بهار ۱۴۰۵
سال پانزدهم
شماره
۵۱

kahrobaonline.ir

فصلنامه
تخصصی برق و کامپیوتر

کهربا
KAHROBA MAGAZINE

Journal of Electrical and Computer Engineering

مجله آنلاین کهربا
مرجع تخصصی مهندسی برق و کامپیوتر

هوش مصنوعی، راهکاری موثر در پایش و نگهداری پیشگویانه در سیستم های توزیع برق

مسیریاب چند مقصدی: روشی برای محاسبه کوتاه‌ترین مسیر برای گذر یک باره از چندین نقطه بدون بازگشت به مبدا

تحول فناوری در تله‌مدیسین، ربات‌های جراح و فناوری‌های پوشیدنی برای نظارت بر سلامتی، دوره نقاهت، پیشگیری، درمان و زنان باردار در مناطق محروم، شرایط بحرانی و جنگ در ایران

ارائه الگوهای طراحی جنبه‌گرا برای بهبود تحمل‌پذیری خطای نرم‌افزار با رویکردی مبتنی بر کیفیت نرم‌افزار و معماری‌های نوین

یک چارچوب یادگیری تقویتی عمیق چندعامله مبتنی بر توجه متقابل و یادگیری فدرال برای بهینه‌سازی پایدار و حفظ حریم خصوصی در شهر هوشمند

بهبود شاخص‌های کیفیت خدمات در اینترنت اشیا مبتنی بر ابر با استفاده از هوش مصنوعی: طراحی بهبودیافته الگوریتم با بهینه‌سازی Harris Hawks



هوش مصنوعی و یادگیری ماشین ■ الکترونیک قدرت ■ امنیت و رمزنگاری ■ انرژی‌های تجدیدپذیر

ISSN 2322-3723
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
شماره مجوز: ۷۷۸۳۱
ISC
CIVILICA
magiran

صاحب‌امتیاز

نواندیشان

مدیرمسئول

مهدی عارف خیابانی

سردبیر

محمود مقدسیان

هیئت تحریریه

دکتر جواد شکرالهی مغانی-دکترای برق قدرت-دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

دکتر امیرحسین رحمانی –دکترای برق قدرت- استاددانشگاه‌های جندی شاپور دزفول و آزاد اسلامی‌واحد درفول

دکتر ملیحه نیک سیرت- دکترای علوم کامپیوتر- استادیار دانشگاه صنعتی بیرجند

دکتر محمود مقدسیان- دکترای برق قدرت- استادیار دانشگاه چمران اهواز

دکتر موسی مجرد- دکترای کامپیوتر-نرم افزار –دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی فیروزآباد

دکتر حامد سقایی- دکترای برق الکترونیک- دانشیار دانشگاه آزاداسلامی شهرکرد ، استادیار دانشگاه اهواز

دکتر آزاد رحیمی- دکترای برق قدرت- هیئت علمی(مربی) و مدیرگروه دانشگاه فنی و حرفه‌ای سنندج

دکتر محمدرضا ذوقی-دکترای برق مخابرات- استادیار دانشگاه کاشان

دکتر مهران ریکی-دکترای کامپیوتر-نرم افزار- هیئت علمی (مربی) دانشکده ملی مهارت شهید باهنر زاهدان

مهندس امین شیخ نجدی-کارشناس ارشد برق الکترونیک-استادیار مدعو دانشگاه جندی شاپور اهواز و آزاداسلامی واحد دزفول

مهندس محمدحسین دوست محمدی- کارشناسی ارشد برق الکترونیک – هیئت علمی(مربی) دانشگاه صنعتی همدان

درباره کهربا	۴
یادداشت مدیرمسئول	۴
سخن سردبیر	۵
مقالات	
هوش مصنوعی، راهکاری موثر در پایش و نگهداری پیشگویانه در سیستم‌های توزیع برق صدف ظریفی ، سیمین خضرایی شولای فر گروه مهندسی برق، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج،ایران	۶
تحول فناوری در تله‌مدیسین، ربات‌های جراح و فناوری‌های پوشیدنی برای نظارت بر سلامتی، دوره نقاهت، پیشگیری، درمان و زنان باردار در مناطق محروم، شرایط بحرانی و جنگ در ایران مهران کریمیان ریزی ،کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی-بیوالکتریک،دانشگاه تبریز ، ایران	۳۰
مسیریاب چند مقصدی: روشی برای محاسبه کوتاه‌ترین مسیر برای گذر یک‌باره از چندین نقطه بدون بازگشت به مبدا محمدرضا سلمانی، کاردانی نرم‌افزار دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران علیرضا محمودی فرد، استاد مدعو دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران	۳۶
ارائه الگوهای طراحی جنبه‌گرا برای بهبود تحمل‌پذیری خطای نرم‌افزار با رویکردی مبتنی بر کیفیت نرم‌افزار و معماری‌های نوین مریم اسداله زاده کرمانشاهی ، کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران- ایران	۵۲
بهبود شاخص‌های کیفیت خدمات در اینترنت اشیا مبتنی بر ابر با استفاده از هوش مصنوعی: طراحی بهبودیافته الگوریتم با بهینه‌سازی Harris Hawks امین فضیلت، موسی مجرد،گروه کامپیوتر، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران	۶۱
یک چارچوب یادگیری تقویتی عمیق چندعامله مبتنی بر توجه متقابل و یادگیری فدرال برای بهینه‌سازی پایدار و حفظ حریم خصوصی در شهر هوشمند یاسر نگهداری ،کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر واحد فیروزآباد ، دانشگاه آزاد اسلامی ، فیروزآباد ، ایران موسی مجرد، دانشیار گروه کامپیوتر، واحد فیروزآباد ، دانشگاه آزاد اسلامی ، فیروزآباد ، ایران	۷۱
ارتباط با کهربا	۷۹
English Abstracts	۸۰

درباره کهربا

مجله الکترونیکی کهربا، با همت و تلاش جمعی از دانشجویان و مهندسین برق، بخصوص اعضای انجمن علمیو پژوهشی نواندیشان، در سال هزار و سیصد و نود شروع به کارکرد. کهربا از سال ۹۱ با کسب شماره بین‌المللی استاندارد مجلات (ISSN:۲۳۲۲-۳۷۲۳) و ثبت در سازمان اسناد و کتابخانه ملی ایران، به‌عنوان فصلنامه‌ای رسمیو تخصصی در حوزه صنعت برق شناخته‌شده است. این نشریه تخصصی در سال ۹۵ موفق به اخذ پروانه انتشار از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، با مجوز شماره ۷۷۸۲۱ و ثبت در سامانه جامع رسانه‌های کشور(e-rasaneh) و بانک اطلاعات نشریات کشور(magiran) گردید. در سال ۹۷ طی تفاهم‌نامه‌ای با بانک مقالات کشور (سیویلیکا) مورد حمایت این پایگاه قرارگرفته و مقالات ارائه‌شده به نشریه پس از انتشار در سیویلیکا نمایه شده و در نظام رتبه‌بندی دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.در سال ۱۴۰۳ موفق به کسب امتیاز لازم جهت نمایه سازی نشریات موسسه استنادی و پایش علم و فناوری جهان اسلام (ISC) گردید.

یادداشت مدیرمسئول

اکنون که به چهاردهمین بهار فعالیت نشریه کهربا پا گذاشته‌ایم و پنجاه ویکمین شماره این مجله تخصصی را پیش روی شما قرار می‌دهیم، خرسندیم که همچنان همراه و هم‌قدم با شما فرهیختگان و علاقه‌مندان به علوم مهندسی برق، الکترونیک و کامپیوتر هستیم.

از نخستین روز انتشار، هدف ما تهیه و ارائه مطالبی کاربردی، قابل فهم و درعین‌حال تخصصی بوده است تا ضمن حفظ عمق علمی، بستری فراهم آوریم برای گسترش دانش و آگاهی در میان دانش‌پژوهان و مشتاقان این حوزه‌ها. امید داریم با راهنمایی‌ها، نقدها و حمایت‌های سازنده شما عزیزان، هر شماره نسبت به شماره پیشین پربارتر و حرفه‌ای‌تر گردد. به یاری همراهی و همت دوستان و همکارانمان، در تلاشیم تا گامی هرچند کوچک در مسیر ارتقای سطح دانش، رضایت شما خوانندگان گرامی، و شکوفایی علمی جامعه برداریم.

با آرزوی موفقیت و پیشرفت روزافزون برای شما عزیزان

سخن سردبیر:

پژوهش و نوآوری همواره موتور محرک توسعه جوامع بشری بوده‌اند و در عصر تحول دیجیتال، نقش دانش و فناوری بیش از هر زمان دیگری در حل مسائل پیچیده و چندبعدی جوامع نمایان شده است. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه‌هایی نظیر هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، یادگیری ماشین، رایانش ابری، سلامت دیجیتال و شهرهای هوشمند، افق‌های جدیدی را پیش روی پژوهشگران و صنعتگران گشوده است.

در این شماره از مجله کهربا، مجموعه‌ای از مقالات علمی و کاربردی منتشر شده‌اند که هر یک از زاویه‌ای متفاوت به چالش‌ها و فرصت‌های فناوری‌های نوین پرداخته‌اند. از کاربرد هوش مصنوعی در پایش و نگهداری پیشگویانه سیستم‌های توزیع برق گرفته تا بهره‌گیری از یادگیری فدرال و یادگیری تقویتی چندعامله در شهرهای هوشمند، همگی نشان‌دهنده حرکت روزافزون علم به سوی سامانه‌های هوشمند، خودکار و داده‌محور هستند.

همچنین موضوعات مهمی نظیر توسعه خدمات سلامت هوشمند از طریق تله‌مدیسین، ربات‌های جراح و فناوری‌های پوشیدنی، بهبود کیفیت خدمات در اینترنت اشیا مبتنی بر ابر، طراحی الگوریتم‌های نوین بهینه‌سازی، ارائه روش‌های کارآمد مسیریابی چندمقصدی و ارتقای تحمل‌پذیری خطای نرم‌افزار با بهره‌گیری از معماری‌های نوین و برنامه‌نویسی جنبه‌گرا، بیانگر گستره وسیع کاربرد فناوری در حل مسائل واقعی و ارتقای کیفیت زندگی انسان‌ها هستند.

آنچه در میان تمامی مقالات این شماره مشترک است، تلاش برای ارائه راهکارهایی نوآورانه، کارآمد و پایدار در مواجهه با مسائل پیچیده دنیای امروز است. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که همگرایی میان علوم مهندسی، علوم داده و فناوری‌های هوشمند می‌تواند بستری مناسب برای توسعه زیرساخت‌های آینده و افزایش بهره‌وری در حوزه‌های مختلف فراهم آورد.

امید است نتایج پژوهش‌های منتشرشده در این شماره بتواند زمینه‌ساز گسترش همکاری‌های علمی، توسعه تحقیقات کاربردی و خلق ایده‌های نو در میان پژوهشگران، دانشجویان و فعالان صنعتی کشور باشد. از تمامی نویسندگان، داوران و اعضای هیئت تحریریه که با تلاش ارزشمند خود در انتشار این شماره همکاری داشته‌اند، صمیمانه قدردانی می‌کنیم.

با آرزوی توفیق و پیشرفت روزافزون جامعه علمی کشور

KNO-1301-5101

هوش مصنوعی، راهکاری موثر در پایش و نگهداری پیشگویانه در سیستم‌های توزیع برق

صدف ظریفی[۱] sadaf_zarifi@yahoo.com
سیمین خضرایی شولای فر[۲] si.khazraei@iau.ac.ir
[۱،۲] گروه مهندسی برق،واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

چکیده:
نگهداری پیش‌گویانه(PdM) شـــبکه توزیع برق، یک اقدام حیاتی برای تشـــخیص خرابی‌های بالقوه بشـــمار می‌رود و می‌تواند قبل از اینکه خاموشی کامل در شبکه اتفاق بیفتد، هشدارهای لازم را به راهبران شبکه ارائه نماید. نگهداری پیش‌گویانه، تأثیر خوبی بر کاهش هزینه‌های شبکه توزیع برق نیز دارد؛ زیرا با مدرن‌تر شدن و پیچیده‌تر شدن سیستم شبکه‌های توزیع برق، هزینه تولید برق نیز افزایش یافته است. با انجام نگهداری پیش‌گویانه، مشکلات مربوط به همگام‌سازی[۴]اجزای مختلف شبکه کاهش می‌یابد.
در روش نگهداری پیش‌گویانه برای شبکه‌های توزیع برق، شبکه باید بتواند به سرعت داده‌های تحلیل شده‌ای را ارائه نماید تا وضعیت شبکه را پیش از وقوع خرابی در سیستم نشان دهد. همچنین، سیستم باید داده‌های حاکی از علائم خرابی و علل بروز عیب در زیرساخت-های شبکه را به سرعت ارائه نماید. در این مقاله خلاصه روش های تعمیر ونگهداری پیشگویانه شبکه توزیع بیان و بر استفاده از روش های فناورانه برای پیش گویی خرابی ها یا حملات سایبری شبکه تاکید گردیده است. با استفاده از روش های بیان شده، ناترازی ها، از کار افتادگی های شبکه یا حملات سایبری به شبکه توزیع را می توان به حداقل میزان ممکنه رساند و حتی حذف نمود.
کلید واژه ها: تعمیر و *نگهداری پیش گویانه، شبکه برق هوشمند، هوش مصنوعی*

۱. مقدمه

نگهداری پیش‌گویانه شبکه توزیع برق، یک اقدام حیاتی برای تشخیص خرابی‌های بالقوه بشمار می‌رود و می‌تواند قبل از اینکه خاموشی کامل در شبکه اتفاق بیفتد، هشدارهای لازم را به راهبران شبکه ارائه نماید [۱-۵]. خرابی ها را به دو گروه عمده می توان دسته بندی کرد: خرابی مدار باز [۶] و خرابی اتصال کوتاه [۷]. هر گونه قطع شدگی در مدار مانند باز بودن یک سوییچ، قطع شدگی در سیم‌کشی یا مقاومتی که مقدار آن به طور ناگهانی تغییر کرده باشد، باعث ایجاد وقفه در عبور جریان از مدار می‌شود که از آن به خرابی مدار باز تعبیر می شود [۶]. خرابی‌های ناشی از اتصال کوتاه را می‌توان بخاطر نفوذ غیرعادی یک امپدانس پایین بین دو نقطه با پتانسیل‌های مختلف دانست [۷].
با پیشرفت طرح‌های مبتکرانه و هوشمندانه در سیستم‌های توزیع برق و ورود شبکه‌های هوشمند به عرصه شبکه‌های توزیع برق، نگهداری مبتنی بر شرایط[۳]راهکار مناسبی برای نگهداری شبکه‌های هوشمند آینده به شمار می‌رود. در نگهداری مبتنی بر شرایط، خرابی تجهیزات الکتریکی با نرخ مشخصی پیش‌بینی می‌شود [۸]. بطور مثال، PMU[۴](دستگاه اندازه‌گیری فازور)، وسیله‌ای است که با استفاده از مشتق زمانی پایه برای همگام‌سازی[۵] امواج الکتریکی روی یک شبکه قدرت را اندازه‌گیری می‌نماید. PMU ها اطلاعات فوق‌العاده زیادی ارائه می‌نمایند که بدست آوردن و چک کردن آن‌ها بطور فیزیکی امکان‌پذیر نیست [۳]. جالب است بدانیم که استفاده از ژنراتورهای

[1] Predictive Maintenance
[2] synchronization
[۳] condition-based
[۴] Phasor Measurement Unit
[۵] synchronization

توزیع شده در سیستم‌های قدرت مذکور طی سال‌های اخیر گسترش یافته است؛ زیرا این ژنراتورها می‌توانند نیاز به افزایش توان در محدوده خود را برطرف کنند. بنابراین، روش مذکور علاوه بر مزیت‌هایی که برای تشخیص عیب دارد، می‌تواند مشکلات زیست محیطی ایجاد شده توسط روش‌های تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی را هم کاهش دهد [۹].

یک رویکرد تشخیص خرابی دیگر هم که به مدل‌های مبتنی بر اعداد وابسته است، در تحقیق انجام شده توسط Moamin A Mahmoud و همکارانش، مورد استفاده قرار گرفته است. هم مدل عیب‌یابی و هم سیکل آزمایش مربوط به آن از طریق یک ارتباط علمی مبتنی بر افزایش عددی در هر دوره آزمایش، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با تشخیص رفتارهای غیرعادی بین سیگنال‌های آن دو، باقی‌مانده‌ها بدست آمد [۱۰]. هنگامی که هیچ خرابی وجود نداشته باشد ، باقی‌مانده‌ها باید صفر شوند. البته این موضوع بخاطر نویز و سایر نقایص مدل، از دقت کافی برخوردار نیست. به همین دلیل، پس از دریافت باقی‌مانده‌ها، ضرورت دارد که بررسی کاملی بر روی آن‌ها انجام شود تا بتوان خرابی‌ها را به درستی تشخیص داد. بنابراین، باقی‌مانده‌ها نمی‌توانند کمک قابل اتکایی در مورد تشخیص خرابی‌ها محسوب شوند [۱۰].

