یک از شاخص‌های کمّی، که متغیری زبانی محسوب می‌شوند، نمایندهٔ کدام معیارهای کیفی جذابیت و توانمندی است.

در این مقاله امتیاز جذابیت و توانمندی پنج فنّاوری زیر را که طبق پیش‌بینی‌های متعددی به عنوان مهمترین فنّاوری‌های پشتیبان انقلاب صنعتی چهارم نقش مهمی در شکل‌دهی به تحوّلات فنی-اجتماعی دارند[42-41]، محاسبه خواهیم کرد:

الف. حوزه فنّاوری و کاربردهای کلان داده[3]

ب. حوزه فنّاوری و کاربردهای اینترنت اشیا[4]

ج. حوزه فنّاوری و کاربردهای هوش مصنوعی[5]

د. حوزهٔ فنّاوری و کاربردهای رایانش ابری[6]

ه. حوزه فنّاوری و کاربردهای زنجیرهٔ بلوکی[7].

[1] ICT for development (ICT4D)
[2] Swedish Programme for ICT in Developing Regions (SPIDER)
[3] Big Data
[4] Internet of Things
[5] Artificial Intelligence
[6] Cloud Computing
[7] Blockchain

جدول۵. معیارهای کیفی جذابیت و توانمندی به همراه متغیر زبانی (کمّی) متناظر آنها

	معیارها	شاخص‌ها (متغیرزبانی)	مرجع
توانمندی	وجود زیرساخت مناسب برای خلّاقیت و نوآوری	بوم‌سازگان نوآوری (IE)	[43]
	توانمندی ترکیب هوشمندانهٔ داده-ها و اطلاعات در حکمرانی	کیفیت مقررات‌گذاری (RQ)	[44]
	وجود زیرساخت-های اولیهٔ توسعه	زیرساخت (Inf)	[43]
جذابیت	افزایش انسجام اجتماعی	سرمایهٔ اجتماعی (SC)	[43]
	افزایش شفافیت و باز بودن در حکمرانی	شفافیت (معادل شاخص کمّی وقوع فساد) (Tr)	[43]
		دولت باز (OG)	[45]
	افزایش مشارکت اجتماعی	مشارکت مدنی (CP)	[45]

صحّه‌گذاری معیارهای جدول ۵ با نظرسنجی از خبرگان انجام شد. بدین منظور، پرسشنامه‌ای (مطابق پیوست ۲) تهیه شد و در آن از خبرگان خواسته شد نظر خود را در خصوص معیارها و انتساب آنها به توانمندی/جذابیت در قالب طیف لیکرت (کاملاًموافقم، موافقم، نظری‌ندارم، مخالفم، کاملاًمخالفم) بیان کنند. در خصوص هر معیار، حداقل ۸۵ درصد از پاسخ‌دهندگان گزینهٔ «کاملاًموافقم» و «موافقم» را انتخاب کردند. این بدان معنی است که بیش از ۸۵ درصد خبرگان با جدول ۵ موافق بوده‌اند. یادآوری می‌شود جامعهٔ آماری این نظرسنجی شامل خبرگان حوزهٔ سیاستگذاری علم و فنّاوری، مدیریت فنّاوری و مهندسان فنّاوری اطلاعات بود که تعداد ۳۶ نفر از آنها در این نظرسنجی شرکت کردند.

۵- روش‌شناسی

پارادایم تحقیق حاضر، علم طراحی[1] و هدف آن، تجویز چارچوبی برای اولویت‌گذاری است که ضمن بهره‌مندی از ابزارهای هوشمندی سیاستی، از هوشمندی محاسباتی نیز برخوردار باشد. فرایند تحقیق شامل مراحل شناسایی و تبیین مسئله، شناسایی مصنوع (مدل)، طراحی و توسعهٔ مصنوع و در نهایت ارزیابی مصنوع و نتیجه‌گیری است[46]. این گام‌ها را می‌توان در جدول ۶ نشان داد:

جدول۶. مراحل پژوهش براساس علم طرّاحی

گام‌های علم طراحی	تطبیق با پژوهش حاضر
شناسایی مسئله	ادراک نقایص چارچوب‌های پیشین اولویت‌گذاری
فهم مسئله	نیاز به مدل کردن ابهام خبرگان
مرور پیشینه	نقش پارامترهای جذابیت و توانمندی
شناسایی مصنوع	استفاده از نظریه مجموعه‌های فازی
پیشنهاد مصنوع مناسب	سامانهٔ خبرهٔ فازی
طراحی مصنوع	مراحل فازی‌گری، پایگاه دانش، موتوراستنتاج و وافازی‌گری
توسعه مصنوع	ورودی: معیارهای شناسایی شده خروجی: جذابیت/توانمندی
ارزیابی مصنوع	مقایسه با: روش‌های دیگر/تحقیقات مشابه قبلی
تصریح یادگیری	مفهوم هوشمندی در اولویت‌گذاری
نتایج	حوزه‌های اولویت‌دار فنّاوری اطلاعات
تعمیم به طبقه‌ای از مسائل	پارامترهای دیگر/فنّاوری‌های دیگر

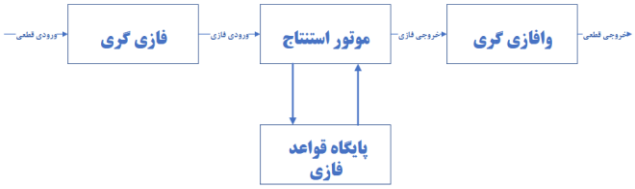
این پژوهش دارای جهت‌گیری کاربردی است زیرا نتایج آن می‌تواند در تعیین اولویت‌های علم و فنّاوری کشور برای افق‌های زمانی متفاوت به‌کارگرفته‌شود. همچنین پژوهش از لحاظ کمّی یا کیفی بودن، ترکیبی است؛ بدین‌منظور از رویکرد استنتاجی[2] و راهبردهای مختلف پژوهش (مطالعات کتابخانه‌ای و مطالعات میدانی) استفاده می‌شود. بازهٔ زمانی تحقیق تک‌مقطعی و ابزارهای گردآوری داده‌ها عبارتند از: اسناد و مدارک، مصاحبه و پرسشنامه.

۶- طرّاحی سامانهٔ استنتاج فازی

مشکل معیارهای جذابیت و توانمندی تنها با کمّی‌سازی آنها حل نمی‌شود بلکه مشکل اصلی، ناتوانی چارچوب جذابیت-توانمندی در مدل کردن ابهام موجود در بین خبرگان در تفسیر مقادیر شاخص‌هاست. راه حل این موضوع، مدل‌سازی آنها بر اساس نظریهٔ مجموعه‌های فازی است. در این صورت می‌توان برای محاسبهٔ امتیاز دو پارامتر جذابیت و توانمندی دو سامانهٔ استنتاج فازی طرّاحی کرد که هوشمندی مدنظر چارچوب شکل ۱ را نیز تأمین می‌کند.
اجزای یک سامانهٔ استنتاج فازی مطابق شکل ۲ نشان داده می‌شود.

[1] Design Science

[2] Abductive



شکل۲. معماری سامانهٔ استنتاج فازی [36,37]

در این سامانه، مقادیر عددی شاخص‌های کمّی به صورت ورودی‌هایی قطعی وارد فرایند فازی‌گری[1] شده و تبدیل به مقادیر فازی می‌شوند. سپس با اعمال قواعد پایگاه دانش[2] بر این مقادیر فازی با استفاده از یک موتور استنتاج[3] مناسب، خروجی‌هایی فازی به دست می‌آیند که در نهایت طی فرایند وافازی‌گری[4] به خروجی‌هایی قطعی تبدیل خواهند شد[33, 36, 37]. در ادامه هر یک از این مراحل به اجمال توضیح داده می‌شود.

۶-۱- فازی‌گری

طبق تعریف، «متغیر زبانی[5]» متغیری است که بتواند واژه‌هایی از زبان طبیعی را به عنوان مقادیر خود اختیارکند. این واژه‌ها با مجموعه‌های فازی مشخص و در جهانی تعریف‌می‌شوند که متغیرهای زبانی تعریف‌شده‌اند[47]. به‌لحاظ ریاضی، متغیر زبانی با چهارتایی مرتب (X, T, U, M) تعریف‌می‌شود که‌درآن[48-49]:

X: نام متغیر زبانی،

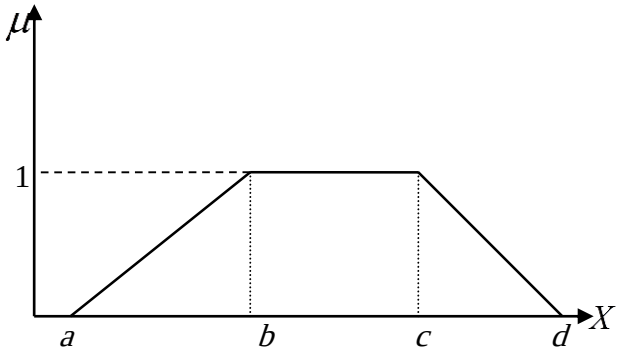
T: مجموعهٔ مقادیر زبانی که X می‌تواند اختیار کند،

U: دامنهٔ فیزیکی واقعی که متغیر X در آن مقادیر کمّی (قطعی) اختیار می‌کند،

M: یک قاعدهٔ معنایی که هر مقدار زبانی در T را با یک مجموعهٔ فازی در U مرتبط می‌کند.»

بدین‌ترتیب متغیرهای زبانی جدول ۵ ، مطابق جدول ۷ به شکل فازی تعریف می‌شوند.

$\mu_{t_i}(x)$ تابع عضویت متغیر زبانی x در مجموعهٔ t_i است و a و b و c و d مقادیر فازی ذوزنقه‌ای[6] هستند. مزیت این نوع توابع عضویت، سادگی محاسباتی و شهودی بودن آنهاست[50]. توابع ذوزنقه‌ای در مقایسه با توابع مثلثی[7]، نسبت به نویز حساسیت کمتری دارند[47]. این تابع در شکل۳ نشان داده‌شده‌است.



شکل۳. شکل تابعِ عضویت

هر خبره می‌تواند تفسیر متفاوتی برای مقادیر زبانی (t_i) ارائه دهد و بنابراین مقادیر a و b و c و d از نظر خبرگان متفاوت خواهد بود. میانگین نظر پنج نفر از خبرگان سیاستگذاری فنّاوری اطلاعات در جدول ۸ نشان داده شده است.

بدین ترتیب دو سامانهٔ استنتاج فازی خواهیم داشت: یکی برای جذابیت(At) و دیگری برای توانمندی(Ca). این دو سامانهٔ فازی از نوع چندورودی-تک‌خروجی[8] هستند.

جدول۷. مدل‌سازی متغیرهای زبانی به کمک مجموعه‌های فازی

M=μ_{t_i}	T=$\{t_i, i = 1,2,3\}$	U	X_i
$\mu_{t_i}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, if\ a \le x \le b \\ 1,\ if\ b \le x \le c \\ \frac{x-d}{c-d}, if\ c \le x \le d \end{cases}$	{Weak, Average, Strong}	[0,100]	x_1= Innovation Ecosystem (IE)
	{Bad, Average, Good}	[0,100]	x_2=Regulatory Quality (RQ)
	{Weak, Average, Strong}	[0,100]	x_3=Infrastructure (Inf)
	{Low, Average, High}	[0,100]	x_4=Social Capital (SC)
	{Low, Average, High}	[0,100]	x_5=Transparency (Tr)
	{Low, Average, High}	[0,100]	x_6=Open Government (OG)
	{Low, Average, High}	[0,100]	x_7=Civic Participation (CP)

[1] Fuzzification
[2] Knowledge Base
[3] Inference Engine
[4] Defuzzification
[5] Linguistic Variable
[6] Trapezoidal
[7] Triangular
[8] Multi-Input-Single-Output (MISO)

جدول۸. میانگین نظر خبرگان دربارهٔ مقادیر فازی

a	b	c	d	$\mu_{t_i}(\mathrm{x})$	a	b	c	d	$\mu_{t_i}(\mathrm{x})$
–	–	48	50	$\mu_{low}(x_4)$	–	–	50	55	$\mu_{weak}(x_1)$
48	50	56	60	$\mu_{average}(x_4)$	50	55	60	70	$\mu_{average}(x_1)$
56	60	–	–	$\mu_{high}(x_4)$	60	70	–	–	$\mu_{strong}(x_1)$
–	–	52	58	$\mu_{low}(x_5)$	–	–	20	30	$\mu_{bad}(x_2)$
52	58	60	73	$\mu_{average}(x_5)$	20	30	70	80	$\mu_{average}(x_2)$
60	73	–	–	$\mu_{high}(x_5)$	70	80	–	–	$\mu_{good}(x_2)$
–	–	50	55	$\mu_{low}(x_6)$	–	–	67	70	$\mu_{weak}(x_3)$
50	55	60	69	$\mu_{average}(x_6)$	67	70	74	80	$\mu_{average}(x_3)$
60	69	–	–	$\mu_{high}(x_6)$	74	80	–	–	$\mu_{strong}(x_3)$
–	–	50	55	$\mu_{low}(x_7)$					
50	55	60	69	$\mu_{average}(x_7)$					
60	69	–	–	$\mu_{high}(x_7)$					

۶-۲- پایگاه قواعد فازی

مهم‌ترین بخش سامانهٔ استنتاج فازی، پایگاه قواعد فازی[1] است. متغیرهای زبانی با استفاده از قواعد فازی ارزیابی می‌شوند و با موتور استنتاج به مجموعه‌های فازی نگاشت داده می‌شوند. هر قاعدهٔ فازی از دانش خبرگان به دست می‌آید و به صورت یک گزارهٔ «اگر-آنگاه» بیان می‌شود. بخش مقدم شامل ترکیب متغیرهای زبانی ورودی با عملگرهای «*and*» یا «*Or*» و بخش تالی شامل متغیرهای زبانی خروجی است. در این پژوهش، متغیرهای ورودی معیارهای مختلف جذابیت و توانمندی بوده و متغیرهای خروجی، مقدار جذابیت و توانمندی هستند. قواعد فازی توانمندی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$If\langle x_1 \widehat{=} t_i\rangle and\langle x_2 \widehat{=} t_j\rangle and\langle x_3 \widehat{=} t_k\rangle then\langle Ca \cong t_m\rangle$$

و قواعد فازی جذابیت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$If\langle x_4 \widehat{=} t_i\rangle and\langle x_5 \widehat{=} t_j\rangle and\langle x_6 \widehat{=} t_k\rangle and\langle x_7 \widehat{=} t_l\rangle \\ then\langle At \cong t_m\rangle$$

و $i,j,k,l,m = 1,2,3$.

در این روابط، نماد $\widehat{=}$ به معنی «مطابق با» و $\cong$ به معنی «معادل با» است[51-52].

و همچنین برای دو متغیر زبانی جذابیت و توانمندی نیز داریم:

$$\{t_m\}=\{low, average, high\}$$

این قواعد، قواعدی مرکّب با ترکیب‌کنندهٔ «و» منطقی[2] هستند. تمامی قواعد ممکنی که می‌توان با این ترکیب‌کننده تشکیل داد، لحاظ شدند و هیچ قاعده‌ای حذف نشد تا تمام حالات ممکن پوشش داده شوند. به این ترتیب 3^3 (۲۷) قاعده برای توانمندی و 3^4 (۸۱) قاعده برای جذابیت حاصل شده‌است. علاوه بر این با نظرسنجی از ۳۶ نفر از خبرگان حوزهٔ سیاستگذاری علم و فنّاوری، مدیریت فنّاوری و مهندسی فنّاوری اطلاعات، بخش تالی هر قاعده و اینکه t_m برای جذابیت و توانمندی در هر قاعده کدام مقادیر زبانی را اخذ کند، تعیین شد(پیوست۱). به عنوان مثال یکی از قواعد توانمندی در زیر آمده است:

«اگر بوم‌سازگان **قوی**، کیفیت مقررات‌گذاری **متوسط** و زیرساخت **متوسط** باشد، توانمندی **بالا** است».

[1] Fuzzy Rule Base

[2] Logical And

و یکی از قواعد جذابیت عبارت است از:

«اگر سرمایهٔ اجتماعی، **بالا** و شفافیت **بالا** و دولت باز **پایین** و مشارکت مدنی **متوسط** باشد، آنگاه امتیاز جذابیت **متوسط** است».

اشاره به این نکته ضروری است در مجموعه قواعد توانمندی و جذابیت، اولاً برای هر متغیر حداقل یک قاعده در پایگاه قواعد فازی وجود دارد، ثانیاً قواعدی یافت نمی‌شوند که بخش‌های «اگر» یکسان و بخش‌های «آنگاه» متفاوت داشته باشند. ثالثاً قواعد همسایه‌ای نمی‌توان دید که اشتراک مجموعه‌های فازی بخش «آنگاه» آنها تهی باشد. بنابراین مجموعهٔ قواعد فازی موجود در سامانهٔ استنتاج فازی مورد بحث، مجموعه‌ای کامل[1]، سازگار[2] و پیوسته[3] است[47].

۶-۳- موتور استنتاج

پس از تشکیل پایگاه قواعد فازی، به موتور استنتاج نیاز داریم تا با دریافت ورودی‌های فازی و قواعد مترتب بر آنها، خروجی مناسبی را ایجاد کند. در این پژوهش از بین دو روشی که برای استنتاج وجود دارد از «استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه[4]» استفاده شده است چراکه هدف ما استفاده از نتیجهٔ تمام قواعدی است که هریک توانایی تولید خروجی فازی مورد نظر را دارد. همهٔ قواعد موجود در پایگاه قواعد به شکل رابطه‌ای یکتا و به صورت «اگر-آنگاه» خلاصه می‌شوند، ضمن اینکه همهٔ قواعد، مستقل از هم فرض شده و به همین دلیل از عملگر «اجتماع[5]» برای ترکیب قواعد استفاده شده است تا محافظه‌کارانه عمل کرده و از تمامی قواعد در نتیجه‌گیری نهایی استفاده شود. علاوه بر این تابع عضویت نهایی با استفاده از ترکیب ممدانی[6] محاسبه شده است.

بنابراین سامانهٔ استنتاج طراحی شده دارای مشخصات زیر است:

الف. استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه بوده که از ترکیب اجتماع استفاده می شود. با این عمل هر قاعده در تعیین خروجی نقش دارد.

ب. استلزام ممدانی انتخاب شده است، چراکه قواعد از نوع محلّی[7] هستند. به این معنی که فقط روی نواحی خاصی از فضای خروجی صدق می‌کنند[54].

ج. استلزام از نوع کمینه ممدانی و نیز نُرم t از نوع عملگر کمینه[8] استفاده شده است تا محافظه‌کارانه عمل شده و شرایط امتیاز دادن به گزینه‌ها(فنّاوری‌ها) در سامانه سخت‌گیرانه باشد.

ه. از عملگر بیشینه[9] برای همهٔ عملگرهای نُرم s استفاده شده است تا فراگیر عمل شود.

باتوجه به نکات فوق، عملکرد ریاضی موتور استنتاج با عبارت زیر توصیف‌می‌شود[53]:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1,\dots,M}\left[\sup_{X\in U}\min(\mu_{A'}(x), \mu_{A_1^l}(x_1), \dots, \mu_{A_n^l}(x_n), \mu_{B^l}(y))\right] \quad (۱)$$

بدین معنی که با داشتن مجموعهٔ فازی $A' \subset U$ ، موتور استنتاج کمینه، مجموعهٔ فازی $B' \subset V$ را مطابق با رابطهٔ (۱) نتیجه می‌دهد. در این رابطه، $\mu_{A_1^l}(x_1)$ تابع عضویت متغیر زبانی x_1 در مجموعهٔ فازی A_1^l است و الی آخر.

بدین ترتیب می‌توان رابطهٔ (۱) را برای توانمندی به صورت زیر نوشت:

$$\mu_{t'_m}(Ca) = \max_{1,\dots,27}\sup_{x\in U}\min[\mu_{t'}(x), \mu_{t_i}(x_1), \mu_{t_j}(x_2), \mu_{t_k}(x_3), \mu_{t_m}(Ca)] \quad (۲)$$

و برای جذابیت داریم:

$$\mu_{t'_m}(At) = \max_{1,\dots,81}\sup_{x\in U}\min[\mu_{t''}(x), \mu_{t_i}(x_1), \mu_{t_j}(x_2), \mu_{t_k}(x_3), \mu_{t_l}(x_4), \mu_{t_m}(At)] \quad (۳)$$

[1] Complete
[2] Consistent
[3] Continuous
[4] Individual-Rule Based Inference
[5] Union Operator
[6] Mamdani Combination
[7] Local
[8] Minimum Operator
[9] Maximum Operator

۶-۴- وافازی‌گری

خروجی موتور استنتاج فازی، مجموعه‌ای فازی است. این مجموعه با استفاده از نگاشتی که وافازی‌گر[1] نامیده می‌شود به یک نقطهٔ قطعی[2] نگاشته شود. این نقطهٔ قطعی بهترین نمایندهٔ مجموعهٔ فازی مذکور است. در این مقاله از وافازی‌گر گرانیگاه[3] استفاده می‌کنیم که به دلیل برخورداری از مزیت توجیه‌پذیری شهودی[4] و پیوستگی[5]، کاربرد بسیاری دارد. وافازی‌گر گرانیگاه نقطهٔ y^* را به عنوان مرکز ناحیه‌ای که به‌وسیلهٔ تابع‌عضویت B' پوشش داده‌شده(ناحیهٔ V) تعریف می‌کند[47]:

$$y^* = \frac{\int_V y\mu_{B'}(y)dy}{\int_V \mu_{B'}(y)dy} \quad (۴)$$

برای توانمندی، این نقطه با رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$z^*_{Ca} = \frac{\int_V (Ca)\mu_{t'_m}(Ca)d(Ca)}{\int_V \mu_{t'_m}(Ca)d(Ca)} \quad (۵)$$

و برای جذابیت داریم:

$$z^*_{At} = \frac{\int_V (At)\mu_{t'_m}(At)d(At)}{\int_V \mu_{t'_m}(At)d(At)} \quad (۶)$$

که y متغیر زبانی، $\mu_{B'}(y)$ تابع عضویت y در مجموعهٔ B' و نقطهٔ y^* نقطهٔ گرانیگاه ناحیهٔ V است که از عملگر بیشینه (نُرم S) نتیجه شده‌است. Ca امتیاز توانمندی، $\mu_{t'_m}(Ca)$ تابع عضویت Ca در مجموعهٔ t'_m و z^*_{Ca} مرکز ناحیهٔ V است. همچنین At امتیاز جذابیت، $\mu_{t'_m}(At)$ تابع عضویت At در مجموعهٔ t'_m و z^*_{At} نیز مرکز ناحیهٔ V است.

۷- پیاده‌سازی سامانهٔ استنتاج فازی

با استفاده از نرم‌افزار متلب، دو سامانهٔ استنتاج فازی یک برای محاسبهٔ جذابیت و دیگری برای محاسبهٔ توانمندی طرّاحی و پیاده‌سازی شده است. متغیرهای ورودی سامانهٔ اول عبارتند از: مقادیر شاخص‌های «بوم‌سازگان نوآوری»، «کیفیت مقررات‌گذاری» و «زیرساخت». متغیرهای ورودی سامانهٔ دوم عبارتند از: مقادیر شاخص‌های «سرمایهٔ اجتماعی»، «شفافیت»، «دولت باز» و «مشارکت مدنی».

مقادیر ورودی زیر را برای شاخص‌های توانمندی در نظر می‌گیریم:

IE=65, RQ=15, Inf=70

که در آن: IE بیانگر شاخص عددی بوم‌سازگان نوآوری، RQ شاخص عددی کیفیت مقررات‌گذاری و Inf شاخص عددی زیرساخت است. بدین‌ترتیب، طبق جداول ۵ و ۶ داریم:

$$\begin{cases} \mu^{IE}_{strong}(65) = 0.5 \\ \mu^{IE}_{average}(65) = 0.5 \\ \mu^{IE}_{weak}(65) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mu^{RQ}_{good}(15) = 0 \\ \mu^{RQ}_{average}(15) = 0 \\ \mu^{RQ}_{bad}(15) = 1 \end{cases}$$

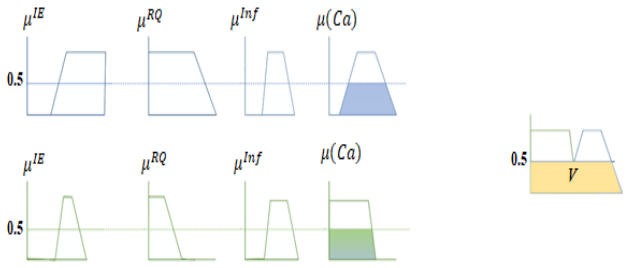
$$\begin{cases} \mu^{Inf}_{strong}(70) = 0 \\ \mu^{Inf}_{average}(70) = 1 \\ \mu^{Inf}_{weak}(70) = 0 \end{cases}$$

این مقادیر مشمول دو قاعده هستند:

قاعدهٔ اول: اگر بوم‌سازگان قوی، کیفیت مقررات‌گذاری بد و زیرساخت متوسط باشد، توانمندی متوسط است.

قاعدهٔ دوم: اگر بوم‌سازگان متوسط، کیفیت مقررات‌گذاری بد و زیرساخت متوسط باشد، توانمندی پایین است.

مراحل استنتاج سامانه برای قواعد فوق در شکل ۴ نشان داده شده است که در آن، ابتدا با توجه به مقدار کمینهٔ درجهٔ عضویت ورودی‌ها در هر قاعده، ناحیهٔ خروجی تعیین شده و سپس اجتماع نواحی خروجی دو قاعده مشخص شده است.



شکل۴. مراحل استنتاج برای مقادیر IE=65, RQ=15, Inf=70

اکنون برای نگاشت مجموعهٔ خروجی به مجموعه‌های قطعی با استفاده از وافازی‌گر گرانیگاه، مقدار زیر به دست می‌آید:

[1] Deffuzifier
[2] Crisp
[3] Center of Gravity Defuzzifier
[4] Intuitive Plausibility
[5] Continuity

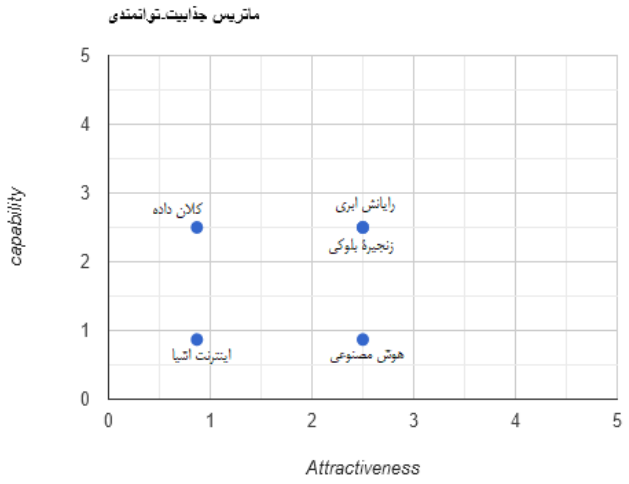
$$z = \frac{\int \mu x dx}{\int \mu dx}$$
$$= \frac{\int_0^{3.25}(0.5)xdx + \int_{3.25}^{3.5}(-2x+7)xdx}{\int_0^{3.25}(0.5)dx + \int_{3.25}^{3.5}(-2x+7)dx} = 1.688$$

برای حل مسئلهٔ واقعی، برای تعیین مقادیر متغیرهای ورودی به دو سامانهٔ محاسبهٔ توانمندی و محاسبهٔ جذابیت، با مراجعه به نهادهای سیاست‌گذار در حوزهٔ فنّاوری اطلاعات شامل: «معاونت علمی، فنّاوری و اقتصاددانش‌بنیان ریاست جمهوری»، «سازمان فنّاوری اطلاعات ایران»، «پژوهشگاه ارتباطات و فنّاوری اطلاعات»، نظر این دستگاه‌ها دربارهٔ امتیاز هر فنّاوری احصا شده است. این مقادیر در جدول ۹ آمده است.

با مقادیر جدول ۹، فنّاوری‌ها طبق شکل ۷ در نقشهٔ جذابیت-توانمندی قرار می‌گیرند.

جدول۹. مقادیر ورودی و خروجی سامانه برای فنّاوری‌ها

ورودی/خروجی	شاخص‌ها	هوش مصنوعی	اینترنت اشیا	کلان-داده	رایانش ابری	زنجیرهٔ بلوکی
ورودی سامانهٔ استنتاج فازی توانمندی	بوم-سازگان نوآوری	۲۰	۲۰	۶۰	۷۰	۶۰
	کیفیت مقررات-گذاری	۳۵	۱۰	۳۰	۳۰	۷۰
	زیرساخت	۳۰	۱۰	۷۰	۵۰	۷۰
ورودی سامانهٔ استنتاج فازی جذابیت	سرمایهٔ اجتماعی	۵۰	۷۰	۲۰	۶۰	۵۰
	شفافیت	۶۰	۵۰	۱۰	۳۰	۹۰
	دولت باز	۷۰	۵۰	۳۰	۷۰	۵۰
	مشارکت اجتماعی	۵۰	۵۰	۹۰	۵۰	۶۰
خروجی	خروجی توانمندی	۰/۸۶۸	۰/۸۶۸	۲/۵	۲/۵	۲/۵
	خروجی جذابیت	۲/۵	۰/۸۶۹	۰/۸۶۹	۲/۵	۲/۵



شکل۷. قرار گرفتن فنّاوری‌ها در ماتریس جذابیت-توانمندی

۸- اعتبارسنجی سامانهٔ استنتاج فازی

مبنای ارزیابی عملکرد سامانه‌های استنتاج فازی، میزان تطابق خروجی‌های سامانه با نظر خبرگان است به همین دلیل سؤال اساسی در اعتبارسنجی سامانهٔ استنتاج فازی طرّاحی شده این است که آیا سامانه از توانایی لازم برای تقلید رفتار خبرگان برخوردار است؟ عملکرد سامانه را می‌توان از مقایسهٔ امتیاز به دست آمده برای توانمندی و جذابیت در دو حالت متفاوت اعتبارسنجی کرد. حالت اول، محاسبهٔ امتیازات با میانگین‌گیری وزنی بین شاخص‌ها بدون استفاده از سامانهٔ استنتاج فازی و حالت دوم، با استفاده از سامانهٔ استنتاج فازی (جدول ۱۰).

جدول۱۰. مقایسهٔ امتیازهای توانمندی و جذابیت در دو حالت(با و بدون استفاده از سامانهٔ استنتاج فازی)

		هوش مصنوعی	اینترنت اشیا	کلان-داده	رایانش ابری	زنجیرهٔ بلوکی
توانمندی	Non-FIS	۱/۴۱	۰/۶۷۱	۲/۶	۲/۵۱	۳/۳۲
	FIS	۰/۸۶۸	۰/۸۶۸	۲/۵	۲/۵	۲/۵
جذابیت	Non-FIS	۲/۸۷	۲/۷۴	۱/۸۷	۲/۶	۳/۱۴
	FIS	۲/۵	۰/۸۶۹	۰/۸۶۹	۲/۵	۲/۵

از محاسبهٔ ضریب همبستگی پیرسون[1] بین دو دسته داده‌های جدول ۱۰ مقادیر زیر به دست می‌آید.

$$r_{Pearson}^{Ca}(Non-FIS, FIS) = 0.925$$

$$r_{Pearson}^{At}(Non-FIS, FIS) = 0.651$$

این مقادیر هردو مثبت بوده و شدت آنها بالاتر از ۰/۶ است، بنابراین مقادیر به دست آمده از سامانهٔ استنتاج فازی برای توانمندی و جذابیت با مقادیر عادی این دو پارامتر(بدون استفاده از سامانه استنتاج فازی) رابطهٔ مستقیم دارند. در نتیجه می‌توان گفت سامانهٔ استنتاج فازی تا حدود زیادی در تقلید از خبرگان موفق عمل می‌کند.

۹- ارزیابی سامانهٔ استنتاج فازی

در ارزیابی نتایج حاصل از سامانهٔ استنتاج فازی آنچه اهمیت دارد این است که چنانچه امتیاز دو عامل جذابیت و توانمندی با معیارهایی غیر از معیارهای به دست آمده از آینده‌نگاری‌ها و بدون استفاده از هرگونه سامانهٔ استنتاج فازی محاسبه می‌شد، نتایج چه تفاوتی داشت؟ پاسخ این سؤال را می‌توان از مقایسهٔ نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش دلفی ملّی آینده‌نگاری فنّاوری اطلاعات[55] به دست آورد. نخستین تفاوت چارچوب مورد استفاده در پژوهش حاضر، به تفاوت در معیارها مربوط می‌شود که در جدول ۱۱ نشان داده شده‌است. با مقایسهٔ معیارهای جذابیت دو ستون جدول ۱۱، قرابت‌هایی بین برخی معیارها دیده می‌شود. مراد از افزایش انسجام اجتماعی، استفاده از فنّاوری برای ایجاد پیوندهای قوی و اصیل با دیگران است طوری که همکاری بین بازیگران کسب‌وکارها بیشتر شود و بافت اجتماعی جامعه دارای پیوستگی باشد. هر چه همکاری بین بازیگران کسب‌وکارها بیشتر شود، بازاری گسترده و رو به رشد را شاهد خواهیم بود. افزایش انسجام اجتماعی، نیز به افزایش عدالت و خلق فرصت‌های برابر نیز منجرمی‌شود.

از آنجا که بازترین و شفاف‌ترین جامعه، جامعه‌ای است که حتی کارکردهای سنّتی دولت نیز به‌طور کامل با بازیگران غیردولتی جایگزین شوند، افزایش شفافیت و باز بودن در حکمرانی نیز به دلیل افزایش حضور بازیگران غیردولتی باعث افزایش عدالت و خلق فرصت‌های برابر می‌شود. هر چه شفافیت بیشتر و حکمرانی بازتر شود، انگیزهٔ بیشتری برای بنگاه‌های جهانی جهت همکاری فنّاورانه با شرکت‌های ایرانی ایجاد می‌شود.

جدول۱۱. مقایسهٔ معیارهای جذابیت و توانمندی برای فنّاوری اطلاعات در دو پژوهش متفاوت

	پژوهش حاضر	«دلفی ملّی آینده‌نگاری ملّی فنّاوری اطلاعات ایران» [55]
معیارهای جذابیت	-افزایش انسجام اجتماعی -افزایش شفافیت و باز بودن در حکمرانی -افزایش مشارکت اجتماعی	-افزایش عدالت و خلق فرصت‌های برابر -بازار گسترده و روبه رشد -جذابیت برای بنگاه‌های جهانی جهت همکاری فنّاورانه با شرکت‌های ایرانی -ارتقای قابلیت تولید محتوای دیجیتال
معیارهای توانمندی	-وجود زیرساخت مناسب برای خلّاقیت و نوآوری -توانمندی ترکیب هوشمندانهٔ داده‌ها و اطلاعات در حکمرانی -وجود زیرساخت-های اولیهٔ توسعه	-توانمندی شرکت‌های ایرانی در دسترسی به فنّاوری -وجود منابع انسانی مناسب در کشور -برخورداری از زیرساخت مناسب در کشور -وجود قوانین و مقررات مناسب در کشور -دسترسی مناسب به منابع مالی -توانمندی شرکت‌های ایرانی در دسترسی به بازار جهانی -دسترسی مناسب به فنّاوری و بازیگران پیشرو جهانی

افزایش مشارکت اجتماعی نیز به دلیل افزایش نقش مردم و کسب‌وکارها در حکمرانی و اولویت‌بندی اهداف توسعه، به افزایش عدالت و خلق فرصت‌های برابر کمک خواهد کرد.

از سوی دیگر، با مقایسهٔ معیارهای توانمندی در دو ستون جدول ۱۱، قرابت‌هایی مشاهده می‌شود: هر سه معیارِ وجود منابع انسانی مناسب در کشور، برخورداری از زیرساخت مناسب در کشور و وجود قوانین و مقررات مناسب در کشور به وجود زیرساخت مناسب اشاره دارند. البته دیدگاه پژوهش حاضر بین زیرساخت مناسب برای

[1] Pearson Correlation Coefficient

خلاقیت و نوآوری و زیرساخت‌های اولیهٔ توسعه تفکیک قائل شده-است. این تفکیک به ویژه از این جهت حایز اهمیت است که در دلفی ملّی آینده‌نگاری فنّاوری اطلاعات ایران، معیار «برخورداری از زیرساخت مناسب» دچار نوعی کلی‌گویی است و مشخص نمی‌کند که آیا معیار مهم «دسترسی به دانش فنّی و اطلاعات» را نیز در خود جای داده یا خیر. در حالی که معیار «وجود زیرساخت مناسب برای خلّاقیت و نوآوری» بر دسترسی به دانش فنّی و اطلاعات نیز دلالت دارد.

توانمندی ترکیب هوشمندانهٔ داده‌ها و اطلاعات نیز اشاره به مزیتی درحکمرانی دارد که در صورت وجود، می‌تواند به وضع قوانین و مقررات مناسب در کشور منجر شود.

تمایز چارچوب مورداستفاده در تحقیق حاضر این است که اولاً معیارها الزاماً از آینده‌نگاری‌ها استخراج شده‌اند و ثانیاً این معیارها، جای خود را به شاخص‌های کمّی متناظر (جدول۵) داده‌اند تا بتوان از آنها در سامانهٔ استنتاج فازی بهره گرفت.

پیمایش دلفی ملّی فنّاوری اطلاعات ایران با ۳۴۳۴ پرسشنامه، برای پنج فنّاوری نتیجه‌ای طبق شکل ۸ به دست داده است[55].

شکل۸. قرار گرفتن فنّاوری‌ها در ماتریس جذابیت-توانمندی بر اساس دلفی ملّی فنّاوری اطلاعات ایران[55]

جدول ۱۲ امتیاز توانمندی و جذابیت پژوهش حاضر را با امتیاز توانمندی و جذابیت پژوهش دلفی ملّی مقایسه‌می‌کند.

جدول۱۲. مقایسهٔ نتایج سامانهٔ استنتاج فازی با دلفی ملّی آینده‌نگاری فنّاوری اطلاعات

فنّاوری	امتیاز			
	توانمندی (دلفی)	توانمندی (فازی)	جذابیت (دلفی)	جذابیت (فازی)
هوش‌مصنوعی	۲/۲	۰/۸۶۸	۳/۹۲	۲/۵
اینترنت اشیا	۲/۷۸	۰/۸۶۸	۲/۷۶	۰/۸۶۹
رایانش ابری	۱/۹۸	۲/۵	۳/۴۶	۲/۵
کلان‌داده	۰/۶۲	۲/۵	۲/۲۷	۰/۸۶۹
زنجیرهٔبلوکی	۲/۱۶	۲/۵	۳	۲/۵

ضریب همبستگی پیرسون[1] بین داده‌های حاصل از سامانهٔ استنتاج فازی و داده‌های دلفی ملّی آینده‌نگاری فنّاوری اطلاعات طبق جدول ۱۲ به طور جداگانه برای توانمندی و جذابیت محاسبه شد:

$$r_{Pearson}^{Ca}(FIS, Delphi) = -0.618$$
$$r_{Pearson}^{At}(FIS, Delphi) = 0.815$$

به این ترتیب می‌توان گفت برای عامل توانمندی، امتیاز به دست آمده از سامانهٔ استنتاج فازی با امتیاز دلفی ملّی رابطهٔ معکوس دارد. برای عامل جذابیت، امتیازهای به دست آمده در دو پژوهش با یکدیگر رابطهٔ مستقیم دارند. اشاره به این نکته ضروری است که وجود همبستگی مثبت یا منفی بین دو دسته داده، اطلاعاتی راجع به اینکه کدام یک از آنها دقیق‌تر بوده و روش محاسبهٔ آن کارایی بیشتری دارد به دست نمی‌دهد و اساساً به دلیل تفاوت در روش، معیارها و جامعهٔ آماری، نمی‌توان انتظارداشت نتایج دو پژوهش لزوماً

[1] Pearson Correlation Coefficient

یکدیگر را تأیید کنند. با وجود این می‌توان دربارهٔ تفاوت‌ها و مزایای پژوهش حاضر بحث کرد. پژوهش حاضر به لحاظ زمانی مربوط به یک سال اخیر و نتایج آن از تازگی برخوردار است. جامعهٔ آماری آن نیز برخلاف پژوهش قبلی(که طیف وسیعی از ذی‌نفعان و در نتیجه نظرات مختلف و گاهاً متضاد و بخشی‌نگر را دربرگرفته)، شامل خبرگان سیاستگذاری فنّاوری(با تأکید بر فنّاوری اطلاعات) است که فراتر از نگاه‌های بخشی به اولویت‌گذاری فنّاوری می‌نگرند. مهمترین مزیت پژوهش حاضر، توانایی آن در مدل کردن ابهام میان خبرگان و بهره‌گیری از ابزار هوشمندی محاسباتی است.

۱۰- تحلیل نتایج

رفع کاستی‌های چارچوب‌های پیشینِ اولویت‌گذاری مستلزم این است که اولاً معیارهای ارزیابی دو عامل توانمندی و جذابیت از آینده‌نگاری‌ها استخراج شوند و شاخص‌های کمّیِ معادل آنها طبق جدول ۵ به کاررروند. بنابراین اولین ویژگی چارچوب ارائه شده در مقالهٔ حاضر (شکل ۱) این است که در تعیین معیارها، متکی به آینده‌نگاری‌هاست. ثانیاً امتیازدهی به گزینه‌ها برخلاف چارچوب‌های تحقیقات پیشین نه با روش دلفی و نه با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بلکه به کمک یک سامانهٔ خبرهٔ فازی انجام می‌شود. بنابراین دومین ویژگی چارچوب مذکور این است که محاسبات مربوط به ارزیابی جذابیت و توانمندی از نوع محاسبات نرم درسامانه‌های خبرهٔ فازی است که امکان رفع ابهام از داده‌های حاصل از نظرسنجی از خبرگان را فراهم می‌کند. تا اینجا چارچوب اولویت‌گذاری به دو ابزار هوشمندی مجهز شده است: آینده‌نگاری فنّاوری به عنوان ابزار هوشمندی سیاستی، و سامانهٔ خبرهٔ فازی به عنوان ابزار هوشمندی محاسباتی. به کار بردن چارچوبی با ویژگی-های مذکور باعث می‌شود نتایجی متفاوت از چارچوب‌های فاقد این ویژگی به دست آید. مزیت این نتایج نسبت به نتایج پیشین این است که در محاسبهٔ آنها، ابهام موجود در بیناذهنیت خبرگان نیز محاسبه شده است. در خصوص نتایج پژوهش حاضر، آنچه می‌تواند برای ارائهٔ توصیه‌های سیاستی راه‌گشا باشد، تحلیل حساسیت فنّاوری‌ها نسبت به تغییرات متغیرهای بنیادی دو عامل توانمندی و جذابیت است. طبق شکل ۷، فنّاوری «رایانش ابری» و «زنجیرهٔ بلوکی» با امتیازی برابر، دقیقاً در مرکز فضای جذابیت-توانمندی قرار دارند. به این ترتیب، صرف‌نظر از نام‌گذاری این فضا به نواحی راهبردی با نام‌های دلخواه، می‌توان این گونه تحلیل کرد که کشور در این دو فنّاوری نسبت به سه فنّاوری دیگر یعنی «اینترنت اشیا»، «هوش مصنوعی» و «کلان‌داده» از توانمندی بالاتری برخوردار است و انتظار خبرگان از توسعهٔ آنها دستاوردهای بیشتری است. در عین حال، سرمایه‌گذاری بر روی متغیرهای بنیادی عامل توانمندی به معنای بهبود شاخص‌های «بوم‌سازگان نوآوری»، «کیفیت مقررات‌گذاری» و «زیرساخت» است. چنانچه دولت طبق خواست ذی‌نفعان فنّاوری «رایانش ابری» و «زنجیرهٔ بلوکی»، بر بهبود شاخص‌های مذکور متمرکز شود، زودتر از سه فنّاوری دیگر به دستاوردهای مدنظر خبرگان خواهد رسید. همچنین سرمایه‌گذاری بر روی متغیرهای بنیادی عامل جذابیت به معنای افزایش آگاهی خبرگان از نتایج توسعهٔ فنّاوری نوعی تصحیح دیدگاه خبرگان در خصوص دستاوردهای توسعهٔ فنّاوری خواهد بود. چنانچه سناریوهای دقیقی از توسعهٔ فنّاوری برای خبرگان ترسیم شود، تأثیر توسعهٔ این فنّاوری‌ها بر «سرمایهٔ اجتماعی»، «باز بودن دولت»، «شفافیت» و «مشارکت اجتماعی» می‌تواند به تسریع در توسعهٔ فنّاوری(در صورت غلبهٔ منافع) یا مطالبهٔ توقف در توسعهٔ فنّاوری(در صورت غلبهٔ خسارات) منجر شود.

۱۱- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل جدیدی مبتنی بر کاربرد ابزارهای هوشمندی سیاستی برای اولویت‌گذاری فنّاوری معرفی شد. بدین منظور با طرّاحی و پیاده‌سازی دو سامانهٔ استنتاج فازی فرایند جدیدی برای ارزیابی فنّاوری(محاسبهٔ امتیاز توانمندی و جذابیت) ارائه شده است. این چارچوب را به ابزار هوشمندی محاسباتی نیز مجهّز کردیم. نتایج حاصل از کاربرد این ابزار سیاستی برای تعیین اولویت پنج فنّاوری انقلاب صنعتی چهارم شامل هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، زنجیرهٔ بلوکی، رایانش ابری و کلان‌داده بررسی شد و نتایج آن با نظر خبرگان مورد ارزیابی قرارگرفت که نشان از توانمندی سامانه در مدل‌سازی رفتار خبرگان و تقلید رفتار آن‌ها دارد. چارچوب تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات پیشین از مزایایی برخورداراست. نخست اینکه انعطاف‌پذیر است و می‌توان هریک از اجزای آن را با عناصر دیگری جایگزین کرد. مثلاً می‌توان به جای عامل توانمندی یا جذابیت هر عامل مناسب دیگری را به کار برد، یا اینکه می‌توان در ساختار سامانهٔ استنتاج فازی تغییراتی ایجاد کرد و به جای اعداد فازی ذوزنقه‌ای از اعداد فازی مثلثی یا گوسی و به جای استلزام ممدانی از استلزام دنیس-رشر[1] و غیره استفاده کرد. دوم اینکه تفسیرپذیر است و با تعیین محدوده‌های دلخواه برای متغیرهای ورودی و خروجی سامانه، می‌توان استانداردهای سخت‌گیرانه یا

[1] Dienes-Rescher

سهل‌گیرانه‌ای بر آنها وضع کرد. سوم اینکه دستاورد پژوهش حاضر، یک مصنوع است که بدون نیاز به تکرار فرایند پژوهش می‌تواند در مقاطع زمانی مختلف صرفاً با اخذ ورودی‌های جدید، نتایج را به روزرسانی کند.

از محدودیت‌های تحقیق می‌توان به محدودیت نظرسنجی از خبرگان برای تشکیل پایگاه قواعد فازی، تعیین محدودهٔ مقادیر زبانی و امکان برقراری تناظر بین معیارهای کیفی و شاخص‌های کمّی اشاره کرد. به عنوان پیشنهاد تحقیقات آتی می‌توان سامانهٔ هوشمند اولویت‌گذاری را متشکل از سه عامل «جذابیت»، «توانمندی» و «سازگاری» طرّاحی کرد.

مراجع

[1] Reid A, Martinaitis Z, Valincius G., "A contribution to priority setting for future research, studies and innovation in Lithuania." , Report of an expert group to the Ministry of Education and Science and Ministry of Economy of the Republic of Lithuania, 2012.

[2] Hellström T, Jacob M, Sjöö K., "From thematic to organizational prioritization: the challenges of implementing RDI priorities." Science and Public Policy, 2017 Oct 1;44(5):599-608.

[3] Ghazinoory S, Ghazinoori S. "An introduction to science, technology and innovation policy". Tehran: Tarbiat Modares University, 2017. {In Persian}

[4] Salo A, Liesiö J., "A case study in participatory priority setting for a Scandinavian research program.", International Journal of Information Technology & Decision Making. 2006 Mar;5(01):65-88.

[5] Fatemi M, Arasti M., "Priority-setting in science, technology and innovation." Journal of science and technology policy. 2019 Jun 22;12(2):119-33.

[6] Georghiou L, Harper JC., "From priority-setting to articulation of demand: Foresight for research and innovation policy and strategy.", Futures. 2011 Apr 1;43(3):243-51.

[7] NSB. Federal Research Resources: A Process for Setting Priorities: Final Report; Approved By the National Science Board at its October 11, 2001 Meeting

[8] Rosenstock L, Olenec C, Wagner GR. "The National Occupational Research Agenda: a model of broad stakeholder input into priority setting.", American Journal of Public Health. 1998 Mar;88(3):353-6.

[9] Benner M, Liu L, Serger SS. "Head in the clouds and feet on the ground: Research priority setting in China." Science and Public Policy. 2012 Mar 1;39(2):258-70.

[10] Bengisu M. "Critical and emerging technologies in Materials, Manufacturing, and Industrial Engineering: A study for priority setting." Scientometrics. 2003 Nov 1;58(3):473-87.

[11] Suh CK, Suh EH, Baek KC. "Prioritizing telecommunications technologies for long-range R&D planning to the year 2006." IEEE Transactions on Engineering Management. 1994 Aug;41(3):264-75.

[12] De Haan S, Kingamkono R, Tindamanyire N, Mshinda H, Makandi H, Tibazarwa F, Kubata B, Montorzi G. "Setting research priorities across science, technology, and health sectors: the Tanzania experience." Health Research Policy and Systems. 2015 Dec;13:1-1.

[13] Stenberg L, Nagano H. "Priority-setting in Japanese research and innovation policy." Vinnova Analysis VA. 2009 Dec;23.

[14] BILAT-USA, "Analysis of Science &Technologies Priorities in Public Research in Europe and the United States of America", 2012.

[15] Gassler H, Polt W, Schindler J, Weber M, Mahroum S, Kubeczko K, Keenan M. "Priorities in science & technology policy. An international comparison". Project report commissioned by the Austrian Council for Research and Technology Development. 2004 Oct.

[16] Sokolov A, Shashnov S, Kotsemir M, Grebenyuk A. "Common STI priorities for a group of countries: The BRICS case." In 6th international conference on future-oriented Technology Analysis (FTA)—future in the making, Brussels 2018 Jun (pp. 4-5).

[17] Salo A, Gustafsson T, Ramanathan R. "Multicriteria methods for technology foresight." Journal of Forecasting. 2003 Mar;22(2-3):235-55.

[18] Fleurence RL, Torgerson DJ. "Setting priorities for research." Health policy. 2004 Jul 1;69(1):1-0.

[19] McGeary M, Smith PM. "The R&D portfolio: a concept for allocating science and technology funds." Science. 1996 Nov 29;274(5292):1484-5.

[20] Cuhls K. "Futur–foresight for priority-setting in Germany." International Journal of Foresight and Innovation Policy. 2004 Jan 1;1(3-4):183-94.

[21] Glod F, Duprel C, Keenan M. "Foresight for science and technology priority setting in a small country: the case of Luxembourg." Technology Analysis & Strategic Management. 2009 Nov 1;21(8):933-51.

[22] Haegeman K, Spiesberger M, Veselitskaya N, Sokolov A, Weiss G. "FTA supporting effective priority setting in multi-lateral research programme cooperation: The case of EU–Russia S&T cooperation." Technological Forecasting and Social Change. 2015 Dec 1;101:200-15.

[23] Hashemkhani Zolfani S, Salimi J, Maknoon R, Kildienė S. "Technology foresight about R & D projects selection; application of SWARA method at the policy making level."

[24] Jarvis RM, Young T. "Key research priorities for the future of marine science in New Zealand." Marine Policy. 2019 Aug 1;106:103539.

[25] MOORE M, LANDREE E, HOTTES AK, SHELTON SR. "Priorities for the Department of Homeland Security Science and Technology Directorate." Homeland Security Operational Analysis Center. 2018

[26] Shepherd M, Turner JA, Small B, Wheeler D. "Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the 'digital agriculture revolution." Journal of the Science of Food and Agriculture. 2020 Nov;100(14):5083-92.

[27] Tübke AL, Ducatel K, Gavigan J, Moncada-Paterno-Castello PI, SMITS R, ZWECK A, RADER M, BARRÉ R, HUT AS. "Strategic policy intelligence: Current trends, the state of play and perspectives." IPTS, Seville. 2001 Dec.

[28] Namdarian L, Naghizadeh R. "Strategic Intelligence in Science, Technology and Innovation Policy Making (STI)." Journal of Science and Technology Policy. 2019 Jun 22;12(2):87-101.

[29] Kuosa T. "Towards strategic intelligence: foresight, intelligence, and policy-making." Dynamic Futures; 2014.

[30] Nazarko Ł. "Future-oriented technology assessment." Procedia Engineering. 2017 Jan 1;182:504-9.

[31] Seidl da Fonseca, Ricardo & Klusacek, Karel & Graf, Hans & Balackova, Halka & Keenan, Michael & Cuhls, Kerstin & Miles, Ian & Phaal, Robert. "Foresight Methodologies" - Textbook. 2004.

[32] Ghazinoori, S. "Technology Assessment: A Policy Intelligence Tool." Tehran: New Industries Center. 2004. ISBN 964-06-5414-0{In Persian}.

[44] WorldBank, 2022, Retrieved: https://govdata360.worldbank.org/indicators/h5083f593?indicator=394&viz=choropleth&years=2020

[45] [45] WJP, 2022, Retrieved: https://worldjusticeproject.org/our-work/wjp-rule-law-index/wjp-open-government-index/global-scores-rankings

[46] Dresch A, Lacerda DP, Antunes Jr JA, Dresch A, Lacerda DP, Antunes JA. "Design science research." Springer International Publishing; 2015.

[47] Wang LX. "A course in fuzzy systems and control." Prentice-Hall, Inc.; 1996 Dec 1.

[48] L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-3, no. 1, pp. 28-44, Jan. 1973, doi: 10.1109/TSMC.1973.5408575.

[49] Zadeh LA. "Fuzzy logic and approximate reasoning: In memory of Grigore Moisil. Synthese." 1975 Sep;30:407-28.

[50] Kreinovich V, Kosheleva O, Shahbazova SN. "Why triangular and trapezoid membership functions: A simple explanation." Recent developments in fuzzy logic and fuzzy sets: dedicated to Lotfi A. Zadeh. 2020:25-31.

[51] Stack Exchange, 2014, Adam Hughes (https://math.stackexchange.com/users/58831/adam-hughes), Difference between "≈", "≃", and "≅", URL (version: 2014-07-11): https://math.stackexchange.com/q/864614

[52] Stack Exchange, 2023, Lover of Structure (https://math.stackexchange.com/users/60628/lover-of-structure), What is the symbol ≙ most commonly used for in a mathematical or math-related context?, URL (version: 2023-02-22): https://math.stackexchange.com/q/790019

[53] Magdalena L. "Fuzzy rule-based systems." Springer handbook of computational intelligence. 2015:203-18.

[54] Mamdani EH. "Fuzzy control: a misconception of theory and application." IEEE Expert. 1994 Aug;9(4):27-8.

[55] Information Technology Organization of Iran, 2021, retrieved: https://www.aparat.com/v/g371u1t/

[33] Zimmermann HJ. "Fuzzy set theory." Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics. 2010 May;2(3):317-32.

[34] Ghazinoory S, Divsalar A, Soofi AS. "A new definition and framework for the development of a national technology strategy: The case of nanotechnology for Iran." Technological Forecasting and Social Change. 2009 Jul 1;76(6):835-48.

[35] N. B. Moghaddam, M. Sahafzadeh, S. M. Emamian and A. Irankhah, "Scenario based priority setting of R&D issues: A case study of membrane technology in National Iranian Gas industry," *PICMET '08 - 2008 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology*, Cape Town, South Africa, 2008, pp. 1497-1505, doi: 10.1109/PICMET.2008.4599766.

[36] Pamučar D., "Fuzzy logic in decision making process in the Armed Forces of Serbia." LAP LAMBERT Academic Publishing; 2011.

[37] Bozanic D, Tešić D, Puška A, Štilić A, Muhsen YR. "Ranking challenges, risks and threats using Fuzzy Inference System." Decision Making: Applications in Management and Engineering. 2023 Sep 4;6(2):933-47.

[38] Sabri N, Aljunid SA, Salim MS, Badlishah RB, Kamaruddin R, Malek MA. "Fuzzy inference system: Short review and design." Int. Rev. Autom. Control. 2013;6(4):441-9.

[39] Russell SJ, Norvig P. "Artificial intelligence: a modern approach." Pearson; 2016.

[40] Khodadadi A, Montazer GA. "Analyzing the Convergence of the Information Technology Future Scenarios." Journal of Science and Technology Policy. 2023 Oct 23;16(3):77-100. {In Persian}. Doi:10.22034/jstp.2023.11432.1675

[41] Martinelli A, Mina A, Moggi M. "The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution." Industrial and Corporate Change. 2021 Feb 1;30(1):161-88.

[42] Marr B. "Tech Trends in Practice: The 25 technologies that are driving the 4th Industrial Revolution." John Wiley & Sons; 2020 Jun 22.

[43] Weforum, 2022, Retrieved: https://www.weforum.org/reports/global-competitiveness-report-2019/

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 238-248

A Novel Method Based on Tranco for Monitoring Cloud Service Providers

Davood Maleki[1], Pejman Goudarzi [2], Alireza Mansouri[3*], Neda Ghorbani[4], Ehsan Arianyan[3]

[1] Faculty Member, ICT Research Institute, Tehran, Iran
[2] Associate Professor, ICT Research Institute, Tehran, Iran
[3] Assistant Professor, ICT Research Institute, Tehran, Iran
[4] Researcher, ICT Research Institute, Tehran, Iran

Received: 10 December 2024, Revised: 21 December 2024, Accepted: 01 July 2025
Paper type: Research

Abstract

Cloud computing service providers offer various cloud services to different users, making effective monitoring solutions crucial for managing these services. This study utilizes Internet domain ranking as an important tool for this purpose. The research explores website ranking methods based on factors such as referrals, popularity, and traffic. It also examines the primary ranking techniques, focusing on distinguishing characteristics including similarity, stability, responsiveness, and the degree of benignity. The study then narrows its focus to ranking cloud service providers, using Tranco as a reliable source for internet domain rankings, which provides valuable insights into the online status of websites at both global and regional levels. Additionally, this study proposes using Tranco's aggregated ranking to evaluate the popularity of cloud service providers' domains and applies this approach to analyze the ranking and status of Iranian cloud service providers. The paper introduces a ranking algorithm that requires verification of the IP address and name server (NS) records for each domain in the extracted list, excluding domains without IP addresses or with expired NS records. The results show a direct correlation between Tranco rankings, the number of active users (as measured through company user panel metrics), and the market share of cloud service providers, reflecting their true popularity. The adoption of this Tranco-based method for monitoring and ranking cloud service providers demonstrates that higher active user counts are associated with increased sales of cloud services and features, leading to higher rankings both on Tranco and within the cloud service market.

Keywords: Cloud Service, Internet Domains, Tranco, Internet Address, Ranking

* Corresponding Author's email: amansuri@itrc.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۲۳۸ الی ۲۴۸

روش نوین مبتنی بر ترانکو جهت رصد فراهم‌کنندگان خدمات ابری

داود ملکی[۱]، پژمان گودرزی[۲]، علیرضا منصوری[۳]*، نداء قربانی[۴]، احسان آریانیان[۳]

[۱] عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران
[۲] دانشیار پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران
[۳] استادیار پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران
[۴] پژوهشگر پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰
نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

ارائه‌دهندگان خدمات رایانش ابری، خدمات مختلفی را به کاربران گوناگون ارائه می‌دهند که این امر نیاز به راه‌حل‌های مؤثر برای نظارت بر این خدمات را حیاتی می‌سازد. این پژوهش به ارزیابی و رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی و وب‌سایت‌ها، بر اساس عوامل مختلفی همچون ارجاعات، محبوبیت و ترافیک می‌پردازد. همچنین روش‌های اصلی رتبه‌بندی همراه با ویژگی‌های متمایز آنها مانند شباهت، پایداری، پاسخگویی و درجه بی‌ضرری را مورد بررسی قرار می‌دهد. سپس به بررسی رتبه‌بندی ارائه‌دهندگان خدمات ابری می‌پردازد و از روش ترانکو -که اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت آنلاین وب‌سایت‌ها در سطح جهانی و منطقه‌ای ارائه می‌دهد- به عنوان یک منبع معتبر برای رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی استفاده می‌کند. همچنین، به معرفی الگوریتم این رتبه‌بندی می‌پردازد. در این الگوریتم نیاز، به تایید آدرس IP و سرور نام (NS) برای هر دامنه موجود در فهرست استخراج شده وجود دارد و در آن دامنه‌هایی که فاقد آدرس IP هستند یا رکوردهای NS آنها منقضی شده، حذف می‌شوند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که بین رتبه‌بندی ترانکو، تعداد کاربران فعال (که با استفاده از معیارهای پنل کاربری شرکت‌ها اندازه گیری می‌شود) و سهم بازار فراهم کننده خدمات ابری که همان محبوبیت واقعی شرکت‌های ابری در بازار است، ارتباط مستقیم وجود دارد. پذیرش روش نوین مبتنی بر ترانکو جهت رصد و رتبه‌بندی فراهم کنندگان خدمات ابری نشان می‌دهد که افزایش تعداد کاربران فعال با افزایش فروش خدمات و ویژگی‌های ابری همراه است و منجر به بالارفتن رتبه‌ها هم در ترانکو و هم در بازار خدمات ابری می‌شود.

کلیدواژگان: خدمات ابری، دامنه‌های اینترنتی، ترانکو، آدرس اینترنتی، رتبه‌بندی.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: amansuri@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

یک ارائه‌دهنده خدمات ابری ترکیبی از فناوری، زیرساخت و تخصص به منظور ارائه خدمات رایانش ابری می‌باشد. ارائه‌دهندگان خدمات ابری دارای توزیع‌شدگی و چندین مرکز داده در سراسر جهان هستند که زیرساخت‌های فیزیکی مورد نیاز برای محاسبات ابری را در خود جای داده‌اند. با استفاده از خدمات ابری، هر کسی، در هر مکان و در هر زمان می‌تواند با اتصال به این مراکز داده و خرید ظرفیت مورد نیاز مبتنی‌بر استفاده به این زیرساخت ابری دسترسی داشته باشد.

استفاده از خدمات ابری ارائه شده توسط CSPها، چالش‌های اصلی چون حفظ محرمانگی و امنیت داده‌ها، محدودیت‌های کنترل و مدیریت زیرساخت توسط خدمت گیرنده به همراه دارد [۱, ۲].

رایانش ابری به دلیل مزایای متعددی نظیر کاهش هزینه‌های زیرساختی و دسترسی بهتر به منابع پردازشی، به سرعت در حال رشد است. با گسترش استفاده از خدمات ابری در سطح جهانی، رقابت در این بازار افزایش یافته است. در ایران نیز، شرکت‌های متعددی به ارائه خدمات ابری پرداخته‌اند، اما رتبه‌بندی دقیق و شفاف از این شرکت‌ها در مقایسه با رقبا به‌ویژه در سطح جهانی، نیازمند تحلیل داده‌های معتبر است.

ارزیابی عملکرد و انتخاب مناسب‌ترین ارائه‌دهنده خدمات ابری به عنوان یک فرآیند مهم، به داده‌های دقیق و مدل‌های تصمیم‌گیری کارآمد نیاز دارد. روش‌های مرسوم ارزیابی مبتنی بر معیارهای عینی مانند تعداد کاربران فعال و حجم تعاملات وب است که نشان‌دهنده عملکرد و محبوبیت شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات ابری در میان کاربران است [۳].

طبق آمار ارائه شده توسط Siteefy[1]، در حال حاضر حدود ۱,۱۱ میلیارد وب‌سایت در سطح جهانی وجود دارد و تقریباً ۱۰،۵۰۰ وب‌سایت جدید هر ساعت ایجاد می‌شود [۴]. حدود ۱۵ درصد این وب سایت‌ها از خدمات ابری استفاده می‌کنند. با توجه به حجم وسیع صفحات وب و سرعت رشد سریع آن‌ها، موتورهای جستجوی خودکار مانند گوگل و یاندکس برای ارائه اطلاعات معتبر به کاربران ضروری هستند.

هدف از رتبه‌بندی وب، سازماندهی وب‌سایت‌ها در یک فهرست ساختاریافته طبق معیارهای بصری، از جمله تعداد بازدیدهای صفحه یا بازدیدکنندگان منحصر به فرد در یک بازه زمانی مشخص است [۲-۸]. این رتبه‌بندی‌ها معمولاً توسط نهادهای مستقل مانند الکسا، مجستیک، امبریلا و کوانت‌کست[2] تولید می‌شوند و از تحلیل پنل‌های کاربران و گروه‌هایی از افراد به‌دست می‌آیند که بابت اجازه نظارت بر فعالیت‌های مرور آنلاین خود پاداش دریافت می‌کنند.

این مقاله ابتدا با تمرکز خاص بر روی پر بازدیدترین دامنه‌ها در میان تمام دامنه‌های ارائه‌دهندگان خدمات ابری، روش‌های رتبه‌بندی مربوط به دامنه‌های اینترنتی را بررسی و ارزیابی می‌کند، علاوه بر این، رتبه‌بندی دامنه‌ها بر اساس پارامترهای مختلف از جمله تأخیر در جستجوی نام دامنه، مالکیت IP، سرورهای نام، موقعیت جغرافیایی و غیره ارزیابی خواهد شد. بعد از آن در این مقاله با استفاده از نتایج بدست آمده از بهترین روش‌های رتبه‌بندی دامنه های اینترنتی، به بررسی و ارزیابی فراهم‌کنندگان خدمات ابری (CSP) می‌پردازد. اهداف این مقاله در قالب پرسش‌های ۹ گانه در جدول ۱ آورده شده است.

بخش‌های بعدی مقاله به شرح زیر ساختاربندی شده‌اند. در بخش دوم، به بحث در مورد کارهای مرتبط پرداخته شده است. بخش سوم، رتبه‌بندی محبوبیت دامنه‌های وب‌سایت‌ها را در پلتفرم‌های ارزیابی مختلف معرفی می‌کند و تحلیلی از عملکرد رتبه‌بندی و مقایسه آن‌ها ارائه می‌دهد. بخش چهارم، اصول کلی رتبه‌بندی ترانکو[3] را مورد بررسی قرار خواهد داد.

جدول ۱. پرسش‌های پژوهش در این مقاله

ردیف	سؤالات تحقیق
۱	اهمیت و ضرورت نظارت بر خدمات رایانش ابری چیست؟
۲	کدام معیارها برای ارزیابی و رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی و وب‌سایت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند؟
۳	ویژگی‌های متمایز روش‌های مختلف رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی چیست؟
۴	روش ترانکو چگونه عمل می‌کند و چه تفاوت‌هایی با سایر روش‌های رتبه‌بندی دارد؟
۵	نقش تأیید آدرس IP و سرور نام (NS) در دقت رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی چیست؟
۶	چه ارتباطی بین رتبه‌بندی ترانکو و تعداد کاربران فعال یک ارائه‌دهنده خدمات ابری وجود دارد؟
۷	چگونه سهم بازار فراهم‌کنندگان خدمات ابری با رتبه‌بندی آنها در ترانکو مرتبط است؟
۸	آیا پذیرش روش مبتنی بر ترانکو می‌تواند باعث بهبود نظارت و تحلیل وضعیت ارائه‌دهندگان خدمات ابری شود؟
۹	چگونه افزایش تعداد کاربران فعال می‌تواند منجر به افزایش فروش خدمات ابری و بهبود رتبه‌بندی شود؟

[1] https://siteefy.com

[2] Alexa, Cisco Umbrella, Majestic, and QuantCast

[3] Tranco

در بخش پنجم ارتباط میان رتبه وب‌سایت شرکت ارائه‌دهنده خدمات ابری و تعداد کاربران فعال و تعاملات وب بر اساس رتبه‌بندی ترانکو مورد بررسی قرار گرفته است. بخش ششم ارزیابی نتایج نهایی را بیان کرده و در نهایت در فصل هفتم به بیان نتیجه گیری و مسیرهایی برای تحقیقات آتی پرداخته شده است.

۲- کارهای مرتبط

در سال‌های اخیر، مدل‌های رتبه‌بندی مبتنی بر معیارهای چندگانه به‌ویژه در حوزه خدمات ابری، به دلیل اهمیت روزافزون تصمیم‌گیری در محیط‌های رقابتی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی، یادگیری ماشین و تحلیل شبکه، توانایی دارند که انتخاب شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات ابری را با توجه به معیارهای مختلف تسهیل کنند [۵].

تحقیقات متعددی قبلاً به بررسی رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی و صفحات وب پرداخته‌اند، که در بخش‌های زیر به برخی آن‌ها اشاره شده است.

نویسندگان در [۶] یک مرور جامع از روش‌های رتبه‌بندی صفحات وب با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی وب انجام داده‌اند. آن‌ها رویکردها، الگوریتم‌ها و روش‌های ارزیابی مختلف از مطالعات پیشین را توضیح داده‌اند و همچنین چالش‌های مهم در رتبه‌بندی صفحات و داده‌کاوی وب را برجسته کرده‌اند. این تحلیل بینش‌های ارزشمندی را ارائه می‌دهد و مسیرهای احتمالی برای تحقیقات آینده در این زمینه را نشان می‌دهد.

بسیاری از روش‌های رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی با تمرکز بر زمینه‌های پرس‌وجوی کاربران برای بهبود نتایج موتورهای جستجو توسعه یافته‌اند [۷-۹].

مطالعه [۱۰] از یک روش یادگیری نظارت‌شده با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان، همراه با چندین ویژگی کلیدی URL، از جمله تعداد نقطه‌ها، خط تیره‌ها، کاراکترهای عددی، طول کلی URL، شاخص شباهت و علامت‌گذاری که نشان‌دهنده حضور یک آدرس IP در URL است، برای تشخیص وب‌سایت‌ها یا دامنه‌های مخرب استفاده می‌کند.

چندین پژوهشگر دیگر یک دسته‌بندی‌کننده خاص به نام الگوریتم تولید دامنه (DGA[1]) معرفی کرده‌اند که از ویژگی‌های زبانی برای تشخیص نام دامنه‌های مخرب به صورت بلادرنگ استفاده می‌کند [۱۱].

نتیجه اینکه تحلیل و ارزیابی جامع برای ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی بر اساس معیارهای و شاخص‌های کیفیت از پیش تعریف شده، از جمله بی‌ضرری[2]، در دسترس بودن، ثبات و دیگر ویژگی‌ها انجام می‌شود.

از میان این معیارها، داده‌های تعاملات وب و تعداد کاربران فعال به عنوان شاخص‌هایی از کیفیت و محبوبیت خدمات به‌ویژه با استفاده از منابعی مانند Tranco[3]، در رتبه‌بندی ارائه‌دهندگان خدمات ابری نقشی کلیدی دارند. ترانکو، به عنوان یک معیار معتبر، داده‌های تعاملات وب را از چندین منبع مختلف گردآوری کرده و رتبه‌بندی جامعی از وب‌سایت‌ها و خدمات برخط ارائه می‌دهد. ترانکو به‌عنوان یک سیستم رتبه‌بندی وب‌سایت‌ها، به‌طور منظم اطلاعاتی در مورد پربازدیدترین دامنه‌ها در سطح جهانی و منطقه‌ای ارائه می‌دهد. در این تحقیق، هدف اصلی تحلیل وضعیت و رتبه‌بندی شرکت‌های خدمات ابری ایرانی با استفاده از داده‌های ترانکو است [۱۲].

تفاوت اصلی بین مقاله حاضر و مطالعات قبلی ارجاع شده، تحلیل و ارزیابی جامع انجام شده برای ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی است که بر اساس شاخص‌های کیفیت از پیش تعریف شده، از جمله بی‌ضرری، در دسترس بودن، ثبات و دیگر ویژگی‌ها انجام می‌شود. تا آنجا که ما می‌دانیم، این اولین ارزیابی رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی ابری از این منظر خاص است.

مزیت اصلی استفاده از رتبه‌بندی ترانکو که در این تحقیق استفاده شده است در مقایسه با سایر روش‌های رتبه‌بندی ذکر شده شامل موارد زیر می‌باشد:

- دامنه‌ها با رتبه‌ی بالا، ترافیک و بازدیدکننده‌ی بیش‌تری دارند.
- رتبه‌ی دامنه‌ها در طول زمان تغییر می‌کنند، تأثیر این پارامتر در دوره‌های زمانی امکان بررسی دارد.

۳- رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی

در این بخش ویژگی‌های مختلف روش‌های رتبه‌بندی شامل الکسا، امبریلا، کوانت‌کست و مجستیک که ممکن است در ارزیابی مناسب بودن آن‌ها مفید باشند، مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱۳].

- شباهت

[1] Domain Generation Algorithm
[2] Benignity
[3] https://tranco-list.eu/

از ژانویه ۲۰۱۸ تا نوامبر ۲۰۱۹، چهار روش رتبه‌بندی مختلف الکسا، امبریلا، کوانت‌کست و مجستیک فقط ۲٫۴۸٪ تطابق و شباهت در رتبه‌بندی وب‌سایت‌های محبوب نشان دادند. این نشان می‌دهد که تنها ۷۰،۰۰۰ از ۲٫۸۲ میلیون سایت در رتبه‌بندی‌های آن‌ها هم‌راستا بوده‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که همپوشانی و توافق کمی در میان این سیستم‌های رتبه‌بندی پرکاربرد از منظر شاخص‌های شباهت وجود دارد [۱۳].

- ثبات و سازگاری

چهار روش رتبه‌بندی مورد بحث تفاوت‌های قابل توجهی در شاخص‌های ثبات و سازگاری خود دارند. طبق یافته‌های ارائه‌شده در [۱۳]، لیست‌های کوانت‌کست و مجستیک به عنوان پایدارترین و سازگارترین بین چهار روش شناخته شده‌اند. این دو لیست نوسانات روزانه‌ای در حدود ۱٪ را تجربه می‌کنند. در مقابل، روش رتبه‌بندی امبریلا تغییرات بسیار بیشتری دارد، به طوری که تغییرات روزانه آن در حدود ۱۰٪ است. علاوه بر این، از ۳۰ ژانویه ۲۰۱۸، حدود ۵۰۰،۰۰۰ رتبه برتر مرتبط با الکسا روزانه تغییر کرده‌اند که به دلیل تغییر ناگهانی در روش‌شناسی رتبه‌بندی وب‌سایت‌های الکسا بوده و باعث تغییرات روزانه حدود ۵۰٪ شده است، همانطور که در [۱۳] ذکر شده است.

- دسترسی‌پذیری

از منظر دسترسی، حدود ۱۱ درصد از رتبه‌بندی مجستیک و ۵ درصد از رتبه‌بندی‌های کوانت‌کست و الکسا غیرقابل دسترسی ارزیابی می‌شوند. در مورد رتبه‌بندی امبریلا، این رقم به حدود ۲۸ درصد می‌رسد. دلیل اصلی نقص‌های موجود در رتبه‌بندی امبریلا، عدم وجود مکانیزم فیلتر برای حذف زیر دامنه‌ها یا دامنه‌های نامعتبر است. وجود این دامنه‌های غیرقابل دسترسی مانع از نمایان کردن دقیق تمام اینترنت بر اساس یک نمونه محدود می‌شود و ممکن است منجر به نتایج نادرست گردد [۱۳].