در سال‌های گذشته، مطالعاتی انجام شده تا یک قطعه مینیاتوری ساخته شود که بتواند به سیستم توزیع متصل شود و محل دقیق وقوع خرابی را مشخص نماید. تشخیص محل خرابی می‌تواند باعث کاهش نیروی انسانی مصرفی برای یافتن عیب باشد و می‌تواند با محدود نمودن زمان خاموشی، کیفیت بی‌چون و چرای ذخیره برق را تضمین نماید. با پیشرفت‌هایی که در زمینه میکروکنترلرها و GSM[۱] و استراتژی‌های تطبیقی و قدرتمند Arduino حاصل شده، راه روشنی به سمت یافتن محل خرابی‌ها پیدا شده است [۲]. در یک طرح نوآورانه که Moamin A Mahmoud و همکارانش به انجام رساندند، از یک ساعت بلادرنگ[۲] استفاده شد. در این طرح، سیگنال‌هایی که توسط این ساعت تولید می‌شوند، در محدوده‌های زمانی مختلفی با flagهای مربوط به خود قرار می‌گیرند. بنابراین با تحلیل سیگنال حاصله، تعیین محل خرابی امکان‌پذیر خواهد شد. البته تشخیص محل خرابی، به تخمین ولتاژهای نقطه مورد بررسی و جریان‌های عبور کننده از سیستم توزیع بستگی دارد. این طرح نوآورانه، دارای بخش‌های مرحله به مرحله است و در هر مرحله اجزای جدید و تکامل یافته‌ای ایجاد می‌کند که در حداقل زمان ممکنه، پاسخ لازم را ارئه می‌نمایند و خروجی‌های دقیقی دارند [۱۱].

۲. روش‌های پیش‌گویی خرابی

تا کنون، خرابی‌های یک سایت تولید برق (به‌عنوان مثال، اتصال یک فاز به زمین [۱۳ و ۱۴]) معمولاً توسط انسان مشخص و رفع شده است. با پیشرفت تکنولوژی و سیستم‌های قدرت، به منظور اطمینان از پایداری سیستم‌های مذکور و افزایش مقاومت این سیستم‌ها در مقابل عوامل طبیعی [۲۳ و ۳۸]، چندین روش از جمله Stockwell Transform پیشنهاد شده که تا کنون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است [۳۶]. البته خرابی‌ها در سیستم‌های قدرت اجتناب ناپذیر هستند اما می‌توان آن‌ها را به حداقل مقدار ممکنه رساند. در ادامه، چند روش مختلف که می‌توانند اطمینان‌پذیری شبکه‌های هوشمند را برای کاربران آن‌ها افزایش دهند، تشریح می‌گردد.

۲,۱. تکنیک مبتنی بر حرارت نگاری مادون قرمز[۳] (IRT) به کمک پرسپترون چند لایه[۴] (MLP)

این تکنیک بصورت غیرمخرب، خرابی‌ها و راه‌های پرهیز از آن‌ها را در یک ایستگاه کنترل، بررسی می‌کند. در این تکنیک، از روش‌های کامپیوتری و تکنولوژی هوش مصنوعی بهره‌گیری می‌شود تا با استفاده از تصاویر حرارتی مادون قرمز، خرابی تجهیزات سخت‌افزاری در

[۱] Global System for Mobile
[۲] real time
[۳] InfraRed Thermography
[۴] MultilLayer Perceptron

مراحل اولیه بروز مشکل، تشخیص داده شوند. از این‌رو، با پایبندی به این متدلوژی و استفاده از هوش مصنوعی روش غیرمخربی برای انجام تست‌های عیب‌یابی در ادوات الکتریکی ایجاد می‌شود. این متدلوژی، برای تشخیص عیب از MLP استفاده می‌نماید تا وضعیت حرارتی اجزای ایستگاه برق را با دقت ۷۹/۷٪ در گروه‌های «معیوب» و «غیرمعیوب» قرار دهد. حرارتی که در اجزای الکتریکی تولید می‌شود را می‌توان با حرارت نگاری مادون قرمز شناسایی نمود. IRT، آخرین وضعیت قطعات مختلف الکتریکی را با استفاده از یک دوربین مادون قرمز دریافت می‌کند. به کمک این اطلاعات، می‌توان با حرارت سنج[۱]این تصاویر را تجزیه نمود. حرارت سنج، وضعیت بخش‌های معیوب را در گروه‌های مربوطه درج می‌نماید [۱۵]. در طولانی مدت، اداراتی که به این امر تخصیص یافته‌اند، می‌توانند بخش‌های داغ شبکه را تجزیه و تحلیل نموده و سخت‌افزارهای معیوب را حسب مورد تعمیر نمایند. به مرور زمان، حرارت سنجی قطعات تکنیک مهمی برای پیش‌بینی و ممانعت از تغییر شکل قطعات الکتریکی شده است؛ زیرا ساختار محافظت شده و معقولی دارد. با ضعیف شدن یک قطعه الکتریکی، مقاومت آن در برابر عبور جریان افزایش و گرمای بیشتری را در طول خطوط انتقال ایجاد می‌نماید. انرژی گرمایی حاصل از یک قطعه الکتریکی، متناسب است با مقاومت آن قطعه و مربع جریان عبور کننده از آن [۱۶]. گسترش این گرما می‌تواند منجر به خرابی یک بخش الکتریکی و برافروخته شدن آن گردد. معمولاً وقتی که روال‌های IRT بکار گرفته می‌شوند، خرابی‌های الکتریکی ناشی از گرمای قطعات و نوع وضعیت خرابی آن‌ها با مراجعه به استانداردهای ΔT آن بررسی می‌شوند. به این روش، معمولاً چارچوب ارزیابی حرارتی نظری[۲]گفته می‌شود. در [۱۶]، قواعد ΔT مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۲,۲. تشخیص عیب با استفاده از امواج متحرک

در متد استفاده از موج متحرک، از انتقال و بازتاب امواج متحرک بین محل خرابی و ترمینال خط استفاده می‌شود. در «شکل ۱» دیاگرام استفاده از متد موج متحرک نشان داده شده است.

«معادله (۱)»، فاصله محل خرابی از نود آزمونگر[۳](F_d) را نشان می دهد که باید تعیین شود. t_1 مدت زمان صرف شده برای حرکت موج اولیه از نود آزمونگر به محل خرابی و t_2 مدت زمان صرف شده برای حرکت موج بازتابی از محل خرابی به نود آزمونگر می‌باشد.

$$F_d=v\,(t_2-t_1)/2 \quad (۱)$$

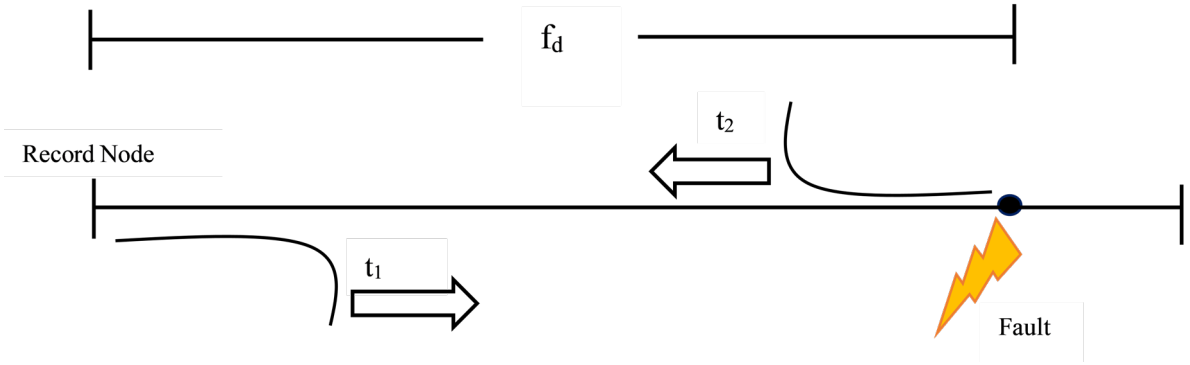
متد موج متحرک به ادواتی نیاز دارد که اولاً در دریافت اطلاعات، سریع باشند، ثانیاً به سنسورها، نشانگرهای عیوب موقتی و یک چارچوب بین المللی GPS[۴]نیاز دارد تا بتواند شکل موجی که از محدوده خرابی عبور می‌کند را دریافت کند [۱۶]. در [۱۶]، آزمونی برای خرابی‌های نه چندان مهم انجام شد و زمان آشکار شدن خرابی‌های آشکار شده با موج متحرک، با استفاده از GPS مشخص گردید. دقت این تکنیک برای یافتن خرابی به دقت تقریب‌های بکار رفته برای محدودیت‌های خط انتقال مانند اندوکتانس خط و ظرفیت خط بستگی دارد.

[۱] Thermograph

[۲] subjective-based temperature assessment framework

[۳] false distance

[۴] Global Positioning System



شکل ۱- متد استفاده از موج متحرک [۱]

مزیت استفاده از این تکنیک، این است که تحت تأثیر مقاومت بالا یا ترکیب بانک خازنی قرار نمی‌گیرد.

تکنیک دیگری در [۱۷] پیشنهاد شده است که در آن اطلاعات مربوط به موج عبوری با استفاده از حذف نویزموجک‌های آن در باس بارها[۱] ثبت می‌شود. موج عبوری حاوی اطلاعاتی در مورد خرابی و مرزهای قابل اندازه‌گیری آن می‌باشد که به یافتن عیب کمک می‌کنند. با این وجود، این تکنیک در مقایسه با تکنیک عیب‌یابی مبتنی بر GPS خطاهای بیشتری دارد؛ اگرچه هزینه‌های آن به دلیل عدم استفاده از ابزارهای جمع‌آوری اطلاعات GPS کمتر است.

تکنیک دیگری که در[۱۶] پیشنهاد گردیده، تکنیک عیب‌یابی مبتنی بر امواج متحرک ماندگار می‌باشد. در این تکنیک، از امواج متحرکی استفاده می‌شود که بین دو نقطه یک خط انتقال رفت و آمد می‌کنند. مزیت این تکنیک، این است که هم با اطلاعات همگام و هم با اطلاعات ناهمگام می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. یک تکنیک عیب‌یابی دو ترمیناله دیگر نیز در [۱۲] پیشنهاد شده است. در این تکنیک، ترکیبی از قواعد مربوط به موج متحرک و موجک‌ها برای عیب‌یابی استفاده می‌شود. همچنین، با تعیین مدت زمانی که موج متحرک اولیه به

دو نقطه حرکت می‌کند، فاصله محل انتشار موج تا نقطه خرابی مشخص می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که این تکنیک با قطعیت نقاط خرابی را مشخص می‌کند.

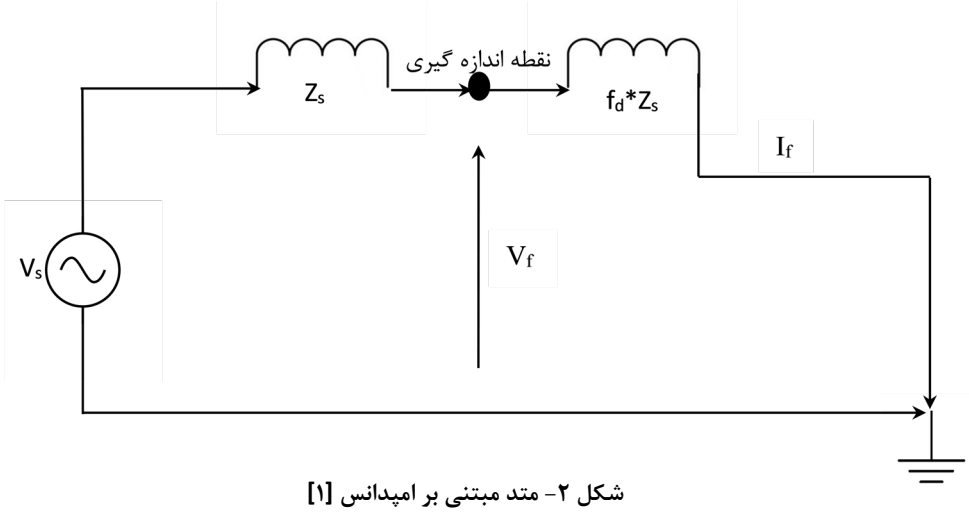
بررسی‌ها نشان می‌دهد که متد موج متحرک بیشتر در خطوط انتقال بکار گرفته می‌شود تا در خطوط توزیع. علتش هم حضور شعب جانبی و شعب فرعی در سیستم‌های توزیع است. مزیت این متد، آن است که مستقل از پیکربندی شرکت توزیع و تجهیزات موجود در آن است و عیب آن نیاز به ادواتی نظیر سنسور و GPS می باشد تا بتواند امواج عبوری را دریافت کند. این بدین معنی است که این سیستم از نظر اجرایی بسیار پر هزینه می‌باشد.

۲،۳. متد مبتنی بر امپدانس

این متد، به دلیل سادگی و بهره‌وری اقتصادی‌اش در مقایسه با متد مبتنی بر امواج متحرک، یکی از متداول‌ترین متدهای مورد استفاده در سیستم‌های قدرت است. مبنای این تکنیک، استفاده از تقریب‌های امپدانسی مشاهده شده از نودهای آزمونگر برای عیب‌یابی است. در «شکل۲»، دیاگرام این متد نشان داده شده است.

در این متد، از مقدار ولتاژ و جریان برای کشف امپدانس خرابی استفاده می‌شود. این یک استراتژی پیشرفته و منظم است و می‌تواند یک انتها یا دو انتها داشته باشد. استراتژی یک انتهایی، از ولتاژ و جریان ایستگاه برای عیب‌یابی استفاده می‌کند [۱۸]. استراتژی دو انتهایی، از ولتاژ و جریان دو دریچه توزیع برای عیب‌یابی استفاده می‌نماید.

[۱] باس بار، یک نوار فلزی رساناست که چند مدار را به یکدیگر متصل می‌نماید.



شکل ۲- متد مبتنی بر امپدانس [۱]

رویکردهای مختلفی برای پیدا کردن فاصله خرابی در خرابی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های مختلفی نظیر receptive segment (یک مفهوم کلیدی در طراحی و تحلیل شبکه‌های عصبی)، محاسبات Takagi و تکنیک‌های Girgis قبلاً بکار گرفته شده‌اند. هدف این متدها، اندازه‌گیری محدوده خرابی در چارچوب‌های کاری تخصیص یافته است. بخشی که مسئول ارائه پاسخ در این متد است، راکتانس آشکار شده خط را از نود آزمونگر به محل خرابی اعلام می‌نماید و پس از آن، راکتانس مذکور را با هدف حذف شدن، تغییر می‌دهد. تحقیقات قبلی [۱۶] به منظور عیب‌یابی، نسبت receptive segment امپدانس آشکار شده به راکتانس خط را تعیین کرده‌اند. این تحقیقات همچنین تأثیر ظرفیت خط بر روی محدوده خرابی را مورد توجه قرار داده‌اند. با این وجود، نقطه ضعفی که برای این روش وجود دارد، این است که به پایداری خرابی توجه ننموده است. بنابراین، این تکنیک برای وضعیت‌هایی که فاقد خرابی هستند، قابل بکارگیری نیست و احتمالاً دارای خطاهای قابل توجهی می‌باشد. در محاسبات Takagi از عبور مجدد جریان و ولتاژ ، قبل از خرابی (یا در حین خرابی) استفاده می‌شود و مشاهده شده که عملکرد خوبی دارد [۱۶].

۲،۴. سیستم رله حفاظت

سیستم رله حفاظت را می‌توان به رله‌ها، مبدل‌های انرژی، مدار قطع کن‌ها و منبع انرژی کمکی تجزیه نمود. برای تعیین یک خرابی، باید به شرایط سیستم برق توجه داشت. شناخته شده‌ترین علائم مورد استفاده برای کشف خرابی، ولتاژ و جریان است [۱۹]. علاوه بر این، نور می‌تواند برای تشخیص یک خرابی از نوع قوس الکتریکی که در داخل جعبه تجهیزات کنترل و حفاظت الکتریکی ایجاد می‌شود، کمک کند. از این رو، با اندازه

گیری فشار درون یک مبدل، می‌توان امواج فشار تولید شده توسط یک خرابی را شناسایی نمود. ترانسفورماتورهای ابزار[۱] را معمولاً با عناوین VT (ترانسفورماتور ولتاژ که به آن ترانسفورماتور پتانسیل (PT) هم گفته می‌شود)، CT[۳] (ترانسفورماتور جریان) و CVT[۴](ترانسفورماتورهای ولتاژ ظرفیتی) می‌شناسند. ترانسفورماتورهای ابزار اساساً شامل دو سیم‌پیچ هستند که حول یک هسته آهنی پیچیده شده‌اند. تفاوت CT با VT در این است که CT در ترکیبی استفاده می‌شود که در آن یک مسیر اصلی برای عبور جریان وجود

[۱] Instrument Transformer
[۲] Voltage Transformer
[۳] Current Transformer
[۴] Capacitive Voltage Transformer

دارد و VT به عنوان یک ابزار شنت به زمین (اگر ولتاژهای فاز به زمین مشخص باشند) یا بین فازها (اگر ولتاژهای فاز به فاز مشخص باشند) مورد استفاده قرار می‌گیرد. CTها و VTها سال‌ها بصورت بخش‌های اجتناب‌ناپذیری از شبکه‌های برق تلقی شده‌اند؛ زیرا دقت بالایی در تکرار جریان یا ولتاژ لازم در ترمینال‌های کمکی دارند.