- بی‌ضرری

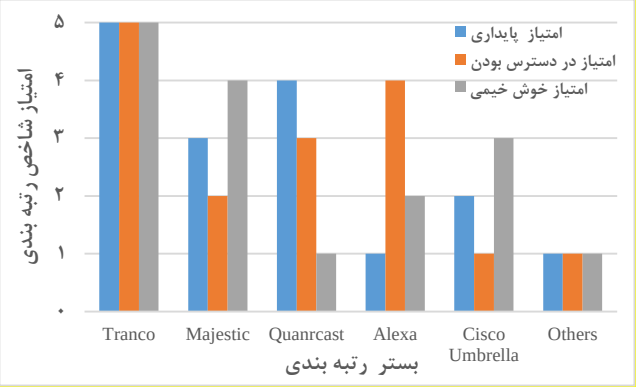
در سال ۲۰۱۸، ارزیابی‌ای که از طریق Google Safe Browsing انجام شد، نشان داد که تقریباً ۰٫۲۲ درصد از وب‌سایت‌های فهرست شده در مجستیک ممکن است مضر باشند و ممکن است با بدافزارها مرتبط باشند. بیشتر روش‌های رتبه‌بندی این سایت‌های مخرب را شناسایی کرده‌اند. به عنوان مثال، در میان ۱۰،۰۰۰ دامنه برتر الکسا، چهار دامنه ویژگی‌های دستکاری‌کننده‌ای داشتند. علاوه بر این، یک دامنه از ۱۰،۰۰۰ دامنه برتر مجستیک به توزیع نرم‌افزار مخرب پرداخته بود. شیوع این دامنه‌های مضر در فهرست‌های کوانت‌کست و الکسا به‌طور قابل توجهی بالا است و به کاهش نمره بی‌ضرری کمک می‌کند. با این حال، مجستیک بالاترین نمره بی‌ضرری را در میان این پلتفرم‌ها حفظ می‌کند [۱۳].

۳-۱- مقایسه عملکرد

داده‌های ارائه‌شده در جدول ۲ از ارقام و توضیحاتی که در بخش پیشین بحث شد، استخراج شده‌اند.

جدول ۲. شاخص‌های روش‌های مختلف رتبه‌بندی دامنه‌های وب سایت

روش رتبه‌بندی	شاخص‌های رتبه‌بندی	دسترسی پذیری سایت	پایداری سایت	بی ضرر بودن سایت
الکسا	اندازه‌گیری بر اساس ترکیبی از بازدیدهای صفحه و کاربران سایت و کاربران نهایی است و از طریق افزونه مرورگر، URLهای بازدید شده ثبت می‌شوند	۴	۱	۲
Cisco Umbrella	شمارش تعداد IP های یک دامنه بر اساس ترافیک OpenDNS و تعداد آدرس‌های IP که درخواست‌های DNS به آنها صادر می‌شوند، می‌باشد.	۱	۲	۳
Majestic	با شمارش تعداد زیرشبکه‌هایی که یک صفحه وب میزبانی می‌کند تا به یک دامنه پیوند دهد رتبه‌بندی انجام می‌شود.	۲	۳	۴
Quantcast	شمارش بازدیدکنندگان سایت از طریق یک اسکریپت تحلیلی انجام می‌شود.	۳	۴	۱
ترانکو	این روش، مجموعه ای هوشمند و ترکیبی از تمام لیست‌های داده معتبر از روش‌های رتبه‌بندی موجود را ارائه می‌دهد و در برابر دستکاری لیست مقاوم است.	۵	۵	۵
بقیه روش‌ها	این روش‌ها با خزیدن و شمارش تعداد زیر شبکه‌های میزبانی شده توسط هر دامنه به صورت ماهانه رتبه‌بندی را انجام می‌دهد.	۱	۱	۱



شکل ۱. امتیاز شاخص‌های رتبه‌بندی در پلتفرم‌های مختلف [۱۳-۱۶]

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، روش ترانکو ویژگی‌های برتری، از جمله رتبه‌بندی ثبات، رتبه‌بندی دسترسی و ارزیابی مثبت برای مقاومت سایت در برابر دستکاری را نمایش می‌دهد [۱۴]. بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۱، روش ترانکو به عنوان موثرترین رویکرد شناسایی شده است، در حالی که Cisco Umbrella و سایر زیرپلتفرم‌های مرتبط به عنوان کمترین اثربخشی در ارزیابی سایت‌های مربوط به ثبات، دسترسی و دستکاری رتبه‌بندی می‌شوند. امتیازات تجمعی برای شاخص‌های ثبات، در دسترس بودن و بی‌ضرری به شرح زیر است: پلتفرم ترانکو در مجموع ۱۵ امتیاز، پلتفرم Majestic، در مجموع ۹ امتیاز، پلتفرم Quantcast در مجموع ۸ امتیاز، پلت فرم الکسا ۷ امتیاز، سیسکو کسب کرده است. پلتفرم آمبرلا ۶ امتیاز کسب کرد، در حالی که سایر سکوها مجموعاً ۳ امتیاز کسب کردند.

۳-۲- استفاده از داده‌های ترانکو

- معرفی ترانکو و نحوه عملکرد آن در رتبه‌بندی دامنه‌ها

سیستم ترانکو یک سیستم رتبه‌بندی دامنه است که توسط محققان دانشگاه لوون بلژیک توسعه داده شده و به عنوان جایگزینی برای سایر رتبه‌بندی‌های مشهور مانند الکسا و مجستیک مطرح است.

- نحوه عملکرد ترانکو

ترانکو داده‌های خود را از چندین لیست مختلف رتبه‌بندی جمع‌آوری می‌کند، از جمله:

۱- Cisco Umbrella: این خدمت ترافیک DNS را پایش می‌کند و داده‌های دامنه‌های پر ترافیک را ارائه می‌دهد.

۲- Majestic: داده‌های لینک‌ها و شبکه‌های لینک‌دهی میان وب‌سایت‌ها را بررسی می‌کند و در رتبه‌بندی استفاده می‌شود.

۳- Quantcast: این منبع بر اساس آمار بازدید سایت‌ها، به ترانکو کمک می‌کند تا دید بهتری از محبوبیت سایت‌ها داشته باشد.

۴- Alexa: که داده‌های ترافیکی را از کاربران ابزارهای مرورگر مانند افزونه‌ها جمع‌آوری می‌کرد (این خدمت در سال ۲۰۲۲ متوقف شد).

- روش ترکیب داده‌ها

برای ترکیب این داده‌ها، ترانکو رتبه‌های هفتگی را از این منابع جمع‌آوری کرده و سپس میانگین‌های رتبه‌ای آن‌ها را محاسبه می‌کند. از آنجایی که منابع مختلف ممکن است دقت و روش‌های مختلفی در جمع‌آوری داده‌ها داشته باشند، این ترکیب باعث افزایش پایداری رتبه‌بندی نهایی می‌شود. همچنین، با استفاده از روش‌های آماری برای صاف کردن داده‌ها، رتبه‌های غیرعادی یا نویزهای موجود در داده‌ها حذف می‌شوند.

- ویژگی‌های کلیدی ترانکو

شفافیت: ترانکو تمام روش‌ها و داده‌های خود را باز و شفاف نگه می‌دارد.

پایداری و قابلیت تکرار: به دلیل ترکیب چندین منبع و روش، رتبه‌بندی‌های ترانکو پایداری بیشتری دارند و در تحقیقات علمی استفاده گسترده‌ای پیدا کرده‌اند[۱۵، ۱۶].

- استفاده از ترانکو برای تحلیل حضور آنلاین و تعاملات کاربران با وب‌سایت‌های ارائه‌دهندگان خدمات ابری

۱- رتبه‌بندی پایدار و متعادل

به دلیل استفاده ترانکو از داده‌های چندین منبع مختلف مانند Majestic و Cisco Umbrella، از رتبه‌بندی‌های پایدارتری نسبت به سیستم‌های مشابه مانند Alexa برخوردار است. این پایداری به تحلیل دقیق‌تر روند تغییرات ترافیکی وب‌سایت‌ها، به‌ویژه در حوزه خدمات ابری، کمک می‌کند.

۲- تحلیل حضور کاربران در خدمات ابری

از طریق ترانکو، ارائه‌دهندگان خدمات ابری می‌توانند حضور کاربران خود را در سطح جهانی و بر اساس بازدیدکنندگان مختلف تحلیل کنند. این تحلیل به شناسایی منابع اصلی ترافیک کمک می‌کند و امکان مقایسه بین رقبا را فراهم می‌سازد.

۳- تحلیل رفتار کاربران و تعاملات با وب‌سایت‌ها

از آنجا که ترانکو به داده‌های ترافیک واقعی وب دسترسی دارد، می‌تواند رفتارهای کاربرانی را که از خدمات ابری استفاده می‌کنند، ردیابی کند.

۴- شناسایی الگوهای ترافیکی و مشکلات عملکردی

یکی از کاربردهای مهم ترانکو، شناسایی الگوهای ترافیکی غیرمعمول یا مشکلات عملکردی در وب‌سایت‌های ارائه‌دهندگان خدمات ابری است. این قابلیت می‌تواند به ارائه‌دهندگان خدمات ابری کمک کند تا به سرعت به مشکلات عملکردی واکنش نشان دهند و از تجربه کاربری ضعیف جلوگیری کنند.

بنابراین ترانکو از طریق تحلیل داده‌های ترکیبی و پایداری بیشتر در رتبه‌بندی، ارائه‌دهندگان خدمات ابری می‌توانند به درک بهتری از حضور آنلاین خود دست یابند و استراتژی‌های بهبود تعاملات کاربری و جذب کاربران جدید را توسعه دهند [۱۷, ۱۸].

۴- رتبه‌بندی خدمات ابری با استفاده از ترانکو

ارتباط میان رتبه وب‌سایت شرکت ارائه‌دهنده خدمات ابری و تعداد کاربران فعال و تعاملات وب شامل موارد زیر است:

- رتبه‌بندی وب‌سایت و حضور آنلاین

براساس تحقیقات انجام شده رتبه‌بندی وب‌سایت‌ها با استفاده از ترانکو می‌تواند نشانه‌ای از میزان محبوبیت و تعاملات کاربران باشد [۱۹].

- تعداد کاربران فعال و تعاملات وب

مطالعات نشان داده است که رابطه مستقیمی میان رتبه ترافیکی وب‌سایت و تعداد کاربران فعال (DAU/MAU[1]) وجود دارد [۲۰].

- تأثیر تعاملات کاربران بر رتبه‌بندی

مؤسسه DNS در تحلیل خود بیان کرده است که تعاملات طولانی‌تر کاربران با وب‌سایت‌ها، مانند دانلود مستندات، استفاده از ابزارهای آنلاین، یا مدیریت خدمات ابری، موجب افزایش رتبه‌بندی در سیستم‌هایی مانند ترانکو می‌شود.

این رابطه دوطرفه است؛ به این معنا که هرچه تعاملات کاربران بیشتر باشد، وب‌سایت رتبه بهتری کسب می‌کند و رتبه بهتر منجر به جذب کاربران بیشتری خواهد شد [۲۱, ۲۲].

بنابراین رتبه‌بندی وب‌سایت‌ها، به ویژه برای شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات ابری، به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در تحلیل تعداد کاربران فعال و میزان تعاملات وب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در الگوریتم ترانکو به بررسی اعتبار NS و IP مربوط به دامنه می‌پردازد و این فرآیند به شرح زیر است:

۱- بررسی وجود IP Address و Name Server

پس از دریافت نتایج پرس‌وجوی DNS، الگوریتم چک می‌کند که آیا دامنه دارای یک آدرس IP معتبر است یا خیر. همچنین بررسی می‌کند که آیا Name Serverهای معتبر برای دامنه وجود دارند.

اگر دامنه‌ای فاقد آدرس IP باشد (یعنی هیچ رکورد A یا AAAA برای دامنه پیدا نشود)، آن دامنه از لیست حذف می‌شود، زیرا نمی‌توان به آن دامنه دسترسی پیدا کرد.

اگر دامنه‌ای فاقد Name Server باشد (یعنی هیچ رکورد NS برای دامنه پیدا نشود یا Name Serverها به‌درستی تنظیم نشده باشند)، آن دامنه نیز حذف می‌شود، چرا که این نشان‌دهنده مشکل در تنظیمات DNS دامنه است.

۲- بررسی وضعیت IPها

علاوه بر وجود IP Address، الگوریتم ممکن است وضعیت و نوع آدرس IP را نیز بررسی کند:

آدرس IP عمومی یا خصوصی: اگر دامنه دارای یک IP خصوصی باشد (مثل IPهای شروع‌شده با ۱۹۲,۱۶۸. یا ۱۰,۰,۰,۰)، این IP معتبر برای اینترنت عمومی نیست و دامنه از لیست حذف می‌شود.

IP های شناخته‌شده اسپم: برخی IP ها ممکن است در لیست‌های سیاه قرار داشته باشند (به دلیل استفاده برای فعالیت‌های اسپم یا بدافزار). دامنه‌هایی که به این IP ها متصل هستند ممکن است از لیست حذف شوند.

۳- اعتبارسنجی Name Serverها

پس از دریافت اطلاعات NS، الگوریتم اعتبار Name Server ها را نیز بررسی می‌کند. دامنه‌هایی که Name Server معتبر ندارند یا Name Server هایشان به‌درستی پاسخ نمی‌دهند، از لیست حذف می‌شوند.

بررسی پاسخ‌دهی Name Server ها: ترانکو چک می‌کند که آیا Name Serverها به درخواست‌های DNS به‌درستی پاسخ می‌دهند یا خیر. اگر Name Server به درستی پیکربندی نشده باشد یا خراب باشد، این دامنه فاقد اعتبار خواهد بود و حذف می‌شود.

۴- حذف دامنه‌های فاقد IP یا Name Server معتبر

در پایان، هر دامنه‌ای که: آدرس IP نداشته باشد و Name Server معتبر نداشته باشد. یا IP آن معتبر نباشد (خصوصی یا بلاک‌شده باشد)، به‌طور خودکار از لیست ترانکو حذف می‌شود.

۵- روش پیشنهادی

هدف اصلی ترانکو، ایجاد یک رتبه‌بندی ترکیبی و پایدار برای ارزیابی دامنه‌ها است. این روش بیشتر مناسب برای: تحلیل پژوهش و امنیت

[1] The Daily Active Users / Monthly Active Users Ratio

سایبری (مانند انتخاب دامنه‌های پرمخاطب برای آزمایش حملات یا تحلیل تهدیدات) می‌باشد.

۱. منبع داده‌ها ترانکو:

منابع ترانکو ترکیبی از رتبه‌بندی‌های چندین پلتفرم (مانند Majestic، Umbrella، Alexa) می‌باشد.

تأکید اصلی رویکرد ترانکو موارد زیر است:

- پایداری داده‌ها (بنابراین داده‌ها کمتر به تغییرات روزانه حساس هستند).
- رتبه‌بندی ترکیبی و میانگین‌گیری.

۲. روش رتبه‌بندی ترانکو:

روش رتبه‌بندی ترانکو میانگین‌گیری و ترکیب داده‌های چند منبع رتبه‌بندی دامنه است.

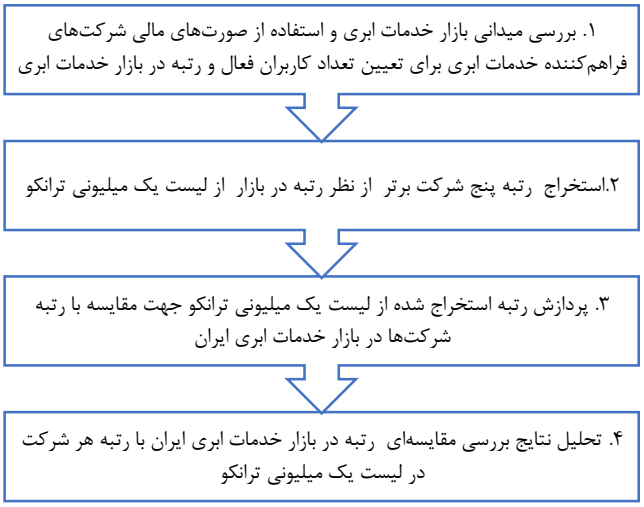
- مزایای این روش، پایداری و مقاومت در برابر تغییرات کوتاه‌مدت می‌باشد.
- معایب این روش، جزئیات مربوط به رفتار کاربران یا منابع ترافیک را ارائه نمی‌دهد.

۳. گستردگی اطلاعات

تمرکز ترانکو بر موارد زیر است:

- رتبه‌بندی کلی دامنه‌ها (بدون جزئیات در مورد منابع ترافیک یا مخاطبان).
- محدود به دامنه‌هایی است که در رتبه‌بندی‌های اولیه وجود دارند.

در شکل ۲ گام‌های روش پیشنهادی جهت رتبه‌بندی خدمات ابری در چهار مرحله آورده شده است.



شکل ۲. گام‌های روش پیشنهادی جهت رتبه‌بندی خدمات ابری

در لیست یک میلیونی از وب سایت‌های رتبه‌بندی شده در ترانکو به استخراج رتبه پنج شرکت فراهم‌کننده خدمات ابری ایرانی که طبق ارزیابی‌های میدانی بازار در جایگاه برتری از نظر تعداد کاربر فعال نسبت به سایر شرکت‌های ارائه دهنده خدمات ابری این کشور قرارداشتند می‌پردازیم. اسامی این شرکت‌ها با A، B، C، D و E نشان داده شده‌اند[۱]. دلیل این انتخاب این پنج شرکت، بررسی و صحت‌سنجی جایگاه این شرکت‌ها از نظر تعداد کاربر فعال طبق بررسی‌های میدانی با توجه به رتبه آنها در لیست یک میلیونی ترانکو می‌باشد.

- استخراج داده‌ها از ترانکو:

داده‌های ترانکو از پایگاه داده رسمی آن برای بازه زمانی ۲۰۲۳ استخراج شده است. این داده‌ها شامل رتبه‌های جهانی و منطقه‌ای دامنه‌های اینترنتی هستند.

- شناسایی دامنه‌های خدمات ابری ایران:

دامنه‌های مربوط به شرکت‌های ابری داخلی ایران با اسامی A، B، C، D و E شناسایی و استخراج شدند.

- استفاده از ابزارهای آنلاین برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها:

برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از ابزارهای آنلاین و ساده مانند Google Sheets و Excel استفاده شده است. این ابزارها برای پردازش داده‌ها و مقایسه رتبه‌های دامنه‌ها به‌کار گرفته شدند. در Google Sheets و Excel، داده‌های رتبه‌بندی دامنه‌ها وارد شده و با استفاده از توابع ساده مانند SORT و FILTER، رتبه‌ها و تعداد بازدیدکنندگان هر دامنه تحلیل گردید.

- تحلیل مقایسه‌ای:

در روش پیشنهادی ابتدا سکوهای رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی را مورد مقایسه قرار داده‌ایم و دریافته‌ایم که ترانکو مناسب‌ترین ابزار برای رتبه‌بندی دامنه‌های اینترنتی است چرا که با توجه به رتبه مشخص شده در لیست یک میلیونی ترانکو می‌توان به میزان محبوبیت سایت‌ها رسید. بنابراین پس از بررسی‌های میدانی بازار، رتبه شرکت‌ها در بازار خدمات ابری و تعداد کاربران فعال (بازدیدهای منحصر به فرد)، از نتایج بدست آمده از Agent های استفاده شده برای SEO پنل کاربری شرکت‌ها و رتبه آنها در بازار با توجه به صورت‌های مالی (میزان فروش حاصل از ارائه خدمات ابری) از ترانکو به عنوان ابزاری در جهت صحت سنجی رتبه کسب شده توسط شرکت‌ها و تعداد کاربران فعال آنها استفاده گردیده

[۱] به دلیل حفظ محرمانگی اطلاعات شرکت‌ها، از این اسامی استفاده شده است.

است. آنگاه رتبه‌های دامنه‌های ایرانی با دامنه‌های جهانی مقایسه شده‌اند تا وضعیت رقابتی خدمات ابری ایران مشخص گردد. همچنین روند تغییرات رتبه‌ها در طول زمان بررسی شده‌اند.

۶- نتایج تحلیل

پنج شرکت فراهم کننده خدمات ابری ایرانی با اسامی A، B، C، D و E شناسایی شدند و دامنه‌های آن‌ها استخراج گردید. با بررسی‌های میدانی بازار، رتبه شرکت‌ها در بازار خدمات ابری و تعداد کاربران فعال (بازدید های منحصر به فرد) از نتایج بدست آمده از Agent های استفاده شده برای SEO پنل کاربری توسط شرکت‌ها به دست آمده است که در زیر آورده شده است:

۱. A : ۱۰۴هزار

۲. B : ۹۰ هزار

۳. C : ۷۰ هزار

۴. E : ۹,۸ هزار

۵. D : ۱۵ هزار

رتبه در بازار شرکت‌ها با توجه به صورت های مالی شرکت‌ها که میزان فروش حاصل از ارائه خدمات ابری به دست آمده است که در زیر آورده شده است [۲۳]:

۱. A : ۱ (۱۷٪ سهم بازار خدمات ابری ایران)

۲. B : ۲ (۱۲٪ سهم بازار خدمات ابری ایران)

۳. C: ۳ (۸٪ سهم بازار خدمات ابری ایران)

۴. E : ۴ (۶٪ سهم بازار خدمات ابری ایران)

۵. D : ۵ (۳٪ سهم بازار خدمات ابری ایران)

پس از استخراج دامنه های پنج شرکت یاد شده به بررسی نتایج رصد آنها توسط ترانکو و استخراج رتبه اختصاص داده شده به آنها در لیست ترانکو پرداخته شده که نتایج آن در ستون «رتبه خام شرکت در ترانکو» جدول ۳ آورده شده است.که در زیر آورده شده است:

۱. A: ۴۸۹۸۷

۲. B : ۵۶۸۷۴

۳. C: ۷۱۹۰۵

۴. E : ۹۷۹۲۴

۵. D : ۱۷۶۴۰۳

برای مقایسه رتبه شرکت‌ها در ترانکو با تعداد کاربران فعال شرکت‌ها و رتبه شرکت‌ها در بازار ایران نتایج رتبه‌بندی ترانکو را نزولی مرتب می‌کنیم. سپس رتبه‌ها را بر عدد ثابتی چون ۱۰،۰۰۰ و در مورد تعداد کاربران فعال بر عدد ثابت ۱۰۰۰ تقسیم می‌کنیم. که این نتایج در ستون« رتبه شرکت در ترانکوی پردازش شده» که جهت مقایسه با رتبه در بازار ایران می‌باشد در جدول ۳ نشان داده شده است و در زیر آورده شده است:

۱. A: ۱ (۹۵,۱)

۲. B : ۲ (۹۴,۳)

۳. C: ۳ (۹۲،۸)

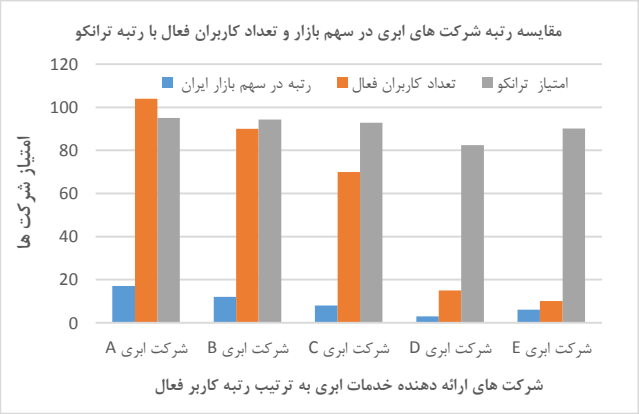
۴. E : ۴ (۹۰,۲)

۵. D : ۵ (۸۲,۳)

مقایسه رتبه ترانکو شرکت‌های ابری و تعداد کاربران فعال استخراج شده از بررسی میدانی بازار در سال ۲۰۲۴ در جدول ۳ نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که رتبه ترانکو با کاربران فعال که همان محبوبیت واقعی شرکت‌ها در بازار ارتباط مستقیم دارد.

جدول ۳. رتبه شرکت‌های ابری از لحاظ کاربران فعال و رتبه ترانکو

شرکت ابری	تعداد کاربران فعال (هزار نفر)	رتبه در بازار ایران [۲۲]	رتبه خام ترانکو	رتبه ترانکوی پردازش شده
A	۱۰۴	(۱۷٪) رتبه ۱	۴۸۹۸۷	(۹۵,۱) رتبه ۱
B	۹۰	(۱۲٪) رتبه ۲	۵۶۸۷۴	(۹۴,۳) رتبه ۲
C	۷۰	(۸٪) رتبه ۳	۷۱۹۰۵	(۹۲،۸) رتبه ۳
D	۱۵	(۳٪) رتبه ۵	۱۷۶۴۰۳	(۸۲,۳) رتبه ۵
E	۹,۸	(۶٪) رتبه ۴	۹۷۹۲۴	(۹۰,۲) رتبه ۴



شکل ۳. مقایسه رتبه‌بندی ترانکو با تعداد کاربران فعال آنها

۶-۱- نتایج کاربردی و عملیاتی

در شکل ۳ یکسانی در رتبه‌بندی ترانکو و رتبه سهم بازار دیده می‌شود اما اختلاف در رتبه ترانکو دو شرکت D (۸۲,۳ با رتبه ۵) و E (۹۰,۲ با رتبه ۴) و رتبه بازار تعداد کاربران فعال برای دو شرکت D (۱۵ هزار) و E (۹,۸ هزار) دیده می‌شود. دلیل اختلاف دیده شده این است که در رتبه‌بندی ترانکو از روش‌های آماری استفاده می‌شود که داده‌های پرت که با افزایش ناگهانی تعداد کاربران در تعاملات آنلاین کاربران بوجود می‌آید را حذف می‌کند. این موضوع باعث پایداری در رتبه ترانکو می‌شود در حالی که در مورد تعداد کاربران فعال که از Agent های SEO[1] استخراج شده است به راحتی می‌توان با استفاده از ترفندهای مربوط به افزایش جعلی[2] ترافیک و یا بازدید آن‌ها را فریب داد که اینگونه موارد در ترانکو شناسایی و حذف می‌شوند. این امر نشان دهنده رتبه‌بندی دقیق‌تر ترانکو می‌باشد [۲۴].

براساس تحقیقات انجام شده رتبه‌بندی وب‌سایت‌ها و دامنه‌ها با استفاده از Tranco می‌تواند نشانه‌ای از میزان محبوبیت و تعاملات کاربران باشد [۱۷]. مطالعات نشان داده است که رابطه مستقیمی میان رتبه ترافیکی وب‌سایت و تعداد کاربران فعال (DAU/MAU[3]) وجود دارد [۲۰]. مؤسسه DNS در تحلیل خود بیان کرده است که تعاملات طولانی‌تر کاربران با وب‌سایت‌ها، مانند دانلود مستندات، استفاده از ابزارهای آنلاین، یا مدیریت سرویس‌های ابری، موجب افزایش رتبه‌بندی در سیستم‌هایی مانند Tranco می‌شود. این رابطه دوطرفه است؛ به این معنا که هرچه تعاملات کاربران بیشتر باشد، وب‌سایت رتبه بهتری کسب می‌کند و رتبه بهتر منجر به جذب کاربران بیشتری خواهد شد [۲۱, ۲۲]. بنابراین از ترانکو در کاربردهای زیر می‌توان استفاده کرد:

۱- تحلیل حضور کاربران در خدمات ابری

۲- رتبه‌بندی پایدار و متعادل

۳- تحلیل رفتار کاربران و تعاملات با وب‌سایت‌ها

۴- شناسایی الگوهای ترافیکی و مشکلات عملکردی

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که از ترانکو به عنوان ابزاری مناسب برای بررسی و صحت‌سنجی رتبه شرکت‌های فراهم کننده خدمات در بازار و تعداد کاربران فعال استخراج شده از Agent های SEO می‌توان استفاده کرد. زیرا رتبه ترانکو با کاربران فعال شرکت‌ها در بازار ارتباط مستقیم دارد.

۷- نتیجه‌گیری

روش‌های مختلفی برای رتبه‌بندی وب‌سایت‌های فعال پربازدید توسط محققان، تحلیل‌گران امنیتی و متخصصان صنعت برای برجسته کردن اهمیت و ارتباط نام‌های دامنه اینترنتی استفاده می‌شود. این مقاله، ضمن مرور و تحلیل روش‌ها و بسترهای تحلیلی مطرح برای رتبه‌بندی، ویژگی‌های آن‌ها و ارزیابی تأثیر آن‌ها را ارزیابی و ارائه کرد. این مطالعه، گزینه‌های استاندارد را برای افزایش ویژگی‌های کلیدی روش‌های رتبه‌بندی، مانند ثبات، پاسخ‌دهی، و سطح بی ضرر بودن ارزیابی کرد. نتایج نشان می‌دهد که لیست ترانکو در زمینه‌های مختلف قابل اجرا است، زیرا ترکیب دامنه‌ها نسبتاً پایدار است.

بر اساس این پژوهش، روش ترانکو روشی نوآورانه برای ایجاد رتبه‌بندی با ادغام هوشمند لیست‌های موجود و افزایش ویژگی‌هایی که برای انجام تحقیقات معتبر و قابل اعتماد ضروری هستند، ارائه می‌دهد. مقایسه رتبه ترانکو با رتبه شرکت‌های ابری بر اساس تعداد کاربران فعال استخراج شده از بررسی میدانی بازار نشان می‌دهد که رتبه ترانکو با کاربران فعال که همان محبوبیت واقعی شرکت‌ها در بازار ارتباط مستقیم دارد.

در ادامه این تحقیق می‌توان از همبستگی لاگ رتبه‌بندی دامنه و تکنیک‌های ادغام داده‌ها برای تحلیل عملکرد روش‌های رتبه‌بندی وب چندگانه استفاده کرد. همچنین ترکیب سایر استراتژی‌های رتبه‌بندی دامنه اینترنتی نوظهور را نیز استفاده نمود، استراتژی‌هایی مانند Amazon Quicksight، SERanking یا رتبه‌بندی Semrush که وب‌سایت را بر اساس چندین معیار مختلف مانند آمار ترافیک جدید حاصل از جستجوهای ارگانیک، سطح دید در نتایج جستجوی Google و موارد دیگر رتبه‌بندی می‌کنند. استفاده از هوش مصنوعی (AI) و سایر ابزارهای SEO برای مقایسه عملکرد، یکی دیگر از حوزه‌های تحقیقاتی باز محسوب می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از حمایت‌های پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات در طول این تحقیق، اعلام نمایند.

[1] Search Engine Optimization
[2] Fake
[3] Daily Active Users (DAU)/ Monthly Active Users (MAU)

مراجع

[1] Liu, X., et al., Performance analysis of cloud computing services considering resources sharing among virtual machines. The Journal of Supercomputing, 2014. 69: p. 357-374.

[2] Maxwell, J.C., A treatise on electricity and magnetism. Clarendon Press, London (1873), p. 3408-3425.

[3] Navarro, M., J.M. Corchado, and Y. Demazeau, *MUSIC-MAS: Modeling a harmonic composition system with virtual organizations to assist novice composers.* Expert Systems with Applications, 2016. **57**: p. 345-355.

[4] How Many Websites Are There in the World?" Available at: https://siteefy.com/how-many-websites-are-there/ [Accessed: 18 December 2024.

[5] Gui, Z., et al., A service brokering and recommendation mechanism for better selecting cloud services. PloS one, 2014. 9(8): p. e105297.

[6] Sharma, P.S., D. Yadav, and R. Thakur, Web page ranking using web mining techniques: a comprehensive survey. Mobile Information Systems, 2022.

[7] Signorini, A., A survey of Ranking Algorithms. Department of Computer Science, University of Iowa, 2005.

[8] Harma, D.K. and A. Sharma, A comparative analysis of web page ranking algorithms. International Journal on Computer Science and Engineering, 2010. 2(08): p. 2670-2676.

[9] Borodin, A., et al., Link analysis ranking: algorithms, theory, and experiments. ACM Transactions on Internet Technology (TOIT), 2005. 5(1): p. 231-297.

[10] Zouina, M. and B. Outtaj, A novel lightweight URL phishing detection system using SVM and similarity index. Human-centric Computing and Information Sciences, 2017. 7: p. 1-13.

[11] Schiavoni, S., et al. Phoenix: DGA-based botnet tracking and intelligence. In International Conference on detection of intrusions and malware, and vulnerability assessment. 2014. Springer.

[12] Garg, S.K., S. Versteeg, and R. Buyya, A framework for ranking of cloud computing services. Future Generation Computer Systems, 2013. 29(4): p. 1012-1023.

[13] S. Tajalizadehkhoob The Tale of Website Popularity Rankings: An Extensive Analysis, 2019, https://labs.ripe.net/author/samaneh_tajalizadehkhoob_1/the-tale-of-website-popularity-rankings-an-extensive-analysis/

[14] https://www.contentpowered.com/blog/alexa-com-dead-alternatives/.

[15] Pochat, V.L., et al., Tranco: A research-oriented top sites ranking hardened against *manipulation*. arXiv preprint arXiv:1806.01156, 2018.

[16] Maleki. D., Goudarzi P. and Mansouri A.R., Performance Comparison of Internet Domain Ranking Techniques, 11th International Symposium on Telecommunications (IST), pp. 66-71, 2014.

[17] Hanley, H., et al., DPSelect: a differential privacy based guard relay selection algorithm for Tor. Proceedings on Privacy Enhancing Technologies, 2019.

[18] Hils, M., D.W. Woods, and R. Böhme. Measuring the emergence of consent management on the web. in Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference. 2020.

[19] Matenga-Ikihele, A., et al., *Navigating digital inclusion and the digital vā among Niue mamatua through the provision of mobile phones during COVID-19.* AlterNative: An International Journal of Indigenous Peoples, 2023 :(۱)۱۹ .p. 145-154.

[20] Yadav, A., et al., *Perceived challenges affecting user engagement in online community: an analysis of interrelationships and interaction.* Benchmarking: An International Journal, 2024. **31**(4): p. 1320-1349.

[21] Le Pochat, V., et al. Evaluating the impact of design decisions on passive DNS-based domain rankings. in 2024 8th Network Traffic Measurement and Analysis Conference (TMA). 2024. IEEE.

[22] Ud Din, M.M., et al., InteliRank: A four-pronged agent for the intelligent ranking of cloud services based on end-users' feedback. Sensors, 2022. 22(12): p. 4627.

[۲۳] گزارشات مالیاتی شرکتهای ارائه کننده خدمات ابری اسفند، ۱۴۰۲

[24] Chandramouli, R. and S. Rose, Secure domain name system (DNS) deployment guide. NIST Special Publication, 2006. 800: p. 81-2.

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 249-268

A Novel Framework for Policymaking and Evaluation of Digital Government

Kolsoom Abbasi[1]*, Masoomeh Sadeghi[2], Homeira Moghadami[2], Mahmood Kharrat[1], Sogol Babazadeh[2], Nasrin Dastranj[1]

[1] Faculty member, ICT Research Institute (ITRC), Tehran, Iran
[2] Researcher, ICT Research Institute (ITRC), Tehran, Iran

Received: 18 April 2024, Revised: 09 April 2025, Accepted: 13 April 2025
Paper type: Research

Abstract

People's lifestyles are experiencing a new paradigm due to emerging technologies such as artificial intelligence, social media, cloud computing and big data, so they are gradually moving towards smarter use of technologies. This kind of intelligence has shown itself in different fields of services, such as government services, and new models have been formed under the title of digital (smart) government. Developed and developing countries have paid more attention to digital government and implemented some of their digital government plans. The approach and method of government services design depend on the relationship between governments and citizens and businesses, and the government (public) organizations' efficiency is dependet to the coverage of goals and satisfaction experienced by citizens. Digital technologies lead to greater efficiency, agility and responsiveness in governments and allow them to respond quickly to the needs of citizens and even anticipate them. Because of these issues, the policymaking of the digital government development as well as its evaluation needs new approaches. Currently, in Iran, digital government development program is considered as one of the main development issues of cyberspace. In this article, it was shown that despite the valuable works that have been done in the field of electronic government development, there is a significant distance to the Digital/ smart government, so attention to the dimensions of the digital government and the appropriate method of policymaking and evaluation can be provided an appropriate mechanism for digital government maturity. In this article, an attempt has been made to extract the different dimensions of digital government from the reference and international models such as the OECD, World Bank, Deloitte and United Nations by using the meta-synthesis method and should provid policymaking mechanisms for its development and evaluation.

Keywords: Digital government, Policymaking, Evaluation Criteria, Digital government Maturity.

* Corresponding Author's email: abbasi@itrc.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۲۴۹ الی ۲۶۸

ارائه چارچوبی نوین برای سیاستگذاری و ارزیابی دولت دیجیتال

کلثوم عباسی شاهکوه[1*]، معصومه صادقی[2]، حمیرا مقدمی[2] ، محمود خراط [1]، سوگل بابازاده[2]، نسرین دسترنج [1]

[1] عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات ، تهران، ایران

[2] پژوهشگر پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات ، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با توجه به فناوری‌های نوظهور مانند هوش مصنوعی، رسانه‌های اجتماعی، رایانش ابری و کلان‌داده، سبک زندگی مردم پارادایم جدیدی را تجربه می‌کند و به تدریج به سمت استفاده هوشمندانه‌تر از فناوری‌ها حرکت می‌کند. این هوشمندی به نوعی خود را در حوزه‌های مختلف خدمات از جمله خدمات دولت نیز نشان داده و بدین ترتیب، الگوهای جدیدی تحت عنوان دولت دیجیتال (هوشمند) شکل گرفته است. کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته توجه بیشتری به دولت دیجیتال داشته و اقداماتی جهت توسعه آن انجام داده‌اند. چگونگی طراحی خدمات دولت به رابطه دولت‌ها با شهروندان و کسب‌وکارها بستگی دارد و کارایی سازمان‌های دولتی در پوشش اهداف و رضایتی که شهروندان تجربه می‌کنند، جستجو می‌شود. فناوری‌های دیجیتال منجر به کارایی، چابکی و پاسخگویی بیشتر دولت‌ها شده و به آنها امکان می‌دهد تا به سرعت به نیازهای شهروندان پاسخ داده و آنها را پیش‌بینی کنند. باتوجه به این موضوعات، سیاستگذاری توسعه دولت هوشمند و همچنین ارزیابی آن نیازمند رویکردهای نوینی است. هم‌اکنون در ایران برنامه توسعه دولت هوشمند به‌عنوان یکی از اقدامات اصلی توسعه فضای مجازی مدنظر است و علی‌رغم کارهای ارزشمندی که در زمینه توسعه دولت الکترونیک انجام شده، فاصله قابل توجهی تا دولت هوشمند وجود دارد، لذا توجه به ابعاد دولت هوشمند و شیوه مناسب سیاستگذاری و ارزیابی آن می‌تواند سازوکار شایسته‌ای را برای بلوغ مناسب آن فراهم نماید. در این مقاله سعی شده تا با استفاده از مدل‌های مرجع بین‌المللی مانند مدل‌های سازمان توسعه و همکاری اقتصادی، بانک جهانی، مؤسسه دیلویت و سازمان ملل، ضمن استخراج ابعاد مختلف دولت دیجیتال، سازوکارهای سیاستگذاری جهت توسعه و ارزیابی آن ارائه شود.