۲,۵. استفاده از زیرساخت مانیتورینگ و سنسورها

سنسورها باعث هوشمندتر شدن شبکه‌ها می‌شوند و نقشی اساسی در کنترل ثابت سیستم‌های توزیع و انتقال برق ایفا می‌نمایند. بعلاوه، سنسورها برای مراقبت از پایداری و قدرت شبکه، یک عنصر حیاتی هستند [۲۰]. کنترل شبکه به تخمین و کنترل محدودیت‌های الکتریکی شبکه‌های انتقال و توزیع بستگی دارد.

سنسورها چند مقدار آستانه واقعی را در چارچوب کاری مورد نظر اندازه‌گیری می‌کنند از جمله مقدار انرژی ذخیره شده، ظرفیت خط توزیع، مدت برق‌رسانی، ظرفیت ایستگاه‌ها، ظرفیت خطوط انتقال، شناسنامه مصرف برق مشتریان و میزان مصرف. در میان سنسورهای مذکور، ترانسفورماتورهای ولتاژ و ترانسفورماتورهای جریان، بخش بزرگی از سیستم‌های هوشمند برق را به خود اختصاص داده‌اند. تعداد سنسورها و ابزارهای تخمین زننده در این‌گونه شبکه‌های برق و کنتورهای هوشمند (SM)[۱] و PMUها در حال افزایش است.

سنسورهای هوشمند[۲](SS) سنسورهایی هستند که قابلیت درک نحوه کارکرد اجزای شبکه را دارند. از جمله این سنسورها، می‌توان به سنسورهای فشار، جریان، حرارت، آب و هوا، ولتاژ و رطوبت اشاره نمود [۲۱].

۳. چارچوب‌های یادگیری ماشین برای پیشگویی خرابی تجهیزات

استفاده از تکنییک های مبتنی بر تکنولوژی یادگیری ماشین برای نگهداری پیشگویانه بویژه در ریز شبکه ها[۳] چندین مزیت دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش دقت پیش گویی بروز خطا در شبکه، آشکار سازی خطاها بصورت بلادرنگ، نظارت بر پایداری و سلامت شبکه در جهت افزایش عمر مفید شبکه و اجزای آن، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش عدم بهره‌وری احتمالی هر یک از دستگاه ها، افزایش تولید برق در شبکه، کنترل تعمیرات و غیره اشاره نمود [۶۲]. «شکل ۳» چارچوب کاری تعمیر و نگهداری پیشگویانه مبتنی بر یادگیری ماشین در یک ریزشبکه را نشان می دهد.

۳,۱. متد SVM

در[۲۲]، یک روش مبتنی بر یادگیری ماشین پیشنهاد شده است که برای پاسخگویی به حوادث، بصورت تقریبی وضعیت‌های مختلف سیستم را پیش‌بینی می‌کند. این مدل پیشنهادی، مبتنی بر یک ماشین بردار پشتیبان[۴](SVM) چند بعدی است. ماشین‌های بردار پشتیبان به طور کلی در خوشه‌بندی[۵]داده‌های ورودی،طبقه‌بندی وهمچنین تحلیل رگرسیون نقش دارند [۶۲]. الگوریتم SVM معمولاً به دنبال نزدیک‌ترین میانگین‌ها (که به آن‌ها بردارهای پشتیبان گفته می‌شود) می‌گردد. سپس زمانی که نزدیک‌ترین میانگین‌ها شناسایی شدند، الگوریتم SVM، خطی را برای اتصال آن‌ها ترسیم می‌نماید. به دلیل دقت بالای این روش، SVM یکی از روش‌های محبوب یادگیری ماشین است که هم در تحلیل رگرسیونی و هم در مسائل طبقه‌بندی به کار گرفته می‌شود. SVM چند بعدی بکار گرفته شده در تحقیق مذکور، شاخص مربوط به مقاومت سیستم را در نظر می گیرد.

از جمله این شاخص‌ها، می‌توان به سطح کیفیت زیرساخت شبکه، مدت زمانی که هر کدام از اجزای شبکه می‌توانند در برابر حادثه مقاومت کنند، مسیر پیش‌بینی شده برای حادثه و شدت حوادثی که در آینده اتفاق می‌افتند، اشاره نمود. نتیجه عملکرد این مدل پیشنهادی، یکسری از داده‌های طبقه‌بندی شده از وضعیت‌های مختلف سیستم است که به دو دسته «قطع شده» و «عملیاتی» تقسیم

[۱] Smart Meters
[۲] Smart Sensor
[۳] Microgrids
[۴] Support Vector Machine
[۵] clustering

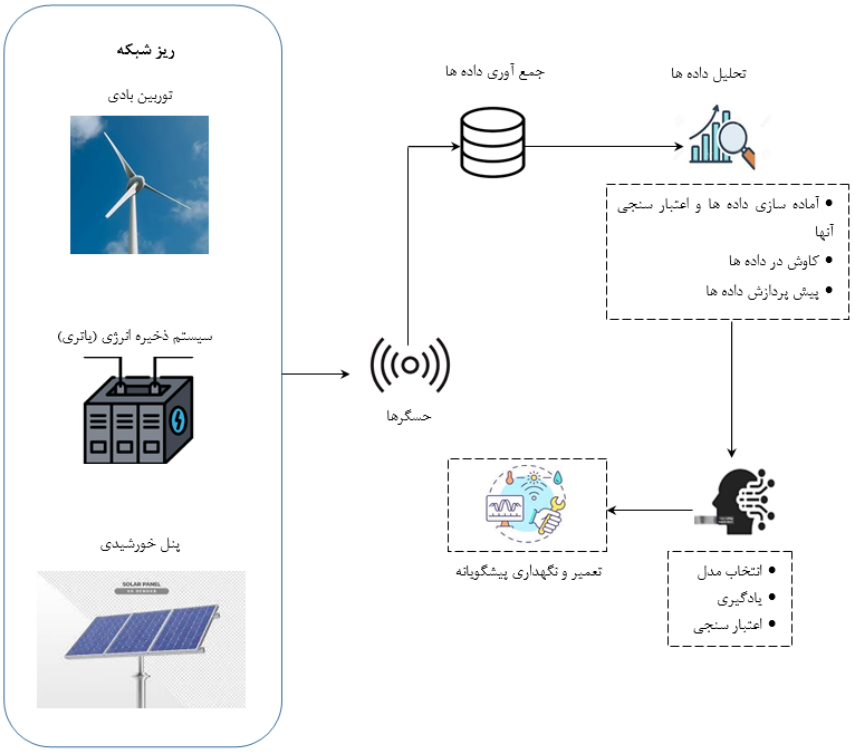
می‌شوند و می‌توانند برای برنامه‌ریزی منابع سیستم مورد استفاده قرار گیرند. عملکرد این مدل، از طریق شبیه‌سازی‌های عددی و معیارهایی برای عملکرد خوب، آزمایش شده است.

الگوریتم SVM در پیش‌بینی عمر باقی‌مانده مفید سیستم ذخیره‌سازی انرژی باتری در ریزشبکه‌ها[۱] و نگهداری پیش‌بینانه (PdM) پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی در یک سیستم ریزشبکه نیز مؤثر است[۶۲].

از دیگر مزایای استفاده از SVM، توانایی آن در مدیریت سیستم‌های غیرخطی و پیچیده است. با توجه به اینکه سیستم‌های ریزشبکه دارای روابط پیچیده و غیرخطی بین داده‌های ورودی و متغیر هدف هستند، استفاده از SVM در نگهداری پیش‌بینانه ریزشبکه‌ها بسیار مناسب می باشد .

۳,۲. الگوریتم Random Forest

برای مدل‌سازی اطلاعات با بُعد بالا، تکنیک جنگل تصادفی[۲](یا به اختصار RF) می‌تواند گزینه مناسبی باشد، چرا که توانایی مدیریت داده‌های طبقه بندی شده،[۳] پیوسته، دودویی[۴] و همچنین داده‌های ناقص را دارد. تکنیک RF شامل تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری مستقل است که می‌توانند به‌صورت گروهی عمل کنند.



شکل ۳- چارچوب کاری تعمیر و نگهداری پیشگویانه مبتنی بر یادگیری ماشین در یک ریزشبکه [۶۲]

[۱] microgrids
[۲] Random Forest
[۳] categorical
[۴] binary

به همین دلیل به آن جنگل تصادفی گفته می‌شود. این تکنیک می‌تواند برای انجام وظایف مرتبط با رگرسیون و طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گیرد. تکنیک‌های RF حتی زمانی که تعداد نمونه‌ها کمتر از تعداد متغیرها باشد، عملکرد خوبی دارند. در فرآیند RF، هر درخت یک پیش‌بینی برای کلاس انجام می‌دهد. در نهایت، خروجی الگوریتم، کلاسی است که بیشترین رأی را از درخت‌ها دریافت کرده باشد. یک پژوهش مبتنی بر مدل RF برای تولید تکنیک پیش‌بینی پویا پیاده‌سازی شده است [۶۲]. نسخه بهبودیافته‌ای از این پژوهش در تحقیق دیگری برای پایش توربین‌های بادی طراحی شده است [۶۲]. در این راستا، از داده‌های عملیاتی و داده‌های وضعیت برای طراحی روش RF استفاده شده است؛ داده‌های عملیاتی به عملکرد توربین‌های بادی مربوط می‌شوند و داده‌های وضعیت با هشدارهای فعال و غیرفعال مرتبط هستند.

۳,۳. استفاده از روش های شبکه عصبی مصنوعی[۱](ANN)

روش‌های شبکه عصبی مصنوعی به‌دلیل توانایی پردازش انواع وسیعی از اطلاعات غیرفازی، غیرخطی و تصادفی، نسبت به روش‌های سنتی یادگیری ماشین، بیشتر پیاده‌سازی شده اند. معماری‌های ANN از تکنیک‌های پرکاربرد محسوب می‌شوند به‌ویژه برای سیستم‌هایی که با داده‌های مبهم، ساختارهای پیچیده و در مقیاس بزرگ سر و کار دارند [۶۲].

شبکه عصبی برای انجام یادگیری، به یک داده آموزشی شامل نمونه‌های واقعی از مسائل نیاز دارد. اندازه این داده آموزشی باید متناسب با پیچیدگی و ساختار مسئله باشد. با این حال، داده آموزشی نباید بیش از حد بزرگ باشد زیرا در این صورت ممکن است قابلیت تعمیم‌دهی مدل کاهش یافته و عملکرد کلی الگوریتم افت کند. بنابراین، برقرار کردن تعادل مناسب بین یادگیری بیش‌ازحد و تعمیم‌دهی مدل از اهمیت بالایی برخوردار است. تعدادی از محققان از معماری‌های ANN در حوزه نگهداری پیش‌بینانه سیستم‌های قدرت استفاده کرده‌اند. برای نمونه، جهت شناسایی و طبقه‌بندی اختلالات کیفیت توان (PQ)، در شرایط محیطی نویزدار و دینامیک، این روش کاربرد گسترده‌ای داشته است. مدل‌هایی با قابلیت شناسایی آنی اختلالات، بر پایه معماری ANN نیز ارائه شده‌اند[۶۲]. این تکنیک می‌تواند اختلالات PQ تکی و ترکیبی را به‌صورت بلادرنگ طبقه‌بندی کند.

ANN در تشخیص ناهنجاری پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در یک تحقیق، سیستم PdM مبتنی بر ANN برای سیستم‌های PV پیاده‌سازی شده است. با مقایسه تولید توان AC پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده، الگوریتم تشخیص ناهنجاری وارد عمل شده است بطوریکه نرخ تشخیص آن بیش از ۹۰٪ گزارش شده است[۶۲].

در زمینه تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه توربین‌های بادی نیز از ANN استفاده شده است. در [۶۲] که برای مقابله با مدل غیرخطی مبدل‌ها در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه[۲](DFIG) انجام شده، از معماری ANN جهت شناسایی اتصال کوتاه بین دورهای سیم‌پیچ استفاده شده است.

ANN می‌تواند احتمال خرابی تجهیزات، سلامت سیستم و طول عمر باقیمانده اجزای ریزشبکه را پیش‌بینی کند. با این حال، در پیاده‌سازی آن باید هزینه محاسباتی بالا و حساسیت به داده‌های پرت[۳]نیز در نظر گرفته شود. در «شکل ۴» مراحل اصلی تعمیر و نگهداری پیشگویانه مبتنی بر مدل ANN نشان داده شده است.

۳,۴. استفاده از سیستم‌های خبره فازی[۴](FES)

[۱] Artificial Neural Network

[۲] Doubly Fed Induction Generator

[۳] outliers

[۴] Fuzzy Expert Systems

منطق فازی[۱] که توانایی شبیه‌سازی تصمیم‌گیری و هوش انسانی را دارد، نوعی منطق احتمالاتی است که با منطق دودویی متفاوت است. در منطق دودویی، مقادیر تنها صفر یا یک هستند، اما در منطق فازی، مقدار متغیرها می‌تواند بین صفر تا یک تغییر کند. این ویژگی منطق فازی را به گزینه‌ای مناسب برای حل مسائل پیچیده در حوزه‌های جست‌وجو، کنترل و پاسخ‌گویی به سوالات تبدیل کرده است، زیرا دارای قابلیت تعمیم‌دهی بالایی می باشد.

منطق فازی در مطالعات مختلفی برای طبقه‌بندی و شناسایی خودکار خطاهای سیستم قدرت به‌کار رفته است [۶۲]. علاوه بر این، در معماری‌های منطق فازی تطبیقی[۲] قابلیت‌های یادگیری بر پایه الگوریتم ژنتیک یا شبکه عصبی مصنوعی به‌کار گرفته می‌شوند تا پارامترهای الگوریتم را تنظیم کرده و در نتیجه، عملکرد سیستم در نظارت بر پارامترهای اختلال کیفیت توان را بهبود دهند.

سیستم‌های خبره فازی می‌توانند ابزار مؤثری در مدیریت سیستم‌های ذخیره انرژی[۳] (ESS) در ریزشبکه‌ها باشند. در [۶۲] ، یک معماری کنترلی مبتنی بر FES پیاده‌سازی شده که توانایی کاهش نوسانات شبکه و همچنین افزایش طول عمر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را در ریزشبکه دارد.

سیستم‌های خبره فازی با تکیه بر قابلیت شبیه‌سازی تصمیم‌گیری انسانی و سازگاری با محیط‌های نامعین، ابزار مناسبی برای پایش، کنترل و تشخیص خطا در سیستم‌های قدرت و ریزشبکه‌ها هستند. ترکیب آن‌ها با تکنیک‌های یادگیری مانند ANN یا GA نیز می‌تواند کارایی و دقت آن‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. مفهوم یک سیستم خبره فازی در «شکل ۵» نمایش داده شده است.

۳,۵. استفاده از متدهای یادگیری عمیق[۴] (DL)

یادگیری عمیق شامل ساختارهایی مانند شبکه‌های باور عمیق[۵] شبکه‌های عصبی عمیق (DNNs)، شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) و شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) است. یکی از ویژگی‌های مهم در معماری‌های یادگیری عمیق، توانایی ذاتی در یادگیری خودکار ویژگی‌های بهینه از سیگنال ورودی است.

این معماری به دلیل توانمندی بالا در شناسایی الگوها و استخراج ویژگی‌ها، پتانسیل بالایی در تخمین، تشخیص و پیش‌بینی مسائل مختلف سیستم های قدرت دارد. به همین دلیل، در بسیاری از مطالعات اخیر برای کاهش اختلالات کیفیت توان (PQ)، کنترل بار خانگی و نگهداری پنل‌های خورشیدی (PV) از DL استفاده شده است[۶۲]. همچنین یک معماری مبتنی بر CNN برای نگهداری پیش‌بینانه پنل‌های خورشیدی در ریزشبکه‌ها طراحی شده است. در این روش، منحنی توان روزانه پنل خورشیدی بر اساس عملکرد پنل‌های همسایه پیش‌بینی شده و با مقدار واقعی مقایسه می‌شود. انحراف بالا در منحنی پیش‌بینی‌شده و واقعی نشانه‌ای از احتمال وجود مشکل در پنل مورد نظر است.

تکنیک‌های DL در پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده (RUL) باتری‌ها در سیستم‌های ذخیره انرژی ریزشبکه‌ها نیز نتایج امیدوارکننده‌ای نشان داده‌اند [۶۲].

۴. ترانسفورماتورهای قدرت

ترانسفورماتورهای قدرت از اجزای حیاتی در سیستم‌های قدرت به شمار می‌روند و خرابی آن‌ها می‌تواند منجر به اختلالات عملیاتی گسترده، خطرات ایمنی جدی و خسارات مالی قابل توجه شود. این تجهیزات در معرض طیف گسترده‌ای از تنش‌های درونی و بیرونی از

[۱] Fuzzy Logic
[۲] Adaptive Fuzzy Logic
[۳] Energy Storage Systems
[۴] Deep Learning
[۵] Deep Belief Networks

جمله تحمل بار حرارتی بیش از اندازه[۱]، شکست عایقی[۲] تنش‌های ناشی از اتصال کوتاه و خستگی مکانیکی[۳]قرار دارند. هر یک از این عوامل می‌توانند به تخریب سیستم عایقی منجر شوند و در نهایت باعث خرابی ترانسفورماتور گردند.

درک مکانیزم‌های خرابی و شناسایی پارامترهای مؤثر در پایش وضعیت ترانسفورماتورها برای جلوگیری از خرابی زودرس و افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق ضروری است. رویکردهای پیشرفته پایش مانند آنالیز گازهای محلول، سنجش دما و اندازه‌گیری تخلیه جزئی نقش مهمی در پیش‌بینی و تشخیص زودهنگام مشکلات ایفا می‌کنند.

در کنار مکانیزم‌های اصلی خرابی، پارامترهای دیگر پایش وضعیت و تکنیک‌های تشخیصی متنوع نقش مهمی در ارزیابی جامع وضعیت سلامت ترانسفورماتورها ایفا می‌کنند. ذیلاً به برخی از روش ها و ابزارهای تشخیصی اشاره می شود:

۱. تشخیص تخلیه جزئی[۴](PD)

تخلیه جزئی یکی از ابزارهای کلیدی برای شناسایی زودهنگام تخریب عایقی به‌ویژه در تجهیزات ولتاژ بالا است. فعالیت‌های PD معمولاً با استفاده از تجهیزات زیر اندازه‌گیری می‌شوند:

- حسگرهای انتشار صوتی[۵]
- حسگرهای فرکانس فوق‌العاده بالا[۶](UHF)
- کوپلرهای خازنی[۷]

این ابزارها قادر به شناسایی پالس‌های الکترومغناطیسی ضعیفی هستند که از نقص‌های عایقی یا حباب‌های داخلی تولید می‌شوند [۸].

۲. پایش دمای روغن سطحی و نقطه داغ سیم‌پیچ

دمای بالای روغن و سیم‌پیچ نشانگر عملکرد حرارتی ترانسفورماتور و فرآیند پیری ناشی از تحمل بار هستند. دمای زیاد موجب اتفاقاتی نظیر تسریع در تخریب پلیمرها و کاهش استحکام مکانیکی و قابلیت عایقی می شود.

۳. تحلیل ارتعاشات

تحلیل ارتعاش برای شناسایی مشکلاتی مانند شل‌شدن هسته و جابجایی سیم‌پیچ‌ها استفاده می‌شود.

۴. سیستم‌های[۸]SCADA

پارامترهای فوق از طریق کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده (SCADA) جمع‌آوری و مدیریت می‌شوند. این سیستم‌ها به مواردی از قبیل تشخیص از راه دور، تولید هشدارها و یکپارچگی با رله‌های دیجیتال برای مکان‌یابی خطا کمک می کنند. همچنین این سیستم‌ها بستر مناسبی برای مدل‌های نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی فراهم می‌کنند که در آن‌ها داده‌های گذشته و زمان واقعی تجزیه و تحلیل می‌شوند تا الگوهای قبل از وقوع خرابی شناسایی شوند.

۴,۱. الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تشخیص و پیش‌بینی خطا در ترانسفورماتورها

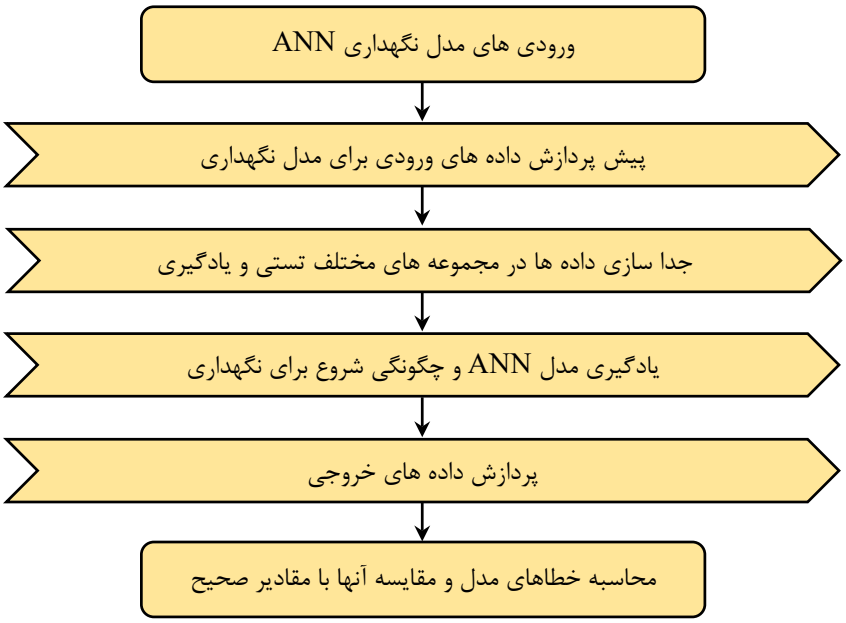
هوش مصنوعی نقش کلیدی در تحول مدل‌های نگهداری پیشگویانه ایفا کرده و روش‌های قدیمی مبتنی بر قوانین ثابت را به مدل‌های تطبیقی و داده محور با توانایی پردازش داده‌های غیرخطی و پیچیده تبدیل کرده است. پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تشخیص خرابی ترانسفورماتورها به شرح زیر می باشد:

۱. SVM : بسیار مؤثر در مجموعه داده‌های کوچک تا متوسط، مناسب برای طبقه‌بندی چندکلاسه، دقت بیش از ۹۰٪ در تشخیص انواع گازهای مربوط به خطاهای قوسی، حرارتی و تخلیه جزئی.

---

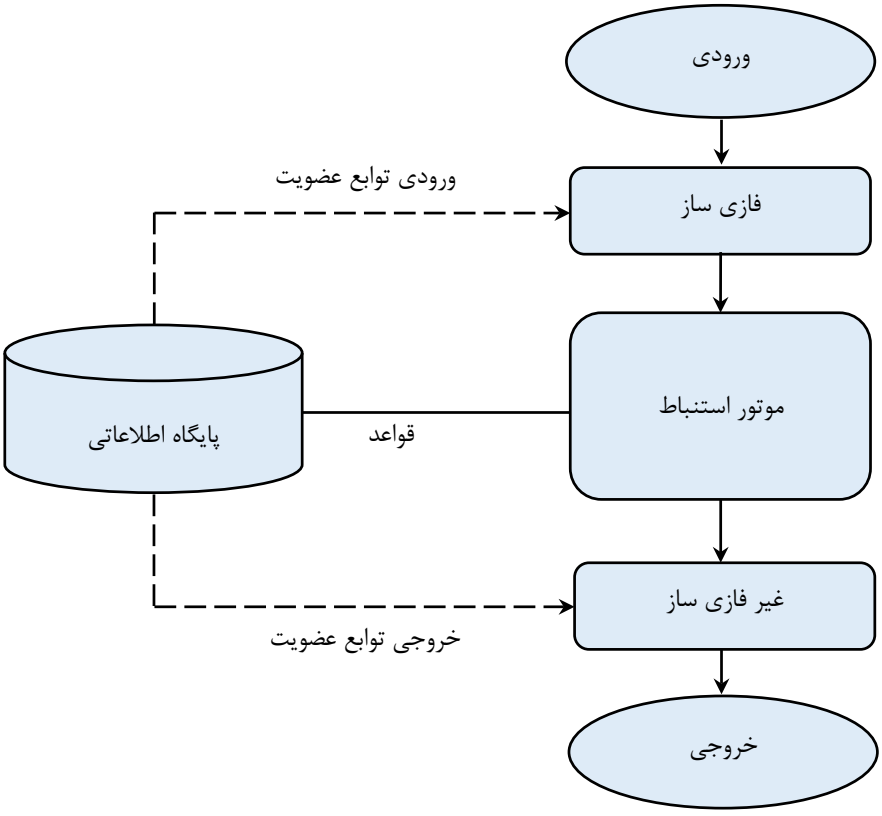
[۱] Thermal Overloading
[۲] Dielectric Breakdown
[۳] Mechanical Fatigue
[۴] Partial Discharge
[۵] Acoustic Emission
[۶] Ultra High Frequency
[۷] Capacitive Couplers
[۸] Supervisory Control And Data Acquisition

۲. درخت تصمیم و جنگل تصادفی: درخت تصمیم، ساده و قابل فهم است و جنگل تصادفی برای داده‌های با ابعاد بالا و عملکرد بهینه در طبقه‌بندی‌های پیچیده مناسب می باشد.
۳. ANN : این الگوریتم، توانایی نگاشت غیرخطی و مقاومت در برابر نویز را دارد و از عملکرد بسیار بالایی در پیش‌بینی خطاهای پیچیده برخوردار است.



شکل ۴- مراحل اصلی تعمیر و نگهداری پیشگویانه مبتنی بر مدل ANN [۶۲]

بنابراین، ترکیب تکنیک‌های پیشرفته پایش وضعیت و الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی امکان پیش‌بینی دقیق‌تر خرابی‌ها، افزایش طول عمر ترانسفورماتورها و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در تعمیر و تعویض تجهیزات را فراهم می‌سازد. مدل‌های آینده باید از ترکیب داده‌های چندمنبعی، مدل‌های یادگیری عمیق، و چارچوب‌های مقیاس‌پذیر بهره‌مند شوند تا پاسخگوی نیازهای شبکه‌های مدرن قدرت باشند.



شکل ۵- مفهوم یک سیستم خبره فازی [۶۲]

۴،۲. معماری‌های اینترنت اشیاء (IoT)[1] و سیستم‌های پایش مبتنی بر حسگر در ترانسفورماتورها

[1] Internet of Things

ادغام معماری‌های اینترنت اشیاء در اکوسیستم نگهداری ترانسفورماتورها، باعث تحول قابل توجهی در روش‌های سنتی پایش شده و پیشرفت‌های قابل توجهی را در زمینه‌های دقت داده، پاسخ‌گویی سیستم، و مقیاس‌پذیری عملیاتی به همراه داشته است.
حسگرهای IoT که به‌صورت دائم در واحدهای ترانسفورماتور نصب می‌شوند، قادر به جمع‌آوری بلادرنگ پارامترهای کلیدی از جمله جریان ،دمای سیم‌پیچ و روغن سطحی، رطوبت محیطی، غلظت گازهای محلول، سطوح ارتعاش و میزان رطوبت در عایق هستند.
این حسگرها داده‌ها را با وضوح بالا منتقل می‌کنند و امکان ادغام بدون وقفه با شبکه و پلتفرم‌های ابری برای ذخیره‌سازی و تحلیل داده ها را فراهم می‌سازند. در «شکل ۶» چارچوب تشخیص خرابی مبتنی بر هوش مصنوعی با استفاده از داده‌های آنالیز گازهای محلول نمایش داده شده است.

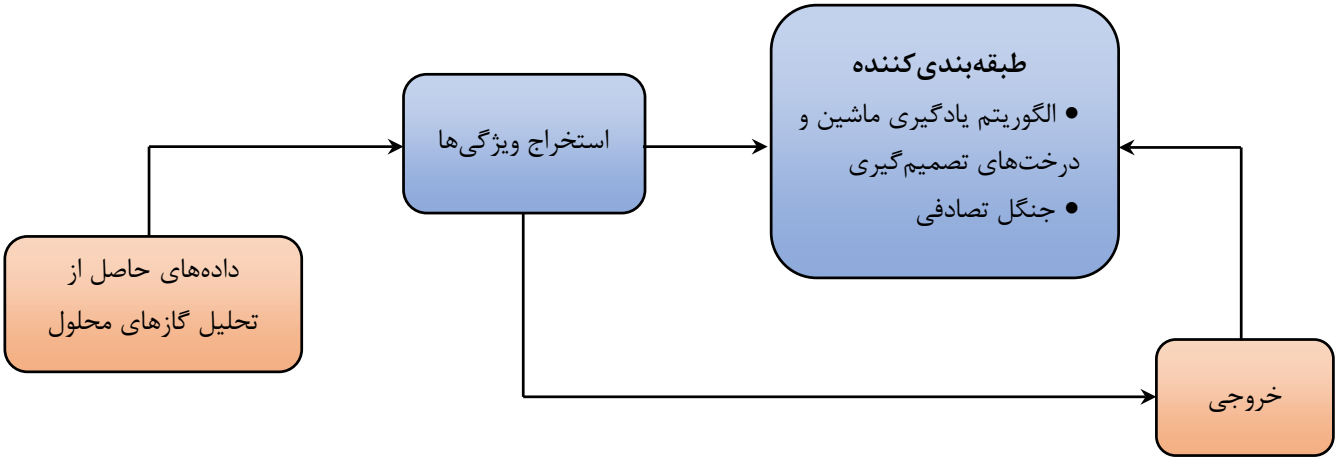
۴،۳. مدل‌های پیش‌بینی‌کننده ترکیبی و یکپارچه‌سازی دوقلوی دیجیتال

مدل‌های پیش‌بینی‌کننده ترکیبی، هوش مصنوعی و فناوری اینترنت اشیا را با هم ادغام می‌کند. این مدل تحول چشمگیری در مدیریت ترانسفورماتورها ایجاد نموده است [۶۳] و با فراهم نمودن امکان بینش عمیق‌تر، یادگیری تطبیقی و تصمیم‌گیری پویا را امکانپذیر می سازد. مدل مذکور با جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ از طریق اینترنت اشیا و قدرت تحلیلی و پیش‌بینی‌کننده هوش مصنوعی، یک معماری ویژه برای نگهداری پیشگویانه ایجاد می‌کند و به‌صورت مداوم عملیات پایش، ارزیابی و تصمیم‌گیری هوشمندانه را برای حفظ شرایط و عملکرد ترانسفورماتور انجام می‌دهد.
فناوری دوقلوی دیجیتال در خط مقدم این موضوع قرار دارد و شامل ایجاد نسخه‌های مجازی از ترانسفورماتورهای فیزیکی است که به صورت بلادرنگ با جریان‌های داده عملیاتی دریافت‌شده از حسگرهای تعبیه‌شده اینترنت اشیا همگام‌سازی می‌شوند. این نسخه‌های دیجیتال به‌صورت پویا رفتار عملیاتی ترانسفورماتورها را در شرایط مختلف تنش، عوامل محیطی، و سوابق بهره‌برداری شبیه‌سازی می کنند و بدین ترتیب امکان تشخیص زودهنگام ناهنجاری‌ها و پیش‌بینی بلندمدت عملکرد را فراهم می‌سازند.
مدل‌های پیشرفته مبتنی بر وضعیت تجهیزات، در کنار تحلیل‌های پیش‌بینی‌کننده برای تحلیل هزینه تعمیر و نگهداری در چرخه عمر تجهیزات، زمان‌بندی بهینه ای برای نگهداری و مدیریت موجودی قطعات یدکی ارائه می نمایند. معماری‌های ترکیبی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که با سامانه‌های مدیریت دارایی سازمانی(EAMS)[1]، SCADA و ابزارهای پشتیبانی تصمیم‌گیری به‌صورت بی‌نقص تعامل داشته باشند.
در نتیجه، سیستم‌های ترکیبی مبتنی بر هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و دوقلوی دیجیتال، با دقت بالای تشخیص، چابکی عملیاتی، و هماهنگی کامل، به شرکت‌های برق این امکان را می‌دهند تا از نگهداری واکنشی یا زمان‌بندی‌شده به سمت مدیریت با زیرساخت هوشمند و بهینه‌شده از نظر عملکرد حرکت کنند. طبقه بندی فرایندهای نگهداری پیش‌گویانه شبکه‌های هوشمند در «شکل ۷» نشان داده شده است.

۵. نگهداری پیش‌گویانه سیستم توزیع برق بر اساس شناسایی موجودیت‌های شبکه

اندازه‌گیری میزان بهره‌وری شبکه‌های قدرتی که هر یک از آن‌ها پیکربندی‌های مختلفی دارند، یکی از مشکلاتی است که تکنولوژی شبکه‌های قدرت امروزی با آن مواجه می‌باشد. مدل‌های فعلی ارزیابی میزان بهره‌وری شبکه به قدرکافی پاسخگوی چالش‌هایی که با برپاسازی شبکه‌ها بوجود می‌آیند، نیستند؛ زیرا فاقد یک چارچوب کاری مناسب برای انجام ارزیابی مناسبی هستند که بتواند شرایط کاری یک شبکه واقعی را با حداکثر میزان شباهت، شبیه‌سازی نماید و سناریوهای مختلف موجود در شبکه را مورد توجه و ارزیابی قرار دهد. Moamin A Mahmoud و همکارانش سیستمی برای ارزیابی شبکه‌های قدرت معرفی نمودند که بسیار انعطاف‌پذیر بوده و مبتنی بر شناسایی موجودیت اجزای شبکه می‌باشد و می‌تواند با انواع مختلف کارکرد شبکه‌ای جفت و جور شده و شبکه را ارزیابی نماید [۶۰].
تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده و کاربردهای جدید ابزارهای هوشمند ماشینی در تمام جنبه‌های زندگی روزانه ما نقش دارند.