کلیدواژگان: دولت دیجیتال، سیاستگذاری، شاخص‌های ارزیابی، بلوغ دولت دیجیتال.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: abbasi@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

از اولین سال‌هایی که مفهوم دولت الکترونیک وارد ادبیات فضای مجازی شده تاکنون، تغییرات زیادی از منظر مفاهیم پایه، مدل‌ها، الگوها و چارچوب‌های تحقق در این حوزه ایجاد شده است. این تغییرات و به تعبیر دیگر این بلوغ نسبی، ناشی از تأثیر عوامل گوناگونی بوده است که برخی از آنها عبارتند از: تغییرات در فضای کسب‌وکار، تغییرات فناورانه، الگوهای جدید در حوزه نیازها و مصارف ذینفعان و عوامل گوناگون اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی. توسعه سیستم‌های دولت الکترونیک با بهره‌گیری از آخرین فناوری‌ها گامی مهم در ارتقای کیفیت خدمات عمومی است. فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی[1] (AI)، یادگیری ماشینی[2] (ML)، کلان‌داده ، اینترنت اشیاء[3] (IoT)، رایانش ابری و برنامه‌های کاربردی تلفن همراه، همراه با سایر نوآوری‌ها در فناوری اطلاعات و ارتباطات، فرصت‌هایی را برای دولت‌ها جهت افزایش اثربخشی و کارایی فرآیندهای خود فراهم می‌کنند. استفاده از این فناوری‌های پیشرفته نه تنها از دولت‌ها در مواجهه با چالش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی حمایت می‌کند، بلکه به طراحی و اجرای استراتژی‌هایی که رفاه اجتماعی را افزایش می‌دهند، کمک می‌کنند، نوآوری، پایداری و رقابت را ارتقاء می‌دهند و خدمات عمومی بهتر و کارآمدتر را توسعه می‌دهند[۱]. شول[4] [۲] نیز بیان داشته که تحول کسب و کار دولت‌ها تازه شروع شده و در دهه آینده می‌توان موارد عمده و غیرقابل انکاری از گذار به دولت دیجیتال را مشاهده کرد. همه‌گیری کووید ۱۹، اهمیت فناوری‌ها و داده‌های دیجیتال را در ایجاد تاب‌آوری اقتصادی و اجتماعی از طریق رویکردهای راهبردی، چابک و نوآورانه دولت‌ها افزایش داده است. «فناوری‌های دیجیتال و داده‌ها» نقشی حیاتی در مدیریت بحران و حمایت اقتصادی کشورهای دارای دولت دیجیتال قوی ایفاء کرده‌اند و در کشورهایی که دولت دیجیتال پیاده‌سازی نشده و یا در مراحل اولیه بوده است، در شرایط بحرانی همچون همه‌گیری کووید ۱۹ شکاف‌ها، نابرابری‌ها و چالش‌ها بیشتر بوده است.

از این‌رو، دولت‌ها باید با تقویت ظرفیت‌های خود جهت رویارویی احتمالی با بحران‌های آینده آماده شوند. استفاده از این فرصت نیازمند درک آنست که چگونه تصمیمات تاثیرگذار برای پیاده‌سازی دولت دیجیتال گرفته شود به‌گونه‌ای که با زمینه‌های بومی سازگاری داشته باشد. تحول دیجیتال موفق، باعث افزایش کارایی و اثربخشی در محیط دیجیتال شده و منجر به ارائه خدمات دولتی ساده‌تر و موثرتر می‌شود و تحقق آن نیازمند تغییر پارادایم از دولت الکترونیک به دولت دیجیتال است. فناوری‌های نوظهور به این تغییر پارادایم کمک می‌کنند. تغییر نیازهای کاربران و تقاضای آنها برای استفاده هوشمندانه‌تر از خدمات باعث می‌شود که خدمات الکترونیک در کل حوزه دولت الکترونیک پیشرفته‌تر و هوشمندتر از قبل شوند. بنابراین، کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته به دولت هوشمند توجه بیشتری دارند و تعدادی از کشورها نیز اقدام به اجرای طرح‌های دولت هوشمند کرده‌اند[۳]. دولت الکترونیک با دولت دیجیتال از نظر ابعاد و مولفه‌های توسعه متفاوت است. گاهی برخی از کشورها در مقابل تغییر مقاومت می‌کنند و تغییرات را به‌راحتی نمی‌پذیرند. سوال مهم آن است که وقتی صحبت از دولت دیجیتال (یا هوشمند) می‌شود منظور چیست؟ چه ابعاد و مولفه‌هایی در توسعه دولت دیجیتال اهمیت دارد؟ ویژگی‌های هر یک از این ابعاد چیست؟ چگونه می‌توان سطح دولت دیجیتال را سنجید؟ هدف از ارائه این مقاله، تبیین چارچوب ابعاد دولت دیجیتال به همراه مولفه‌های ارزیابی آن است. لذا، به منظور تبیین چنین چارچوبی برای سیاستگذاری و سنجش دولت دیجیتال، مدل‌های مختلف ارائه شده توسط موسسات معتبر بین‌المللی مانند سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[5] (OECD)، بانک جهانی، مؤسسه دیلویت[6] و سازمان ملل متحد بررسی و مقایسه شدند. برای استخراج ابعاد چارچوب و مولفه-های ارزیابی از روش فراترکیب استفاده شده و موضوعات کلیدی هر مدل و چارچوب استخراج و با هم مقایسه شده است. تلاش بر آن است تا چارچوب ارائه شده، چارچوبی جامع و مانع باشد و در برگیرنده تمامی ابعاد و مولفه‌های مهم توسعه دولت دیجیتال باشد. لذا در بخش ۲ مفاهیم مرتبط با دولت دیجیتال ارائه شده است. در بخش ۳ با مرور پیشینه پژوهش، چارچوب‌های ارائه شده توسط موسسات معتبر بین‌المللی همچون OECD، دیلویت، بانک جهانی و سازمان ملل متحد معرفی می‌شود. در بخش ۴ مقاله، روش‌شناسی استخراج چارچوب و در بخش ۵ با مقایسه تحلیلی ابعاد و مولفه‌های موجود در چارچوب‌های بررسی شده، چارچوب مفهومی پیشنهادی برای سیاستگذاری و ارزیابی دولت دیجیتال نشان داده شده است. در بخش ۶ وضع موجود کشور در حوزه دولت الکترونیک بررسی و لزوم توسعه دیجیتال بیان شده و در انتها نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مفاهیم مرتبط با دولت دیجیتال

براساس گزارش OECD[۴]، دولت دیجیتال به معنای استفاده از فناوری‌های دیجیتال به‌عنوان بخش جدایی‌ناپذیر از راهبردهای مدرن‌سازی دولت، به‌منظور ایجاد ارزش عمومی است. OECD گزارشی با عنوان «چارچوب سیاستی دولت دیجیتال[7] (DGPF)»

[1] Artificial Intelligence (AI)
[2] Machine Learning (ML)
[3] Internet of Things (IoT)
[4] Scholl
[5] Organisation for Economic Co-operation and Development
[6] Delloite
[7] Digital government Policy Framework (DGPF)

جهت تحلیل و چارچوب‌بندی توصیه‌های سیاستی و یادگیری مشترک و شناسایی ویژگی‌های ضروری برای کمک به دولت‌ها جهت گذار از دولت الکترونیک به دولت دیجیتال ارائه نموده است[۵].

چگونگی طراحی خدمات دولت به رابطه دولت‌ها با شهروندان و کسب و کارها بستگی دارد و کارایی سازمان‌های دولتی را در پوشش اهداف و رضایتی که شهروندان تجربه می‌کنند، تعیین می‌کند. کیفیت و قابلیت خدمات دولتی تاثیر بسزایی در اعتماد به بخش دولتی ایجاد می‌کند. این موضوع منجر به ایجاد ظرفیت‌هایی برای پاسخگویی سریع و پیش‌بینی نیازهای مشتریان می‌شود. استفاده از فناوری‌های دیجیتال و داده، عملیات و فرایندهای داخلی دولت را متحول می‌سازد. فناوری‌های دیجیتال منجر به کارایی، چابکی و پاسخگویی بیشتر در دولت‌ها شده و به آنها امکان می‌دهد تا به سرعت به نیازهای شهروندان پاسخ داده و حتی آنها را پیش‌بینی کنند.

فرق دولت الکترونیک با دولت دیجیتال در آن است که دولت الکترونیک از طریق استفاده از فناوری‌های دیجیتال منجر به کارایی بیشتر در هریک از بخش‌های دولتی و ارائه خدمات و فرایندهای موجود با هزینه و زمان کمتر می‌شوند. دولت دیجیتال تکاملی از دولت الکترونیک را ارائه می‌دهد که به بخش دولتی کمک می‌کند تا از رویکردهای کارایی‌محور نسبت به فناوری‌های دیجیتال، به سمت دولتی باز، همکارانه و نوآورانه حرکت کند. OECD تحول دیجیتال دولت را در ۳ مرحله تعریف کرده است که عبارتند از: دولت آنالوگ، دولت الکترونیک و دولت دیجیتال[۴]. از سوی دیگر، بانک جهانی یک مرحله جدیدتر با عنوان فناوری دولتی (GovTech) تعریف نموده که یک رویکرد کل دولت برای نوسازی بخش عمومی است و دولتی ساده، کارآمد و شفاف را ترویج می‌دهد که شهروندان در مرکز اصلاحات هستند. رویکرد GovTech مرز کنونی تحول دیجیتال دولت را نشان داده و از مراحل قبلی متمایز است زیرا بر سه جنبه نوسازی بخش عمومی تأکید دارد که عبارتند از: خدمات عمومی شهروندمحور که در دسترس همگان است؛ رویکرد کل دولت برای تحول دولت دیجیتال و سیستم‌های دولتی ساده، کارآمد و شفاف[۵]. دستور کار GovTech شامل استفاده مؤثر از فناوری‌های تحول‌آفرین نیز می‌باشد که عبارتند از: هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی، رایانش ابری، اینترنت اشیاء و پلتفرم‌های داده عمومی که استفاده از داده‌های عمومی باز توسط افراد و شرکت‌ها را برای ایجاد ارزش ترویج می‌کنند. شکل ۱ چهار مرحله تحول دیجیتال دولت ارائه شده توسط بانک جهانی را ارائه نموده است[۶].

- دولت آنالوگ: عملیات بسته و تمرکز داخلی و رویه‌های آنالوگ و دولت به عنوان فراهم‌آورنده
- دولت الکترونیک: رویکردهای کاربرمرکز اما تامین‌محور، ارائه خدمت و ارتباطات یکطرفه، رویه‌های توانمند شده با ICT اما اغلب آنالوگ در طراحی، کسب و توسعه ICT، شفافیت بیشتر و دولت به عنوان یک فراهم‌آورنده
- دولت دیجیتال: رویه‌هایی که از مرحله طراحی دیجیتالی است، خدمات عمومی کاربرمحور، دولت به‌عنوان یک پلتفرم[1] (GaaP)، بطور پیش‌فرض باز بودن (هم‌آفرینی)، بخش عمومی داده‌محور و مدیریت فراکنشی
- GOVTech: خدمات عمومی شهروندمحور که در دسترس همگان است، رویکرد کل دولت به تحول دیجیتال و سیستم‌های دولتی ساده، کارآمد و شفاف.
-

شکل ۱. تحول دیجیتال بخش عمومی ارائه شده توسط بانک جهانی مبتنی بر OECD [۶]

[1] Government as a Platform

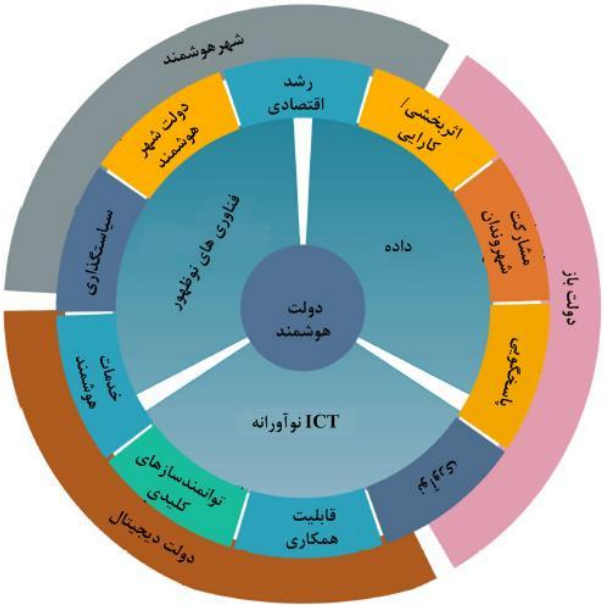
۳- پیشینه پژوهش

پژوهش‌های مختلفی درخصوص دولت هوشمند یا دولت دیجیتال انجام شده است. فورتادو[1] و همکارانش[۷] چارچوب تحول دیجیتال به سمت حکمرانی هوشمند جهت توسعه شهر هوشمند و توسعه پایدار ارائه نمودند. آنها هفت مولفه را مدنظر قرار دادند که عبارتند از: داده‌های نامرئی، بودجه‌ریزی استراتژیک، زیرساخت دیجیتالی پایه، ابزار دیجیتال، سیاست اجتماعی‌محور، آزمایشگاه‌ها و موسسات برای انجام پروژه‌ها و داده و نوآوری و در نهایت شرکا. تولید داده و سازماندهی داده، تغییر فرهنگ دولت، آماده‌سازی زیرساخت‌ها و به‌روزرسانی مهارت‌ها، توسعه سواد داده ذینفعان دولت و جامعه مدنی از جمله موضوعات مهم مورد اشاره بوده است. همچنین آنتوپولوس[2] و همکارانش [۸] به مفهوم‌سازی دولت هوشمند پرداخته و ارتباط آن با شهر هوشمند را بررسی کردند. آنها به ابعاد مختلف دولت هوشمند مطابق شکل ۲ اشاره نمودند.

همچنین گوندیوز[3] و همکارانش [۹] فاکتورهای موفقیت دولت هوشمند را بررسی نموده و عوامل را به ۳ دسته نهادی (تعهد سیاسی، حکمرانی روشن، چابکی قانونی، آگاهی دیجیتال و زیرساخت‌های فناوری اطلاعات)، سازمانی (ساختار و فرآیندها، قابلیت‌ها، ارزش‌ها و منابع انسانی) و رهبری تقسیم نمودند.

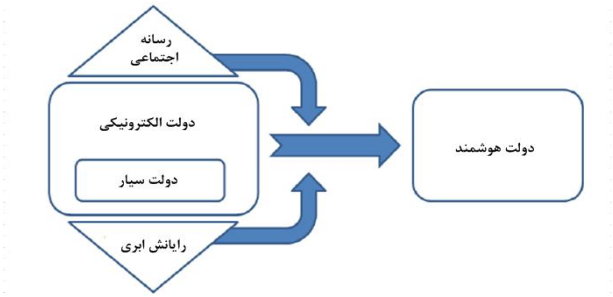
علاوه بر موارد فوق، آقای تقوی و همکارانشان [۱۰] در مدل پیشنهادی خود، ابعاد دولت هوشمند را تبیین نمودند که عبارتند از: رهبری و مدیریت هوشمند (دولت باز، سازمان هوشمند، بهره‌ور، شفاف، حکمرانی خوب، مدیریت هوشمند، نوآور، پاسخگو، مسئولیت‌پذیر، انعطاف‌پذیر، خلاق، تمرکز زدا، ساده و کارآفرین)، فناوری/زیرساخت هوشمند (فناوری هوشمند، دولت الکترونیک نسل جدید، سیار بودن، رسانه‌های نوین، کلان‌داده ، وب معنای و رایانش ابری)، تعامل هوشمند (تعامل، یکپارچگی، همکاری، مشارکت، اشتراک‌گذاری، هماهنگی)، خدمات هوشمند (خدمات هوشمند، خدمات پایدار، کسب و کار هوشمند و خدمات دسترس‌پذیر)، محیط هوشمند (برابری و عدالت اجتماعی، جامعه دانشی، مردم سالاری، اعتماد، محیط هوشمند، مبتنی بر شهروند هوشمند، تحکیم هویت ملی، اخلاق‌مدار) و در نهایت امنیت و ایمنی هوشمند (امنیت هوشمند، حفظ حریم خصوصی و مدیریت بحران).

همچنین آقای شاپری و کلانتری[۱۱] چارچوبی را برای دولت هوشمند ارائه نمودند که متشکل از دو لایه است که در لایه نخست سه مولفه فناوری، تامین داده و کاربرد و نهادهاست و لایه دوم متشکل از مولفه‌های حاکمیت/سیاست، اقتصاد هوشمند، زیرساخت‌ها، اجتماع هوشمند و محیط هوشمند است.



شکل ۲. مدل مفهومی دولت هوشمند[۸]

همچنین پریهاتمانتو و آندریان[4][۱] مروری سیستماتیک از چارچوب‌ها و معماری‌های دولت هوشمند، با تمرکز بر شناسایی و تجزیه و تحلیل مؤلفه‌ها و ویژگی‌های کلیدی که ارائه خدمات عمومی را افزایش می‌دهند، ارائه کردند. یافته‌های این مقاله اهمیت یکپارچه‌سازی فناوری اطلاعات پیشرفته، اطمینان از قابلیت همکاری سیستم و تقویت مشارکت و همکاری ذینفعان را برجسته می‌کند و مسائل امنیتی داده، محدودیت‌های زیرساخت‌های فناوری و مقاومت در برابر تغییر در سازمان‌های دولتی را به‌عنوان چالش‌های اصلی معرفی نموده است. حسن و همکارانش [۱۲] اجزای دولت هوشمند را مطابق شکل ۳ تعریف نموده و بیشترین تمرکز را بررسانه‌های اجتماعی و رایانش ابری داشته است و بیشتر به موضوعات فناورانه پرداخته است.



شکل۳. مولفه‌های دولت هوشمند[۱۲]

همه موارد بررسی شده تاکنون، به خوبی به جنبه‌های دولت هوشمند و ابعاد آن اشاره داشتند، اما در تمام منابع بررسی شده، اشاره‌ای به مدل‌ها و چارچوب‌های ارائه شده توسط موسسات معتبر بین‌المللی نشده است. برخی از این چارچوب‌ها همچون OECD و بانک جهانی برای ارزیابی سطح بلوغ دیجیتالی/ هوشمندی دولت‌های کشورهای

[1] Furtado
[2] Anthopoulos
[3] Guenduez
[4] Prihatmanto & Andrian

مختلف استفاده شده است. در ادامه این مقاله ابعاد دولت دیجیتال مبتنی بر چارچوب‌های معتبر بین‌المللی بررسی و ارائه می‌شوند.

۳-۱- چارچوب خط‌مشی‌گذاری دولت دیجیتال OECD

توصیه‌های OECD برای کمک به بخش دولتی جهت اتخاذ رویکردهایی راهبردی در استفاده از فناوری‌ها با نگاه به ایجاد دولتی چابک و پاسخگو ارائه شده‌است. اصولی که در توصیه‌های مربوطه آمده ناظر به تغییر فرهنگی در سطح دولت است به صورتی‌که فناوری بتواند عملیات بخش دولتی را بهتر پشتیبانی نموده و تصمیمات راهبردی بر فناوری‌های دیجیتال و سیاست‌های بخش دولتی را برای تغییر و مدرن‌سازی بخش دولتی شکل دهد.

این توصیه‌ها مجموعه‌ای از اولویت‌های راهبردی برای دولت‌ها فراهم می‌نماید تا از دولت الکترونیک (مبتنی بر دیجیتالی‌سازی فرایندها، عملیات و خدمات در هریک از بخش‌های مجزای دولت) به سمت دولت دیجیتال (دیجیتالی‌سازی فرایندها، عملیات و خدمات در تمام سازمان‌های دولتی به صورت یکپارچه، اشتراکی، منسجم و پایدار) حرکت کنند. این اولویت‌ها دوازده توصیه کلیدی را در سه محور ارائه می‌دهند، شامل [۴]:

- در محور بازبودن و مشارکت کردن: ۱) باز بودن، شفافیت و فراگیری، ۲) مشارکت در سیاستگذاری و ارائه خدمات، ۳) ایجاد فرهنگ داده‌محوری و ۴) حفاظت از حریم خصوصی و تضمین امنیت؛
- در محور حکمرانی و هماهنگی: ۵) رهبری و تعهد سیاسی، ۶) استفاده منسجم از فناوری‌های دیجیتال در تمامی حوزه‌های سیاستی، ۷) چارچوب‌های حاکمیتی و سازمانی موثر برای ایجاد هماهنگی و ۸) تقویت همکاری بین‌المللی با سایر دولت‌ها؛ و
- در محور ظرفیت‌هایی برای حمایت از پیاده‌سازی: ۹) ایجاد موارد کسب و کاری شفاف، ۱۰) ظرفیت‌های نهادی تقویت شده، ۱۱) تدارک فناوری‌های دیجیتال و ۱۲) چارچوب‌های قانونی و تنظیم‌گری.

این توصیه‌ها فعالیت‌هایی را پیشنهاد می‌دهد که در صورتی‌که با هم انجام شوند، موجب تحول دیجیتال دولت خواهند شد. بر پایه این توصیه‌ها، OECD چارچوب خط‌مشی‌گذاری دولت دیجیتال (DGPF[1]) را به منظور کمک به تصمیم‌سازان در دستیابی به دولت دیجیتال ارائه نمود. این چارچوب، پایه‌ای برای ایجاد مجموعه‌ای از شاخص‌های دولت دیجیتال(DGI[2]) فراهم نموده‌است که بلوغ دولت دیجیتال را در شش بعد اندازه می‌گیرد که عبارتند از [۵]: دیجیتال از مرحله طراحی[3]؛ بخش عمومی داده‌محور[4]؛ دولت به‌عنوان پلتفرم[5]؛ باز بودن به‌طور پیش‌فرض[6]؛ کاربرمحوری[7] و فراکنشی[8]. چهار بعد اول اول تحت عنوان ابعاد بنیادین[9] و دو بعد آخر تحت عنوان ابعاد تحولی در دولت دیجیتال شناخته شده است. ابعاد بنیادین بلوک‌های سازنده تحقق دولت دیجیتال شامل سازوکارهای حاکمیتی و اصول و ابزارهایی است که اصلاحات مؤثر دولت دیجیتال را ممکن ساخته و به سیاست‌گذاران اجازه می‌دهد تا خدماتی را با تمرکز بر چابکی، پاسخ‌گویی و پیش‌بینی و طراحی ارائه کنند. ابعاد تحولی، بر اساس ابعاد بنیادین ساخته شده‌اند و به مجموعه تلاش‌های سازمان‌های بخش دولتی در استفاده از فناوری‌های دیجیتال و داده‌ها برای فعالیت با تمرکز بر نیازهای مردم مربوط می‌شوند. دولت دیجیتالی که سطح بالاتری از بلوغ را در شش بعد داشته باشد، نه‌تنها جایگاه بهتری از لحاظ کارایی داخلی و شفافیت به‌دست می‌آورد بلکه خدمات عمومی بهتری فرای توقع مردم در پاسخ به نیازهایشان ارائه می‌دهد. بلوغ دولت‌ها در شش بعد اساسی دولت دیجیتال، منجر به تغییر و بازآفرینی روابط بین دولت‌ها و بخش عمومی، گسترش میزان مشارکت ذینفعان، تیم‌های مجهزتر، شهروندان توانمندتر، افزایش مسئولیت‌پذیری بخش دولتی و راه‌های جدید برای ایجاد هوشمندی جمعی می‌شود. در ادامه، مروری بر هر یک از ابعاد بلوغ دولت دیجیتال خواهد شد.

- دیجیتال از مرحله طراحی: میزان استفاده دولت از فناوری‌های دیجیتال برای بازبینی و مهندسی مجدد فرایندهای دولتی، ساده‌سازی فرایندها و ایجاد کانال‌های جدید ارتباطی و مشارکت با ذینفعان برای ایجاد دولتی باز، کارا، پایدار و کاربرمحور.
- داده‌محوری: میزان ارزش ایجاده شده از طریق استفاده از داده‌ها در برنامه‌ریزی، ارائه و نظارت بر سیاست‌های دولتی و اتخاذ اصول اخلاقی برای ایجاد اعتماد و استفاده مجدد ایمن از داده‌ها.
- دولت به‌عنوان پلتفرم: میزان تامین دستورالعمل‌ها، ابزارها، داده‌ها و نرم‌افزارها برای ارایه خدمات یکپارچه و بین‌بخشی و کاربرمحور توسط دولت.
- باز بودن به‌طور پیش‌فرض: میزان باز بودن فناوری و داده با توجه به محدودیت‌های موجود در قوانین و در توازن با منافع دولتی.
- کاربرمحوری: تا چه حد دولت با نقش محوری که به افراد می‌دهد، نیازهای آنها را در مرکز شکل‌دهی به فرایندها، خدمات و سیاست‌ها قرار می‌دهد و از مکانیزم‌های پوشش فراگیر

[1] Digital Government Policy Framework
[2] Digital government index
[3] Digital by design
[4] Data-driven public sector
[5] Government as a platform
[6] Open by default
[7] User-driven
[8] Proactiveness
[9] foundational

مناسب برای تحقق این موضوع، استفاده می‌کند.

- فراکنشی: دولت تا چه حد به پیش‌بینی نیازهای کاربران و پاسخ سریع به آنها می‌پردازد.

- ارزیابی براساس وجوه عرضی چهارگانه مطرح در چارچوب OECD

در ارزیابی دولت دیجیتال، OECD در کنار شش بعد DGPF، چهار وجه عرضی[1] را به منظور شناخت نقاط قوت و ضعف دولت مورد استفاده قرار داده است[۱۳]. این چهار وجه، به ارزیابی تلاش‌های دولت برای تعیین اینکه آیا توازنی میان چشم‌انداز بلندمدت، تنظیمات حاکمیتی، ابزارهای سیاستی، مکانیزم‌های پیاده‌سازی و نظارت به روشی که منجر به تحقق دولت دیجیتال شود، می‌پردازد. برای تحلیل کیفی، سیاست‌های دولت دیجیتال به مراحل مختلف چرخه حیات سیاست نگاشت می‌شود. این چهار وجه برای ارزیابی بهتر هر بعد ایجاد شده و زمینه مقایسه آنها را فراهم می‌آورد.

۱- رویکرد راهبردی: تا چه میزان دولت چشم‌انداز شفاف، اهداف و اقداماتی را در حوزه‌های سیاستی دیجیتال انجام داده و یا موضوعاتی همچون داده‌های بخش عمومی و سیاست‌های داده باز و استراتژی‌های توسعه مهارت‌های دیجیتال و غیره را به هم پیوند می‌دهد.

۲- اهرم‌های سیاستی: ابزارهایی هستند تا دولت‌ها اقدامات تحول دیجیتال سیستمی را با بهره‌گیری از توانمندسازهای کلیدی مانند تعامل‌پذیری، هویت دیجیتال، زیرساخت داده و خدمات مشترک ارتقاء دهند و ظرفیت پیاده‌سازی سیاست‌ها را بالا ببرند. به بیانی دیگر، اهرم‌های سیاستی، وجه رویکرد راهبردی را به وجه پیاده‌سازی پیوند می‌دهد. در این وجه چهار نوع از ابزارهای سیاستی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند: دستورالعمل‌ها و استانداردها، الزامات رسمی و مکانیزم‌های قانونی در سازمان‌های دولتی، چارچوب‌های توانمندساز و در نهایت مکانیزم‌ها و بدنه‌های رسمی.

۳- پیاده‌سازی: این وجه به ارزیابی اقدامات پیاده‌سازی شده برای تحقق اهداف سیاستی و ارزیابی‌های دوره‌ای خدمات دولتی به منظور ارزیابی و بهبود پیاده‌سازی خدمات می‌پردازد. این موضوع در خصوص معیارهای پیاده‌سازی هویت دیجیتال، تعامل‌پذیری، استراتژی‌های ابری، تدارکات الکترونیکی، پروژه‌های ICT، مدل‌های کسب و کار استاندارد و استفاده از فناوری‌های نوظهور بکارگرفته شده و همچنین ارزیابی می‌کند که چگونه اهرم‌های سیاستی مانند الزامات رسمی از طریق اقدامات عملیاتی پیاده‌سازی شده‌اند.

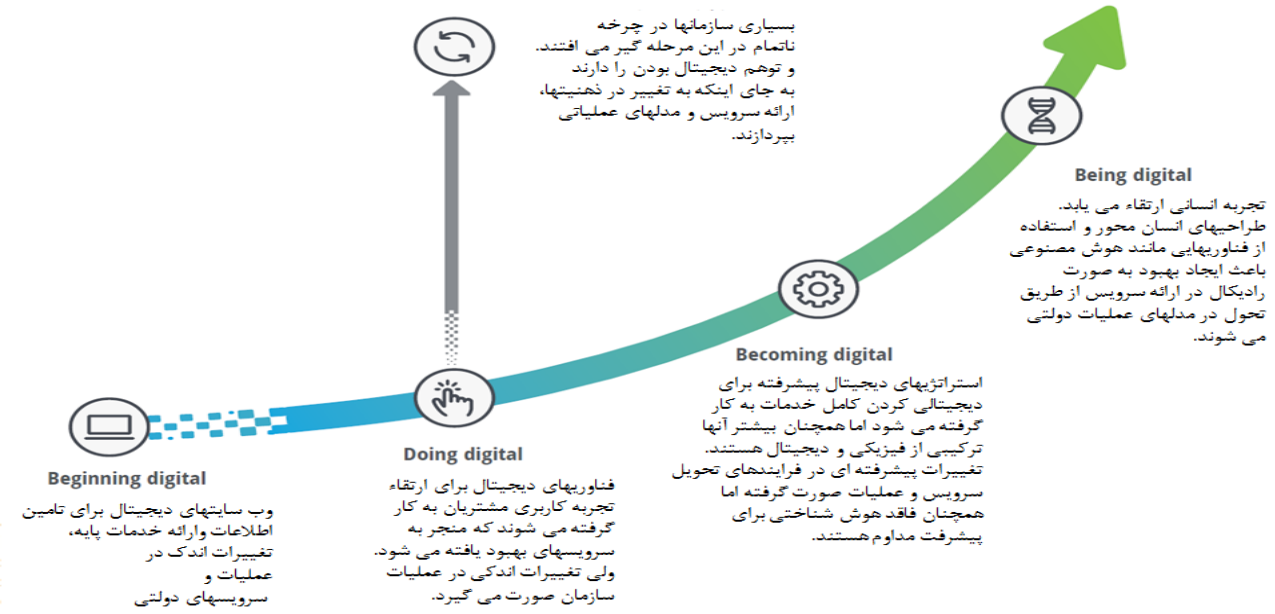
۴- نظارت: این وجه به -طیفی از فعالیت‌ها برای توصیف، تحلیل و پیگیری توسعه سیاست‌های دولت دیجیتال، شناسایی شکاف‌های بالقوه در فرایندها برای فعالیت‌های آتی می‌پردازد. ارزیابی خدمات با هم طراحی شده[2] و شکاف دیجیتال، رضایت کاربران از خدمات، اثرات داده‌های باز و قانون‌گذاری‌ها، وجود ارزیابی منافع و هزینه در پروژه‌های ICT و شاخص‌هایی برای نظارت بر پیاده‌سازی استراتژی ملی دولت دیجیتال (NDGS[3]) در این وجه مورد نظر است. به‌طور کلی، ارزیابی اثرات سیاست‌ها و اقدامات در کنار موانع اصلی و هزینه‌های آنها هنوز یک چالش است.

۳-۲- هفت محور موسسه دیلویت برای تحول دیجیتال دولت

با توجه به مدل چهارمرحله‌ای تحول دیجیتال موسسه دیلویت (مطابق شکل۴)، قبل از همه‌گیری کرونا، سازمان‌ها و شرکت‌ها عمدتاً در مرحله ورود به دیجیتالی شدن[4] بودند؛ به این معنی که از فناوری‌های دیجیتال به‌منظور افزایش قابلیت‌های خود استفاده می‌کردند، اما بیشتر بر مدل‌های قدیمی عملیاتی اتکا داشتند. همه‌گیری کرونا بسیاری از دولت‌ها را وارد مرحله بعدی تحول دیجیتال یعنی "دیجیتالی شدن"[5] کرد به‌گونه‌ای که فرایندها و فناوری‌های دیجیتال را به صورت عمیق‌تری در سازمان‌ها تعبیه نمودند. زمانی که سازمان‌ها وارد مرحله "دیجیتال بودن"[6] می‌شوند، از فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی و ابر برای تقویت تجربه انسانی و تحول بنیادین در تحویل خدمت و عملیات داخلی استفاده می‌کنند. در مرکز تحول دیجیتال، حرکت از کاربرد مقطعی[7] دیجیتال به طراحی و پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال به‌گونه‌ای انجام می‌شود که در دی‌ان‌ای[8] سازمان تعبیه شود.

موسسه دیلویت برای کمک به درک بلوک‌های مرحله" دیجیتالی بودن"، ویژگی‌های دیجیتال بودن را به دو بخش ارائه خدمات و عملیات دولتی تقسیم کرده که در ادامه ویژگی‌های هریک معرفی می‌شوند[۱۴].

[1] Transversal facets
[2] Co-designing
[3] National Digital Government Strategy (NDGS)
[4] doing digital
[5] becoming digital
[6] being digital
[7] Ad hoc
[8] DNA



شکل ۴. مراحل تحول دیجیتال دولت‌ها[۱۴]

ویژگی‌های ارائه خدمات در مرحله "دیجیتالی بودن"

این ویژگی‌ها به‌طور مستقیم بر خدمات ارائه‌شده توسط دولت به زیرمجموعه‌های آن تاثیر می‌گذارند. مهمترین آنها عبارتند از:

- شخصی‌سازی: خدمات متناسب با نیازها، علایق و شرایط فرد طراحی می‌شوند. بر خلاف رویکرد "یک سایز مناسب همه[۱]"، ارائه‌دهنده خدمات تلاش می‌کند تا مشتریان خود را درک کرده و تجربه‌ای سفارشی ایجاد نماید.
- تجربه بدون اصطکاک[۲]: دسترسی به خدمات، اغلب نیازمند تلاش اندک یا بدون هیچ تلاشی از سوی کاربر است، هیچ حلقه‌ای برای پرش، هیچ تقاضایی برای اطلاعات و هیچ مانع ناامیدکننده‌ای وجود ندارد، ارایه خدمات با یک کلیک یا برنامه‌هایی که رسیدن سریع به هر چیزی را ممکن می‌سازد، آسان می‌شود.
- فراکنشی (بر اساس رویدادهای زندگی): در اینجا منظور دور شدن از ارائه خدمات سنتی بخش‌محور به سمت رویکرد رویدادهای زندگی است. رویکرد رویداد زندگی دو موضوع حیاتی را در بردارد. اول اینکه تحویل خدمت را بدون درگیر کردن مشتری با مولفه‌هایی که خود ضرورتا به آنها نیاز دارد، شروع می‌کند و دوم اینکه انواع مختلفی از خدمات که از بدو حیات شروع می‌شود را دربر می‌گیرد.
- استراتژی‌های چند کاناله: این استراتژی‌ها به ارائه یک تجربه ثابت در کانال‌های مختلف می‌پردازند (مثلاً از طریق تلفن، وب، موبایل و ...) و درعین‌حال واقعیت‌هایی مانند محیط‌هایی بدون اینترنت، پهنای باند کم و همچنین بی‌سوادی و شکاف-های دسترسی را در نظر می‌گیرد.
- هویت دیجیتال جهانی: شناسه‌های دیجیتالی منحصربه‌فرد، دری به روی داده‌های یکپارچه و تجربه یکپارچه شهروندان باز می‌کند و امکان جهش چشمگیر در کیفیت خدمات، بهره‌وری بالا و حرکت به سمت تحول دیجیتال را فراهم می‌کنند.
- پیش‌بینی‌کننده: دولت‌ها نیازها و مشکلات احتمالی را براساس تحلیل داده‌ها پیش‌بینی می‌کنند. دولت‌ها باید پلتفرم‌های دیجیتال شخصی‌سازی شده و یکپارچه‌تری را ارائه کنند تا به صورت فراکنشی به نیازهای شهروندان و کسب‌وکارها پاسخ دهند.

ویژگی‌های عملیات دولتی در مرحله دیجیتالی بودن

ویژگی‌های عملیات دولتی بیشتر ماهیت پسین(بَک‌اند)[۳]دارند. آن‌ها سازمان‌ها را قادر می‌سازند، تا پلتفرم‌های فناوری قوی همراه با منابع مستعد برای دستیابی به ماموریت خود ایجاد کنند. مؤلفه‌هایی که می‌توانند به دولت‌ها در دستیابی به بلوغ دیجیتال در عملیات کمک کنند، عبارتند از:

- **فقط یک‌بار:** شهروندان و مشاغل فقط باید یک‌بار اطلاعات خود را به دولت ارائه دهند که موجب بهبود تجربه کاربری و کاهش بار اداری می‌شود. پیاده‌سازی این اصل نیازمند سیستم‌های داده تعامل‌پذیر است.
- **بازیابی سریع[۴]:** فناوری‌های دیجیتال قابلیت‌هایی را امکان‌پذیر می‌کنند، که می‌تواند قدرت و چابکی را در پاسخگویی موثر به اختلالات ایجاد نماید. این امر، مستلزم توانایی چرخش سریع در حین اختلالات در پاسخ به تهدیدها

[1] One size fits all
[2] Frictionless experience
[3] back-end
[4] Resilience:

و فرصت‌های جدید (سبکی[1])، توانایی پاسخ‌گویی به افزایش ناگهانی (یا کاهش) در تقاضاها (مقیاس‌پذیری) و توانایی حفظ برتری عملیاتی در حین چرخش و مقیاس‌پذیری سریع است (پایداری).