[1] Enterprise Asset Management System



شکل ۶- چارچوب تشخیص خرابی مبتنی بر هوش مصنوعی با استفاده از داده‌های حاصل از آنالیز گازهای محلول **[۶۳]**

استفاده از مدل موجودیت‌ها، یک میان‌افزار برای ارزیابی عملکرد شبکه ایجاد می‌کند و بهترین راهکار برای ایجاد سیستمی است که با مفاهیم و معانی شبکه‌های قدرت آشنا بوده و در ارزیابی‌های خود دقت بالایی دارد و انعطاف‌پذیری لازم برای ارزیابی شبکه در سطوح متنوع را دارا می‌باشد. نحوه ارزیابی عملکرد شبکه در این سیستم، پیش‌گویی نمودن شدت خرابی و سپس تولید یک گزارش مناسب برای نگهداری شبکه‌ای با پیکربندی‌های مختلف است. این سیستم از سه مولفه اصلی تشکیل شده است که عبارتند از:

- ✓ GCT[۱] به معنی ابزار تولیدکننده پیکربندی
- ✓ FDM[۲] به معنی مدل پیشگویی خرابی
- ✓ HSP[۳] به معنی زیرساخت شبیه سازی هیبریدی.

[۱] Configuration Generator Tool
[۲] Failure Prediction Model
[۳] Hybrid Simulation Platform

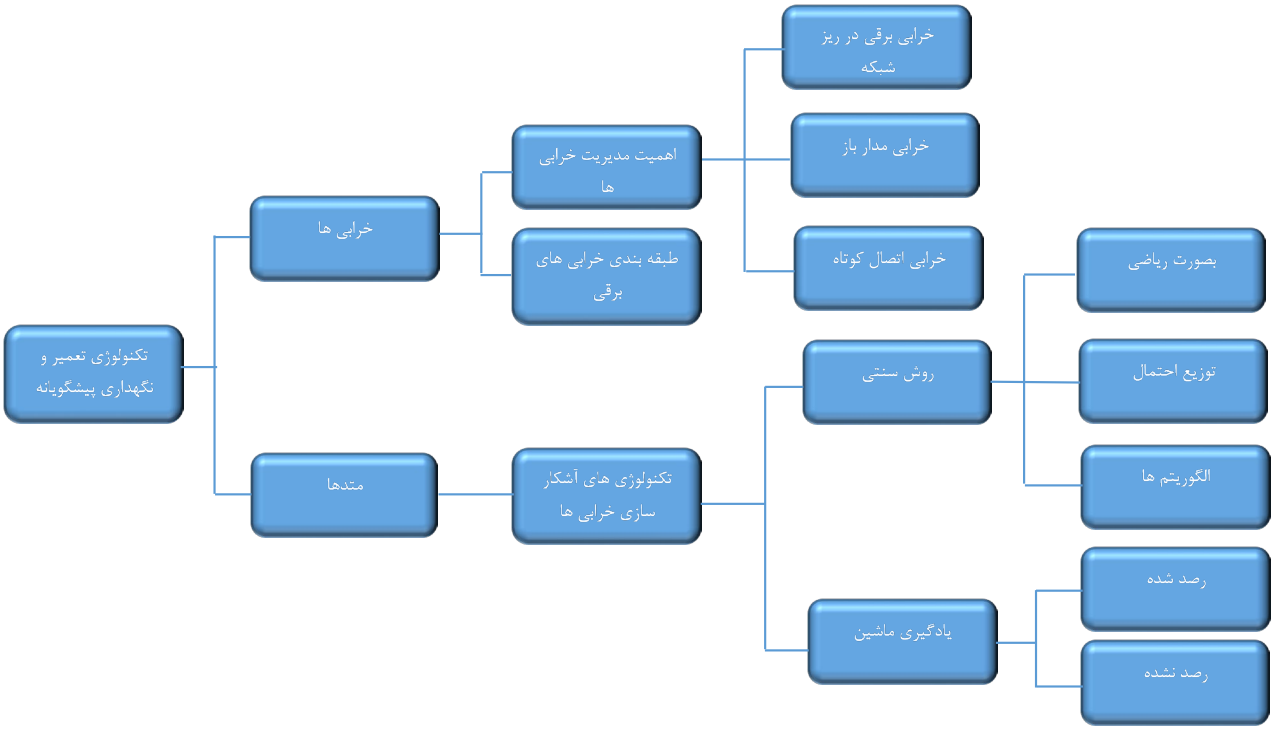
GCT یک سیستم مبتنی بر دانش است که ابزار قدرتمندی را در اختیار مهندسین برق قرار می‌دهد تا بتوانند پیکربندی‌های جایگزین را برای شبکه تولید نمایند. داده‌های مورد نیاز GCT را اظهاراتی تشکیل می‌دهند که توسط متخصصین امر، مورد تایید قرار گرفته‌اند . این داده‌ها با استفاده از زبان هستی شناسی[1] OWL که یک زبان هستی شناسی در وب است، مدل‌بندی می‌شوند.

HSP با استفاده از ۷ ابزار مدل‌گذاری و هستی شناسی نظیر Blender 3D Modeling، unity 3d، asp.net، my sql و apache Jena fuseki تولید شده است.

FDM نیز بر اساس تأثیری که وقایع منحصر بفرد بر عناصر شبکه قدرت می‌گذارند و ارتباط این وقایع یا عناصر شبکه و تأثیری که یک مولفه خراب بر سایر مولفه‌های شبکه می‌گذارد تولید شده است.

نهایتاً پیشگویی بر اساس دو متد مدل‌گذاری می‌گردد: متد پواسون و مدل تخمینی Likelyhood.

در سیستم پیشنهادی Moamin A Mahmoud و همکارانش، معانی و مفاهیم موجودیت‌های شبکه بین نرم‌افزارهای کاربردی مورد استفاده در سیستم و اجزای شبکه به اشتراک گذاشته می‌شوند. وقتی که تمامی اجزا از واژگان یکسان و مشابه استفاده کنند، مشکلات عادی که در خلال عملکرد متقابل نرم‌افزار کاربردی سیستم با شبکه بروز می‌نمایند به آسانی درک و حتی پیش‌بینی می‌شوند. موجودیت شناسی، حوزه کاربرد و خصوصیات نرم‌افزار کاربردی سیستم را پوشش می‌دهد و نه تنها می‌تواند با استفاده از واژگان استاندارد، یکپارچه‌سازی سیستم‌های درون شبکه را تقویت کند بلکه می‌تواند با استفاده مجدد از این تکنیک‌های هوشمند، عملکرد سیستم را نیز بهبود ببخشد.



شکل ۷- طبقه بندی نگهداری پیشگویانه ریز شبکه های هوشمند [۱]

[1] Web Ontology Language

۶. مقاوم‌سازی شبکه توزیع برق در مقابل حوادث طبیعی

در حال حاضر، شرکت‌های توزیع برق با انتظارات و تقاضای زیاد مشتریان خود مواجه هستند تا بتوانند بطور موثر نسبت به عواقب ناشی از حوادث فاجعه‌بار مثل طوفان که می‌تواند در کیفیت برق‌رسانی تأثیر گذاشته و در فعالیت آن وقفه ایجاد کند، پاسخ مناسب ارائه نمایند. در چنین شرایطی، مفهوم بهبود و افزایش مقاومت سیستم توزیع برق، یک معیار مهم در مدیریت ریسک جهت پاسخگویی به این چالش می‌باشد.

منظور از مقاومت سیستم، قابلیت سیستم در سازگار شدن با شوک‌های خارجی است. انواع مختلفی از شوک‌های خارجی وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به حوادث ناشی از آب و هوای نامطلوب و بلایای طبیعی اشاره نمود. عواقب مخرب این حوادث، باعث می‌شود تا استراتژی‌هایی را جهت مقابله با آن‌ها انتخاب کنیم تا این اطمینان حاصل شود که شبکه توزیع برق، حتی با وجود چنین حوادثی می‌تواند برق را به مشتریان خود عرضه کند بطوری‌که حتی اگر شبکه برق بطور قابل توجهی تحت تأثیر چنین حوادثی قرار گرفت، بتواند از وضعیت نیاز به کنترل، به شرایط عملکرد نرمال خودش بازگردد. در این زمینه، پیش‌بینی دقیق تأثیرات چنین طوفان‌هایی در شبکه برق، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا می‌توان از این پیش‌بینی برای دستیابی به چگونگی ایجاد مقاومت بیشتر در شبکه برق استفاده کرد.

مفهوم مقاومت در برابر خرابی برای سیستم‌های پیچیده، اولین بار توسط Holling [۲۴] تعریف شد. از نظر Holling، مقاومت یک سیستم یعنی نرخ و سرعت برگشتن سیستم از شرایط غیرنرمال به شرایط نرمال، بعد از بروز یک حادثه. هدف از مطالعه مقاومت، این است که با توجه به محدودیت‌های سیستم‌های توزیع برق و تأثیر مداوم این محدودیت‌ها در طراحی سیستم‌های مذکور و نیز تأثیر شدت شوک‌های خارجی وارد شونده به آن‌ها بتوانیم تغییرات ناشی از وقوع خرابی در سیستم را پیش‌بینی کنیم. در[۲۵]، تأثیر مقاومت سیستم در کاهش احتمال بروز خرابی بررسی شده است. همچنین در[۲۶]، روشی برای محاسبه مقاومت زیرساخت یک شبکه توزیع برق و اجزای آن ارائه شده است. در[۲۷]، روش تخصیص منابع Proactive با هدف بازیابی شبکه توزیع برق بعد از یک حادثه مخرب، پیشنهاد شده است. در [۲۸] و [۲۹]، یک چارچوب کاری برای بازیابی عملکرد اجزای مختلف سیستم قبل از بروز خرابی ناشی از حادثه، معرفی شده و به دنبال آن، یک مدل برای بازیابی قطعی و مدیریت منابع حادثه بعد از بروز حادثه معرفی شده است.

در[۳۰]، یک مدل بازسازی پیشنهاد شده است که با استفاده از مفهوم macroeconomic ارزش بار از دست رفته را تعیین می‌کند تا ضررهای اقتصادی ناشی از وقفه‌های ایجاد شده در مرحله پس از خرابی، به حداقل میزان ممکنه برسد. در[۳۱]، یک مدل تصمیم‌گیری برای پیکربندی سیستم پیشنهاد شده تا بعد از طوفان و در مرحله بازسازی شبکه برق آسیب دیده، بهترین فهرست فعالیت‌های بازیابی را تعیین نماید.

در [۳۲]، پیشنهاد شده که شاخص مقاومت یک شبکه برق، به کمک تجزیه و تحلیل فرآیند تولید، ارسال و مصرف برق در کشورهای مختلف مشخص شود. در [۳۲]، میانگین هندسی چند عامل مختلف مانند وابستگی بهره تولید سوخت‌های تجدیدناپذیر، بهره توزیع، و تنوع منابع سوختی مذکور مورد بررسی قرار گرفتند تا شاخص مقاومت ایجاد شود. در[۳۳]، روشی برای محاسبه شاخص مقاومت سیستم انتقال برق جهت بازیابی زیرساخت‌ها بعد از رخ دادن حادثه، پیشنهاد شده است. یک سیستم با چندین زیرساخت، شامل زیرساخت‌های انتقال برق و ارتباطات از راه دور، مورد بررسی قرار گرفته و معیارهای کیفیت و مقاومت در برابر شکنندگی شبکه، با مدل ورودی-خروجی این زیرساخت‌ها ترکیب شده‌اند. شاخص پیشنهادی، توسط داده‌های حاصل از طوفان کاترینا مورد ارزیابی قرار گرفته است تا مقاومت شبکه حین حوادث طبیعی ارزیابی شود. در[۳۴]، یک چارچوب کاری برای تقویت مقاومت سیستم‌های زیرساختی شهری، پیشنهاد شده است. معیار مقاومت مورد انتظار وابسته به زمان، بر اساس عملکرد و پاسخگویی شبکه توزیع برقی که دچار یک حادثه مهیب شده، بنا شده است. این فرآیند، در چند مرحله از جمله پیش‌گیری از بروز فاجعه، جلوگیری از گسترش آسیب و صدمه، ارزیابی و بازیابی اجرا شده است. مقاومت در برابر طوفان در شبکه‌های برق، با استفاده از یک مدل احتمالی، مدل پواسون برای وقوع طوفان‌ها، مدل شکنندگی اجزای شبکه و مدل بازسازی شبکه با اولویت بازسازی اجزای آن، تعیین شده است [۳۵].

در بسیاری از مسائل، یافتن راه حل با یک فرمول‌بندی مشخص به راحتی قابل دسترسی نیست. اما به کمک تکنولوژی یادگیری ماشین، برای یافتن راه حل، الگوریتم‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرد که قابلیت یادگیری با استفاده از داده‌های قبلی را دارند. این الگوریتم‌ها، می‌توانند داده‌های مشاهده شده را دسته‌بندی کنند (یادگیری قابل نظارت)، الگوهای شبیه به هم را برای خوشه‌بندی با هم ترکیب کنند (یادگیری بدون نظارت) و خروجی سیستم را با استفاده از رفتار و تاریخچه داده‌ها، پیش‌بینی نمایند (مدل‌سازی رگرسیون) [۳۷]. رویکردهای یادگیری ماشین، در تعداد قابل توجهی از تحقیقات حوزه برق و قدرت به کار گرفته شده‌اند [۳۹]. ارزیابی امنیتی شبکه برق، یکی از کاربردهای متنوع یادگیری ماشین در شبکه برق می‌باشد که اگر بخواهیم تعدادی از این کاربردها را نام ببریم، می‌توانیم به کاربردهای تشخیص الگو [۳۹]، ایجاد درخت تصمیم‌گیری و طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه [۴۰] اشاره کنیم. پیش‌بینی کردن، یکی دیگر از کاربردهای متداول یادگیری ماشین است. تعدادی از شبکه‌های عصبی هوشمند (ANNs) برای پیش‌بینی کوتاه مدت بار [۴۱] و پیش‌بینی قدرت باد [۴۲]، پیشنهاد داده شده‌اند. از مثال‌های دیگر کاربردهای یادگیری ماشین در شبکه برق، می‌توان به تجزیه و تحلیل ریسک با استفاده از مدل رگرسیون، ANNs و ماشین برداری پشتیبانی (SVM) [۴۳]، گسترش تشخیص خطا با بکار بردن ANNs و SVM [۴۴] و پیش‌بینی مدت زمان قطعی برق با استفاده از مدل‌های رگرسیون اشاره نمود [۴۵]. در[۶۱] ارزیابی جامعی از الگوریتم‌های دسته‌بندی و رگرسیون برای پیش‌بینی خطا در سامانه‌های شبکه هوشمند ارائه شده است. این الگوریتم ها از داده‌هایی استفاده می کنند که از قبل‌نمونه برداری‌شده اند.

در[۴۶]، یک مدل SVM سه بعدی پیشنهاد شده است که احتمال قطع شدن اجزای مختلف شبکه برق توسط طوفان‌ها را پیش‌بینی می‌کند. مدل پیشنهادی SVM، با استفاده از تاریخچه داده‌ها با سه ویژگی تحت یادگیری قرار می‌گیرد. این ویژگی‌ها، عبارتند از اندیس مقاومتی اجزای مختلف سیستم، فاصله اجزای سیستم تا مرکز طوفان و نوع طوفان که به سرعت طوفان بستگی دارد.

در[۴۷]، یک روش SVM سه بعدی بکار گرفته شده تا وضعیت اجزای مختلف سیستم و مرز تصمیم‌گیری برای وضعیت‌های «صدمه دیده» یا «دایر» تعیین شود.

۷. متدهای قابل استفاده برای تحلیل خرابی های شبکه هوشمند

چک کردن مداوم سیگنال‌های جریان و ولتاژهای تولید شده توسط ادوات هوشمند یک شبکه هوشمند، تکنیک ویژه‌ای برای تحلیل خرابی‌ها در شبکه به شمار می‌رود [۴۸]. تحلیل نقاط ضعف شبکه با استفاده از جدیدترین اطلاعات دریافت شده از شبکه با تکیه بر بررسی‌های مبتنی بر مدل مارکوف یا آزمون موجک‌ها[۵] نیز روش مطلوبی می باشد [۴۹ و ۵۰ و ۵۱]. موجک، یک ابزار ریاضی برای تجزیه و تحلیل داده‌ها به ویژه پردازش سیگنال در طول زمان می‌باشد.

۷,۱. چالش‌های پیش روی شبکه‌های هوشمند

«شکل ۹»، چالش‌های پیش روی شبکه‌های هوشمند را نشان می‌دهد. امنیت، مهم‌ترین چالشی است که باید مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا هر آنچه که هوشمند است، می‌تواند به این شبکه سایبری وصل شود. شبکه‌های هوشمند نقش مهمی در تغذیه برق دارند و متصل نمودن آن‌ها به شبکه برق، خطرات زیادی را بر شبکه تحمیل می‌کند. امنیت سایبری یکی از چالش‌های کلی برای عملکرد صحیح چنین شبکه‌ای است[۶۴] زیرا هر تهدیدی در این شبکه، این احتمال را دارد که خطر را به حادثه‌ای برای تجهیزات برقی منازل و مردم درون شبکه تبدیل کند.