- **دی‌ان‌ای دیجیتال**: سازمان‌هایی که دی‌ان‌ای دیجیتالی در سازمان‌هایشان تعبیه‌شده (مجموعه¬ای از ۲۳ صفت از چابکی تا تخریب مداوم و ساختارهای تیمی مورفینگ) می‌توانند به بلوغ دیجیتال بهتر از سایرین دست یابند.
- **هوشمندی داده بلادرنگ**: داده‌ها یک محرک با ارزش هستند. به‌عنوان یک کاتالیزور دیجیتالی می‌توانند به سازمان‌ها کمک کنند تا با تجزیه و تحلیل منابع داده‌ای واگرا، تصمیمات کلیدی بگیرند تا به نتایج مطلوب دست یابند.
- **پلتفرم‌ها:** توسعه پلتفرم‌های فناوری دیجیتال مدرن که چابک و انعطاف‌پذیر هستند و به سازمان‌ها اجازه می‌دهند تا براساس بازخورد کاربران، تکرار و تکامل پیدا کنند.

هفت محور اصلی معرفی شده توسط دیلویت

گذار به دولت دیجیتال مستلزم توسعه مجموعه وسیعی از دارایی‌ها و قابلیت‌هاست که در مطالعه دیلویت تحت عنوان محورهای دیجیتال نامیده شده است. اعمال این محورها در خدمات و عملیات سازمان منجر به خدمات دولتی می‌شود که ویژگی‌های اصلی دیجیتال بودن را که قبلاً نام برده شد، دارند(جدول ۱). سازمان‌های بالغ به‌طور پیوسته از هر هفت محور، ارزش بدست می‌آورند. این محورها عبارتند از: تسلط بر داده‌ها[2]؛ زیرساخت ایمن و منعطف؛ هوشمندی دیجیتالی و شبکه‌های استعدادیابی باز[3]؛ مشارکت اکوسیستمی؛ جریان‌های کاری هوشمند[4]؛ تجربه کاربری یکپارچه و نوآوری و مدل‌های کسب و کار جدید.

محور اول: تسلط بر داده: مفهوم این بعد، یکپارچه‌سازی، فعال‌سازی و متصل‌کردن داده‌های کمتر استفاده شده و ایزوله با تعبیه آنها در خدمات و عملیات برای افزایش کارایی و بهبود ارائه خدمت است.

محور دوم: زیرساخت ایمن و منعطف: منظور از این بعد پیاده‌سازی زیرساخت فناوری است که نیازهای محرمانگی و امنیت را در تعادل با قابلیت ایجاد ظرفیت منعطف و مقیاس‌پذیری بر اساس تقاضا قرار می‌دهد.

جدول ۱. کاربرد محورهای دولت دیجیتال در ایجاد ویژگی‌های دیجیتال بودن در مطالعه دیلویت

محورهای دولت دیجیتال / ویژگی‌های دیجیتال بودن	تسلط بر داده‌ها	زیرساخت ایمن و منعطف	شبکه‌های استعدادیابی باز	مشارکت اکوسیستمی	جریان‌های کاری هوشمند	تجربه کاربری یکپارچه	نوآوری و مدل‌های کسب و کار جدید
ارائه خدمات							
شخصی‌سازی‌شده	✓		✓		✓	✓	✓
بدون اصطکاک					✓	✓	
فراکنشی					✓	✓	✓
Omni channel	✓		✓	✓		✓	✓
هویت دیجیتال‌جهانی	✓	✓		✓			
پیش بینی	✓				✓	✓	✓
عملیات دولتی							
فقط یک بار	✓	✓			✓	✓	
بازیابی سریع		✓	✓	✓			
دی‌ان‌ای دیجیتال			✓	✓			✓
داده بلادرنگ	✓	✓					
پلتفرم‌ها	✓	✓			✓	✓	✓

محور سوم: شبکه‌های استعدادیابی باز: در حقیقت مفهوم این بعد، در ارتباط با وجود برنامه‌های آموزشی با تمرکز بر صلاحیت دیجیتال و تیم‌سازی از طریق مدل‌های منعطف و اقتضایی برای دسترسی سریع به مجموعه مهارت‌های مورد نیاز و منعطف‌سازی نیروی کاری سازمان بر پایه نیازهای سازمانی می‌باشد.

محور چهارم: مشارکت در اکوسیستم: دولت‌ها می‌توانند به‌طور مؤثر از اکوسیستم‌های بیرونی برای دستیابی به اهداف تحول دیجیتال خود بهره ببرند. تعامل با اکوسیستم همچنین به‌معنای اجتناب از تعصبات است، جایی‌که سازمان‌ها به‌طور پیش‌فرض به سفارشی‌سازی مواردی می‌پردازند که قبلا توسط صنعت انجام شده است. کار با شرکای کسب و کاری بیرونی مانند سازمان‌های تحقیق و توسعه، انکوباتورهای فناوری و استارت‌اپ‌ها برای دسترسی به منابعی همچون فناوری و افراد برای افزایش توانایی سازمان به منظور ایجاد بهبود و نوآوری در این بعد می‌گنجد.

محور پنجم: جریان‌های کاری هوشمند: این محور به ساده‌سازی[5] فرایندها و گردش‌های کاری اصلی، استفاده از اتوماسیون برای انجام کارهای تکراری و پشتیبانی از کارکنان با ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی می‌پردازد. این موضوع به سازمان‌ها کمک می‌کند تا با حذف ورود داده‌های اضافی، بهبود کیفیت داده‌ها و کاهش خطاها، کارایی و سرعت بیشتری به دست آورند؛ کاغذبازی و عقب‌ماندگی را کاهش دهند و بر محدودیت‌های منابع غلبه کنند. پیاده‌سازی و کالیبراسیون

[1] Nimbleness
[2] Data mastry
[3] Digitally savvy, open talent networks
[4] Intelligent workflows
[5] Streamlining

مداوم فرایندهایی که از قابلیت‌های انسانی و فناورانه استفاده می‌کنند و منابع را برای فعالیت‌های با ارزش‌تر آزاد می‌نماید، در این بعد قرار دارد.

محور ششم: تجربه کاربری یکپارچه: تجربه انتها به انتهایی است که بر اساس دیدگاه مشتری توسعه‌یافته و در هر مکان و هر زمان و از هر کانالی در دسترس است. ایجاد یک تجربه کاربری بر اساس دیدگاه ۳۶۰ درجه مشتری می‌تواند در سراسر سازمان به اشتراک گذاشته شود به‌گونه‌ای که کاربران تعاملات هماهنگ شده انسان و دیجیتال را تجربه می‌کنند که مفید، لذت بخش و موثر در محیطی فراگیر و جذاب می‌باشد.

محور هفتم: نوآوری و مدل‌های کسب‌وکاری جدید: ظهور فناوری‌های دیجیتال مانند هوش مصنوعی، ابر، بلاک‌چین و موارد دیگر، امکانات جدیدی را برای دولت فراهم می‌کند تا خدماتی را به شهروندان به روش‌های کاملاً جدید و مؤثرتر ارائه دهند. نوآوری در مدل‌های کسب و کاری سازمان با اتخاذ مدل‌های جدید برای تطابق با نیازهای در حال تغییر و بهبود ارائه خدمت از مفاهیم این بعد است. ارزشی که هر یک از سازمان‌های دولتی از این هفت محور می‌برند، تا حد زیادی به رویکرد آنها در تحول دیجیتال بستگی دارد. شکاف زیادی میان سازمان‌های کاملاً بالغ با سازمان‌های کمتر بالغ در محورهایی همچون تسلط بر داده‌ها، تجربه کاربری یکپارچه و جریان‌های کاری هوشمند وجود دارد.

۳-۳- مدل ارزیابی آمادگی دیجیتال بانک جهانی

بانک جهانی، مجموعه ابزار «ارزیابی آمادگی دولت دیجیتال»[۱] (DGRA)، را که یک ابزار تشخیصی جامع است با هدف کمک به کشورهای در حال توسعه برای ارزیابی آمادگی تحول دیجیتال خود ارائه کرده است[۱۵]. این مدل، از طریق تحلیل‌های کمی و کیفی، نقاط قوت و ضعف وضعیت فعلی دولت دیجیتال را شناسایی کرده و برنامه‌های اقدام آینده‌نگر را برای بهبود و توسعه یک راهبرد جامع ملی ICT پیشنهاد می‌دهد. این چارچوب، شامل مجموعه‌ای جامع از ۶۷ سؤال در ۹ بعد اصلی دولت دیجیتال است که زیرساخت‌ها و عملیات دولت دیجیتال باز و چابک را ایجاد می‌کند. این ابعاد عبارتند از: رهبری و حکمرانی[۲]؛ طراحی کاربرمحور[۳]؛ مدیریت دولتی و مدیریت تغییر[۴]؛ قابلیت‌ها، فرهنگ و مهارت‌ها[۵]؛ زیرساخت فناوری؛ زیرساخت داده، راهبردها و حاکمیت داده؛ امنیت سایبری، حریم خصوصی و بازیابی سریع[۶]؛ قانون‌گذاری و مقررات[۷] و اکوسیستم دیجیتالی. در ادامه هریک از ابعاد نام برده شده توضیح داده شده‌اند.

بعد اول: رهبری و حاکمیت

پیکربندی بالا به پایین و اولویت‌بندی شفاف برای تحول دیجیتال با رهبری مدیریتی و سیاسی در بسیاری دولت‌ها در ایجاد جامعه دیجیتال چابک و شفاف نقش مهمی داشته است. تحول دیجیتال دولتی با نیاز به تنظیمات مختلف قانونی، نهادی، فناوری و فرهنگی همراه است. در نتیجه، تعهدات سیاسی سطح بالا در کمک به تغییر شکل‌های ضروری به صورت موثر و به موقع لازم است. دولت‌ها باید بیانیه چشم‌انداز شفافی در استراتژی دیجیتال خود داشته باشند. لذا این بعد به بررسی استراتژی‌ها، نقشه‌راه‌ها، ساختارهای حاکمیتی و سازمانی برای تحول دیجیتال می‌پردازد.

بعد دوم: طراحی کاربرمحور

طراحی کاربرمحور[۸] با تمرکز بر نیازهای مشتریان، یک اصل بنیادی در دولت دیجیتال است. پیاده‌سازی این اصل در استراتژی دیجیتال ملی حیاتی است. این بعد مشورت و مشارکت کاربران در طراحی و توسعه خدمات دولت دیجیتال را در همه گروه‌های کاربران (شامل شهروندان، کسب و کارها و کارکنان دولت) بررسی می‌کند. روش‌شناسی طراحی انسان‌محور، مثالی از چنین رویکرد مشارکتی برای نوسازی خدمات دولتی است. برای تضمین پوشش جامعی از همه کاربران بالقوه و بالفعل، در این بعد مصاحبه با سازمان‌های مردم‌نهاد و واسطه‌های اجتماعی نیز ضروری است.

بعد سوم: مدیریت دولتی و مدیریت تغییر

اقدامات دولت دیجیتال همچنین به مهندسی مجدد فرایندهای پشتیبانی[۹] برای دیجیتال کردن کل جریان کاری و اتوماسیون فرایندهای روتین می‌پردازد. این بعد به اصلاحات اساسی مدیریتی برای تحول دیجیتال توجه دارد. این محور جنبه‌ای از تحول دیجیتال است که بیشتر از همه مورد غفلت قرار می‌گیرد و می‌تواند موفقیت برنامه تحول را تعیین کند. چنانچه سیستم ماتریسی برای پیاده‌سازی تغییر وجود داشته باشد، تلاش شود سوالات پیرامون درک آن سیستم و فرایندهای مدیریت تغییر پیرامون آن جهت‌دهی شود.

بعد چهارم: قابلیت‌ها، فرهنگ و مهارت‌ها

این بُعد، آمادگی سرمایه‌های انسانی در دولت از حیث وجود خبرگان و متخصصان حوزه دولت دیجیتال (داخلی و پیمانکاران) و همچنین متخصصان کسب و کار مدیریتی را بررسی می‌کند. دسته‌بندی خدمتگزاران مدنی توسط پروفایل و مهارت‌هایشان، امری کلیدی است. شناسایی شاخص‌های کلیدی مانند گواهینامه‌ها و اعتبارسنجی‌ها، ضروری است. آموزش نیز مورد نیاز است که طیفی از مدیریت برنامه، زیرساخت و عملیات برنامه‌های کاربردی، مدیریت پایگاه داده، تحلیل داده، خدمات مشتری/ مرکز تماس و غیره را شامل می‌شود.

[1] Digital Government Readiness Assessment
[2] Leadership & Governance
[3] User-Centered Design
[4] Public Administration and Change Management
[5] Capabilities, Culture and Skills
[6] Cybersecurity, Privacy and Resilience
[7] Legislation and Regulation
[8] User-centered
[9] back-office

بعد پنجم: زیرساخت فناوری

این بعد، استانداردها، طراحی‌ها، پیاده‌سازی‌های زیرساخت فناوری مشترک برای ایجاد دولت دیجیتال اعم از اینکه دولت به تنهایی و یا در مشارکت با بخش خصوصی ایجاد کرده و یا برای ایجاد آن برنامه‌ریزی می‌کند را مورد بررسی قرار می‌دهد.

بعد ششم: زیرساخت داده، راهبردها و حاکمیت داده

این بعد، داده‌های دولت، دسترس‌پذیری، ساختار، استانداردها، پروتکل‌ها و سیاست‌های تبادل مربوطه و رایج را بررسی می‌کند. لازم است میان داده‌های استفاده شده توسط دولت برای ارائه خدمت و داده‌های استفاده شده توسط بخش خصوصی تمایز قائل شد.

بعد هفتم: امنیت سایبری، حریم خصوصی و بازیابی سریع

امنیت و مدیریت تداوم کسب و کارهای دولتی، عناصر حیاتی تحول دیجیتال هستند. این بعد به اقدامات انجام شده یا برنامه‌هایی که امنیت فضای مجازی، حریم خصوصی، اعتبار، صحت و بازیابی سریع تراکنش‌های دولت دیجیتال را تضمین می‌کند، توجه دارد.

بعد هشتم: قانون‌گذاری و تنظیم‌گری

دولت دیجیتال نیازمند محیط قانونی و رگولاتوری قدرتمندی است که مفاد قانونی جدیدی برای حریم خصوصی، محافظت از کاربر، امضای دیجیتال، شناسایی دیجیتال، امنیت سایبری و غیره ایجاد نماید. این نوع قوانین باعث شفافیت در هزینه‌کردهای دولتی یا فرایندهای تدارکات الکترونیکی که با داده سر و کار دارند؛ می‌شود. اتخاذ قانون PPP[1]، مشوقی برای مشارکت بخش خصوصی در توسعه دیجیتال و اشتراک دانش و خبرگی با بخش دولتی ایجاد کرده که در بلندمدت به رشد اقتصادی متوازن منجر می‌شود. لذا این بُعد، توانمندسازی قانون‌گذاری و تنظیم‌گری برای پشتیبانی از دولت دیجیتال و اقتصاد دیجیتال را بررسی می‌کند.

بعد نهم: اکوسیستم دیجیتال

از طریق دولت دیجیتال مشارکت و گفتگو میان شهروندان، بخش خصوصی، جامعه مدنی و دانشگاه‌ها در اکوسیستم دیجیتال شکل گرفته و نه تنها نوآوری، یادگیری و کارآفرینی را تقویت کرده بلکه منجر به توسعه اقتصاد دیجیتال مدرن می‌شود. این بعد، نهادها و افراد مشارکت‌کننده خارج از دولت که می‌توانند از برنامه‌های دولت دیجیتال و پیاده‌سازی آن پشتیبانی نمایند را بررسی می‌کند.

۳-۴- مدل دولت دیجیتال سازمان ملل متحد

در تعریف ارائه شده توسط سازمان ملل متحد، تحول دیجیتال دولتی، فرایند تحول مدل‌های حاکمیتی و مکانیزم‌های تعاملی میان دولت و جامعه و ایجاد نوآوری در سیاستگذاری، سازمان‌ها، خدمات و برنامه‌های دولتی با استفاده از فناوری‌های دیجیتال است. دولت دیجیتال به فرایند تغییر بنیادینی اشاره دارد که نیازمند رویکردی کل‌نگر است و مردم را از ابتدا مورد توجه قرار داده و حول نیازهای آنان بوده و ریسک‌های مرتبط با استفاده از فناوری‌ها را می‌کاهد.

ویژگی‌محوری رویکرد همه‌جانبه به تحول دیجیتال دولتی، همراستایی نهادها، سازمان‌ها، مردم، فناوری، داده و منابع برای پشتیبانی از تغییرات مطلوب داخل و بیرون بخش دولتی برای ایجاد ارزش عمومی است. دولت دیجیتالی که از توسعه پایدار حمایت می‌کند، باید بر پایه رویکرد اکوسیستمی باشد که با بهره‌گیری از تفکر سیستمی و رویکردهای یکپارچه‌سازی بتواند پیوندهای متقابل میان اهداف توسعه پایدار و ارائه خدمات را دربرگیرد. این تحول به شکلی باید انجام شود که فراتر از تغییرات تدریجی باشد و تغییر سیستمی را شامل شود و با بهره‌برداری از دانش داخلی و توجه به بهترین تجربیات دنیا، بومی و فراگیر باشد و تضمین کند که هر تحولی با هدف ایجاد فرصت‌های برابر برای همه مردم برای دسترسی به خدمات با کیفیت و قابل اتکا، انجام می‌شود. لازم است همکارانه باشد، چرا که یکپارچه‌سازی خدمات دیجیتال نیازمند درجه بالایی از هماهنگی میان وزارتخانه‌ها و نهادها و ذهنیت‌های جدید در دولت و جامعه است. همچنین لازم است با رویکردهای انسان‌محوری، مدیریت برنامه‌ها و ارائه خدمات اطلاع‌رسانی شود و مسائل و نیازهای واقعی گروه‌های مختلف مردم در جامعه را پوشش دهد.

در سطح سیستمی یک رویکرد کل‌نگر برای تحول دیجیتال دولت، نیازمند ایجاد قابلیت‌ها و ظرفیت‌های عمیق است. ظرفیت دولت دیجیتال به معنای توانایی دولت‌ها و جامعه برای تحول سیاست‌ها، برنامه‌ها، فرایندها و خدمات با استفاده از نوآوری و فناوری‌های دیجیتال است. توسعه ظرفیت جامع برای دولت دیجیتال جهت تضمین ارائه خدمات دیجیتال به صورت در دسترس، قابل اعتماد، سریع، شخصی‌سازی‌شده، ایمن و فراگیر با مشارکت افراد در فرایند تصمیم‌سازی و طراحی و ارائه خدمت، ضروری است. ظرفیت‌سازی باید در سطوح سازمانی، نهادی و فردی در دولت و سطح جامعه انجام شود. تعهد سیاسی در بالاترین سطح دولت، پیش‌شرط ضروری است.

بدین ترتیب، فرایند تحول دیجیتال دولت یک چرخه تکرارشونده چهار مرحله‌ای است: ۱) تحلیل موقعیت برای ارزیابی فرصت‌ها و شکاف‌های ظرفیت تحول دیجیتال، ۲) بیان چشم‌انداز مشترک تحول دیجیتال در دولت و اینکه چگونه فناوری‌های دیجیتال برای دسترسی به اهداف جامعه استفاده می‌شوند، ۳) تدوین استراتژی و

[1] Public-Private-Partnership

نقشه‌راه تحول دیجیتال دولت به‌گونه‌ای که ابعاد کلیدی دولت دیجیتال شناسایی شده باشند و ۴) ایجاد مکانیزم‌های ارزیابی و نظارت برای جمع‌آوری بازخوردها برای اطلاع‌رسانی در دوره‌های بعدی تحلیل موقعیت، توسعه استراتژی و پیاده‌سازی [۱۶].

ابعاد کلیدی دولت دیجیتال از نگاه سازمان ملل متحد

باتوجه به توضیحات ارائه شده، نقشه‌راه یک کشور برای دولت دیجیتال لازم است بر پایه ابعاد کلیدی (جدول ۲) ساخته شود که دولت دیجیتال فراگیر، پاسخگو و موثر را ترویج می‌کند[۱۶].

۴- روش‌شناسی پژوهش

امروزه با توسعه تحول دیجیتال و فناوری‌های نوین در سازمان‌ها و دستگاه‌های مختلف دولتی، دولت هوشمند مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است و سازمان‌ها در تلاش هستند که سطح بلوغ سازمان خود را ارتقاء داده و بتوانند خدمات مورد نیاز کاربران را شناسایی و در کمترین زمان ممکن به آنها ارائه دهند. به‌منظور تشخیص وضعیت دولت دیجیتال و ارزیابی و سنجش سطح بلوغ آن در سازمان، لازم است معیارها و شاخص‌های بلوغ دولت دیجیتال تعیین و بر اساس آن وضعیت دولت دیجیتال ارزیابی و تعیین شود تا برای ارتقاء سازمان در همه ابعاد مرتبط با دولت هوشمند و تحول دیجیتال تدبیر اندیشیده شود. این مقاله، تلاش دارد تا ابعاد مختلف دولت دیجیتال و مولفه‌های ارزیابی هر بُعد را جهت کاربرد در برنامه‌های توسعه دولت دیجیتال در کشور مشخص نماید. لذا، براساس هدف تعیین شده، این پژوهش توسعه‌ای و کاربردی است. در پژوهش حاضر از داده‌های اصلی و بدون دست‌کاری بهره گرفته شده، در نتیجه در زمره تحقیقات توصیفی (غیرآزمایشی) شمرده می‌شود.

برای احصاء ابعاد و مولفه‌های دولت دیجیتال، از مطالعات سازمان‌ها و موسسات معتبر بین‌المللی همچون OECD، دیلویت، بانک جهانی و سازمان ملل متحد استفاده شده است. بنابراین، رویکرد فرامطالعه بکار گرفته شده است. دبورا فینفگلد کانت ۱ در کتاب خود[۱۷] به روش فراترکیب کامل پرداخته است و مطرح کرده است که روش‌های مختلفی برای انجام فراترکیب وجود دارد که به روش‌های فرامطالعه، فراخلاصه، ترکیب تحقیقات کیفی، فراتجمیع کیفی و غیره اشاره کرد. فراترکیب نوعی مرور نظام‌مند است که یافته‌های تحقیقات کیفی را از مطالعات فردی به منظور ایجاد تفاسیر جدید و پیشبرد حوزه‌ای از دانش ترکیب می‌کند. این روش از تحقیقات کیفی قبلی منتشر شده به عنوان پایگاه‌داده خود استفاده کرده و جنبه‌های مشابه و متفاوت یافته‌های مطالعات کیفی در یک حوزه خاص را تفسیر، ارزیابی و ارائه می‌کند.

جدول ۲. ابعاد دولت دیجیتال از منظر سازمان ملل

ابعاد	توضیحات و زیر ابعاد
چشم‌انداز، رهبری و ذهنیت[۲]	تقویت رهبری تحول، ایجاد ظرفیت‌های دیجیتال و تغییر ذهنیت‌ها در سطوح نهادی و فردی **زیر ابعاد** (رهبری تحول و پشتیبانی کامل دولت دیجیتال از سوی مدیران در تمامی سطوح دولت؛ استراتژی دیجیتال تعبیه‌شده یا همراستا با استراتژی توسعه ملی؛ تیم‌های همراستا حول داده‌ها؛ ذهنیت‌های دیجیتال و با قابلیت انطباق، نوآورانه، فراکنشی و پیش‌بینی کننده)
چارچوب قانونی و نهادی[۳]	ایجاد یک چارچوب قانون و مقررات برای توسعه اکوسیستم نهادی یکپارچه **زیرابعاد** (تنظیم‌کننده‌ها و تسهیل‌کننده‌ها؛ چارچوب قانونی جامع و دوراندیش؛ شناسه هویت دیجیتال قوی؛ سندباکس‌های رگولاتوری برای استفاده از فناوری‌های نوظهور)
ساختار و فرهنگ سازمانی[۴]	تحول ساختار و فرهنگ سازمانی **زیر ابعاد** (CIO مستقر در بالاترین سطح بدنه تصمیم‌سازی در دولت با استقلال بودجه؛ تیم‌های چندرشته‌ای با تخصص‌های مختلف، شبکه CIOها در سطوح محلی و ملی؛ محیط با یادگیری مداوم برای تطبیق سریع با تغییرات؛ چابکی عملیاتی مانند منابع انسانی هوشمند در حوزه تحلیل برای شناسایی و پوشش شکاف‌های مهارتی و همکاری با استارتاپ‌های نوآوری؛ همکاری انسان و ماشین که نیازمند خلاقیت و تصمیمات استراتژیک است.؛ دادن اختیار عمل به کارمندان برای انجام وظایف با ارزش افزوده بالاترکه نیازمند خلاقیت است.
تفکر سیستمی و یکپارچه‌سازی[۵]	ترویج تفکر سیستمی و توسعه رویکردهای یکپارچه برای سیاستگذاری و ارائه خدمت **زیر ابعاد** (وب سایت دولتی واحد و قوی؛ ارائه خدمات دولتی بر مبنای اصول "اصل اول دیجیتال "، "دیجیتال به طور پیش فرض"، "دیجیتال از مرحله طراحی"، "اصل اول موبایل" به عنوان یک سیستم یکپارچه؛ شناسه هویت دیجیتال ملی قوی؛ خدمات مردم مرکز و مردم محور؛ توسعه همکارانه خدمات؛ دولت پاسخگو و سازگار با نیازهای مردم)
حاکمیت داده	تضمین مدیریت حرفه‌ای و استراتژیک داده برای تعیین اولویت‌های دسترسی و استفاده از داده و توانمندسازی‌سیاستگذاری داده‌محور **زیرابعاد** (وجود دفتر/اداره حاکمیت داده؛ اصل فقط یک بار؛ فرهنگ داده محور؛ تصمیمات مبتنی بر شواهد؛ بهبود و نظارت مداوم داده؛ داده‌های دولتی باز با قابلیت خوانش توسط ماشین؛ استفاده زیاد از داده‌های باز)
زیرساخت ICT، مقرون به صرفه و دسترسی به فناوری[۶]	تامین دسترسی به اینترنت پهن باند با سرعت بالا و دسترسی ایمن به فناوری‌های جدید برای همه **زیرابعاد** (اتصلات پهن باند؛ استفاده از فناوری‌های جدید، کلان‌داده؛ مدل‌های کسب و کار پلتفرمی؛ معماری تعامل‌پذیر و غیرمتمرکز؛ ایمن از مرحله طراحی؛ بلاکچین به عنوان ویژگی امنیتی؛ اکوسیستم محور)
منابع	تجمیع منابع و همراستایی اولویت‌ها، برنامه‌ها و بودجه از طریق مشارکت‌های بخش دولتی و خصوصی **زیر ابعاد** (رویکرد بلندمدت و کل دولت با تامین مالی پایدار؛ مشارکت‌های عمومی خصوصی)

1 Deborah Finfgeld-Connett
2 Vision, leadership and mindsets
3 Institutional and regulatory framework
4 Organizational set-up and culture
5 Systems thinking and integration
6 ICT infrastructure and affordability and access to technology

ظرفیت توسعه‌دهندگان ظرفیت[1]	تقویت ظرفیت مدارس مدیریت دولتی و سایر نهادها و مکانیزم‌های ایجاد ظرفیت **زیرابعاد** (مشارکت قوی با دانشگاه‌ها، اتاق‌های فکر، بخش خصوصی از جمله آزمایشگاه‌های نوآوری و سایر دولت‌ها مانند آموزش‌های امنیت سایبری منطقه‌ای؛ مشارکت مدارس مدیریت دولتی برای ایجاد برنامه‌های درسی برای ظرفیت دیجیتال و سایر مهارت‌های مرتبط؛ آموزش مداوم آموزش‌دهندگان)
ظرفیت‌های اجتماعی[2]	توسعه قابلیت‌ها در سطح اجتماعی برای پوشش شکاف دیجیتال زیر ابعاد (سواد دیجیتال بالا در جامعه و نفوذ اینترنت بسیار بالا در تمامی سطوح؛ رویکرد چندکاناله و omni برای آموزش مادام العمر؛ مشارکت میان دولت و صنایع ICT؛ حفظ اعتماد در دولت، امنیت ICT، ایمنی و حریم خصوصی)

فراترکیب کیفی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته، برای پاسخ به سؤالات تحقیق، زمانی که مطالعات کیفی متعددی در مورد موضوع در دسترس باشد، مناسب است. هدف، استفاده از روشی ساختاریافته، شفاف و قابل ممیزی برای پیشبرد دانش در یک حوزه مطالعاتی می‌باشد. فراترکیب کیفی برای تفسیر مجدد معنا و ایجاد نظریه‌های جدید و یا تبیین مداخلات بر اساس یافته‌های چند مطالعه کیفی با کیفیت بالا، مناسب می‌باشد[۱۸].

لذا در این مقاله، با توجه به هدف مورد نظر، از روش فراترکیب چارچوب‌ها و ابعاد دولت دیجیتال ارائه شده توسط موسسات بین‌المللی مطالعه و تحلیل می‌شوند و چارچوب جامعی شامل ابعاد و مولفه‌های ارزیابی دولت دیجیتال پیشنهاد خواهد شد. مراحل انجام کار، در شکل۵ آمده است. همانطور که قبلا اشاره شد، روش فراترکیب نوعی روش تحقیق است که برای ترجمه‌های تفسیری[3] و یا ایجاد تئوری با بهره‌گیری از یکپارچه‌سازی و مقایسه یافته‌ها یا استعاره‌های مطالعات کیفی مختلف، استفاده می‌شود[۱۹]. تعداد مراحل انجام روش فراترکیب در مراجع مختلف، متفاوت است، مثلا هون[4] [۲۰]، ۸ مرحله برای این روش ارائه نموده است که عبارتند از: چارچوب‌بندی سوال تحقیق، مکان‌یابی تحقیقات مربوطه، استخراج و کدگذاری داده‌ها، تجزیه و تحلیل در سطح مورد خاص، ترکیب در سطح مطالعه ، نظریه سازی از فراترکیب و بحث. لچل[5] و همکارانش[۲۱] از مدل ۶ مرحله‌ای در حوزه روانپزشکی استفاده نمودند که این مراحل عبارتند از: تعریف سوال تحقیق و معیارهای ورود، انتخاب مطالعات، ارزیابی کیفیت آنها، استخراج و ارائه داده‌های رسمی، تجزیه و تحلیل داده‌ها و بیان ترکیب.

در این مقاله از ۷ مرحله فراترکیب ارائه شده توسط نوبلت[6] و هیر[7] استفاده شده که عبارتند از[۲۲]:

شکل۵. فرایند و روش‌شناسی تحقیق

۱. مرحله شروع، تعیین هدف و مسئله تحقیق: شروع کار با تعیین هدف از انجام یک پژوهش، تعریف مسئله و بیان آن به منظور تشریح و شفاف‌سازی مشکل صورت می‌گیرد. در این مقاله، هدف ارائه ابعاد و مولفه‌های جامع چارچوب دولت دیجیتال است.

۲. انتخاب مدل‌ها و چارچوب‌های مرتبط با موضوع تحقیق: در این گام، با بررسی ادبیات موضوع، انواع مختلف مدل‌ها و چارچوب‌ها شناسایی و مرتبط‌ترین آنها انتخاب می‌شوند. برای این کار چارچوب‌های معتبر دولت دیجیتال ارائه شده توسط OECD، دیلویت، بانک جهانی و سازمان ملل متحد انتخاب شدند. دلیل انتخاب این مدل‌ها این است که اولاً همگی توسط موسسات بین‌المللی و معتبر در سطح جهان ارائه شده‌اند و دومین دلیل آن که بر اساس این مدل‌ها شاخص‌های مرتبط ارائه شده و کشورهای عضو هر یک از این موسسات بر اساس آنها رتبه‌بندی شدند.

۳. مطالعه و بررسی چارچوب‌های معتبر: پس از شناسایی و انتخاب موارد مورد نظر در پایان گام قبل، منابع استخراج شده مطالعه و بررسی شده و جزییات هر چارچوب شناسایی می‌شود. برای این کار چارچوب‌های دولت دیجیتال و ابعاد و مولفه‌های مورد اشاره در آنها به دقت بررسی و تعیین شدند که نتایج آن در بخش ۳ ارائه شد.

۴. تعیین چگونگی ارتباط مدل‌ها و چارچوب‌های بررسی شده: در این مرحله، ارتباط بین مطالعات مختلف ارائه می‌شود. آنالیز مدل‌ها و چارچوب‌های انتخابی نشان می‌دهد که چه موضوعاتی مهم بوده و بهتر است در نظر گرفته شوند. در این مرحله، مطالعه ادبیات موضوع بررسی شده تا این مرحله نشان می‌دهد که نقاط اشتراک میان چارچوب‌های مختلف چیست. نتایج این مرحله نیز

[1] Capacities of capacity developers
[2] Societal Capacities
[3] Interpretive Translations
[4] Hoon
[5] Lachal
[6] Noblit
[7] Hare

در قالب جدول ۳ در بخش ۵ ارائه می‌شود.

۵. ترجمه و تفسیر مطالعات به همدیگر: در این مرحله، مدل‌های مختلف مقایسه و ارتباط آن‌ها پیدا می‌شود. همچنین سعی شده تا موضوعاتی که در هر چارچوب به آن توجه شده، استخراج و در صورت امکان اشتراک‌های بین چارچوب‌ها بدست آید. در این مرحله ارتباط بین چارچوب‌های مختلف و مولفه‌ها و ابعاد آنها در ماتریسی ارائه می‌شود. جدول ۴ نتایج این مرحله را ارائه می‌کند.

۶. ترکیب و تلفیق تفسیر: این مرحله ارتباط بین چارچوب‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این مرحله، نتایج ماتریس مربوطه تحلیل می‌شود و از نتایج آن برای چارچوب پیشنهادی استفاده می‌شود. نتایج این مرحله نیز در شکل ۶ ارائه شده است.

۷. نشان دادن یافته‌ها: در این مرحله نتایج تحقیق که در واقع دستیابی به نوعی جمع‌بندی است، ارائه می‌شود. نتایج این مرحله نیز در جدول ۵ ارائه شده است.

۵- چارچوب سیاستگذاری و ارزیابی دولت دیجیتال

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، از مدل فراترکیب برای استخراج ابعاد و مولفه‌ها و تبیین چارچوب پیشنهادی استفاده شده است. در بخش ۳، مطالعه جامعی بر روی مدل‌ها و چارچوب‌ها انجام شد. در این بخش تلاش شده‌است با مقایسه تحلیلی ابعاد و مولفه‌های موجود در چارچوب‌های مورد بررسی، چارچوب مفهومی جامعی برای سیاستگذاری و ارزیابی دولت دیجیتال با درنظر گرفتن تمامی مولفه‌های مدل‌های بررسی شده، ارائه شود.

۵-۱- جمع‌بندی تحلیلی ابعاد و مولفه‌های موجود در هریک از مدل‌ها

در جدول ۳، ابعاد هریک از چارچوب‌های بررسی شده و مولفه‌های مطرح در هریک آورده شده است تا امکان مقایسه آنها فراهم شود.