چالش دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، بازسازی خطوط است؛ زیرا خطوطی که از قبل برای کنترل الکتریکی شبکه ساخته شده‌اند قادر نخواهند بود با شبکه هوشمند پیشرفته و منابع تجدیدپذیر مربوطه کار کنند.

[۵] wavelet

چالش‌های ارتباطی، رتبه سوم چالش‌ها هستند؛ زیرا پروتکل‌های ارتباطی هنوز به خوبی در سیستم شبکه‌های هوشمند تعریف نشده‌اند. لذا چالش مذکور نقصی برای انتقال داده‌های این شبکه محسوب می‌شود.
چهارمین چالش، هزینه‌های سنگین ایجاد آن است و آخرین چالش هم عمومیت یافتن در سطح بین‌المللی برای چارچوب کاری آن می‌باشد.

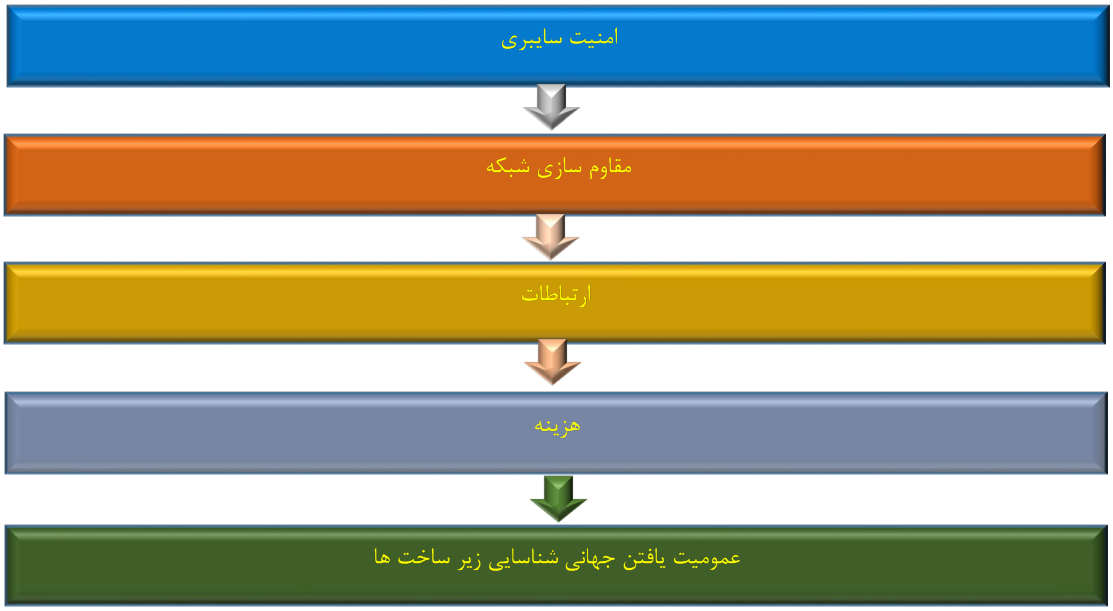
۷,۲. امنیت سایبری

در سیستم‌های تولید و توزیع برق، ایجاد کنترل‌های بلادرنگ، ارتباطات شبکه‌ای برای انجام تحلیل‌ها، شناسایی تهدیدات و استفاده از امکانات ارتباطی به منظور کنترل و تحلیل شبکه به طور وسیعی احتمال حملات سایبری در سیستم‌های کنترلی شبکه را افزایش می‌دهد. با افزایش شبکه‌های متکی بر زیرساخت سایبری، کامپیوتری‌سازی وکنترل‌های بیشتر وارد عرصه شبکه الکتریکی گردید [۵۲].
حملات سایبری با نمایش اطلاعات نادرست به راهبران شبکه، باعث ایجاد اختلال در شبکه و صدور هشدارها و پیغام‌های خطای نادرست می‌گردند. متدهای معمول برای حمله به یک سیستم شبکه هوشمند عبارتند از حمله از طریق: کامپیوتر، تجهیزات و کابل‌های شبکه، یک ترمینال در شبکه یا یک ترمینال دور دست. در صورت انجام چنین حملاتی، ضروری است که سیستم در اسرع وقت به وضعیت اولیه برگردد اما نه فقط با مدیریت حملات سایبری بلکه با رفع اختلالاتی که با وارد شدن صدمات فیزیکی به تجهیزات شبکه ایجاد شده‌اند.

۷,۳. برقراری امنیت سایبری و یکپارچگی داده‌ها هنگام نگهداری ترانسفورماتورها بر اساسAI-IoT

افزایش استفاده از هوش مصنوعی و اینترنت اشیا در سامانه‌های نگهداری پیشگویانه برای ترانسفورماتورهای قدرت، فضای جدیدی از پیچیدگی و ریسک را به‌ویژه از نظر امنیت سایبری و یکپارچگی داده‌ها ایجاد نموده است. این سیستم‌های هوشمند بر پایه شبکه‌های گسترده‌ای از دستگاه‌های متصلبه شبکه قدرت مانند شبکه‌های حسگر بی‌سیم[۵۲]گره‌های محاسباتی و بسترهای تجمیع داده‌های ابری طراحی شده‌اند که همگی ممکن است اهداف بالقوه‌ای برای حملات سایبری محسوب شوند.
شبکه‌های حسگر بی‌سیم شامل گره‌های حسگر با پراکندگی مکانی هستند که به‌صورت هم‌زمان امکان پایش چند نقطه‌ای در پست‌های برق یا مناطق توزیع‌شده شبکه را فراهم می‌کنند.

[۵] Wireless sensor networks



شکل ۹- چالش های پیش روی شبکه‌های هوشمند [۱]

ارسال بلادرنگ داده‌ها از طریق این گره‌ها در صورت عدم محافظت کافی ممکن است در معرض دسترسی غیرمجاز، جعل اطلاعات یا شنود داده‌ها قرار گیرد. چندین مطالعه نشان داده‌اند که زیرساخت‌های PdM در برابر تهدیدات سایبری پیشرفته آسیب‌پذیر هستند [۶۵]. این حملات می‌توانند هم قابلیت اطمینان عملکردی و هم صحت خروجی‌های تشخیصی را به خطر بیندازند.

یکی از نگرانی‌های اصلی، خرابکاری یا دستکاری داده‌های پایش وضعیت مانند سطوح گاز، لرزش یا دمای حرارتی است که به عنوان ورودی الگوریتم‌های هوش مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حتی اختلالات جزئی یا مسموم‌سازی داده‌ها می‌تواند منجر به گمراهی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، تاخیر در شناسایی خطا یا اقدامات نگهداری غیرضروری شود .در ایستگاه‌های برق و محوطه‌های ترانسفورماتور، نبود رمزنگاری سرتاسری [۶۵] ، مکانیزم‌های احراز هویت قوی و سامانه‌های شناسایی نفوذ، آسیب‌پذیری سامانه را به میزان زیادی افزایش می‌دهد

۷,۴. بازسازی خطوط شبکه

خطوط کنترل الکتریکی که قبلا در یک شبکه توزیع برق ایجاد شده‌اند قادر به کار با شبکه‌های هوشمند پیشرفته و منابع انرژی تجدیدپذیر مربوطه نمی‌باشند. از این‌رو، شاید لازم باشد تا دستورالعمل مربوط به اتصالات داخلی شبکه توزیع به گونه‌ای توسعه یابد که سطوح بالاتری از کنترل‌ها نظیر کنترل ولتاژ پایین را پوشش دهند [۵۳]. همچنین به مرور زمان، پارامترهای الکتریکی و مکانیکی زیرساخت‌های شبکه و خطوط انتقال نیز تغییر می‌یابند. عملکرد اجزای شبکه نیز که در طی زمان فشارهای الکتریکی و مکانیکی و نیز فشارهای طبیعی مانند باد، برف، گرد و خاک و غیره را متحمل شده‌اند و دچار زنگ‌زدگی و فرسایش شده‌اند تحلیل می‌رود [۵۴]. بازسازی خطوط شبکه را می‌توان بخشی دائمی از اکوسیستم شبکه توزیع برق دانست. **۷,۵. ارتباطات**

شبکه هوشمند، تمامی اجزای یک سیستم توزیع برق را با یکدیگر هماهنگ می‌سازد تا عملکرد شبکه را ارتقا دهد. بخش اعظم هماهنگ‌سازی شبکه به سیستم‌های ارتباطی و چارچوب‌های کاری IT مربوط می‌شود. دسترس‌پذیری پایدار به ارتباطات دیجیتال پر سرعت دو طرفه برای سیستم‌های توزیع برق پیشرفته امروزی یک ضرورت محسوب می‌شود. اکنون دیگر معنی ندارد که شبکه‌ای فاقد تکنولوژی‌های ارتباطی برای خود متصور باشیم. امروز، عملکرد متقابل و هماهنگ‌سازی کلیه اجزای شبکه بدون استفاده از تکنولوژی ارتباطات امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، درخواست برای دسترسی به اینترنت پر سرعت و نامحدود، به یک نیاز اضطراری برای شبکه‌های

توزیع تبدیل شده است [۵۵]. امروزه لازم است تا ارتباطات شبکه‌ای نظیر ارتباط با یک مشتری در شبکه توزیع به سرعت با دسترسی به اینترنت صورت پذیرد. اگرچه اینترنت، بدون برق وجود نخواهد داشت اما امروزه بدون اینترنت، برق نیز پایدار نخواهد ماند.

۸. یک پروژه نمونه نگهداری شبکه‌های هوشمند توزیع برق در ایران

علیرضا فریدونیان، استاد دانشگاه خواجه نصیرطوسی و محقق شبکه‌های توزیع به همراه گروهی از دانشجویان رشته‌های مرتبط موفق به طراحی نرم‌افزاری برای پیش‌بینی شاخص پایداری شبکه برق با استفاده از روش داده‌کاوی و ابزار هوش مصنوعی شده و دستورالعمل داده‌کاوی در شرکت‌های توزیع را نیز تهیه و به این شرکت‌ها ارائه کرده است [۵۶] .

اولین پیش‌بینی‌هایی که در صنعت برق انجام شد، پیش‌بینی بار الکتریکی مصرف شده در شبکه بود. یکی از اهداف مهم شرکت‌های توزیع و برق منطقه‌ای این است که بر مبنای اطلاعات آب‌وهوا، روزهای تعطیل و غیرتعطیل و سایر داده‌های محیطی، میزان تقاضای برق شهر یا کل کشور را پیش‌بینی کنند [۵۶].

با استفاده از داده‌های ثبت‌شده مربوط به حوادث و خرابی‌های شبکه برق، می‌توان الگوی آماری خرابی‌ها را پیش‌بینی نموده و از روی آن مقادیر دو شاخص اساسی فراوانی خرابی و تداوم خرابی را پیش‌بینی کرد. فراوانی خرابی یعنی سیستم برق یا دستگاه‌های شرکت تولید و توزیع برق، با چه فاصله زمانی خراب می‌شوند و تداوم خرابی (یا طول مدت خرابی) یعنی این‌که رفع خرابی و بازیابی خدمت برق‌رسانی چقدر طول می‌کشد.

البته داده‌های مذکور حتی با وجود ثبت خودکار در پایگاه داده‌ها، کم‌خطا نیستند! با این حال، الگوسازی و پیش‌بینی فراوانی خرابی و تداوم خرابی با تکیه به داده‌های فوق، با دقت و کیفیت خوبی حاصل می‌گردد.

یادگیری آماری و یادگیری ماشینی دو روش در داده‌کاوی هستند که با داده‌های دریافت شده از شبکه هوشمند برق می‌توانند الگویی برای توصیف رفتار شبکه ارائه دهند. بعد از این مرحله و رسیدن به الگویی برای پیش‌بینی رفتار شبکه، این سوال مطرح می‌شود که الگوسازی و پیش‌بینی شاخص‌های پایداری شبکه، فراوانی خرابی و تداوم خرابی در چه زمینه‌هایی می‌توانند به کار گرفته شوند.

مهم‌ترین فعالیت برای کاهش فراوانی قطع برق در شبکه‌های هوشمند توزیع برق، فعالیت نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه است. الگوی رفتاری شبکه هوشمند توزیع برق که با داده‌کاوی در پایگاه اطلاعاتی حوادث و خرابی‌های شبکه کشف شده، می‌تواند در برنامه‌ریزی موثرتر فعالیت‌های اصلاح و بهینه‌سازی شبکه و نیز در برنامه‌ریزی بازدیدها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه شبکه توزیع به کار گرفته شود. وقتی نگهداری تجهیزات به خوبی انجام می‌شود، انتظار داریم فراوانی قطع برق نیز کاهش یابد.

به منظور برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری، بررسی نقاط ضعف شبکه توزیع برق و کشف رخدادهای غیرعادی، باید خاموشی‌های رخ داده در شبکه را ردگیری کرد [۵۷]. مهم‌ترین وظیفه شرکت‌های توزیع برق، تأمین مطمئن و پایدار برق است که بایستی با حداقل خاموشی و ولتاژ استاندارد همراه باشد.

یکی از نرم‌افزارهای حوزه نگهداری شبکه‌های توزیع برق، نرم‌افزار ثبت حوادث ENOX است که می‌توان با کمک آن اطلاعات پایه شبکه، حوادثی که رخ می‌دهند و سایر مواردی از این قبیل را ثبت نمود و در نهایت، اطلاعات جامعی از خطاهای رخ داده (شامل زمان وقوع خطا، مدت زمان رفع خرابی، نوع خرابی و ...) که در پایگاه داده مربوط به ان سیستم ذخیره شده، استخراج نمود.

تکنیک تحلیل و آنالیز سری‌های زمانی و همچنین شبکه عصبی و درخت تصمیم از روش‌های پیش‌بینی خرابی تجهیزات شبکه برق هستند. مثلا در[۵۸]، یک تحلیل آماری پیشنهاد شده که به کمک آن، علل اصلی وقوع خرابی در شبکه توزیع برق مشخص می‌شوند. در[۵۹] نیز، یک مدل جامع برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان شبکه توزیع برق پیشنهاد شده است که از دو بخش مدل‌های خرابی شبکه توزیع برق و خاموشی‌های برنامه‌ریزی شده تشکیل شده است. این مدل جامع، متشکل از شبکه عصبی سه لایه و تحلیل خاکستری می‌باشد.

۹. نتایج و جمع بندی

با توجه به پیچیده تر شدن شبکه های توزیع برق، افزایش تقاضای مصرف از سوی مشترکین و ریسک های امنیتی موجود در شبکه های مذکور، پایدارنگاه داشتن توزیع برق در شبکه، به امری حساس و درخور توجه ویژه تبدیل شده است. دستیابی به توزیع پایدار و بدون وقفه، نیازمند پیاده سازی یک طرح جامع برای تعمیر و نگهداری شبکه توزیع ازسوی شرکتهای توزیع برق می باشد. رویکرد بسیاری از این شرکت ها ، استفاده از متدهای جدید و موثر برای تعمیر و نگهداری پیش گویانه شبکه های توزیع است تا بتوانند چالش های پیش رو را پیش بینی نموده و برای مقابله با آنها برنامه ریزی و اقدام نمایند. در این مقاله، ضمن بررسی چالش های گفته شده، روش های مختلفی برای تعمیر ونگهداری پیشگویانه شبکه توزیع بیان و بر استفاده از روش های فناورانه برای پیش گویی خرابی ها یا حملات سایبری شبکه تاکید گردیده است. همچنین نشان داده شد که با استفاده از روش های بیان شده، ناترازی ها، از کار افتادگی های شبکه یا حملات سایبری به شبکه توزیع را می توان به حداقل میزان ممکنه رساند و حتی حذف نمود. با ارجاع به مقالات مختلف، مشخص گردید که گرایش عمده تحقیقات در زمینه توزیع انرژی، بر استفاده ازمتدهای مبتنی بر تکنولوژی فناوری اطلاعات و کاربردهای هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و منطق فازی متمرکز شده است. نتایج تحقیقات نشان داده است که هر یک از متدهای مذکور می تواند منجر به نتایج مطلوبی برای تعمیر و نگهداری پیش گویانه شبکه های توزیع شود. زیر ساختهای شبکه نیز نیازمند تقویت یا تجدید ساختارند بطوریکه شبکه هدف، پتانسیل پیاده سازی تعمیر و نگهداری پیش گویانه را داشته باشد. البته نباید فراموش کرد که فراهم نمودن امکانات لازم برای برپاسازی یک شبکه توزیع امن و پایدار نیازمند سرمایه گذاری و صرف هزینه در این راه می باشد. در واقع، بررسی نسبت فایده به هزینه از پارامترهای مهم برای گرایش به تعمیر و نگهداری پیش گویانه شبکه های توزیع محسوب می شود. اما این گرایش حتی اگر پر هزینه هم باشد، در طولانی مدت آثار خود را در جهت صرفه جویی در هزینه های تعمیر و نگهداری و افزایش رضایتمندی مشترکین شبکه به جای خواهد گذارد.

مراجع

[1] Mahmoud, M.A.; Md Nasir, N.R.; Gurunathan, M.; Raj, P.; Mostafa, S.A. The Current State of the Art in Research on Predictive Maintenance in Smart Grid Distribution Network: Fault's Types, Causes, and Prediction Methods, A Systematic Review. *Energies* 2021, *14*,5078. https://doi.org/10.3390/en14165078

[2] Thomas, P. et al, Stand Alone Distribution Feeder Inter Area Fault Location Identification System for Indian Utility. In Proceedings of the 2020 IEEE 5th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, UP, India, 30-31 October 2020, pp. 258-262.