جدول ۳. جمع‌بندی و مقایسه ابعاد و مولفه‌های دولت دیجیتال در چارچوب‌های مورد بررسی

ابعاد سیاستگذاری دولت دیجیتال OECD		محورهای تحول دیجیتالی دولت دیلویت		ابعاد ارزیابی آمادگی دولت دیجیتال بانک جهانی		ابعاد تحول دیجیتال دولت سازمان ملل متحد	
دیجیتال از مرحله طراحی	استراتژی جامع دولت دیجیتال؛ رهبری و ساختار سازمانی؛ ارزیابی قوانین دولتی؛ بازبینی و مهندسی مجدد فرایندها و عملیات دولتی؛ استانداردها و دستورالعمل‌های طراحی خدمات؛ وجود چارچوب‌ها و زیرساخت‌های مشترک؛ وجود کانال‌های ارتباطی و مشارکتی با ذینفعان برای طراحی خدمت و دریافت بازخورد؛ ارزیابی منافع و هزینه‌های پروژه‌های ICT	تسلط بر داده‌ها	یکپارچه‌سازی داده‌های ساختاریافته بدون ساختار در سطح دولت؛ ایجاد داده‌ها و سیستم‌های تعامل‌پذیر در داخل و بین سازمان‌ها؛ چارچوب قانونی برای دسترسی و به‌اشتراک‌گذاری داده‌ها بین سازمان‌ها؛ استقرار یک زیرساخت فناورانه انعطاف‌پذیر، مقیاس‌پذیر و ایمن	رهبری و حاکمیت	استراتژی دولت دیجیتال؛ اهداف قابل اندازه‌گیری همراستا با اهداف توسعه پایدار؛ نقشه‌راه برای پیاده‌سازی استراتژی دولت دیجیتال؛ یک نهاد دولتی برای توسعه و پیاده‌سازی استراتژی دولت دیجیتال با دستور کار رسمی با مدل عملیاتی شفاف؛ همکاری سایر نهادهای دولتی با نهاد ذکرشده؛ درک و پشتیبانی مقامات دولتی در خصوص دولت دیجیتال؛ مشورت با ذینفعان بیرونی برای توسعه استراتژی دولت دیجیتال؛ اطلاع‌رسانی چشم‌انداز و استراتژی دولت دیجیتال؛ تامین مالی پایدار برای پشتیبانی و پیاده‌سازی استراتژی دولت دیجیتال؛ تدارکات مرکزی برای مدیریت دارایی و تدارکات ICT	چشم‌انداز، رهبری و ذهنیت	رهبری تحول و پشتیبانی کامل دولت دیجیتال از سوی مدیران تمامی سطوح؛ وجود استراتژی دیجیتال تعبیه شده یا همراستا با استراتژی توسعه ملی؛ وجود ذهنیت‌های دیجیتال و با قابلیت انطباق، نوآورانه، فراکنشی و پیش‌بینی کننده
داده محوری	سیاست داده در سطح دولت؛ نقش‌ها و مسئولیت‌ها برای پیاده‌سازی سیاست داده؛ استانداردهای مدیریت و اشتراک داده در سطح دولت؛ اتخاذ قوانین و اصول اخلاقی در مدیریت داده کاربران و حفظ حریم خصوصی؛ شفافیت و باز بودن داده‌ها در سطح دولتی و مدیریت اخلاقی داده‌های دولتی؛ مدیریت خطرات امنیتی	زیرساخت ایمن و منعطف	استقرار یک زیرساخت فناورانه انعطاف‌پذیر، مقیاس‌پذیر و ایمن	طراحی کاربرمحور	تعبیه رویکردهای طراحی کاربرمحور خدمات دولتی در استراتژی دولت دیجیتال؛ اصول راهنما طراحی و پیاده‌سازی خدمات دیجیتال برای گروه‌های مختلف کاربران؛ مشارکت کاربران در طراحی، تست و استفاده از خدمات؛ رویکردهای چندکاناله برای ارائه و ترویج خدمات الکترونیکی؛ استراتژی بازاریابی و برنامه‌ای برای ترویج استفاده از خدمات الکترونیکی در تمام کانال‌های در دسترس؛ دسترس‌پذیری خدمات دیجیتال برای همگان؛ دریافت بازخورد کاربران؛ مشورت با ذینفعان بیرونی در خصوص طراحی سرویس کاربرمحور	چارچوب قانونی و نهادی	چارچوب قانونی جامع و دوراندیش؛ شناسه هویت دیجیتال قوی؛ سندباکس‌های رگولاتوری برای استفاده از فناوری‌های نوظهور
دولت به عنوان یک پلتفرم	استفاده از پلتفرم‌های دیجیتال برای مشارکت فعالانه ذینفعان خارجی؛ تجهیز تیم‌های توسعه‌دهنده ارایه خدمات یکپارچه دولتی	شبکه‌های استعدادیابی باز	استخدام کارمندان باهوش دیجیتال؛ آموزش و ارتقاء مهارت‌های موجود کارمندان دولتی؛ استفاده از قدرت جمعی با ایجاد چالش‌ها و رقابت‌ها؛ مشارکت با دانشگاه‌ها و صنعت با مدل‌های استخدامی موقت؛ استفاده از مدل‌های منعطف و اقتضایی در ایجاد تیم‌ها	مدیریت دولتی و مدیریت تغییر	استراتژی مدرن‌سازی و تغییر شکل مدیریتی بر اساس دولت دیجیتال؛ استفاده از رویه‌های استاندارد برای دیجیتال کردن و بهینه‌سازی خدمات دولتی؛ اشتراک داده‌های مرجع بین بخشی میان موسسات دولتی؛ توسعه کاتالوگ خدمت در سطح دولت؛ تغییر سامانه‌ها و خدمات با استانداردهای یکپارچه‌سازی در دولت دیجیتال؛ وجود دفتر مدیریت تغییر برای پیاده‌سازی تغییرات متناسب با دولت دیجیتال	ساختار و فرهنگ سازمانی	CIO مستقر در بالاترین سطح بدنه تصمیم‌سازی و شبکه CIOها؛ تیم‌های چندرشته‌ای با تخصص‌های مختلف چابکی عملیاتی مانند منابع انسانی هوشمند در حوزه تحلیل؛ دادن اختیار عمل به کارمندان برای انجام وظایف؛ پوشش شکاف‌های مهارتی و همکاری با استارتاپ‌های نوآوری

باز بودن	باز بودن و شفافیت داده‌های دولتی؛ وجود دستورالعمل‌ها و استانداردهایی در سطح دولت برای انتشار دیجیتال داده‌های دولتی	مشارکت اکوسیستمی	مشارکت با شرکای بیرونی مانند بخش خصوصی و دانشگاه‌ها، انکوباتورها و .... برای حل مسائل	قابلیت‌ها، فرهنگ و مهارت‌ها	وجود نیروی متخصص (فنی و کسب وکار) برای ارائه خدمت بر اساس استراتژی دولت دیجیتال با مسیر شغلی شفاف؛ درک واضح از نیازمندی‌های قابلیت‌های دولت دیجیتال؛ وجود برنامه آموزشی دیجیتال داخلی در تمامی سطوح دولتی؛ دسترسی به متخصصان آکادمیک و بخش دانشگاهی یا صنعتی برای پروژه‌های خاص دولت دیجیتال؛ آمادگی برونسپاری عملیات توانمندساز دولت دیجیتال به پیمانکاران بخش خصوصی؛ فرهنگ مشارکتی درخصوص پروژه‌ها در میان کارمندان در دولت و وجود جوامع علمی دانش بنیان در بدنه دولت	تفکر سیستمی و یکپارچه‌سازی	وب سایت دولتی واحد و قوی؛ ارائه خدمات دولتی بر مبنای اصول دیجیتال از مرحله طراحی و ....؛ وجود شناسه هویت دیجیتال ملی قوی؛ خدمات مردم‌مرکز و مردم محور؛ ایجاد همکارانه خدمات؛ دولت پاسخگو و سازگار با نیازهای مردم
کاربر محوری	فراگیر بودن خدمات دولتی؛ سازگاری خدمات با نیازها و علائق مشتریان؛ ارتقاء مهارت شهروندان؛ مشارکت شهروندان در سیاستگذاری و طراحی خدمت	جریان‌های کاری هوشمند	ساده‌سازی فرایندها و گردش-های کاری اصلی؛ استفاده از اتوماسیون برای انجام کارهای تکراری؛ پشتیبانی از کارکنان با ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی	زیرساخت فناوری	توسعه معماری سازمانی دولت همراستا با برنامه دولت دیجیتال؛ وجود چارچوب تعامل‌پذیری دولت الکترونیک و سایر استانداردهای داده و متادیتا؛ وجود گذرگاه سرویس سازمانی با APIهای استاندارد شده؛ وجود شبکه دیجیتال گسترده در سطح دولت برای اشتراک گذاری خدمات و داده‌ها؛ استفاده از فناوری-های جدید در دولت؛ وجود پورتال دولت دیجیتال مشترک برای تمامی خدمات دیجیتال؛ وجود یک مرکز تماس به‌منظور ارتباط با مردم و مشتریان؛ وجود دستورالعمل‌های عملیات دیجیتال یا ICT برای کارمندان پایه و متخصص	حاکمیت داده	وجود دفتر/اداره حاکمیت داده؛ اصل فقط یک بار؛ فرهنگ داده محور؛ بهبود و نظارت مداوم داده؛ داده‌های دولتی باز با قابلیت خوانش توسط ماشین
فراکنشی	پیش‌بینی نیاز شهروندان؛ اصل فقط یک بار؛ مشارکت کاربران در طراحی خدمات و سیاست‌ها و بازبینی اقدامات دولتی؛ آموزش کاربران برای استفاده از ابزارهای دیجیتال؛ اطلاع رسانی به شهروندان درخصوص اقدامات دولتی	تجربه کاربری یکپارچه	ارائه تجربه شخصی‌سازی شده برای شهروندان و کسب و کارها؛ در دسترسی بودن خدمات در هر مکان و هر زمان و از هر کانالی؛ ارائه خدمات به صورت یکپارچه و انتها به انتها؛ انتصاب مدیران ارشد با تجربه برای نهادینه‌سازی فرهنگ تجربه مشتری؛ سرمایه‌گذاری در پلتفرم‌های تجربه دیجیتال	زیرساخت داده، راهبردها و حاکمیت داده	وجود راهبرد مدیریت داده در دولت و پیاده‌سازی آن؛ ثبت داده‌های پایه‌ای به همراه مسئولیت‌های سازمانی مربوطه؛ وجود توافقنامه اشتراک داده و پروتکل‌های تبادل داده با شخص ثالث؛ وجود زیرساخت داده فضایی و استفاده از پلتفرم GIS مشترک؛ استفاده از هوش مصنوعی، بیگ دیتا و تحلیل داده برای تصمیم‌سازی بهتر؛ اشتراک داده‌های باز و تشویق به آن، ایجاد دیتاست‌های دولتی و عضویت در OGP	زیرساخت ICT	اتصلات پهن باند؛ استفاده از فناوری‌های جدید؛ مدل‌های کسب و کار پلتفرمی؛ معماری تعامل‌پذیر و غیرمتمرکز؛ ایمن از مرحله طراحی؛ بلاک‌چین به عنوان ویژگی امنیتی؛ اکوسیستم محوری
		نوآوری و مدل‌های کسب و کار جدید	اتخاذ مدل‌های کسب و کار جدید برای تطابق با نیازهای در حال تغییر	امنیت سایبری، حریم خصوصی و بازیابی سریع	وجود استراتژی و سند سیاستی امنیت سایبری؛ واحد امنیت سایبری در دولت مرکزی؛ اشتراک اطلاعات و کاهش ریسک‌های سایبری دولتها یا سازمان‌های منطقه‌ای و جهانی؛ قابلیت CERT؛ برنامه حفاظت زیرساخت بحرانی ملی	منابع	رویکرد بلند مدت و کل دولت با تامین مالی پایدار؛ مشارکت‌های عمومی خصوصی
				قانون‌گذاری و تنظیم‌گری	قانون حفاظت از داده؛ قانون تجارت الکترونیکی یا تراکنش‌های دیجیتال؛ قانون هویت دیجیتال؛ قانون حفاظت از کاربر ؛ قانون جرایم سایبری؛ قوانین دسترسی باز به اطلاعات دولتی (داده‌های باز)؛ قانون مشارکت PPP؛ اصلاح قوانین و مقررات قدیمی متناسب با دولت دیجیتال	ظرفیت توسعه‌دهندگان	مشارکت قوی با دانشگاه‌ها، اتاق-های فکر و ....؛ مشارکت مدارس مدیریت دولتی برای ایجاد برنامه-های درسی برای ظرفیت دیجیتال؛ آموزش مداوم آموزش-دهندگان
				اکوسیستم دیجیتال	وجود دانشگاه‌ها یا موسسات آموزشی برای آموزش فناوری و کسب و کار؛ هاب‌های نوآوری و شتاب‌دهنده‌های استارتاپ برای پشتیبانی از نوآوری به همراه مشوق‌هایی از سوی دولت؛ پشتیبانی بخش-های خصوصی و دانشگاه‌ها و مراکز بین‌المللی در مسیر توسعه دولت دیجیتال؛ وجود مشارکت‌های رسمی با اپراتورهای بخش خصوصی و دانشگاه‌ها و سازمان‌های مدنی در پشتیبانی از دولت دیجیتال؛ وجود بانک‌ها و موسسات سرمایه‌گذاری برای پشتیبانی از دستورکار دیجیتال برای دولت	ظرفیت‌های اجتماعی	سواد دیجیتال بالا در جامعه و نفوذ اینترنت بسیار بالا در تمامی سطوح؛ رویکرد چندکاناله و omni برای آموزش مادام العمر؛ مشارکت میان دولت و صنایع ICT؛ حفظ اعتماد در دولت، امنیت ICT، ایمنی و حریم خصوصی

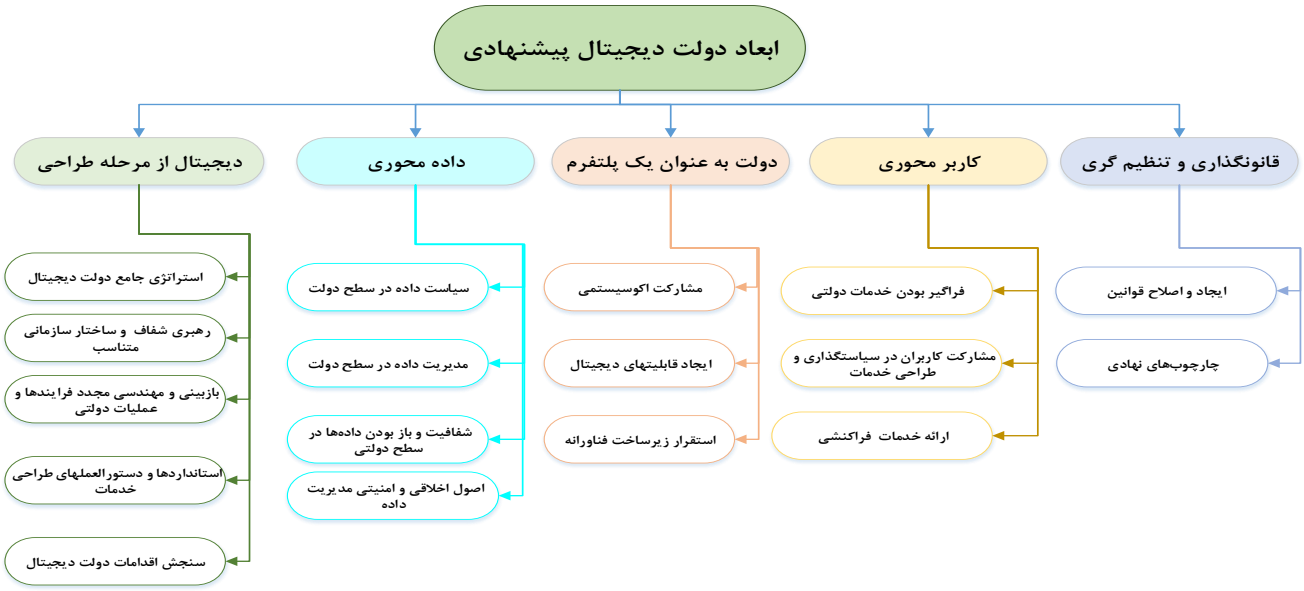
۵-۲- استخراج چارچوب سیاستگذاری و ارزیابی دولت دیجیتال

در جدول ۴، با توجه به مولفه‌های مطرح در هریک از ابعاد موجود در چارچوب‌ها و با کمک روش فراترکیب، ابعادی که از لحاظ مفهومی و اشتراک در مولفه‌ها، شباهت زیادی به‌هم دارند، آورده شده‌اند. با توجه به جامعیت ابعاد مطرح در OECD و ارائه چارچوب ارزیابی همه‌جانبه برای اندازه‌گیری دولت دیجیتال و نظرسنجی انجام شده[۲۳]، مبنای مقایسه چارچوب‌ها بر اساس این چارچوب بنا نهاده شده است.

با بررسی‌های انجام شده و مقایسه تحلیلی ابعاد و مولفه‌ها در هریک از چارچوب‌ها که نتایج آن در جداول ۳ و ۴ آورده شد، شکل ۶ چارچوب پیشنهادی برای دولت دیجیتال را ارائه می‌کند. همچنین جدول۵ ارائه ابعاد و مولفه‌های چارچوب تحلیلی پیشنهادی به همراه ویژگی‌های هر یک را نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت ابعاد مربوط به چارچوب قانونی دولت دیجیتال که در سازمان ملل متحد و بانک جهانی به عنوان ابعاد مستقل آورده شده است، این بعد به عنوان بعدی مستقل در این چارچوب آورده شد. برای نام‌گذاری سایر ابعاد چارچوب پژوهش از چارچوب OECD استفاده شده است. تعیین مولفه‌های هریک از ابعاد، با بررسی ابعاد و ویژگی‌های موجود در تمامی چارچوب‌ها صورت گرفته است.

جدول ۴. بررسی ابعاد مطرح در هریک از چارچوب‌ها

ابعاد / چارچوب‌ها	ابعاد کلیدی به هم مرتبط در چارچوب‌های مورد بررسی			
OECD	- دیجیتال از مرحله طراحی	- داده محوری - باز بودن	- دولت به عنوان یک پلتفرم	- کاربر محوری - فراکنشی
دیلویت	- جریان‌های کاری هوشمند - مشارکت اکوسیستمی	- تسلط بر داده‌ها	- زیرساخت ایمن و منعطف - هوشمندی دیجیتالی و شبکه‌های استعدادیابی باز -مشارکت اکوسیستمی - نوآوری و مدل‌های کسب و کار جدید	- تجربه کاربری یکپارچه
بانک جهانی	- رهبری و حاکمیت - مدیریت دولتی و مدیریت تغییر - قابلیت‌ها، فرهنگ مهارت‌ها - قانونگذاری و تنظیم گری	- زیرساخت داده، راهبردها و حاکمیت داده	- زیرساخت فناوری - اکوسیستم دیجیتال	- طراحی کاربر محور - امنیت، حریم خصوصی و بازیابی سریع
سازمان ملل متحد	- چشم‌انداز، رهبری و حاکمیت - تفکر سیستمی و یکپارچه‌سازی - ساختار و فرهنگ سازمانی - چارچوب قانونی و نهادی	- حاکمیت داده	- تفکر سیستمی و یکپارچه سازی - زیرساخت ICT - منابع - ظرفیت توسعه دهندگان ظرفیت	- تفکر سیستمی و یکپارچه‌سازی - ظرفیت‌های اجتماعی - پتانسیل توسعه‌دهندگان ظرفیت



شکل۶. چارچوب پیشنهادی دولت دیجیتال

جدول ۵. چارچوب پیشنهادی برای سیاستگذاری و ارزیابی دولت دیجیتال در پژوهش حاضر

ردیف	ابعاد	مولفه‌ها	توصیف/مصادیق
۱	دیجیتال از مرحله طراحی	**استراتژی جامع دولت دیجیتال**	سند استراتژی دولت دیجیتال؛ اهداف قابل اندازه‌گیری همراستا با توسعه پایدار؛ نقشه‌راه برای پیاده‌سازی استراتژی دولت دیجیتال؛ مشورت با ذینفعان برای توسعه استراتژی دولت دیجیتال؛ اطلاع‌رسانی چشم‌انداز و استراتژی دولت دیجیتال
		رهبری شفاف و ساختار سازمانی متناسب	وجود یک بخش دولتی برای توسعه و پیاده‌سازی استراتژی دولت دیجیتال؛ ارائه مشاوره در بدنه‌های دولتی برای هماهنگی‌های دولت دیجیتال؛ درک و پشتیبانی مقامات دولتی از توسعه دولت دیجیتال و وجود ذهنیت‌های دیجیتال؛ وجود نقش‌ها و مسئولیت‌های مرتبط مانند CIO مستقر در بالاترین سطح بدنه تصمیم‌سازی؛ وجود تدارکات مرکزی برای مدیریت دارایی و تدارکات ICT؛ وجود دفتر مدیریت تغییر ؛ تامین مالی پایدار برای پشتیبانی از پیاده‌سازی استراتژی
		بازبینی و مهندسی مجدد فرایندها و عملیات دولتی	تغییر سامانه‌ها و خدمات با استانداردهای یکپارچه‌سازی در دولت دیجیتال؛ ساده‌سازی فرایندها و گردش‌های کاری اصلی؛ چابکی عملیات سازمانی؛ استفاده از فناوری‌های دیجیتال برای مهندسی مجدد فرایندها
		استانداردها و دستورالعمل‌های طراحی خدمات	استفاده از رویه‌های استاندارد برای دیجیتال کردن و بهینه‌سازی خدمات؛ توسعه کاتالوگ خدمت در سطح دولت؛ رعایت اصل فقط یک بار؛ وجود کانال‌های ارتباطی و مشارکتی با ذینفعان برای طراحی خدمت و دریافت بازخورد؛ اصول راهنمای طراحی خدمات برای گروه‌های مختلف کاربران؛ در دسترس بودن چارچوب‌های توانمندساز مشترک مانند زیرساخت‌ها و معماری داده، نرم‌افزارهای متن باز؛ وجود یک پورتال واحد برای ارائه خدمات به صورت انتها به انتها؛ وجود لیستی از تمامی خدمات دیجیتال شده در بدنه دولتی؛ ایجاد شناسه هویت دیجیتال قوی
		سنجش اقدامات دولت دیجیتال	ارزیابی منافع و هزینه‌های پروژه‌های ICT؛ ارزیابی هزینه‌های تراکنش خدمات در کانال‌های مختلف؛ ارزیابی اثرات اقتصادی ملی برای کسب‌وکارها در پیاده‌سازی خدمات دولت دیجیتال؛ دریافت بازخورد از تمامی ذینفعان و کاربران در خصوص کیفیت خدمات دیجیتال؛ ارزیابی شفافیت، پاسخگویی، فراگیری و مشارکت فعالانه ارائه خدمات توسط دولت؛ ارزیابی میزان مشارکت در طراحی خدمات دیجیتال؛ ارزیابی و نظارت اقدامات و سیاست‌های دولتی برای رسیدگی به تطابق آنها با توقعات و نیازهای شهروندان
۲	داده‌محوری	**سیاست داده در سطح دولت**	وجود سیاست مدیریت داده در دولت و پیاده‌سازی آن؛ استفاده از هوش مصنوعی و تحلیل‌های داده برای تصمیم‌سازی بهتر؛ وجود دفتر/ اداره حاکمیت داده در سطح دولت؛ فرهنگ داده‌محوری؛ CDO مستقر در سازمان‌ها و دولت مرکزی؛ ارتقاء مهارت نیروی کاری دولتی در استفاده و اشتراک از داده‌ها
		مدیریت داده در سطح دولت	استانداردهای مدیریت و اشتراک داده؛ چارچوب تعامل‌پذیری دولت دیجیتال و سایر استانداردهای داده و فراداده؛ بهبود و نظارت مداوم بر داده؛ وجود توافقنامه اشتراک داده و پروتکل‌های تبادل داده؛ ایجاد مخازن داده واحد
		شفافیت و باز بودن داده‌ها در سطح دولتی	وجود استراتژی یا برنامه عملیاتی برای داده‌های باز دولتی؛ وجود دستورالعمل‌ها و استانداردهایی در سطح دولت برای انتشار دیجیتال داده‌های دولتی؛ تامین داده‌های دولتی تحت مجوزهای باز، پورتال‌هایی به زبان متن باز، و فرمت‌های قابل خوانش توسط ماشین؛ عضویت در OGP؛ ایجاد دیتاست‌های دولتی؛ ثبت و در اختیار قرار دادن داده‌های پایه‌ای؛ مدیریت اخلاقی استفاده از داده‌ها در سراسر بخش دولتی
		اصول اخلاقی و امنیتی مدیریت داده	حفظ حریم خصوصی کاربران؛ رضایت کاربران در استفاده از داده‌های آنها؛ حفظ ایمنی و حفاظت از داده‌های حساس و افزایش سطح اعتماد کاربران
۳	دولت به عنوان یک پلتفرم	**مشارکت اکوسیستمی**	ایجاد پلتفرم‌های دیجیتال برای مشارکت ذینفعان در سیاستگذاری و طراحی خدمات؛ پوشش شکاف‌های مهارتی با همکاری استارتاپ‌ها و بخش خصوصی و دانشگاه‌ها و ...؛ استفاده از قدرت جمعی برای حل مسائل با راه اندازی چالش‌ها؛ مشارکت با دانشگاه و صنعت با مدل‌های منعطف و اقتضایی برای ایجاد تیم‌ها؛ وجود شبکه دیجیتال گسترده برای اشتراک‌گذاری خدمات؛ نوآوری و مدل‌های کسب و کار پلتفرمی، PPP؛ ایجاد هاب‌های نوآوری و شتاب‌دهنده‌ها؛ وجود موسسات سرمایه‌گذاری برای پشتیبانی مالی نوآوری
		ایجاد قابلیت‌های دیجیتال	درک نیازمندی‌های قابلیت‌های دولت دیجیتال؛ ایجاد برنامه‌های درسی برای ظرفیت دیجیتال؛ وجود دانشگاه‌ها یا موسسات آموزشی برای آموزش فناوری؛ آموزش مداوم آموزش‌دهندگان؛ ایجاد سواد بالای دیجیتال در جامعه؛ وجود نیروی متخصص برای ارائه سرویس؛ جوامع علمی دانش بنیان در بدنه دولت؛ آموزش کاربران برای استفاده از ظرفیت‌های دیجیتال؛ تیم‌های چند رشته‌ای با تخصص‌های مختلف
		استقرار زیرساخت فناورانه	توسعه معماری سازمانی یکپارچه در دولت همراستا با برنامه دولت دیجیتال؛ تامین زیرساخت فناورانه منعطف، ایمن و مقیاس-پذیر برای تیم‌های توسعه دهنده خدمات؛ ارائه دستورالعمل‌ها، ابزارها، داده‌ها و نرم‌افزارها برای تجهیز تیم‌های توسعه‌دهنده خدمت؛ وجود استانداردها، چارچوب‌ها و زیرساخت‌های مشترک از سوی دولت برای توسعه یوزکیس‌ها؛ استفاده از فناوری‌های جدید در دولت؛ اتصالات پهن‌باند و نفوذ اینترنت در جامعه؛ حفظ امنیت سایبری و حفاظت از زیرساخت بحرانی ملی
۴	کاربر محوری	**فراگیر بودن خدمات دولتی**	رویکردهای omni-channel برای دسترسی به خدمات؛ ترویج استفاده از خدمات الکترونیکی در تمام کانال‌های در دسترس؛ در دسترس بودن خدمات دیجیتال برای همگان در هر زمان و از هر کانالی؛ آموزش کاربران و ارتقاء مهارت آنان برای استفاده از ابزارهای دیجیتال
		مشارکت کاربران در سیاستگذاری و طراحی خدمات	مشارکت کاربران در طراحی، تست و استفاده از خدمات؛ دریافت بازخورد کاربران؛ اطلاع‌رسانی به شهروندان در خصوص اقدامات و پروژه‌های دولتی؛ وجود مرکز تماس برای ارتباط با مردم و دریافت شکایات

		ارائه خدمات فراکنشی	پیش‌بینی نیاز شهروندان؛ سازگاری خدمات با نیازها و علائق کاربران؛ ارائه تجربه شخصی‌سازی شده برای شهروندان و کسب و کارها؛ انتصاب مدیران ارشد با تجربه برای نهادینه سازی فرهنگ تجربه مشتری؛ اصل فقط یک بار؛ مشارکت کاربران در طراحی خدمات و سیاست‌ها و بازبینی اقدامات دولتی؛ اطلاع رسانی به شهروندان در خصوص اقدامات و پروژه‌های دولتی؛ دریافت بازخورد کاربران
۵	قانونگذاری و تنظیم‌گری	**ایجاد و اصلاح قوانین**	ارزیابی و اصلاح قوانین دولتی موجود و قدیمی جهت سازگاری با دولت دیجیتال؛ ایجاد و اصلاح قوانین حوزه دولت دیجیتال (قانون حفاظت داده، قانون تجارت الکترونیکی، قانون هویت دیجیتال، قانون حفاظت از مصرف کننده، قانون جرایم سایبری، قوانین داده باز، قوانین مشارکت PPP)؛ اتخاذ قوانین مدیریت داده کاربران و حفظ حریم خصوصی (قوانین مدیریت داده کاربران)؛ چارچوب‌های قانونی برای دسترسی و اشتراک‌گذاری داده‌ها بین سازمان‌ها (قوانین مدیریت داده‌های سازمان‌های دولتی و باز)؛ دریافت بازخورد کاربران بر قوانین
		چارچوب‌های نهادی	سندباکس‌های رگولاتوری برای استفاده از فناوری‌های نوظهور؛ طرح جامع برای حفاظت از اطلاعات شخصی و حریم خصوصی افراد؛ نظارت بر اجرای قوانین؛ ایجاد نهاد مستقل برای اطمینان استفاده اخلاقی از داده‌ها

۶- وضع موجود کشور در خدمات دولت الکترونیک

با توجه به بررسی‌های انجام شده در خصوص وضعیت خدمات دولت الکترونیک در کشور، ملاحظه شد که فاصله عمیقی میان مفروضات و تلاش‌های دولت دیجیتال با شرایط ارائه خدمات دولت الکترونیک در کشور ما وجود دارد. هر چند اقدامات ارزشمندی در حال انجام و شکل گرفتن است که از آن جمله می‌توان به پروژه‌های اولویت‌دار دولت الکترونیک، گذرگاه ملی خدمات دولت، پایش و ارزیابی وضعیت خدمات دولت الکترونیکی در دوره‌های سه‌ماهه اشاره نمود. همچنین در جلسه بیست و سوم شورای اجرایی فناوری اطلاعات کشور مورخ ۱۴۰۰/۱۱/۱۴، به منظور ایجاد هم‌افزایی و همراستا شدن کلیه طرح-ها و پروژه‌های ارائه خدمات الکترونیکی با رویکرد گذار به دولت دیجیتال و تسریع در تکالیف باقیمانده دستگاه‌های اجرایی و آسیب-شناسی پروژه‌های اولویت‌دار و بازمهندسی ارائه خدمات دولت الکترونیکی، دستورالعملی در خصوص تدقیق شناسنامه خدمات و بهینه‌سازی فرایندهای دستگاه‌های اجرایی، جایگاه سازمانی و مدیریت توسعه دولت دیجیتال در دستگاه‌های اجرایی، یکپارچگی توسعه دولت الکترونیکی و پنجره واحد خدمات و شناسایی الزامات توسعه دولت دیجیتال به تصویب رسیده است.

یکی از اقدامات دولت به جهت اجتناب از ارائه خدمات الکترونیکی از درگاه‌های مختلف و ایجاد درگاه واحد ارائه خدمات الکترونیکی، ایجاد "پنجره واحد خدمات الکترونیکی" است. با توجه به نتایج حاصل از مصاحبه با یکی از خبرگان خدمات دولت الکترونیک، این درگاه در سازمان فناوری اطلاعات ایجاد شده و متولی آن معاونت دولت الکترونیک این سازمان می‌باشد. این پنجره بر روی سه مدل خدمات الکترونیکی متمرکز است که عباتند از G2C، G2B و G2G. در رابطه با خدمات G2C ابهامات و مشکلات زیادی وجود دارد ولی درخصوص دو مدل دیگر پایه‌گذاری مناسبی انجام شده است.

در ارزیابی‌های دوسالانه‌ای که توسط موسسات معتبر دنیا در حوزه دولت دیجیتال ارائه می‌شود، وضعیت ایران چندان مناسب نمی‌باشد. به‌عنوان مثال در آخرین ارزیابی سازمان ملل متحد در سال ۲۰۲۴، رتبه ایران در بین ۱۹۳ کشور برابر با ۱۰۱ بوده است. این در حالیست که رتبه ایران در مشارکت الکترونیک بسیار بدتر و برابر با ۱۶۴ می‌باشد [۲۴].

از جمله شکاف‌هایی که در ارائه خدمات دولت الکترونیک در کشور نسبت به ویژگی‌های دولت دیجیتال ملاحظه می‌شود می‌توان به نبود رویکردهای ذیل در سیاستگذاری، طراحی و ارائه خدمات اشاره نمود:

- رویکرد همه‌جانبه به تحول دیجیتال دولتی، همراستایی نهادها، سازمان‌ها، مردم، فناوری، داده و منابع برای پشتیبانی از تغییرات مطلوب داخل و بیرون بخش دولتی برای ایجاد ارزش عمومی
- رویکرد اکوسیستمی بهره‌مند از تفکر سیستمی و رویکردهای یکپارچه‌سازی و مشارکت تمامی ذینفعان در سیاستگذاری و طراحی خدمات و اجتناب از رویکردهای جزیره‌ای و بخشی
- فراگیری ارائه خدمات و تضمین اینکه هر تحولی با هدف ایجاد فرصت‌های برابر برای همه مردم برای دسترسی به خدمات با کیفیت و قابل اتکا، انجام می‌شود.
- توسعه همکارانه خدمات، چراکه یکپارچه‌سازی خدمات دیجیتال نیازمند درجه بالایی از هماهنگی میان وزارتخانه‌ها و نهادها و ذهنیت‌های جدید در دولت و جامعه است.
- اتخاذ رویکردهای مردم‌محوری و کاربرمحوری با در نظر گرفتن مسائل و نیازهای واقعی گروه‌های مختلف مردم در جامعه
- رهبری و نقش‌های موثر به همراه ذهنیت‌های کلیدی مدیران
- استفاده از فناوری‌های نوظهور و داده برای پیش‌بینی نیازهای کاربران
- شفافیت و باز بودن داده‌ها در سطح دولت

ایجاد یک رویکرد کل‌نگر برای تحول دولت دیجیتال در کشور،

نیازمند تفکر سیستمی و ایجاد قابلیت‌ها و ظرفیت‌های عمیق است. ظرفیت دولت دیجیتال به معنای توانایی دولت‌ها و جامعه برای تحول سیاست‌ها، برنامه‌ها، فرایندها، و خدمات با استفاده از نوآوری و فناوری‌های دیجیتال است. توسعه ظرفیت جامع برای دولت دیجیتال باید به‌گونه‌ای باشد که ارائه خدمات دیجیتال به صورت در دسترس، قابل اعتماد، سریع، شخصی‌سازی شده، ایمن و فراگیر با مشارکت افراد در فرایند تصمیم‌سازی و طراحی خدمت، صورت گیرد. ظرفیت‌سازی باید در تمامی سطوح سازمانی، نهادی و فردی در دولت و سطح جامعه انجام شود و تعهد سیاسی در بالاترین سطح دولت یک پیش‌شرط ضروری برای موفقیت آن است.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برجسته‌تر شدن نقش و اهمیت دولت دیجیتال در مواجهه با بحران‌هایی نظیر همه‌گیری کرونا، جای تردیدی باقی نگذاشته است که بهره‌مندی از دولت دیجیتال و خدمات آن امروزه یک ضرورت برای کشورها بوده و از اینرو، دولت‌ها باید سیاستگذاری، برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری‌های لازم برای رسیدن به این مهم را انجام دهند. همانطور که در بخش ۶ مقاله اشاره شد برنامه‌های توسعه دولت الکترونیک در ایران فاصله معنادار و قابل‌توجهی با مطالعات دولت دیجیتال در سطح جهان دارد. دولت‌ها لازم است برای برآورده کردن نیازهای کاربران و جلب اعتماد آنها رویکردهای خود را در ارائه خدمات تغییر داده و با استفاده از فناوری‌های نوین و تحول‌آفرین، نیازهای کاربران را پیش‌بینی و برآورده نمایند و در کنار آن خدمات دولتی را سریعتر، هوشمندانه‌تر و بهتر به کاربران ارائه دهند. این امر نیازمند تحول بنیادین است تا با درنظر گرفتن تمامی ابعاد تأثیرگذار و با بهره‌گیری بهینه از فناوری‌های نوین دیجیتال، خدمات دولت به‌گونه‌ای طراحی شود که به کارایی و چابکی بیشتر و پیش‌بینی نیازهای شهروندان و پاسخگویی سریعتر به آنها منجر شود. از اینرو، اتخاذ رویکردهایی از قبیل کل دولت و GovTech نظیر آنچه توسط سازمان ملل متحد و بانک جهانی در توسعه دولت دیجیتال بدان رسیده‌اند؛ برای کشور ایران نیز ضروری است. همچنین، سیاستگذاری و سنجش و ارزیابی دولت دیجیتال جایگاه مهمی پیدا می‌کند، زیرا بدون داشتن شاخص و معیارهای سنجش، دانستن وضعیت موجود میسر نبوده و گام برداشتن در جهت توسعه دولت دیجیتال امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این مقاله ضمن اشاره به وضعیت ارائه خدمات دولت الکترونیک در ایران، با استفاده از مدل‌های معتبر جهانی و بهره‌مندی از روش فراترکیب، چارچوب جامعی که در برگیرنده ابعاد و مولفه‌های مهم جهت سیاستگذاری و ارزیابی دولت دیجیتال می‌باشد تبیین و پیشنهاد شده است. با توجه به نتایج حاصله از این پژوهش، مهم‌ترین ابعاد در توسعه دولت دیجیتال عبارتند از: دیجیتال از مرحله طراحی، داده‌محوری، دولت به‌عنوان یک پلتفرم، کاربرمحور بودن؛ فراکنشی بودن و همچنین قانون‌گذاری و تنظیم‌گری. جهت توسعه هر یک از این ابعاد لازم است که موضوعات مختلفی مورد توجه قرار گیرد و اقدامات متعددی صورت گیرد که خلاصه آنها عبارتند از:

- بُعد دیجیتال از مرحله طراحی: مهمترین موضوعات در این بُعد عبارت است از داشتن استراتژی دولت دیجیتال همراستا با دیگر استراتژی‌های ملی کشور؛ وجود یک بخش/ نهاد دولتی با ساختار سازمانی مناسب جهت رهبری شفاف و پیاده‌سازی استراتژی‌های مرتبط با دولت دیجیتال؛ بازبینی و مهندسی مجدد فرآیندها و عملیات‌های دولتی جهت ساده‌سازی فرآیندها و چابکی عملیات سازمانی و استفاده بهینه از فناوری-های دیجیتال؛ استفاده از رویه‌های استاندارد برای طراحی و دیجیتالی کردن خدمات و در کنار آنها سنجش اقدامات دولت دیجیتال جهت ارزیابی مواردی همچون هزینه-فایده پروژه‌ها و اقدامات و سیاست‌های دولت در برآوردن نیازهای شهروندان.
- بُعد داده‌محوری: مهمترین موضوعات در این بُعد داشتن سیاست داده در سطح دولت، ترویج فرهنگ داده‌محوری، استقرار مدیر ارشد داده در سازمان‌ها، ارتقاء نیروی کاری ماهر جهت استفاده و اشتراک‌گذاری داده؛ استانداردهای مدیریت و اشتراک داده و چارچوب تعامل‌پذیری دولت دیجیتال؛ وجود استراتژی و برنامه عملیاتی داده‌های باز و تامین داده‌های دولتی؛ رعایت اصول اخلاقی و امنیتی داده و حفظ حریم خصوصی کاربران
- بُعد دولت به‌عنوان یک پلتفرم: در این بعد مباحثی همچون مشارکت اکوسیستمی و استفاده از ظرفیت‌های بخش خصوصی، دانشگاه‌ها و استارت‌آپ‌ها برای حل مسائل دولت دیجیتال؛ ایجاد قابلیت‌های دیجیتال با تدوین برنامه‌های درسی و آموزش مداوم و ایجاد تیم‌های چندرشته‌ای؛ تامین و استقرار زیرساخت‌های فناورانه مقیاس‌پذیر و ایمن به‌همراه ابزارها، داده‌ها و نرم‌افزارها، استانداردها و چارچوب‌های لازم مطرح است.
- بُعد کاربرمحوری: موضوعات مهم در این بعد عبارتند از فراگیر بودن خدمات دولتی با اتخاذ رویکرد همه‌کاناله و آموزش کاربران جهت استفاده از ابزارهای دیجیتال؛ مشارکت کاربران در سیاستگذاری و طراحی خدمات با اطلاع‌رسانی اقدامات و پروژه‌ها به کاربران و دریافت بازخورد از آنها و ارائه خدمات فراکنشی با پیش‌بینی نیاز کاربران.
- بُعد قانونگذاری و تنظیم‌گری: در این بعد مواردی همچون ایجاد قوانین جدید و اصلاح قوانین موجود مانند قوانین مدیریت داده، اشتراک‌گذاری داده، هویت دیجیتال جهت سازگاری با دولت دیجیتال؛ ایجاد چارچوب‌های نهادی مانند سندباکس‌های تنظیم‌گری برای استفاده از فناوری‌های نوظهور و نهاد مستقل برای اطمینان از استفاده اخلاقی داده‌ها حائز اهمیت است.