[3] Bhattacharya, B, Sinha, A., Intelligent Fault Analysis in Electrical Power Grids. In Proceedings of the 2017 IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), Boston, MA, USA, 6-8 November 2017, pp. 985-990.

[4] Korada, p., Devidas, A.R., Studying the impact of AC-microgrid on the main grid and its fault analysis, 2016-Bienn, In Proceedings of the 2016 Biennial International Conference on Power and Energy (PESTSE), Bengaluru, India, 21-23 January 2016.

[5] Skydt, M.R. et al, A probabilistic sequence classification approach for early fault prediction in distribution grids using long short-term memory neural networks, Meas. J. Int. Meas. Confed. 2020, 170, 108691.

[6] Sabir, R. et al, Open and Short Circuit Fault detection in Alternators using the rectified DC output voltage, In Proceedings of the 2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC), Singapore, 10-13 December 2018. pp. 1-7.

[7] Lau, S.K., Ho, S.K., Open-circuit fault detection in distribution overhead power supply network, J. Int. Counc. Electr. Eng. 2017, 7, 269-275.

[8] Wang, H. et al, Prediction of electrical equipment failure rate based on improved drosophila optimization algorithm, In Proceedings of the 2017 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), Guilin, China, 29-31 July 2017, pp. 1915-1921.

[9] Chaitanya, B.K., Yadav, A., An intelligent fault detection and classification scheme for distribution lines integrate with distributed generators, Comput. Electr. Eng. 2018, 69, 28-40.

[10] Marquez, J.J. et al, Diagnosis and Fault Mitigation in a Microgrid Using Model Predictive Control, In Proceedings of the 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Sevilla, Spain, 10-12 September 2018, pp. 1-6.

[11] Feng, D. et al, Optimization Method With Prediction-Based Maintenance Strategy for Traction Power Supply Equipment Based on Risk Quantification, IEEE Trans. Transp. Electrif. 2018, 4, 961-970.

[12] Wang, B. et al, High-Impedance Fault Detection ased on Nonlinear Voltage-Current Characteristic Profile Identification, IEEE Trans. Smart Grid 2016, 9, 3783-3791.

[13] Yu, J.J.Q. et al, Intelligent Fault Detection Scheme for Microgrids with Wavelet-Based Deep Neural Networks, IEEE Trans. Smart Grid 2017, 10, 1694-1703.

[14] Robson, S. et al, Fault Location on Branched Networks Using a Multiended Approach, IEEE Trans. Power Deliv. 2014, 29, 1955-1963.

[15] Ullah, I. et al, Predictive Maintenance of Power Substation Equipment by Infrared Thermography Using a Machine-Learning Approach, Energies 2017, 10, 1987.

[16] Gururajapathy, S.S. et al, Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 74, 949-958.

[17] Barik, M.A. et al, A decentralized fault detection technique for detecting single phase to ground faults in power distribution systems with resonant grounding, IEEE Trans. Power Deliv. 2018, 33, 2462-2473.

[18] Roostaee, S. et al, Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines, Prot. Control. Mod. Power Syst. 2017, 2, 16.

[19] Zhang, Z. et al, straživanje sustava zaštite releja mikro-rešetke, Teh, Vjesn. 2015, 22, 51-59.

[20] Hidayatullah, N.A. et al, Power Transmission and Distribution Monitoring Using Internet of Things (IoT) for Smart Grid, IOP Conf, Ser. Mater. Sci. Eng 2018, 384, 012039.

[21] Awalin, L.J., Rahmat, M.K., A Recent Development of Monitoring Devices on Smart Grid, E3S Web Conf. 2020, 186, 02004.

[22] Shafiullah, M. et al, Distribution Grids Fault Location employing ST based Optimized Machine Learning Approach, Energies, 11(9), 2328, 2018.

[23] L.M. Branscomb, Sustainable cities: Safety and security, Technol., Soc., Vol 28, no. 1, pp. 225-234, 2006.

[24] C.S. Holling, Reselience and stability of ecological systems, Annu. Rev. Ecol. Syst., pp. 1-23, 1973.

[25] N.O. Attoh-Okine et al, Formulation of resilience index of urban infrastructure using belief functions, Syst. J. IEEE, vol. 3, no. 2, pp. 147-153, 2009.
[26] O.O. Aderinlewo, N.O. Attoh-Okine, Assesment of a Transportation Infrastructure System using Graph Theory, 2013.
[27] A. Arab et al, Stochastic Pre-Hurricane Restoration Planning for Electric Power Systems Infrastructure, Smart Grid IEEE Trans. on. vol. 6, no. 2, pp. 1046-1054, 2015.
[28] A. arab et al, Proactive Recovery of Electric Power Assest for Resiliency Enhancement, Access IEEE, vol. 3, pp. 99-109, 2015.
[29] A. Arab et al, Post-hurricane transmission network outage management, in Proc. IEEE Great Lakes Symp, Smart Grid New Energy Econ., pp. 1-6, 2013.
[30] A. Arab et al, Transmission network restoration considering AC power flow constrains, in 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 816-821, 2015.
[31] A. Arab et al, Electric Power Grid Restoration Considering Disaster Economics, 2016.
[32] L. Molyneaux et al, Resilience and electricity systems: A comparative Analysis, Energy Policy, vol. 47, pp. 188-201, 2012.
[33] D.A. Reed et al, Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure, Syst. J. IEEE, vol. 3, no. 2, pp. 174-184, 2009
[34] M. Ouyang et al, A three- stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems, Struct. Saf., vol. 36, pp. 23-31, 2012.
[35] M. Ouyang, L. Duenas-Osorio, Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems, Struct. Saf., vol. 48, pp. 15-24, 2014.
[36] Sharma. R. et al, Detection of Power System Faults in Distribution System Using Stockwell Transform, In Proceeding of the 2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, India, 24-25 February 2018, pp. 1-5.
[37] C.M. Bishop, Pattern Recognition, Mach. Learn. vol. 128, pp. 1-58, 2006.
[38] Executive Office of the President, Economic Benefits of Increasing Electric Grid Resilience to Weather Outages-August 2013.
[39] C.K. Pang et al, Security Evaluation in Power Systems Using Pattern Recognition, IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-93, no. 3, pp. 969-976, May 1974.
[40] D.J. Sobajic, Y.-H. Pao, Artificial neural-net based dynamic security assessment for electric power systems, IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, no. 1, pp. 220-228, 1989.
[41] A.D. Papalexopoulos et al, An implementation of a neural network based load forecasting model for the EMS, IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 4, pp. 1956-1962, 1994.
[42] G.N. Kariniotakis et al, Wind power forecasting using advanced neural network models, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 11, no. 4, pp. 762-768, 1996.
[43] S.D. Guikema, Natural disaster risk analysis for critical infrastructure systems: An approach based on statistical learning theory, Reliab. Eng. Syst. Saf., vol. 94, no. 4, pp. 855-860, 2009.
[44] D. Thukaram et al, Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems, IEEE Trans. Power Deliv., vol. 20, no. 2, pp. 710-721, 2005.
[45] R. Nateghi et al, Comparison and validation of statistical methods for predicting power outage durations in the event of hurricanes, Risk Anal., vol. 31, no. 12, pp. 1897-1906, 2011.
[46] C. Cortes, V. Vapnik, Support-vector networks, Mach. Learn., vol. 20, no. 3, pp. 273-297, 1995.
[47] Rozhin Eskandarpour et al, I mproving Power Grid Resilience Through Predictive Outage Estimation.
[48] Rajaei, N. et al, Fault current management using inverter-based distributed generators in smart grids, IEEE Trans. Smart Grid 2014, 5, 2183-2193.
[49] Samanta, S. et al, An approach for power system fault diagnosis using current samples towards smart grid operation, In Proceedings of the 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIES), Calcutta, India, 31 January-2 February 2014, pp. 743-746.
[50] Dhend, M.H., Chile, R.H., Efficient fault diagnosis in smart grid using non conventional mother wavelet function, In Proceedings of the 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, China, 25-28 October 2016, pp. 342-347.
[51] Ntalampiras, S., Fault Diagnosis for Smart Grids in Pragmatic Conditions, IEEE Trans. Smart Grid 2016, 9, 1964-1971.

[52] Rajendran, G. et al, Cyber Security in Smart Grid: Challenges and Solutions, In Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), Chennai, India, 21-23 August 2019, pp. 546-551.
[53] Bayindir, R. et al, The path of the smart grid –the new and improved power grid, In Proceedings of the 2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), Istanbul, Turkey, 21-25 March 2016, pp. 1-8.
[54] Hossain, E. et al, Utility Grid: Present Challenges and Their Potential Solutions, IEEE Access 2018, 6, 60294-60317.
[55] Baimel, D. et al, Smart Grid Communication Technologies, J. Powe Energy Eng. 2016, 4, 1-8.
[56] IRNA News Agency, https://www.google.com /amp/s/www.irna.ir/amp/85498647/, August 2024.
[57] Shervin Asadzadeh, Modeling and Optimal Prediction of Eqipment Failure Rate in Power Distribution Networks, Journal of Quality and Productivity in IRAN`s Power Industry- No. 15, 2019.
[58] Quiroga, O. et al, Fault Causes analysis in Feeders of Power Distribution Networks, Renewable Enegries and Power Quality Journal, vol. 1, no. 5, pp. 1269-1272, 2011.
[59] Kaigui, X. et al, Reliability Forecasting Models for Electrical Distribution Systems Considering Component Failures and Planned Outages, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 79, pp. 228-234, 2016.
[60] Moamin A Mahmoud et al, An Ontology-Based Predictive Maintenance Tool for Power Substation Faults in Distribution Grid, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 11, no. 11, 2020.
[61] J. Olalekan Awujoola et al, Machine Learning and Predictive Maintenance in Smart Grids, AI and Blockchain in Smart Grids, 2025.
[62] M. Y. Arafat, Machine Learning Scopes on Microgrid Predictive Maintenance: Potential frameworks, challenges, and prospects, School of Electrical and Data Engineering, University of Technology, Sydney, Renewable and Sustainable Energy Review (190), 2024.
[63] Md. Nuruzzaman et al, Predictive Maintenance in Power Transformers: A Syatematic Review of AI and IoT Applications, 1st Global Research and Innovation Conference, 2025.
[64] Alireza Joshan, Analyzing and optimization of smart grid operation using of machine learning algorithms: challenges and new solutions, Quarterly journal of Electrical and Computer Engineering-Kahroba, NO. 47, 2025.
[65] Mehdi Aref Khiabani, Smart grid: Technologies, pros. and cons., Quarterly journal of Electrical and Computer Engineering-Kahroba, NO. 46, 2024.

KNO-1301-5102

تحول فناوری در تله‌مدیسین، ربات‌های جراح و فناوری‌های پوشیدنی برای نظارت بر سلامتی، دوره نقاهت، پیشگیری، درمان و زنان باردار در مناطق محروم، شرایط بحرانی و جنگ در ایران

مهران کریمیان ریزی[1] mehrankarimian7395@gmail.com
کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی-بیوالکتریک، دانشگاه تبریز، ایران

چکیده: فناوری‌های نوین سلامت شامل تله‌مدیسین، ربات‌های جراحی و دستگاه‌های پوشیدنی هوشمند تحول عمیقی در ارائه خدمات بهداشتی-درمانی ایجاد کرده‌اند. این مقاله با مرور و بهره‌گیری از مطالعات داخلی و بین‌المللی نقش این فناوری‌ها را در بهبود دسترسی به خدمات سلامت در مناطق محروم ایران (سیستان و بلوچستان، کردستان، خراسان جنوبی و...)، شرایط بحرانی (زلزله، سیل، طوفان و...) و سناریوهای جنگی بررسی می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که تله‌مدیسین تا حدود زیادی هزینه‌های انتقال بیمار را کاهش می‌دهد ربات‌های جراحی ایرانی مانند سینا مدل فلکس امکان جراحی کم‌تهاجمی از راه دور را فراهم می‌کنند و د ستگاه‌های پو شیدنی نظارت مداوم بر علائم حیاتی را ممکن ساخته و مرگ‌ومیر پس از بحران را تا مقدار زیادی کم می‌کنند. چالش‌های اصلی شامل زیرساخت ارتباطی ضعیف، امنیت سایبری، تحریم‌ها، هزینه اولیه بالا و مقاومت فرهنگی است. شواهد حاکی از آن است که سرمایه‌گذاری هدفمند در این فناوری‌ها، همراه با تقویت زیر ساخت 5G، آموزش نیروی انسانی و تدوین سیا ست‌های حمایتی می‌تواند تاب‌آوری نظام سلامت ایران را به‌طور چشمگیری افزایش دهد و ایران را به صادرکننده منطقه‌ای فناوری سلامت تبدیل کرده و در مقابل بحران، جنگ و شرایط غیرعادی مقاوم سازد.

کلید واژه‌ها: *تله‌مدیسین، ربات جراحی، فناوری پوشیدنی، سلامت دیجیتال*

۱ مقدمه

ایران با مساحت بیش از ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع و پراکندگی جمعیتی گسترده و جمعیت زیادی از خود را در مناطق محروم، حاشیه شهرهای بزرگ و زاغه نشینی و روستایی ساکن دارد. تجربه بحران‌های طبیعی مکرر (زلزله بم و کرمانشاه، سیل سال ۱۳۹۸) و تهدیدات ژئوپلیتیکی (جنگ‌های قومی و مذهبی)، ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین سلامت را دوچندان کرده است. تله‌مدیسین، ربات‌های جراحی از راه دور و دستگاه‌های پوشیدنی سه ستون اصلی تحول دیجیتال در سلامت هستند که نه تنها در شرایط عادی بلکه در شرایط بحرانی و جنگی می‌توانند جان انسان‌ها را نجات دهند و هزینه‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش دهند[۱و۲]. این مقاله با مرور کلی و علمی موجود، به بررسی کاربرد، چالش‌ها، جایگاه منطقه‌ای و راهکارهای بومی‌سازی این فناوری‌ها در ایران می‌پردازد.

تله‌مدیسین در مناطق محروم و شرایط بحرانی ایران

تله‌مدیسین در ایران از دهه ۸۰ آغاز شد و در پاندمی کووید-۱۹ شتاب گرفت. وزارت بهداشت در سال ۱۴۰۴ گزارش داد که بیشتر دانشگاه‌های علوم پزشکی به پلتفرم‌های تله‌مدیسین متصل هستند و وی درباره شروع اجرای برنامه گفت: آغاز کار از روستاها و شهرهای زیر ۲۰ هزار نفر جمعیت است و در هر استان یک پایلوت تعیین شده که پس از ارزیابی و بررسی‌های لازم، به تدریج توسعه خواهد یافت. همه مراحل این برنامه در هفت کمیته کارشناسی شده و تصمیم‌گیری‌ها تلفیق شده است[۳].

در مناطق محروم، تله‌مدیسین فاصله جغرافیایی را حذف کرده است. در شرایط بحرانی و مانورهای نظامی این فناوری زمان رسیدن کمک تخصصی را از چند ساعت به چند دقیقه کاهش می‌دهد[۴].

چالش اصلی قطعی اینترنت و امنیت داده است که راهکار آن توسعه شبکه ملی اطلاعات و ارتباطات ماهواره‌ای بومی و ساخت ایران برای رسیدن به قیمت و امنیت مناسب و جلوگیری از وابسته سازی.

ربات‌های جراح و کاربرد آن‌ها در بحران و جنگ

ایران یکی از معدود کشورهایی است که سیستم جراحی رباتیک بومی تولید کرده. ربات «سینا فلکس» (Sina Flex) با ۷ درجه آزادی حرکتی دقتی مناسب و قابل مقایسه با دست انسان و قابلیت جراحی از راه دور روی شبکه G ارائه می‌دهد، در سال ۱۴۰۴ جراحی‌های موفق متعددی انجام داد و مطالعات بالینی آن تکمیل شد[۵،۷،۶و۸]. این ربات در بیمارستان‌های صحرایی و مناطق جنگی ایده‌آل است و جراح می‌تواند از تهران یا حتی خارج کشور بیمار را در خط مقدم عمل کند. تا آبان ۱۴۰۴ چهار دستگاه سینا فلکس در اندونزی نصب و وارد فاز آموزشی شد و هیئت جراحان عراقی از این فناوری بازدید کردند که نشان‌دهنده شروع صادرات منطقه‌ای است[۹،۷و۱۰].

فناوری‌های پوشیدنی و نظارت مداوم در دوره نقاهت و پیشگیری

با استفاده از دستگاه‌های پوشیدنی در بیماران قلبی مناطق محروم مراجعات اورژانسی را تا حد زیادی و هزینه‌های بستری و بیمارستان را کاهش می‌دهد. در شرایط جنگی لباس‌های هوشمند نیروهای مسلح با سنسورهای حیاتی، شوک و خونریزی داخلی را زودهنگام تشخیص می‌دهند. چالش اصلی دقت سنسورها در گرما و گردوغبار ایران و حریم خصوصی داده‌هاست اما بزرگترین مشکل همچون پیاده سازی تمام تکنولوژی‌های پیشرو درکشور، عدم دسترسی ایران به قطعات و زیرساخت‌های لازم به دلیل تحریم‌ها و تفاوت ارزش ریال با سایر ارزهای مبادله است.