مراجع

[1] Setijadi Prihatmanto, A., Andrian, R., Danar Sunindyo, W., & Sutriadi, R. (2024). Transforming Public Services: A Systematic Review of Smart Government Frameworks, Architectures, and Implementation Challenges. IEEE Access, 12, 135799-135810.

[2] Hans J. Scholl. , Digital Government: Looking Back and Ahead on a Fascinating Domain of Research and Practice. Digit. Gov.: Res. Pract. 1, 1, Article 7 (2020), 12 pages. https://doi.org/10.1145/3352682

[3] Tumennast E., A Smart Government Framework for Mobile Application Services in Mongolia, Copyright © 2017, IGI Global, DOI: 10.4018/978-1-5225-1703-0.ch005

[4] OECD, Recommendation of the Council on Digital Government Strategies, 2014.

[5] OECD digital government policy framework: six dimensions of a government policy, OECD (2020, 1).

[6] GovTech: The New Frontier in Digital Government Transformation, world bank, 2020, https://thedocs.worldbank.org/en/doc/805211612215188198-0090022021/original/GovTechGuidanceNote1TheFrontier.pdf

[7] Furtado, L. S., Ticiana L. C. da Silva, Marianna G., José A., and Jessika K. "A framework for Digital Transformation towards Smart Governance: using big data tools to target SDGs in Ceará, Brazil." Journal of Urban Management 12, no. 1 (2023): 74-87

[8] Anthopoulos, L., Kleanthis S., and Christopher G. R. "Conceptualizing smart government: interrelations and reciprocities with Smart City." Digital Government: Research and Practice 2, no. 4 (2022): 1-28.

[9] Guenduez, A. A., Sebastian S., Tobias T., Kuno S., and Moritz O. "Smart government success factors." Jahrbuch der Schweizerischen Verwaltungswissenschaften 9, no. 1 (2018).

[۱۰] تقوا محمدرضا، تقوی‌فرد محمدتقی، معینی علی و زین‌الدینی محمدرضا. "مدلی برای دولت هوشمند: تبیین ابعاد دولت هوشمند با استفاده از روش فراترکیب." ۱۳۱-۱۶۸ (۱۴۰۱)

[۱۱] کلانتری نادیا و شاهپری علیرضا. "ارائه چارچوبی برای استقرار دولت هوشمند در ایران" پژوهش‌های مدیریت منابع سازمانی. ۱۳۹۴؛ ۵ (۴): ۱۱۵-۱۵۶.

[12] Hassan, I. M., Mahdi, A. A., & Al-Khafaji, N. J. (2014). Theoretical Study to Highlight The Smart Government Components In 21 St Century. International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 3(12), 333-347.

[13] Digital Government Index (DGI): ۲۰۱۹Results, OECD(2020, 2), Avaiable at: https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/4de9f5bb-en.pdf?expires=1713264426&id=id&accname=guest&checksum=766F42F03F6E532F4B29A5085E468DE0

[14] Deloitte Insights, seven pivots for government's digital transformation, Deloitte (2021), available at: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/articles/6974_CGI-Digital-2/DI_CGI-Digital-2.0.pdf

[15] World Bank, Digital Government Readiness Assessment Toolkit: Guidelines for Task Teams. 2020, available at: https://documents1.worldbank.org/curated/en/999901588145595011/pdf/Digital-Government-Readiness-Assessment-DGRA-Toolkit-V-31-Guidelines-for-Task-Teams.pdf

[16] UN, E-government survey 2020, digital government in the decade of action for sustainable development, department of economic and social affairs, New York, 2020.

[17] Finfgeld-Connett, D. (2018). A guide to qualitative meta-synthesis (Vol. 10). New York, NY, USA:: Routledge.

[18] McLeod S., "Metasynthesis of Qualitative Research", 2024, Simply Psychology, DOI:10.13140/RG.2.2.27149.55526

[19] Beck C. ،"Mothering Multiples: A Meta –Synthesis of the Qualitative Research" ،MCN ،The American Journal of maternal /child nursing ،Vol.28 ،No.2،pp.93-99, 2002.

[20] Hoon, C. (2013). Meta-synthesis of qualitative case studies: An approach to theory building. Organizational research methods, 16(4), 522-556.

[21] Lachal, J., Revah-Levy, A., Orri, M., & Moro, M. R. (2017). Metasynthesis: an original method to synthesize qualitative literature in psychiatry. Frontiers in psychiatry, 8, 269.

[22] Noblit G.W. ،Hare R.D. ،Meta –Ethnography: Synthesizing Qualitative Studies ،Stage ،Newbury Park ،CA۱۹۸۸ .

[23] OECD Digital Government Index (DGI): Methodology and 2019 Results, OECD (2020, 3).

[24] UN E-Government Knowledgebase, 2024, https://publicadministration.un.org/egovkb/en-us/Data/Country-Information/id/79-Iran-Islamic-Republic-of

Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 269-282

Improving the Accuracy of Detection Botnet Attacks in Internet of Things Network by Using MLP Neural Network

Safieh Siadat[1], Amir Houshang Tajfar[2*]

[1] Department of Computer, University of Payam Noor, Tehran, Iran
[2*] Department of Computer, University of Payam Noor, Tehran, Iran

Received: 30 October 2024, Revised: 05 May 2025, Accepted: 07 May 2025
Paper type: Research

Abstract

Due to the increasing use of the Internet of Things around the world and the exponential increase in the number of devices connected to the network and the communication between them, the potential for security problems is increasing. Considering that many personal and public devices are connected to this network, any security problem can have unpredictable and significant consequences. Internet of Things applications include smart cities, smart transportation, responsive environments, and some other specific things that are directly controlled by users or digital devices, cyber-attacks through the Internet of Things and smart digital devices is the most important threat for these networks. So far, numerous researches have been conducted to detect Internet of Things attacks, in particular botnet attacks, as one of the most important attacks in this field. But the lack of a method that uses machine learning methods with high accuracy and low error to detect these attacks is strongly felt. In this research, by using the N-BaIoT dataset and Python simulator for modeling and also using deep learning methods and MLP neural network to evaluate and train the data (using the objective function and training), the neural system was used for detecting botnet attacks. This method obtained accuracy 90.35, precision 85.99, recall 90.53 and f1-score 87.50. Compared to other machine learning methods including random forest algorithm (RF), support vector machine algorithm (svm), K nearest neighbor algorithm (knn), XGBOOST algorithm, AdaBoost algorithm, the best result was obtained in all 4 evaluation parameters (accuracy, precision, recall and f1-score).

Keywords: Botnet, neural network, Internet of Things, Deep Learning

* Corresponding Author's email: amir.tajfar@pnu.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۲۶۹ الی ۲۸۲

بهبود دقت تشخیص حملات بات‌نت در شبکه‌های اینترنت اشیا با استفاده از شبکه عصبی MLP

صفیه سیادت[۱]، امیرهوشنگ تاج‌فر[۲*]

[۱] گروه کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه پیام نور، ایران، تهران

[۲] گروه کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه پیام نور، ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

گسترش فزاینده استفاده از اینترنت اشیا در سراسر جهان و افزایش تصاعدی تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه و ارتباط بین آن‌ها، پتانسیل مشکلات امنیتی در حال افزایش است. با توجه به اتصال بسیاری از دستگاه‌ها به این شبکه، هرگونه مشکل امنیتی می‌تواند تبعات غیرقابل‌پیش‌بینی و جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیا شامل شهرهای هوشمند، حمل‌ونقل هوشمند، محیط‌های پاسخگو و برخی از موارد خاص دیگر که مستقیماً توسط کاربران یا وسیله دیجیتال کنترل می‌شوند، هستند، بنابراین مهم‌ترین خطر موجود، حملات سایبری از طریق اینترنت اشیا و وسایل دیجیتال هوشمند است. تحقیقات زیادی برای تشخیص حملات اینترنت اشیا به‌خصوص حملات بات‌نت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حملات این حوزه انجام شده است؛ اما فقدان روشی که با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین با دقت بالا و خطای کم به تشخیص این حملات بپردازد به‌شدت احساس می‌شود. در این تحقیق با استفاده از مجموعه‌داده N-BaIoT و شبیه‌ساز پایتون برای مدل‌سازی و با به‌کارگیری روش‌های یادگیری عمیق و شبکه عصبی MLP جهت ارزیابی و آموزش داده‌ها (با استفاده از تابع هدف و آموزش)، سیستم عصبی برای تشخیص حملات بات‌نت به کار برده شد. این روش Accuracy ۹۰,۳۵، Precision ۸۵,۹۹، Recall ۹۰,۵۳ و F1-Score ۸۷,۵۰ به دست آورد و در مقایسه با سایر روش‌های یادگیری ماشین شامل الگوریتم جنگل تصادفی (RF)، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)، الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (KNN)، الگوریتم XGBOOST، الگوریتم AdaBoost در هر چهار پارامتر ارزیابی Accuracy، Precision، Recall وF1-Score بهترین نتیجه را کسب کرد، که نشان‌دهنده عملکرد شاخص روش پیشنهادی می‌باشد.

کلیدواژگان: بات‌نت، اینترنت اشیا، شبکه عصبی، یادگیری عمیق

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: amir.tajfar@pnu.ac.ir

۱- مقدمه

اینترنت اشیا[1] به‌سرعت در حال گسترش است و تعداد دستگاه‌ها و تجهیزات متصل به اینترنتت اشیا روزبه‌روز افزایش می‌یابد. ایده اینترنت اشیاء، اتصال همه چیز در جهان، به اینترنت است. اینترنت اشیاء از سه مفهوم اینترنت-گرایی، اشیاء-گرایی و معنا-گرایی تحقق می‌یابد [1]. ایده اصلی این است که اشیاء یا چیزهایی مانند برچسب‌های شناسایی با فرکانس‌های رادیویی، حسگرها، تلفن‌های موبایل و غیره که الگوی آدرس‌دهی منحصربه‌فردی دارند، می‌توانند با یکدیگر و محیط اطراف خود، برای رسیدن به اهداف یا منظور خاص مشترک همکاری کنند [2]. اینترنت اشیاء، به‌طور چشم‌گیری زندگی ما را در آینده‌های نزدیک تغییر خواهد داد و بسیاری از ناممکن‌ها را ممکن خواهد ساخت. حجم عظیم داده‌های تولید شده یا جمع‌اوری شده توسط تجهیزات اینترنت اشیاء، حاوی مطالعات ارزشمند و قابل استفاده است و با رواج دستگاه‌های توسعه‌یافته فناوری بی‌سیم مانند بلوتوث، شناسایی با فرکانس رادیویی و خدمات داده بر روی تلفن و همچنین حس‌گر و محرک و نودهای تعبیه شده در وسایل، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، باعث شده تا اینترنت اشیاء مراحل ابتدایی خود را پشت سر گذاشته و در آستانه تبدیل اینترنت ایستای کنونی، به اینترنت کامل و یکپارچه در آینده است [3].

کشف دانش از طریق داده‌کاوی و متن‌کاوی نیز بدون شک نقش زیادی در زمینه هوشمندسازی سیستم‌ها و در نتیجه ارائه خدمات و محیط مناسب برای ارائه خدمات خواهد داشت [4]. همچنین استفاده از روش‌های داده‌کاوی برای خوشه‌بندی تجهیزات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و تعیین سرخوشه در حال گسترش است [5]. ارتباط میدانی نزدیک و شبکه‌های حسگر و فعال‌کننده بی‌سیم و برچسب‌های شناسایی با فرکانس رادیویی، با هم اجزای اتمیکی هستند که دنیای واقعی را با دنیای دیجیتال پیوند می‌دهند.

ابزارهای متعدد و متنوع زیادی برای اینترنت اشیا وجود دارد که ازجمله ویژگی‌های آن‌ها می‌توان به‌اندازه کوچک، تعداد مشخص، حافظه کم، استفاده حداقل از انرژی و قابلیت‌های پردازش ویژه آن اشاره کرد که توسط سیستم‌های عامل کوچک که مخصوص این ابزارها ایجاد شده است، راهبری می‌شود [6]. این ابزارها حداقل دارای یکی از توانایی‌های حس نمودن، فعال‌سازی، ذخیره یا پردازش اطلاعات هستند. درعین‌حال نقص‌های امنیتی متعددی نیز مانند حملات بات‌نت ممکن است در این دستگاه‌ها وجود داشته باشد، زیرا اکثر آن‌ها فاقد حافظه و منابع محاسباتی لازم برای عملیات امنیتی کافی هستند [7].

به‌طورکلی دستگاه‌ها اینترنت اشیا می‌توانند تحت‌تأثیر انواع حملات قرار گیرند. یک حمله واحد به سیستم‌ها یا دستگاه‌های شبکه می‌تواند منجر به آسیب‌های قابل‌توجه در امنیت داده‌ها و حریم خصوصی شود. حملات بات‌نت ازجمله مخرب‌ترین حملات به شبکه‌های اینترنت اشیا محسوب می‌شود. درواقع بات‌نت امروزه به یکی از تهدیدهای جدی و خطرناک برای امنیت صدها میلیون رایانه در نظر گرفته می‌شود

«شبکه بات» شبکه‌ای از رایانه‌های آلوده متصل به اینترنت است که تحت مدیریت سرور فرماندهی و کنترل قرار دارد و برای حملات انکار سرویس, فرستادن هرزنامه و عملیات مخرب دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد [8]. باوجود ویژگی‌های خاص هر شبکه بات, بات‌ها در داخل شبکه رفتارهای همسانی از خود نشان می‌دهند و این می‌تواند نقطه آغاز شناسایی یک بات در داخل شبکه باشد و با شناسایی این رفتار همگون می‌توان ترافیک تولیدی بات‌ها را از ترافیک عادی شبکه تفکیک کرد و از مشکلاتی مانند یافتن الگوریتم‌های رمزگشایی کانال‌های ارتباطی رمزنگاری شده در امان بود [9].

با توجه به گسترش حملات بات‌نت[2] و آسیب‌های مختلفی که می‌تواند به دنبال داشته باشد، مطالعات مختلفی در خصوص روش‌های و الگوریتم‌های شناسایی حملات بات‌نت در شبکه‌های اینترنت اشیا انجام شده است و بر اساس آن راه‌کارهای مختلفی برای تشخیص حملات بات‌نت در اینترنت اشیا ارائه شده است. در این تحقیق برای تشخیص حملات بات‌نت از طریق شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه (MLP)[3] و با استفاده از مجموعه‌داده N-Balot انجام شده است. هدف اصلی تحقیق شناسایی حملات بات‌نت در اینترنت اشیا با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و در نهایت ایجاد اپلیکیشن هوشمند در جهت تشخیص حملات بات‌نت در اینترنت اشیاء می‌باشد.

۲- مبانی نظری پژوهش

۲-۱- اینترنت اشیا (IoT)

سیستمی از دستگاه‌های محاسباتی مرتبط، ماشین‌های مکانیکی و دیجیتال، اشیا، یا افراد است که با شناسه‌های منحصربه‌فرد (UID)[4]

[1] Internet of Things
[2] Botnet
[3] Multilayer Perceptron
[4] Unique Identifier

و از طریق شبکه‌ای بدون نیاز به تعامل انسان با انسان یا انسان با کامپیوتر، داده‌ها را منتقل می‌کنند. یک شیء در اینترنت اشیا می‌تواند یک فرد با کاشت مانیتور قلب باشد یا یک حیوان مزرعه با یک ترانسپوندر بیوچیپ یا خودرویی با حسگرهای داخلی برای هشدار به راننده در صورت پایین آمدن فشار باد لاستیک یا هر چیز طبیعی یا مصنوعی دیگر باشد. به‌طورکلی به هر شیء که می‌توان به آن آدرس پروتکل اینترنت (IP)[1] اختصاص داد و قادر به انتقال داده‌ها از طریق شبکه باشد، می‌تواند در شبکه اینترنت اشیا اضافه شود [10].

۲-۲- حملات باتنت

شبکه‌های باتنت گروه‌هایی از کامپیوترها و دستگاه‌های متصل به اینترنت هستند که تحت کنترل یک یا چند فرد یا گروه هکر قرار دارند. این کامپیوترها معمولاً به‌طور خودکار و بدون اطلاع یا رضایت مالکانشان توسط بدافزارهای مخرب (معمولاً تروجان‌ها) آلوده شده‌اند. به این تروجان‌ها هم به نام "بات" یا "زامبی" اشاره می‌شود. هنگامی‌که یک کامپیوتر به‌عنوان یک بات به یک شبکه باتنت متصل می‌شود، کنترل آن توسط مهاجم یا اپراتور باتنت انجام می‌شود. این اپراتور می‌تواند دستورات و فرمان‌های مختلف را به کامپیوترهای آلوده ارسال کند و آن‌ها را برای انجام فعالیت‌های مخرب یا تخریبی مورد استفاده قرار دهد.

حملات باتنت درواقع توسط مجموعه‌ای منطقی از دستگاه‌های متصل به اینترنت، مانند رایانه‌ها، تلفن‌های هوشمند یا دستگاه‌های اینترنت اشیا صورت می‌گیرد، که امنیت آن‌ها نقض شده و کنترل آن به نفوذگر واگذار شده است.

کنترل‌کننده یک باتنت قادر است فعالیت‌های رایانه‌های در معرض خطر را از طریق کانال‌های ارتباطی تشکیل‌شده توسط پروتکل‌های شبکه مبتنی بر استاندارد، مانند (IRC)[2] و پروتکل انتقال ابرمتن (HTTP)[3] هدایت کند. همچنین از باتنت‌ها می‌توان برای انجام حملات سرویس توزیع شده (DDoS)[4]، سرقت داده‌ها، ارسال هرزنامه، و اجازه دسترسی مهاجم به دستگاه و اتصال آن استفاده کرد. معماری باتنت در طول زمان در تلاش برای فرار از تشخیص و اختلال تکامل‌یافته است. به‌طور سنتی، برنامه‌های ربات به‌عنوان کلاینت‌هایی ساخته می‌شوند که از طریق سرورهای موجود ارتباط برقرار می‌کنند. این به کنترل‌کننده باتنت اجازه می‌دهد تا تمام کنترل‌ها را از یک مکان راه دور انجام دهد که ترافیک را مبهم کند[11].

۲-۳- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP)

این از ساده‌ترین و قدیمی‌ترین شبکه‌های عصبی مصنوعی محسوب می‌شود. در که در آن حداقل سه لایه از نودها که به آن نورون نیز گفته می‌شود، وجود دارد که عبارتند از: لایه ورودی، لایه نهان و لایه خروجی. به‌جز گره‌های ورودی، هر گره یک نورون است که از یک تابع فعال‌سازی غیرخطی استفاده می‌کند. MLP از تکنیک یادگیری نظارت شده به نام بازپرداخت برای آموزش استفاده می‌کند. لایه‌های متعدد و فعال‌سازی غیرخطی آن، MLP را از یک پرسپترون خطی متمایز می‌کند. درواقع می‌تواند داده‌هایی را متمایز کند که به‌صورت خطی قابل‌تفکیک نیستند. در بررسی شبکه‌های عصبی چندلایه پروسپترون لازم است چند بخش مجزا تابع فعال‌سازی، ساختار لایه‌ها و یادگیری توضیح داده شوند:

- تابع فعال‌سازی: اگر یک پرسپترون چندلایه، تابع فعال‌سازی خطی در تمام نورون‌ها داشته باشد، درواقع با این تابع خطی ورودی‌های وزن‌دار هر نورون را ترسیم می‌کند. سپس با استفاده از جبر خطی نشان می‌دهد که هر عددی مربوط به لایه‌ها را می‌توان به یک مدل ورودی-خروجی دولایه کاهش داد. در MLP، برخی از نورون‌ها از یک تابع فعال غیرخطی استفاده می‌کنند که برای مدل‌سازی فرکانس پتانسیل‌های عمل یا شلیک نورون‌های بیولوژیکی توسعه داده شده است
- ساختار لایه: MLP شامل سه یا تعداد بیشتری از لایه‌های دنس که از گره‌های غیرخطی فعال‌کننده هستند، می‌باشد. ازآنجاکه MLPها به‌طور کامل متصل شده‌اند، هر گره در یک‌لایه با وزن مشخص در هر نود به لایه بعدی متصل می‌شود.
- یادگیری: یادگیری در شبکه عصبی با تغییر وزن اتصال پس از پردازش هر قطعه از داده‌ها، بر اساس میزان خطا در خروجی در مقایسه با نتیجه مورد انتظار رخ می‌دهد. این نمونه که از یادگیری با نظارت و از طریق بازگشت به عقب و تعمیم الگوریتم حداقل مربعات در پرسپترون خطی انجام می‌شود[12].

[1] Internet Protocol
[2] Internet Relay Chat
[3] Hypertext Transfer Protocol
[4] Distributed denial of service

۲-۴- الگوریتم جنگل تصادفی

جنگل تصادفی یا جنگل‌های تصمیم تصادفی (RF)[1] یک روش یادگیری ترکیبی برای طبقه‌بندی یا رگرسیون است که بر اساس ساختاری متشکل از تعداد زیادی درخت تصمیم کار می‌کند، برای آموزش و خروجی کلاس‌ها (کلاس‌بندی) یا برای پیش‌بینی‌های هر درخت به شکل مجزا، بررسی می‌شود. عملکرد جنگل تصادفی معمولاً بهتر از درخت تصمیم است، اما این بهبود عملکرد تا حدی به نوع داده هم بستگی دارد[13].

۲-۵- اگوریتم ماشین بردار پشتیبانی (SVM)[2]

یکی از روش‌های یادگیری با نظارت است که از آن برای کلاس‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. این روش ازجمله روش‌های جدیدی است که در سال‌های اخیر کارایی خوبی برای طبقه‌بندی از خود نشان داده است. اصول کار آن دسته‌بندی یا کلاس‌بندی خطی داده‌ها است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌کند خطی را انتخاب کند که شیب بهتری داشته باشد.

۲-۶- الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (KNN)[3]

یک متد آمار ناپارامتری است که برای کلاس‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. در هر دو حالت K شامل نزدیک‌ترین مثال آموزشی در فضای داده‌ای است و خروجی آن بسته به نوع مورداستفاده در کلاس‌بندی و رگرسیون متغیر است. در حالت کلاس‌بندی، با توجه به مقدار مشخص شده برای K، به محاسبه فاصله نقطه‌ای که می‌خواهیم برچسب آن را مشخص کنیم با نزدیک‌ترین نقاط می‌پردازد و با توجه به تعداد رأی حداکثری این نقاط همسایه، در رابطه با برچسب نقطه موردنظر تصمیم‌گیری می‌شود

۲-۷- الگوریتم XGBOOST

الگوریتم XGBoost یک الگوریتم یادگیری با ناظر است که به خاطر قابلیت‌هایش در تنظیم خودکار، سرعت بالا در آموزش و قدرت پیش‌بینی، به‌عنوان یکی از قدرتمندترین و مؤثرترین ابزارها در حوزه یادگیری ماشین شناخته می‌شود و در طیف گسترده‌ای از کاربردهای عملی، از تجزیه‌وتحلیل داده‌های مالی گرفته تا پیش‌بینی‌های پزشکی، استفاده می‌شود.

۲-۸- الگوریتم AdaBoost

الگوریتم AdaBoost، (مخفف Adaptive Boosting) یک روش یادگیری جمعی و معروف‌ترین الگوریتم از خانواده الگوریتم‌های Boosting است. در الگوریتم‌های یادگیری جمعی، یک نمونه توسط چندین کلاسه بند مختلف کلاسه‌بندی می‌شود و نتایج کلاسه‌بندی‌ها به شکل هوشمندانه‌ای با یکدیگر ترکیب شده و نتیجه نهایی برای آن نمونه خاص تعیین می‌گردد. در الگوریتم یادگیری جمعی، هر کلاسه بند، با یک زیرمجموعه تصادفی و منتخب از کل نمونه‌ها، آموزش داده می‌شود. با شکل گرفتن چندین کلاسه بند متفاوت، کلاسه‌بندی نهایی که نتیجه نگاه جمعی است دارای کارایی بالاتری خواهد بود.

۲-۹- انواع حملات

- حملات انکار سرویس (DOS)[4]: در این حملات منابع سیستم بیش‌ازحد مورد استفاده قرار می‌گیرد و باعث می‌شود که درخواست‌های نرمال برای در اختیار گرفتن منابع رد شود. این نوع حملات معمولاً از نقاط ضعف نرم‌افزارها جهت آسیب رساندن استفاده می‌کنند و با ایجاد سربار در کانال‌های ارتباطی مانع ارتباط‌های قانونی سیستم می‌شوند.
- حملات کاربر به ریشه (U2R)[5]: در این حملات مهاجم با استفاده از روش‌هایی مانند مهندسی اجتماعی به یک حساب کاربری بر روی سیستم دسترسی پیدا می‌کند و به سیستم آسیب می‌رساند.
- حملات راه دور به نزدیک (R2L)[6]: در این حملات مهاجم با نفوذ غیرمجاز از راه دور به ماشین قربانی شروع به سوءاستفاده از حساب قانونی کاربر کرده و اقدام به ارسال بسته بر روی شبکه می‌کند. مهاجم با استفاده از روش آزمون‌وخطا و توسط اسکریپت‌های خودکار یا روش‌های دیگر اقدام به حدس زدن کلمه عبور قربانی می‌کند. همچنین برخی روش‌های پیچیده‌تری هم وجود دارد که در آن مهاجم قبل از نفوذ به سیستم اقدام به نصب یک برنامه‌ای می‌کند که کلمه عبور را سرقت کند
- حملات پوششی[7]: در این حملات شبکه و یا میزبان برای جمع‌آوری اطلاعات و یافتن آسیب‌پذیری‌های شناخته شده پویش می‌شود. به‌عنوان‌مثال در این حملات شبکه به‌منظور

[1] Random forest
[2] Support Vector Machines
[3] K-Nearest Neighbors
[4] denial-of-service
[5] User to Root
[6] Remote to Local
[7] Probing

جمع‌آوری اطلاعاتی برای تعیین تعداد و یا نوع ماشین‌های مورد استفاده در شبکه پویش می‌شود و یا میزبان به‌منظور تعیین نوع برنامه نصب شده و یا مورد استفاده در آن، مورد حمله واقع می‌شود. حمله کاوش به‌عنوان نخستین گام یک حمله واقعی به شبکه یا میزبان در نظر گرفته می‌شود

- BASHLITE: بدافزاری است که سیستم‌های لینوکس را به‌منظور راه‌اندازی حملات انکار سرویس توزیع شده (DDoS)[1] آلوده می‌کند[14].

۳- پیشینه پژوهش

چین[2] و همکاران در سال ۲۰۱۷ تشخیص مبتنی بر امضا را بررسی کردند و روشی برای کمک به تشخیص ناهنجاری‌های مرتبط با این حوزه ارائه دادند. روش اصلی آن تحقیق تشخیص مبتنی بر میزبان بود که در آن میزبان در یک شبکه، همراه با محتویات آن‌ها ازنظر ناهنجاری‌ها (به‌عنوان‌مثال، فعالیت بات‌نت) تحت نظارت قرار می‌گیرند بااین‌حال، نتایج تحقیق آن‌ها دلالت بر مشکلاتی در تشخیص بات‌نت با استفاده از تجزیه‌وتحلیل امضا داشت. اولین مورد این است که اگر این روش در یک شبکه بزرگ شرکتی اجرا شود، مقیاس شبکه باعث می‌شود، سیستم به‌اندازه کافی مؤثر نباشد. مورد دوم این است که قوانین اعمال شده برای تشخیص امضاء به‌درستی کار می‌کند؛ زیرا بات‌نت تغییراتی در ارتباطات شبکه ایجاد می‌کند[15].

در سال ۲۰۱۷ آیگان[3]و همکاران از الگوریتم‌های زیرمجموعه یادگیری عمیق، با نام HAEs-2017 (مدل رمزگذارهای خودکار ترکیبی، شامل رمزگذارهای خودکار و حذف نویز از رمزگذار خودکار) جهت تشخیص حملات بات‌نت در شبکه اینترنت اشیا استفاده کردند. جهت ارزیابی از مجموعه‌داده KDDTest و NSL-KDD بهره بردند و به‌دقت ۸۸,۲۸ درصد دست یافتند. روش آن‌ها ۵ حمله DOS, PROBE, R2L, U2R و بات‌نت را در ۵ کلاس تشخیص می‌داد؛ اما نقطه‌ضعف کار آن‌ها دقت پایین آن بود [16].

در سال ۲۰۱۸ میلادی، مک‌درموت[4]و همکاران جهت تشخیص حملات بات‌نت در شبکه اینترنت اشیا از الگوریتم‌های زیرمجموعه یادگیری عمیق، با نام BLSTM-RNN مبتنی بر شبکه عصبی حافظه کوتاه-طولانی‌مدت (LSTM)[5] و شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN)[6] استفاده کردند. جهت ارزیابی از یک مجموعه‌داده دست‌ساز بهره بردند و به‌دقت ۹۷,۵ درصد دست یافتند. روش آن‌ها پنج حمله (DNS)[7]، (ACK)[8]، (UDP)[9]، MIRAI و بات‌نت را در پنج کلاس تشخیص می‌داد؛ اما نقطه‌ضعف آن زمان اجرای بالای آن یعنی بیش از ۵ دقیقه بود [17].

در سال ۲۰۱۹ میلادی کومار[10] و لیم[11] جهت تشخیص حملات بات‌نت در شبکه اینترنت اشیا از الگوریتم k نزدیک‌ترین همسایه زیرمجموعه یادگیری عمیق استفاده کردند. جهت ارزیابی از یک مجموعه‌داده دست‌ساز شامل ۶۰ جلسه ترافیک به مدت ۱۵ دقیقه در دو کلاس حملات عادی و مخرب بهره بردند و به‌دقت ۹۲ درصد دست یافتند. روش آن‌ها ۳ حمله HTTP_POST،TELNET و HTTP_GET را در سه کلاس تشخیص می‌داد؛ اما نقطه‌ضعف آن عدم اجرای روش مذکور روی مجموعه‌داده‌های دیگر بود؛ چراکه الگوریتم‌های آماده یادگیری عمیق ممکن است در مجموعه‌داده‌های مختلف دقت‌های متفاوتی ایجاد نماید [18].

در سال ۲۰۱۹ لوانوی[12] و واسیلیو[13] جهت تشخیص حملات بات‌نت در شبکه اینترنت اشیا از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)[14] زیرمجموعه یادگیری عمیق استفاده کردند و جهت ارزیابی نیز از یک مجموعه‌داده دست‌ساز بهره برده و به‌دقت ۸۱ درصد دست یافتند. روش آن‌ها ۵ حمله DOS)[15] , PROBE, R2L, U2R) و بات‌نت را در پنج کلاس تشخیص می‌داد؛ اما نقطه‌ضعف آن دقت پایین بود [۱۹].

در سال ۲۰۲۰، شیی[16] و سان[17] جهت تشخیص حملات بات‌نت در شبکه اینترنت اشیا از الگوریتم‌های زیرمجموعه یادگیری عمیق، با نام LSTM-RNN-2020 مدل ترکیبی متشکل از شبکه عصبی LSTM و RNN به کاربردند. جهت ارزیابی از یک مجموعه‌داده دست‌ساز بهره بردند و به‌دقت ۹۹,۳۰ درصد دست یافتند. روش آن‌ها دو حمله MIRAI و ITS VARIANTS را در دو کلاس تشخیص می‌داد نقطه‌ضعف آن عدم اجرای روش مذکور روی مجموعه‌داده دیگر بود؛ چراکه الگوریتم‌های آماده یادگیری عمیق

[1] Distributed denial-of-service
[2] Chen
[3] Aygun
[4] McDermott
[5] Long-Short Term Memory
[6] Recurrent Neural Network
[7] Domain Name System
[8] Acknowledgement
[9] User Datagram Protocol
[10] Kumar
[11] Lim
[12] Loannou
[13] Vassiliou
[14] Support Vector Machine
[15] Denial-of-service
[16] Shi
[17] Sun

ممکن است در مجموعه‌داده‌های مختلف دقت‌های متفاوتی ایجاد نماید [۲۰].

در سال ۲۰۲۱، هزام[1] و همکاران جهت تشخیص حملات باتنت در شبکه اینترنت اشیا با استفاده از شبکه عصبی بازگشتی RNN زیرمجموعه یادگیری عمیق به کاربردند. جهت ارزیابی از مجموعه داده N-BaIoT بهره بردند و به‌دقت ۸۹,۷۵ درصد دست یافتند. روش آن‌ها دو حمله MIRAI + BASHLITE را در دو کلاس تشخیص می‌داد؛ اما نقطه‌ضعف آن دقت پایین بود [۲۱].

در سال ۲۰۲۲ ابوآلحاجا[2] و آلدالایین[3]، یک مدل یادگیری عمیق مبتنی بر درخت تصمیم برای تشخیص حمله باتنت در شبکه‌های اینترنت اشیا به نام ELBA-IoT ایجاد کردند، آن‌ها ویژگی‌های شبکه‌های اینترنت اشیا و استفاده از یادگیری مجموعه‌ای را برای شناسایی ترافیک غیرعادی شبکه در دستگاه‌های IoT در معرض خطر به کاربردند. درنهایت آن‌ها برای ارزیابی از مجموعه‌داده N-BaIoT-2021 که شامل ۷۷۳۷ نمونه ترافیک باتنت (تعداد ۴۷۳۷ رکورد در حمله Bashlite و ۳۰۰۰ رکورد در حمله Mirai) بهره برده و پس از ارزیابی این مجموعه‌داده با سه تکنیک زیرمجموعه درخت تصمیم (AdaBoosted، RUSBoosted و bagged) در بخش‌های مختلف دو کلاسه، سه کلاسه و چند کلاسه، دقت تشخیص (۹۹,۶ درصد) را در ۴۰ ثانیه به دست آوردند[۲۲]. مهم‌ترین نقطه‌ضعف این روش این است که جز دقت هیچ معیار ارزیابی دیگری را به کار نبرده است؛ چراکه در مدل‌های مختلف زیرمجموعه یادگیری عمیق طبق نظریه هان و همکاران یا از سه پارامتر دقت، حساسیت و تشخیص و یا از ۴ پارامتر: ارزیابی معیار تشخیص، صحت و دقت استفاده می‌شود.

در سال ۲۰۲۳، المطیری و همکاران یک روش بهینه‌سازی شده بر اساس شبکه عصبی کانولوشنی (CNN) برای تشخیص حملات باتنت در اینترنت اشیا پیشنهاد دادند. آن‌ها از یک معماری چندلایه عمیق بهره بردند که شامل لایه‌های پردازش ویژگی و طبقه‌بندی نهایی بود. این روش با استفاده از مجموعه‌داده IoTID20 مورد آزمایش قرار گرفت و توانست به‌دقت ۹۸,۷ درصد در شناسایی حملات دست یابد [۲۳]. بااین‌حال، چالش اصلی آن روش زمان پردازش بالا در مجموعه‌های داده بزرگ بود که نیاز به بهینه‌سازی بیشتر دارد.

در سال ۲۰۲۳، یانگ و همکاران یک مدل شبکه عصبی گراف (GNN) را برای تشخیص حملات باتنت معرفی کردند. این مدل با استفاده از نمایش گرافی داده‌های ترافیک شبکه، توانست روابط پیچیده بین نودهای شبکه را تحلیل کرده و باتنت‌ها را شناسایی کند. آن‌ها مدل خود را بر روی مجموعه‌داده CICIoT2023 آزمایش کردند و به‌دقت ۹۸,۹ درصد دست یافتند [۲۴]. بااین‌حال، محدودیت این روش نیاز به منابع محاسباتی بالا برای پردازش داده‌های حجیم بود.

در سال ۲۰۲۲، ابوآلحاجا و آلدالایین یک مدل یادگیری عمیق مبتنی بر درخت تصمیم برای تشخیص حملات باتنت در شبکه‌های اینترنت اشیا ارائه دادند. آن‌ها از ترکیب روش‌های یادگیری مجموعه‌ای، شامل AdaBoosted، RUSBoosted و Bagged، برای افزایش دقت مدل بهره بردند. این مدل بر روی مجموعه‌داده N-BaIoT-2021 آزمایش شد که شامل ۷۷۳۷ نمونه از ترافیک‌های مخرب باتنت بود. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی آن‌ها توانست دقتی معادل ۹۹,۶ درصد را در ۴۰ ثانیه به دست آورد، اما محدودیت آن عدم بررسی سایر معیارهای ارزیابی مانند حساسیت و دقت تفکیک‌پذیری بود [۲۵].

در سال ۲۰۲۲، لی و همکاران یک روش مبتنی بر ترکیب یادگیری انتقالی و مدل‌های عمیق برای تشخیص حملات باتنت در اینترنت اشیا پیشنهاد کردند. آن‌ها از مدل از پیش آموزش دیده شده ResNet برای استخراج ویژگی‌های پیچیده و سپس از یک شبکه کاملاً متصل برای طبقه‌بندی نهایی استفاده کردند. آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مجموعه‌داده IoTBotNet نشان داد که این روش دقت ۹۷,۵ درصد را در شناسایی حملات ارائه می‌دهد، اما چالش اصلی آن تأخیر محاسباتی بالا در پردازش داده‌های زنده بود [۲۶].

احمد[4] و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی، استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی K-means را برای شناسایی الگوهای ترافیکی مشکوک در دستگاه‌های اینترنت اشیا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که الگوریتم K-means قادر است با دقت قابل قبولی، دستگاه‌های آلوده به باتنت را از دستگاه‌های سالم تشخیص دهد، اما این روش در تشخیص باتنت‌های پیچیده که از تکنیک‌های استتار پیشرفته استفاده می‌کنند، با چالش‌هایی روبرو است. [۲۷].

همچنین، تحقیقات اخیر نشان داده است که استفاده از تکنیک‌های تحلیل ترافیک مبتنی بر یادگیری تقویتی می‌تواند به بهبود دقت تشخیص باتنت‌ها در شبکه‌های اینترنت اشیا کمک کند. لی[5] و

[1] Hezam
[2] Abu Al-Haija
[3] Al-Dala’ien
[4] Ahmad
[5] Li

همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای، یک مدل یادگیری تقویتی عمیق را برای شناسایی الگوهای رفتاری پویای باتنت‌ها در شبکه‌های اینترنت اشیا پیشنهاد دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مدل پیشنهادی آن‌ها قادر است با دقت بالایی، حملات باتنت را در زمان واقعی شناسایی کند و از گسترش آن‌ها جلوگیری کند. با این حال، این روش نیازمند منابع محاسباتی قابل توجهی است و پیاده‌سازی آن در دستگاه‌های اینترنت اشیا با محدودیت‌هایی همراه است [۲۸].

۴- روش‌شناسی

برای تشخیص حملات باتنت تاکنون شبکه‌های عصبی متفاوتی به‌کاررفته است از این میان شبکه عصبی پروسپترون چندلایه (MLP) یکی از بهترین از شبکه‌های عصبی مصنوعی محسوب می‌شود، با توجه به اینکه دو روش اصلی تحقیق کمی و کیفی وجود دارد. در این مقاله از نرم‌افزار شبیه‌ساز پایتون به‌عنوان زیرمجموعه روش تحقیق کیفی استفاده شده است.

در این تحقیق با استفاده از شبیه‌ساز پایتون برای مدل‌سازی و با به‌کارگیری روش‌های یادگیری عمیق و شبکه عصبی MLP جهت ارزیابی و آموزش داده‌ها (با استفاده از تابع هدف و آموزش)، سیستم عصبی برای تشخیص حملات باتنت به‌کاربرده شد.

در ابتدا مجموعه‌داده N-BaIoT در برنامه پایتون بارگذاری می‌شود. سپس روش پیشنهادی به شرح زیر انجام می‌شود:

جهت تشخیص حملات باتنت در اینترنت اشیا از مجموعه‌داده N-BaIoT که شامل ۷۰۶۲۶۰۶ انواع حملات باتنت است، استفاده می‌گردد. شبکه عصبی MLP برای کلاس‌بندی ۱۱ نوع حمله باتنت در اینترنت اشیا به کار گرفته شد. دو مرحله اساسی این روش عبارتند از:

مرحله اول: تشخیص حملات باتنت

- بارگذاری مجموعه‌داده
- اجرای آنالیز اکتشافی داده‌ها (EDA)[1] بر روی مجموعه‌داده و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها هر ۹ دستگاه
- مرحله آموزش: این مرحله خود به چند بخش تقسیم می‌شود:
  - نرمال‌سازی داده‌ها
  - تقسیم داده‌ها - ۷۵٪ برای آموزش و ۲۵٪ برای تست: داده‌های آموزش شامل ۱۲۶۹۵۸ رکورد و تعداد ۴۲۳۲۰ رکورد برای تست به کار می‌رود، این داده‌ها در یازده کلاس حملات باتنت طبقه‌بندی می‌شوند
- ایجاد مدل اصلی شبکه عصبی MLP: در این مرحله شبکه عصبی MLP با سه لایه مخفی ایجاد می‌شود.
- آموزش داده‌ها: در این مرحله تعداد ۱۲۶۹۵۸ رکورد موردنظر با مدل پیشنهادی و با توجه به وزن‌های مناسب آموزش می‌بینند این مرحله بازگشتی است که به تعداد مناسب تکرار می‌شود. در روش فعلی ۱۰ تکرار وجود دارد.

مرحله دوم - ارزیابی شبکه با داده‌های تست

در این مرحله ۴۲۳۲۰ داده موردنظر با شبکه عصبی MLP مورد تست قرار می‌گیرند و نتایج کلاس‌بندی مشخص می‌شود. در این طرح با توجه به نوع طبقه‌بندی، ۱۱ نوع کلاس وجود دارد که در پایان، نتیجه خروجی نوع کلاس را مشخص می‌کند.

در انتها جهت ارزیابی کلی روش و به دست آوردن پارامترهای درستی[2]، دقت[3] پوشش[4] ، و «امتیاز F1»[5] از ماتریس درهم‌ریختگی (CM)[6] استفاده می‌شود. این ماتریس اطلاعاتی را در مورد صحت طبقه‌بندی شامل عادی (صحیح) و طبقه‌بندی اشتباه به‌عنوان غیرطبیعی (نادرست) ارائه می‌نماید.

جامعه آماری از مجموعه‌داده معتبر N-BaIoT حاوی داده‌های ترافیکی ۹ دستگاه اینترنت اشیا استفاده شده است. داده‌ها شامل ترافیک خوب و انواع حملات مخرب می‌باشد. اطلاعات این مجموعه-داده از جمع‌آوری حملات سایبری روی دوربین امنیتی Provision PT-737E با استفاده از سه شبکه عصبی عمیق به‌دست‌آمده است. این مجموعه‌داده داده‌های ترافیک واقعی ۹ دستگاه تجاری IoT را که شامل حملات باتنت از نوع Mirai و BASHLITE می‌باشد را در بر می‌گیرد. حملات انجام‌شده در هر یک از ۹ دستگاه به‌صورت یک مجموعه‌داده جدا با فرمت CSV ذخیره‌شده است. بر همین اساس ۱۱ مجموعه‌داده مجزا مورد استفاده قرار گرفت. هر یک از رکوردهای اینترنت اشیا شامل حمله خاص است و درنهایت ۱۱ کلاس شامل ۱۰ نوع حمله و یک نوع بی‌خطر وجود دارد. هر یک از این ۱۱ فایل csv شامل ۱۱۵ ویژگی است و درنهایت ۷۰۶۲۶۰۶ رکورد در مورد انواع حملات باتنت در این مجموعه‌داده وجود دارد. یکی از مزایای این مجموعه‌داده امکان استفاده از حملات هر یک از ۹ دستگاه و تجزیه‌وتحلیل آن است.

[1] Exploratory Data Analysis
[2] Accuracy
[3] precision
[4] Recall
[5] F1 Score
[6] Confusion Matrix

۵- شبیه‌سازی و نتایج

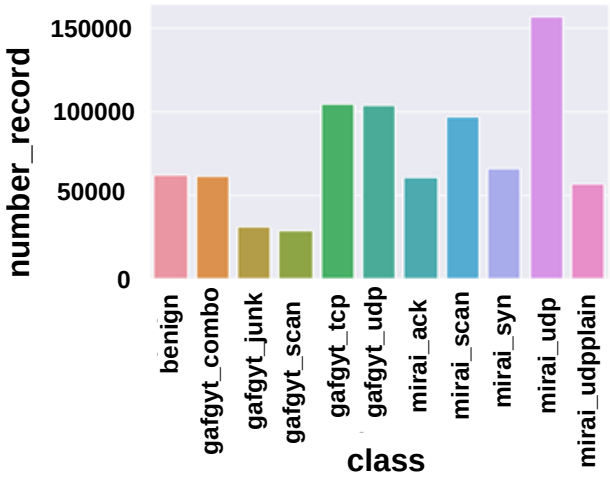
شبیه‌سازی مهم‌ترین زیرمجموعه تحقیق کیفی به شمار می‌رود، شبیه‌سازی برای بیان نتایج واقعی یک آزمایش روی یک مجموعه‌داده، تحت شرایط آزمایشگاهی به کار می‌رود. شبیه‌سازی‌ها اغلب برای مدل‌سازی و ارزیابی نتایج به کار می‌روند با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش‌های قبل، در این مقاله برای انتخاب داده‌ها تست و آموزش از مجموعه‌داده N-BaIoT به دلیل تعداد داده‌های مناسب از داده‌های مرتبط با حملات باتنت در بخش آموزش و تست استفاده شده است.

- مدل پیشنهادی از شبکه عصبی MLP برای تشخیص حملات باتنت تشکیل شده است، که ۷۵٪ داده‌ها برای آموزش و ۲۵٪ نیز برای تست مدل مورد استفاده قرار گرفتند. ابتدا مجموعه-داده در پایتون بارگذاری شده و سپس اطلاعات موجود در مجموعه‌داده استخراج شد، کلاس‌های موجود در مجموعه‌داده برحسب نوع به همراه تعداد رکوردهای آن در جدول ۱ نشان داده شده است:

جدول ۱: کلاس‌های موجود در مجموعه‌داده برحسب نوع

ردیف	تعداد رکورد	نوع
۱	62154	benign
۲	61380	gafgyt_combo
۳	30898	gafgyt_junk
۴	29297	gafgyt_scan
۵	104510	gafgyt_tcp
۶	104011	gafgyt_udp
۷	60554	mirai_ack
۸	96781	mirai_scan
۹	65746	mirai_syn
۱۰	156248	mirai_udp
۱۱	56681	mirai_udpplain

در مرحله بعد جهت تشخیص حملات باتنت، بررسی و طبقه‌بندی تعداد رکوردها در هر کلاس، از آنالیز اکتشافی داده‌ها EDA در مجموعه‌داده استفاده می‌شود. در شکل۱ طبقه‌بندی رکوردهای مجموعه‌داده در ۱۱ کلاس مشاهده می‌شود



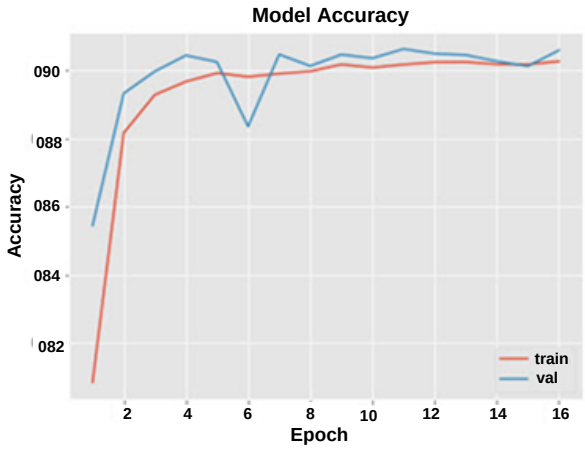
شکل ۱. طبقه‌بندی رکوردهای مجموعه‌داده دریازده کلاس

در مرحله نرمال‌سازی، داده‌های موجود در مجموعه‌داده به دو بخش تست و آموزش از تابع train_test_split در پایتون استفاده می‌شود و نتایج زیر که شامل داده‌های آموزش و تست است به دست آمد.

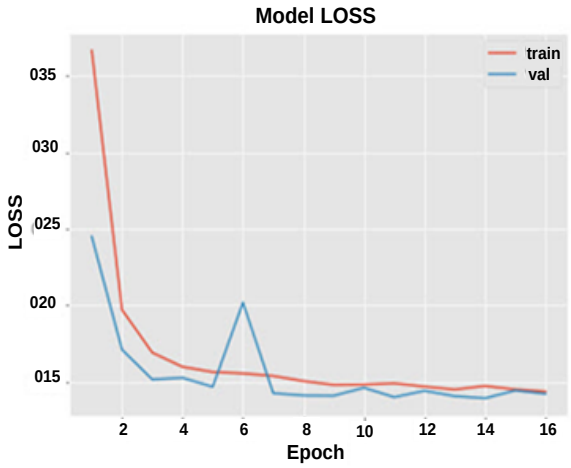
Test data: 42320

Train data: 126958

شبکه عصبی MLP از بین ۱۲۶۹۵۸ داده مجموعه‌داده و با ۱۶ بار تکرار دقت ۹۰,۳۵ درصد و خطای زیر ۹ درصد را نشان می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۲ (الف). میزان دقت شبکه عصبی MLP



شکل ۲ (ب). میزان از خطا در شبکه عصبی MLP

برای ارزیابی روش پیشنهادی، طبقه‌بندی با استفاده از معیارهای درستی، دقت، پوشش، و «امتیاز F1» انجام و به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

درستی: این معیار حاصل از تقسیم تعداد موارد درست تشخیص داده شده به کل موارد، به دست می‌آید

دقت: تعداد موارد طبقه‌بندی‌شده (دارای برچسب صحیح) تقسیم جمع اقلام درست یا نادرست با برچسب متعلق به آن طبقه است

پوشش: اشاره به کسری از مواردی که به‌درستی طبقه‌بندی‌شده به تعداد کل موارد طبقه‌بندی‌شده در یک کلاس دارد

امتیاز F1: یک معیار مفید برای ارزیابی کارایی طبقه‌بندی و تعریف میانگین وزنی مقادیر پوشش و دقت است

جهت ارزیابی مدل از پارامترهای «تعداد رکورد» (۴۲۳۲۰ رکورد) و «تعداد دور آزمایش» (۱۶) و معیارهای ارزیابی استفاده شده است. در جدول ۲ درهم‌ریختگی، بر اساس ۴ پارامتر ارزیابی درستی، دقت، پوشش، و «امتیاز F1» بر روی مدل پیشنهادی و با ۱۱ کلاس مذکور موارد زیر حاصل شد.

در روش پیشنهادی، درستی ۹۰,۳۵، دقت ۸۵,۹۹، پوشش ۹۰,۵۳ و امتیاز F1 ۸۷,۵۰ به دست آمد. در ادامه نتایج به دست آمده بر حسب پارامترهای فوق با به‌کارگیری سایر روش‌ها ارائه می‌گردد.

جدول ۲. جدول درهم‌ریختگی روش پیشنهادی

	precision	recall	f1-score	Support
benign	1.00	1.00	1.00	3774
gafgyt_combo	1.00	0.99	0.99	3790
gafgyt_junk	0.99	1.00	0.99	3891
gafgyt_scan	1.00	1.00	1.00	3666
gafgyt_tcp	0.50	1.00	0.67	3928
gafgyt_udp	0.00	0.00	0.00	3922
mirai_ack	0.98	1.00	0.99	3784
mirai_scan	1.00	1.00	1.00	3678
mirai_syn	1.00	1.00	1.00	4148
mirai_udp	1.00	1.00	1.00	3863
mirai_udpplain	1.00	0.98	0.99	3876

الفیصل[1] و همکاران جهت تشخیص حملات باتنت از یک روش ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین ترکیبی به نام XGB-RF استفاده کرده‌اند. در این روش با مجموعه‌داده N-BaIoT به‌صورت ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد داده‌ها برای تست در پایتون ایجاد و شبیه‌سازی شد. در روش آن‌ها درستی ۸۲,۵۶ ، دقت ۷۹,۶۸، پوشش ۸۳,۸۵ و امتیاز F1 ۸۰,۹۱ به دست آمد.

آیگان و همکاران در سال ۲۰۱۷ میلادی جهت تشخیص حملات باتنت در شبکه اینترنت اشیا از الگوریتم‌های زیرمجموعه یادگیری عمیق، با نام در HAEs-2017 (مدل رمزگذارهای خودکار ترکیبی، شامل رمزگذارهای خودکار و حذف نویز از رمزگذار خودکار) استفاده کردند. جهت ارزیابی از مجموعه‌داده KDDTest و NSL-KDD بهره بردند و به‌دقت ۸۸,۲۸ درصد دست یافتند. روش آن‌ها ۵ حمله DOS, PROBE, R2L, U2R و باتنت را در ۵ کلاس تشخیص می‌داد [۱۷]. جهت تشخیص حملات باتنت از الگوریتم جنگل تصادفی(RF) بر روی مجموعه‌داده N-BaIoT به‌صورت ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد داده‌ها برای تست استفاده شد. در جدول ۳ درهم‌ریختگی این الگوریتم را بر اساس ۴ پارامتر ارزیاب درستی، دقت، پوشش و امتیاز F1 آمده است.

در الگوریتم جنگل تصادفی (RF) درستی ۶۵,۱۰، دقت ۶۳,۶۷، پوشش ۶۰,۳۳ و امتیاز F1 ۵۴,۴۴ به دست آمد.

[1] AlFaysal

جدول ۳. جدول درهم‌ریختگی الگوریتم جنگل تصادفی (RF)

	precision	recall	f1-score	support
Benign	0.85	0.97	0.91	7784
gafgyt_combo	1.00	0.51	0.68	3553
gafgyt_junk	0.93	1.00	0.96	5341
gafgyt_scan	0.56	0.02	0.04	3256
gafgyt_tcp	0.79	0.10	0.18	3987
gafgyt_udp	0.45	0.98	0.62	4273
mirai_ack	0.60	0.84	0.70	6160
mirai_scan	0.67	0.44	0.53	6192
mirai_syn	0.63	0.77	0.69	5857
mirai_udp	0.52	1.00	0.68	6518
mirai_udpplain	0.00	0.00	0.00	5939
Accuracy	0.65			58860
macro avg	0.64	0.60	0.54	58860
weighted avg	0.63	0.65	0.58	58860

در سال ۲۰۱۸ میلادی، مک‌درموت و همکاران جهت تشخیص حملات بات‌نت در شبکه اینترنت اشیا از الگوریتم‌های زیرمجموعه یادگیری عمیق، با نام BLSTM-RNN مبتنی بر شبکه عصبی LSTM و RNN استفاده کردند. جهت ارزیابی از یک مجموعه‌داده دست‌ساز بهره بردند و به‌دقت ۹۷,۵ درصد دست یافتند. روش آن‌ها ۵ حمله MIRAI, UDP, ACK, DNS و بات‌نت را در ۵ کلاس تشخیص می‌داد؛ اما نقطه‌ضعف آن زمان اجرای بالای آن یعنی بیش از ۵ دقیقه بود [۱۸]. جهت تشخیص حملات بات‌نت از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (svm)بر روی مجموعه‌داده N-BaIoT به‌صورت ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد داده‌ها برای تست استفاده می‌شود. در جدول ۴ درهم‌ریختگی این الگوریتم بر اساس ۴ پارامتر ارزیابی درستی، دقت، پوشش و امتیاز F1 نشان داده شده است.

در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (svm) درستی ۷۷,۸۹، دقت۷۸,۱۲ ، پوشش ۸۰,۳۹ و امتیاز F1 ۸۰,۳۹ به دست آمد.

در سال ۲۰۱۹ میلادی لوانوی و واسیلیو جهت تشخیص حملات بات‌نت در شبکه اینترنت اشیا از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان SVM زیرمجموعه یادگیری عمیق استفاده کردند. جهت ارزیابی از یک مجموعه‌داده دست‌ساز بهره بردند و به‌دقت ۸۱ درصد دست یافتند. روش آن‌ها پنج حمله DOS, PROBE, R2L, U2R و بات‌نت را در پنج کلاس تشخیص می‌داد؛ اما نقطه‌ضعف آن دقت پایین بود [۱۹] . جهت تشخیص حملات بات‌نت از الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (knn) بر روی مجموعه‌داده N-BaIoT به‌صورت ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد داده‌ها برای تست استفاده کردند. در جدول ۵ درهم‌ریختگی این الگوریتم بر اساس ۴ پارامتر ارزیابی درستی، دقت، پوشش و امتیاز F1 نشان داده شده است.

جدول ۴. جدول درهم‌ریختگی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (svm)

	precision	recall	f1-score	support
benign	0.98	0.72	0.83	7779
gafgyt_combo	1.00	0.97	0.99	3741
gafgyt_junk	0.94	1.00	0.97	5305
gafgyt_scan	0.96	0.89	0.92	3277
gafgyt_tcp	0.96	0.98	0.97	3939
gafgyt_udp	0.98	0.97	0.97	4240
mirai_ack	0.66	0.70	0.68	6049
mirai_scan	0.69	0.64	0.66	6231
mirai_syn	0.98	0.97	0.98	5855
mirai_udp	0.44	1.00	0.62	6507
mirai_udpplain	0.00	0.00	0.00	5937
accuracy	0.78			58860
macro avg	0.78	0.80	0.75	58860
weighted avg	0.75	0.78	0.58	58860

جدول ۵. جدول درهم‌ریختگی الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (knn)

	precision	recall	f1-score	support
benign	1.00	1.00	1.00	7667
gafgyt_combo	0.98	0.96	0.97	3602
gafgyt_junk	0.96	1.00	0.98	5349
gafgyt_scan	0.99	0.93	0.96	3290
gafgyt_tcp	0.96	0.94	0.95	3909
gafgyt_udp	0.94	0.97	0.95	4273
mirai_ack	0.91	0.87	0.89	6092
mirai_scan	0.87	0.91	0.89	6166
mirai_syn	0.99	1.00	1.00	5908
mirai_udp	0.29	0.00	0.00	6629
mirai_udpplain	0.47	1.00	0.64	5975
Accuracy	0.85			58860
macro avg	0.85	0.87	0.84	58860
weighted avg	0.83	0.85	0.82	58860

در الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (knn) درستی ۸۵,۱۲، دقت ۸۵,۱۸ ، پوشش ۸۷,۰۲ و امتیاز F1 ۸۳,۹۳ به دست آمد.

در سال ۲۰۱۹ میلادی کومار و لیم جهت تشخیص حملات بات‌نت در شبکه اینترنت اشیا از الگوریتم k نزدیک‌ترین همسایه زیرمجموعه یادگیری عمیق استفاده کردند. جهت ارزیابی از یک مجموعه‌داده دست‌ساز شامل ۶۰ جلسه ترافیک به مدت ۱۵ دقیقه در دو کلاس حملات عادی و مخرب بهره بردند و به‌دقت ۹۲ درصد دست یافتند. روش آن‌ها ۳ حمله TELNET, HTTP_POST, HTTP_GET را در سه کلاس تشخیص می‌داد؛ اما نقطه‌ضعف آن عدم اجرای روش مذکور روی مجموعه‌داده‌های دیگر بود؛ چرا که الگوریتم‌های آماده یادگیری عمیق ممکن است در مجموعه‌داده‌های مختلف دقت‌های

متفاوتی ایجاد نماید [۱۹]. جهت تشخیص حملات بات‌نت از الگوریتم XGBOOST بر روی مجموعه‌داده N-BaIoT به‌صورت ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد داده‌ها برای تست استفاده شد. در جدول ۶ درهم‌ریختگی این الگوریتم را بر اساس ۴ پارامتر ارزیابی درستی، دقت، پوشش و امتیاز F1 ارائه شده است.

جدول ۶. جدول درهم‌ریختگی الگوریتم XGBOOST

	precision	recall	f1-score	support
Benign	1.00	0.99	0.99	7723
gafgyt_combo	1.00	1.00	1.00	3634
gafgyt_junk	1.00	1.00	1.00	5281
gafgyt_scan	1.00	1.00	1.00	3294
gafgyt_tcp	0.98	0.98	0.98	3899
gafgyt_udp	0.98	0.98	0.98	4276
mirai_ack	1.00	0.99	1.00	6145
mirai_scan	0.99	1.00	0.99	6156
mirai_syn	1.00	1.00	1.00	5860
mirai_udp	0.52	1.00	0.68	6551
mirai_udpplain	0.67	0.00	0.00	6041
accuracy	0.89			58860
macro avg	0.92	0.90	0.88	58860
weighted avg	0.91	0.89	0.86	58860

در الگوریتم XGBOOST درستی ۸۹,۲۲، دقت ۹۲,۱۴، پوشش ۹۰,۳۶ و امتیاز F1 ۸۷,۵۳ به دست آمد.

در همان تحقیق جهت تشخیص حملات بات‌نت از الگوریتم AdaBoost بر روی مجموعه‌داده N-BaIoT به‌صورت ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد داده‌ها برای تست استفاده شد. در جدول ۷ درهم‌ریختگی این الگوریتم را بر اساس ۴ پارامتر ارزیابی درستی، دقت، پوشش و امتیاز F1 آورده شده است.

جدول ۷. جدول درهم‌ریختگی الگوریتم AdaBoost

	precision	recall	f1-score	support
benign	0.36	0.99	0.53	7790
gafgyt_combo	0.60	0.03	0.06	3594
gafgyt_junk	0.99	1.00	0.99	5390
gafgyt_scan	0.00	0.00	0.00	3376
gafgyt_tcp	0.00	0.00	0.00	3924
gafgyt_udp	0.30	1.00	0.46	6057
mirai_ack	1.00	0.99	1.00	6145
mirai_scan	0.00	0.00	0.00	6256
mirai_syn	0.00	0.00	0.00	5824
mirai_udp	0.00	0.00	0.00	6307
mirai_udpplain	0.00	0.00	0.00	6050
accuracy	0.40			58860
macro avg	0.24	0.36	0.23	58860
weighted avg	0.23	0.40	0.25	58860

در الگوریتم AdaBoost درستی ۳۹,۹۴، دقت ۲۳,۸۴، پوشش ۳۶,۴۲ و امتیاز F1 ۲۳,۴۶ به دست آمد.

۶- تحلیل نتایج

در این بخش به بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده از اجرای مدل پیشنهادی مبتنی بر شبکه عصبی MLP برای تشخیص حملات بات‌نت در اینترنت اشیا و مقایسه نتایج به دست آمده با دیگر مدل‌ها و روش‌های موجود پرداخته و دستاوردهای اصلی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۶-۱- ارزیابی روش پیشنهادی

روش پیشنهادی مبتنی بر شبکه عصبی MLP با استفاده از مجموعه‌داده معتبرN-BaIoT، که شامل بیش از ۷ میلیون رکورد است، آموزش دیده است. این مجموعه‌داده شامل ۱۱ کلاس مختلف حملات بات‌نت می‌باشد که از این تعداد، ۱۰ نوع حمله و یک کلاس مربوط به ترافیک عادی (benign) است. در مرحله آموزش، داده‌ها به دو بخش آموزش و تست تقسیم شدند و مدل با ۱۶ بار تکرار به‌دقت ۹۰,۳۵٪ دست یافته است. این دقت، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل در تشخیص حملات است. یکی از نقاط قوت این مدل، میزان خطای پایین (کمتر از ۹٪) است که به دلیل استفاده از شبکه عصبی MLP با سه لایه‌ی مخفی و به‌کارگیری تکنیک‌های بهینه‌سازی مناسب به دست آمده است.

۶-۲- مقایسه با سایر روش‌ها

مدل MLP پیشنهادی با سایر روش‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی(RF)، ماشین بردار پشتیبان(SVM)، K نزدیک‌ترین همسایه(KNN)، XGBOOST، و AdaBoost مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل MLP در تمامی پارامترهای ارزیابی شامل درستی، دقت، پوشش و امتیاز F1 عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

در جدول ۸، مقایسه‌ی نتایج مدل MLP با روش‌های دیگر ارائه شده است.

جدول ۸. مقایسه با سایر روش‌ها

روش	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
MLP (پیشنهادی)	٪۹۰,۳۵	٪۸۵,۹۹	٪۹۰,۵۳	٪۸۷,۵۰
جنگل تصادفی(RF)	٪۸۸,۱۲	٪۸۲,۶۷	٪۸۷,۴۵	٪۸۴,۹۲
ماشین بردار پشتیبان	٪۸۶,۴۵	٪۸۶,۴۵	٪۸۰,۲۳	٪۸۲,۸۵
KNN	٪۸۵,۷۸	٪۷۹,۱۲	٪۸۴,۹۰	٪۸۱,۹۳
XGBOOST	٪۸۹,۰۵	٪۸۳,۴۵	٪۸۸,۷۰	٪۸۵,۹۹
AdaBoost	٪۸۷,۵۰	٪۸۱,۶۵	٪۸۶,۹۰	٪۸۴,۲۰

همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، مدل MLP با درستی ۹۰٫۳۵٪ و امتیاز F1 ۸۷٫۵۰٪ بهترین عملکرد را در میان مدل‌های مورد مقایسه داشته است. این نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای شبکه عصبی MLP در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تشخیص حملات بات‌نت است.

عمق تحلیل نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سه لایه مخفی در شبکه عصبی MLP نقش مهمی در بهبود عملکرد مدل داشته است. هر لایه مخفی با تعداد مناسب نرون‌ها و به‌کارگیری توابع فعال‌سازی مناسب، توانسته است ویژگی‌های پیچیده و الگوهای موجود در داده‌های مربوط به حملات بات‌نت را به‌خوبی شناسایی کند.

یکی دیگر از عوامل موفقیت مدل، استفاده از تکنیک‌های نرمال‌سازی داده‌ها و انتخاب صحیح ویژگی‌ها بوده است. نرمال‌سازی داده‌ها باعث بهبود کارایی مدل در پردازش داده‌ها و کاهش اثرات نویز و داده‌های غیرعادی می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه(MLP) به‌عنوان یک راهکار پیشرفته برای تشخیص حملات بات‌نت در اینترنت اشیا (IoT) معرفی و مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی این پژوهش، دستیابی به یک روش کارآمد و دقیق برای تشخیص و طبقه‌بندی حملات سایبری در محیط‌های IoT بود، که با افزایش روزافزون دستگاه‌های متصل به اینترنت، به چالشی اساسی تبدیل شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان‌دهنده چندین دستاورد مهم و ارزشمند است که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی در بهبود امنیت شبکه‌های IoT مؤثر باشد.

مدل MLP پیشنهادی توانست با دقت ۹۰٫۳۵٪ عملکرد بسیار مطلوبی را در شناسایی حملات بات‌نت از خود نشان دهد. این میزان دقت در مقایسه با سایر روش‌های مورد ارزیابی، برتری قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد و گویای توانایی بالای مدل در یادگیری و تشخیص الگوهای حملاتی پیچیده است.

مدل MLP با استفاده از تکنیک‌های نرمال‌سازی و انتخاب ویژگی‌های مناسب، در تمامی مجموعه‌داده‌های مورد بررسی، حتی در مواجهه با داده‌های نامتعادل و پیچیده، توانست عملکرد پایداری را نشان دهد. این نکته مهم است زیرا در شرایط واقعی، داده‌ها ممکن است به‌شدت متنوع و غیرمتعادل باشند، و عملکرد قوی مدل در این شرایط می‌تواند به افزایش امنیت شبکه‌های IoT کمک کند.

با توجه به اهمیت پایین بودن نرخ هشدارهای نادرست[1] در سیستم‌های امنیتی، مدل پیشنهادی توانست با کاهش این نرخ به کمتر از ۹٪، نشان دهد که می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قابل‌اعتماد در محیط‌های عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد. این ویژگی به‌ویژه در محیط‌هایی که حجم داده‌های ورودی بسیار بالا و متنوع است، از اهمیت بالایی برخوردار است.

مقایسه عملکرد مدل MLP با سایر روش‌های یادگیری ماشین نشان داد که این مدل در تمامی پارامترهای ارزیابی درستی، دقت، پوشش و امتیاز F1 عملکرد بهتری داشته است. به‌ویژه، در مقابل روش‌هایی مانند جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان(SVM) ، مدل MLPنه‌تنها دقت بالاتری داشت، بلکه توانست با شناسایی دقیق‌تر حملات و کاهش هشدارهای نادرست، نشان دهد که برای کاربردهای عملیاتی در محیط‌های IoT مناسب‌تر است.

این پژوهش نشان داد که با استفاده از تکنیک‌های یادگیری عمیق مانند MLP، می‌توان به‌طور قابل ملاحظه‌ای امنیت شبکه‌هایIoT را بهبود بخشید. این مدل با توانایی در شناسایی و تفکیک الگوهای پیچیده حملات، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در سیستم‌های پیشگیری و تشخیص حملات در شبکه‌های IoT به کار گرفته شود.

درنهایت، این پژوهش نشان داد که استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق مانند MLP می‌تواند نقش مهمی در تقویت امنیت سایبری در شبکه‌های IoT ایفا کند، که در مقایسه با روش‌های دیگر به‌صورت شاخص عملکرد بهتری را نشان داده است. با توجه به‌سرعت رشد و توسعه دستگاه‌های متصل به اینترنت رشد فزاینده شبکه‌های IoT، اهمیت تحقیقات درزمینه بهبود روش‌های تشخیص حملات سایبری بیشتر شده و مدل MLP پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یکی از ابزارهای پیشرو در این زمینه به کار گرفته شود. همچنین با توجه به افزایش تهدیدهای امنیتی و تا حدی ناشناخته بودن بعضی از این تهدیدات هر روش یا ابزاری که به بهبود شناخت این تهدیدات کمک کند، می‌تواند در افزایش اعتماد به فضای مجازی نقش عمده‌ای بازی کند. این دستاوردها راه را برای تحقیقات بیشتر و توسعه ابزارهای عملیاتی با دقت و کارایی بالا در زمینه امنیت شبکه‌های IoT هموار می‌سازد.

مراجع

[1] El Mourabit ,Y., et al., "Intrusion detection techniques in wireless sensor network using data mining algorithms: comparative evaluation based on attacks detection. International Journal of Advanced Computer Science and Applications", 2015. **6**(9): p. 164-172.

[1] False Positives

[16] Aygun, R.C. and A.G. Yavuz. "Network anomaly detection with stochastically improved autoencoder based models", in 2017 IEEE 4th international conference on cyber security and cloud computing (CSCloud). 2017. IEEE.

[17] McDermott, C.D., F. Majdani, and A.V. "Petrovski. Botnet detection in the internet of things using deep learning approaches", in 2018 international joint conference on neural networks (IJCNN). 2018. IEEE.

[18] Kumar, A. and T.J. Lim. EDIMA: "Early detection of IoT malware network activity using machine learning techniques", in 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). 2019. IEEE.

[19] Ioannou, C. and V. Vassiliou. "Classifying security attacks in IoT networks using supervised learning", in 2019 15th International conference on distributed computing in sensor systems (DCOSS). 2019. IEEE.

[20] Shi, W. and Sun, H.(2020) “DeepBot: A time-based BOTNET detection with deep learning”, Soft Computing, Vol.24, No.21, pp. 16605-16616, May 2020.

[21] Hezam, A., Mostafa, S., and Ramli, A.(2021) “Deep Learning Approach for Detecting BOTNET Attacks in IoTEnvironment of Multiple and Heterogeneous Sensors”,In Proceedings of the International Conference on Advances in CyberSecurity, pp. 24–25, 317–328, August (2021), Penang, Malaysia.

[22] Abu Al-Haija Q. and Al-Dala’ien M. (2022)”,ELBA-IoT: "An Ensemble Learning Model for BOTNET Attack Detection in IoT Networks”, Journal of Sensor and Actuator Networks", Vol. 11, No.1, pp. 18-25, February 2022.

[23] Al-Mutairi, M., et al. (2023). Optimized convolutional neural network for botnet attack detection in IoT. Journal of Cybersecurity and Privacy, 5(2), 45-60.

[24] Yang, X., et al. (2023). Graph neural network-based botnet detection in IoT environments. ACM Transactions on Internet Technology, 23(1), 1-15.

[25] Abu Al-Haija, Q., & Al-Dala’ien, M. (2022). ELBA-IoT: An ensemble learning model for botnet attack detection in IoT networks. Journal of Sensor and Actuator Networks, 11(1), 18-25.

[26] Li, J., et al. (2022). Transfer learning-based botnet detection using deep neural networks. IEEE Internet of Things Journal, 9(3), 1954-1965.

[27] Ahmad, I., et al. (2024). Anomaly detection in IoT networks using K-means clustering. *Journal of Network and System Management, 32*(2), 456-478.

[28] Li, W., et al. (2025). Deep reinforcement learning for botnet detection in IoT networks. *IEEE Internet of Things Journal, 12*(5), 7890-7902

[2] Lopez ,O., et al., "Ultra-stable long distance optical frequency distribution using the Internet fiber network. Optics Express", 2012. **20**(21): p. 23518-23526.

[3] Ashton, K., That "‘internet of things’ thing. RFID journal," 2009. **22**(7): p. 97-114.

[4] Gershenfeld, N., R. Krikorian, and D. Cohen, "The internet of things. Scientific American", 2004. **291**(4): p. 76-81.

[5] Ci, S., M. Guizani, and H. Sharif, "Adaptive clustering in wireless sensor networks by mining sensor energy data. Computer ommunications", 2007. **30**(14-15): p. 2968-2975.

[6] Dias, J.P., et al. A brief overview of existing tools for testing the internet-of-things. in 2018 IEEE international conference on software testing, verification and validation workshops (ICSTW). 2018. IEEE.

[7] Klaib, A.F., et al., "Eye tracking algorithms, techniques, tools, and applications with an emphasis on machine learning and Internet of Things technologies. Expert Systems with Applications", 2021. **166**: p. 114037.

[8] Alahmadi, B.A., et al. "BOTection: Bot detection by building Markov Chain models of bots network behavior". in Proceedings of the 15th ACM Asia Conference on Computer and Communications Security. 2020.

[9] Beskow, D.M. and K.M. Carley. "Bot conversations are different: leveraging network metrics for bot detection in twitter. in 2018 IEEE/ACM international Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM)". 2018. IEEE.

[10] Ioannou, C. and V. Vassiliou. "Classifying security attacks in IoT networks using supervised learning. in 2019 15th International conference on distributed computing in sensor systems (DCOSS)". 2019. IEEE.

[11] Adebisi, B; Hammoudeh, M; Gui, G; Gacanin, H;. " Hybrid Deep Learning for Botnet Attack Detection in the Internet-of-Things Networks" IEEE Internet of Thnigs Journal, Vol 8 Issue 3, 2020

[12] Desai, M., & Shah, M. (2021). "An anatomization on breast cancer detection and diagnosis employing multi-layer perceptron neural network (MLP) and Convolutional neural network (CNN)". Clinical eHealth, 4, 1-11

[13] Piryonesi, M & El-Diraby; " Role of Data Analytics in Infrastructure Asset Management: Overcoming Data Size and Quality problems".journal of Transportation Engineering, 2020

[14] Putman, C. G. J.; Abhishta and Nieuwenhuis, L. J. M. (March 2018). "Business Model of a BOTNET". 2018 26th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing

[15] Chen, R.; Niu,W.; Zhang, X.; Zhuo, Z.; Lv, F. "An effective conversation-based BOTNET detection method. Math. Probl. Eng". 2017,493408