جایگاه ایران در تله‌مدیسین و جراحی رباتیک خاورمیانه

ایران در سال ۲۰۲۵ یکی از پیشروترین کشورهای منطقه در حوزه جراحی رباتیک و تله‌جراحی است. ربات سینا فلکس تنها سیستم بومی خاورمیانه است که جراحی از راه دور واقعی (نه فقط آموزشی) روی شبکه 5G انجام داده و در سال ۱۴۰۴ واحدهای سوم و چهارم آن در اندونزی نصب شد و هیئت‌های عراقی و اندونزی برای خرید و آموزش به تهران سفر کردند[۹،۷و۱۰]. این در حالی است که کشورهای حاشیه خلیج فارس عمدتاً به da Vinci Surgical System آمریکایی وابسته‌اند و هنوز جراحی از راه دور کاملا بومی و واقعی انجام نداده‌اند.

بازار تله‌مدیسین خاورمیانه مستعد رشد زیادی به دلیل شرایط حاکم بر آن است، امارات و عربستان سرمایه‌گذاری سنگین در پلتفرم‌های تله‌مدیسین کرده‌اند، اما ایران با وجود تحریم به لطف تولید بومی ربات سینا و شبکه 5G همراه اول اولین کشور منطقه است که جراحی رباتیک از راه دور با تأخیر کمتر و مجاز انجام داده است[۱۱]. پزشکان ایرانی در سال ۱۴۰۴ توانسته‌اند مجاز به فعالیت رسمی در پلتفرم‌های اماراتی و عمانی با توجه به تغییرات قانون شوند و درآمد دلاری پایدار کسب کنند[۱۲].

ایران با سرمایه گذاری می‌تواند از واردکننده به صادرکننده فناوری سلامت منطقه‌ای تبدیل شده و در شرایط جنگی احتمالی و بحرانی برتری استراتژیک ایجاد کند.

زنان باردار و افراد آسیب‌پذیر

همه‌گیری کووید-۱۹ تأثیر عمیقی بر زندگی مردم سراسر جهان گذاشته و رشد پزشکی از راه دور را تسریع کرده است. با بلوغ فناوری و دسترسی آسان و کم‌هزینه به خدمات آنلاین از طریق موبایل بسیاری از بیماران، زنان باردار و مادرانی که به‌تازگی زایمان کرده‌اند توانسته‌اند از این روش بهره ببرند. در اوج این همه‌گیری بیمارانی که نیاز به ارزیابی، پیگیری و مداخله درمانی داشتند ناچار به انتخاب میان ملاقات حضوری با خطر انتقال و ابتلا به عفونت یا استفاده از پزشکی از راه دور بودند. این چالش به‌ویژه برای زنان باردار که نیازمند مراقبت‌های تخصصی دوران بارداری هستند جدی‌تر بود، زیرا خطر بالای عفونت در بیمارستان‌ها می‌توانست سلامت آن‌ها و نوزادشان را تهدید کند [۱۳و۱۴].

در این شرایط مراقبت‌های آنلاین دوران بارداری به‌عنوان جایگزینی مناسب مطرح شد که امکان دسترسی به اطلاعات بارداری و مشاوره‌ای پزشکی از راه دور را فراهم می‌کرد. علاوه بر این، این روش می‌توانست خدمات پزشکی را با هزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه‌تر ارائه داده و نابرابری در دسترسی به مراقبت‌های بهداشتی را کاهش دهد، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه یا مناطق محروم. بااین‌حال، برخی از زنان باردار ممکن است نسبت به میزان اعتبار و صحت اطلاعات آنلاین تردید داشته باشند. بنابراین اطمینان از کیفیت و ایمنی این خدمات و ایجاد اعتماد پایدار میان زنان باردار، ارائه دهندگان خدمات مامایی و فناوری‌های مورد استفاده در این برنامه‌ها امری ضروری است [۱۴].

افسردگی پس از زایمان[۵۳](PPD) یک مشکل جدی بهداشت عمومی است که پیامدهای نامطلوبی بر سلامت مادران، روابط زوجین، رشد عصبی نوزاد و همچنین رشد عاطفی و شناختی کودک دارد. این اختلال همچنان یک نگرانی عمده محسوب می‌شود و چالش‌های قابل توجهی را برای رفاه مادران، سلامت نوزاد و پیوند مادرنوزاد ایجاد می‌کند، به‌ویژه در شرایطی که موانع متعددی بر سر راه حمایت‌ها و مداخلات سنتی وجود دارد [۱۵و۱۶]. با همه‌گیری COVID-19 شیوع اختلالات خلقی و اضطرابی دوران پیرامون زایمان به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته بود و همزمان ارائه خدمات درمانی نیز به سمت پزشکی از راه دور (Telemedicine) تغییر جهت داده است [۱۷]. در این میان مداخلات پزشکی از راه دور و سلامت همراه[۵۴](mHealth) به‌عنوان راهکاری نویدبخش برای مدیریت افسردگی پس از زایمان مطرح شده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که این مداخلات می‌توانند به تشخیص زودهنگام و مدیریت مسائل سلامت روان کمک کرده و درعین‌حال مراقبت‌های پیشگیرانه را ارتقا دهند. تله‌مدیسین نه‌تنها یک روش مؤثر برای درمان افسردگی پس از زایمان در زنان است، بلکه تأثیرات قابل‌توجهی در کاهش اضطراب و بهبود عملکرد مادران در دوران پس از زایمان دارد [۱۵].

علاوه بر این، مراقبت‌های دوران بارداری[۵۵](ANC) که نقش کلیدی در نظارت و بهبود سلامت مادران و نوزادان دارد نیز می‌تواند از مزایای سلامت همراه بهرمند شوند. در کشورهای کم‌درآمد و با درآمد متوسط زنان باردار اغلب با چالش‌هایی مانند دسترسی محدود به اطلاعات و خدمات بهداشتی جامع مواجه‌اند. در چنین شرایطی مداخلات سلامت همراه، به‌ویژه مداخلات مبتنی بر پیامک (SMS) پتانسیل قابل توجهی در بهبود نتایج سلامت مادران و کاهش نابرابری‌های بهداشتی نشان داده‌اند [۱۸].

افسردگی پس از زایمان همچنان یک نگرانی عمده محسوب می‌شود و چالش‌های قابل توجهی برای رفاه مادران، سلامت نوزاد و پیوند مادر-نوزاد ایجاد می‌کند، به‌ویژه در مواجهه با موانع موجود در حمایت‌ها و مداخلات سنتی. بر اساس یک مرور سیستماتیک اخیر، شیوع جهانی افسردگی پس از زایمان (PPD) به ٪۳۴ می‌رسد. در مالزی نظرسنجی ملی سلامت و بیماری‌های مزمن در سال۲۰۲۲ گزارش داد که ٪۱۱/۲ از مادران دچار افسردگی هستند و ٪۹۰ از آن‌ها از علائم خود آگاهی ندارند، که این امر نگران کننده است. علاوه بر این، افسردگی پس از زایمان نه‌تنها تأثیرات مخربی بر سلامت مادر دارد، بلکه بر نوزاد و همچنین پیوند عاطفی و روابط آینده آن‌ها تأثیر می‌گذارد [۱۵]. حال با ترکیب این بیماری‌ها و شرایط بحرانی وضعیت خطرناک‌تر می‌شود.

[5] Postpartum Depression
[5] Mobile Health
[5] Ante Natal Care

چالش‌های مشترک و راهبردهای ملی

چالش‌های مشترک: زیرساخت ارتباطی، امنیت سایبری، تحریم و مقاومت فرهنگی[۱۹و۲۰]

راهبردهای پیشنهادی:

- تخصیص بودجه بیشتر و متناسب به فناوری دیجیتال در حوزه سلامت
- ایجاد «مرکز ملی تله‌جراحی و سلامت دیجیتال خاورمیانه» در ایران
- پوشش 5G و ماهواره‌ای ٪۱۰۰ کشور
- آموزش هزاران نفر متخصص سلامت دیجیتال متناسب به سیستم پیاده سازی شده
- ترغیب و ایجاد بسته های پیشنهادی به دکتر، مریض و مراکز درمانی

نتیجه‌گیری

فناوری‌های سلامت دیجیتال (تله‌مدیسین، ربات جراحی سینا فلکس و دستگاه‌های پوشیدنی هوشمند) دیگر صرفاً ابزارهای لوکس یا آزمایشی نیستند؛ بلکه به ستون‌های اصلی نظام سلامت و تاب‌آوری ایران تبدیل شده‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد:

- تله‌مدیسین می‌تواند هزینه‌های انتقال بیماران از مناطق محروم و بحران‌زده را کاهش دهد و زمان دسترسی به متخصص را در شرایط جنگی از چندین ساعت به چند دقیقه برساند.

- ربات جراحی سینا فلکس به‌عنوان تنها سیستم بومی خاورمیانه که جراحی واقعی از راه دور (نه صرفاً شبیه‌سازی آموزشی) را روی شبکه 5G با کمترین تأخیر انجام می‌دهد، در سال ۱۴۰۴ مطالعات بالینی را با موفقیت پشت سر گذاشت و چهار دستگاه آن به اندونزی صادر شد و هیئت‌های پزشکی عراق و چند کشور دیگر برای خرید و آموزش به تهران سفر کردند [۵،۶و۷]. این دستاورد ایران را از واردکننده کامل فناوری‌های جراحی رباتیک به صادرکننده منطقه‌ای تبدیل کرده و در شرایط تحریم برتری استراتژیک غیرقابل انکاری در بیمارستان‌های صحرایی و مناطق عملیاتی ایجاد کرده است.

- فناوری‌های پوشیدنی با کاهش مراجعات اورژانسی و هزینه‌های بستری در مناطق محروم و همچنین تشخیص زودهنگام شوک و خونریزی در نیروهای مسلح ثابت کرده‌اند که نظارت مداوم و هوشمند می‌تواند مرگ‌ومیر پس از بحران را کاهش دهد.

ایران در سال ۲۰۲۶ به‌رغم تحریم‌های سنگین کشوری در خاورمیانه است که همزمان:

- جراحی رباتیک واقعی از راه دور را عملیاتی کرده
- آن را به تولید انبوه و صادرات رسانده

این دستاوردها نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری هدفمند در سه حوزه کلیدی زیرساخت 5G و ماهواره‌ای بومی، تولید انبوه ربات سینا و پیشرفت تر از آن و آموزش گسترده متخصصان سلامت دیجیتال نه تنها تاب‌آوری نظام سلامت ایران را در برابر زلزله، سیل و تهدیدات جنگی به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، بلکه ایران را به هاب سلامت دیجیتال خاورمیانه و حتی جنوب شرقی آسیا تبدیل خواهد کرد. ادامه این مسیر با شتاب فعلی تا پایان دهه ۱۴۰۰ خورشیدی مرگ‌ومیر قابل پیشگیری در مناطق محروم و بحران‌زده را به سطح کشورهای توسعه‌یافته نزدیک خواهد کرد و جایگاه ایران را به «ارائه‌دهنده فناوری نجات‌بخش» در منطقه تغییر خواهد داد.

حال با توجه به مشاهدات و تجربه‌های دوران کرونا، جنگ خرداد ۱۴۰۴ و اسفند ۱۴۰۴ در ایران و وضعیت وخیم زایمان و زنان، نوزادان، مادران و نوزدان در شیردهی و مادران خردسال، افراد کهنسال و تمامی قشر های آسیب پذیر از شرایط بحرانی و استرس‌زا به

شدت به نرم افزارهای پشتیبانی و همراهی پزشکی و روانپزشکی نیاز است زیرا به دلیل طولانی شدن جنگ اثرات آن مخرب‌تر و هزینه جبران بسیار زیاد و بعضاً غیرقابل جبران می‌باشد.

بنابراین، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران سلامت و دفاعی کشور بودجه سلامت، توریست پزشکی و فناوری های حوزه بهداشت را افزایش و اولویت‌دهی به تولید و صادرات ربات سینا و پوشش ارتباطی ٪۱۰۰ کشور به اینترنت پرسرعت و امن به‌سرعت تصویب و اجرا کنند. آینده سلامت ایران دیگر در بیمارستان‌های فیزیکی محدود نیست؛ آینده در شبکه‌های هوشمند، ربات‌های بومی و داده‌ها قابل دسترس در هر نقطه ای از جهان زنده است.

مراجع

[1] مهدیان، سمیه و سجادی، حانیه السادات،۱۳۸۵،بررسی، کاربرد و اهمیت انواع تله مدیسین در مواجه با بلایای طبیعی،همایش سراسری راهکارهای ارتقاء مدیریت بحران در حوادث و سوانح غیرمترقبه،زنجان.

[2] اسکندری نسب، مسلم،۱۴۰۳،بررسی تاثیر تله مدیسین بر کاهش مراجعات غیرضروری در بیماران روستایی،دومین کنفرانس جهانی سلامت عمومی.

[3] https://dolat.ir/detail/467207)

[4] Teymourzadeh, E., Amiri-Ara, M., Yaghoubi, M. (2025). 'Analyzing the Challenges of Telehealth in War (with an Emphasis on the 12-day Sacred Defense) and Providing Practical Solutions', Journal of Military Medicine, 27(Special Issue 1), pp. 48-57. doi: 10.30491/jmm.2025.1006918.1375.

[5] https://sinamed.ir/news.

[6] https://www.surgicalroboticstechnology.com/videos/first-robotic-telesurgery-in-iran-using-sina-flex-robotic-telesurgery-system-over-5g-internet/.

[7] https://sinamed.ir/news/6905beffc330afd9253f8bd0.

[8] https://www.darmanna.ir/news/2791

[9] حسینی، سیدعلی و حسینی، سیدامید و صداقت، یسری،۱۴۰۰،معرفی ربات جراح سینا،اولین کنفرانس بین المللی پژوهش ها و دستاوردهای نو در علوم، مهندسی و فناوری های نوین.

[10] https://sinamed.ir/news/6905beffc330afd9253f8bd0

[11] https://mci.ir/news/-/view/1180138

[12] http://drpishkar.com/telemedicine-middle-east/

[13] NashP.Telemedicine and rheumatology. Joint Bone Spine. 2022 Nov;89(6):105439.doi: 10.1016/j.jbspin.2022.105439. Epub 2022 Aug 3. PMID: 35933086; PMCID: PMC9451505

[14] Wu H, Sun W, Huang X, Yu S, Wang H, Bi X, Sheng J, Chen S, Akinwunmi B, Zhang CJP, Ming WK. Online Antenatal Care During the COVID-19 Pandemic: Opportunities and Challenges. J Med Internet Res.2020 Jul22;22(7):e19916. doi: 10.2196/19916. PMID: 32658860; PMCID: PMC7407486.

[15] Siti Sabrina Kamarudin et al. JMIR Res Protoc. 2025 Kamarudin SS, Idris IB, Sharip S, Ahmad N. LoVE4MUM Mobile App to Prevent Postpartum Depression: Protocol for a Pilot Randomized Controlled Trial. JMIR Res Protoc. 2025 Jan 27;14:e63564. doi:10.2196/63564. PMID:39869891; PMCID: PMC11811676.

[16] Liu X, Huang S, Hu Y, Wang G. The effectiveness of telemedicine interventions on women with postpartum depression: A systematic review and meta-analysis. Worldviews Evid Based Nurs. 2022 Jun;19(3):175-190. doi:10.1111/wvn.12576. Epub 2022 Mar 29. PMID: 35349219.

[17] Wassef A, Wassef E. Telemedicine in perinatal mental health: perspectives. J Psychosom Obstet Gynaecol. 2022 Jun;43(2):224-227. doi: 10.1080/0167482X.2021.2024162. Epub 2022 Jan 6. PMID: 34989294.

[18] Mahamadou Kante et al. BMJ Open. 2025.

[19] Hosseini, S.M., Boushehri, S.A. & Alimohammadzadeh, K. Challenges and solutions for implementing telemedicine in Iran from health policymakers' perspective. BMC Health Serv Res 24, 50 (2024).

[20] Mehrolhassani MH, Yazdi-Feyzabadi V, Dehnavieh R, Bahaadinbeigy K, Kargar M. Barriers to Telemedicine Establishment in Iran: A Systematic Review. Iran J Public Health. 2025;54(4):739-750.

KNO-1301-5103

مسیریاب چند مقصدی: روشی برای محاسبه کوتاه‌ترین مسیر برای گذر یک‌باره از چندین نقطه بدون بازگشت به مبدا

محمدرضا سلمانی [۱] m.salmani@gmail.com

علیرضا محمودی‌فرد *[۲] alireza10.m10@gmail.com

[۱] دانشجوی کاردانی نرم‌افزار دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران

[۲] پسادکترای حرفه‌ای آینده‌پژوهی و استاد مدعو دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران

چکیده

یافتن کوتاه‌ترین مسیر ممکن برای گذر از چندین نقطه به شکلی که تنها یک‌بار از هر نقطه عبور کند، چالشی کلیدی در سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند و لجستیک شهری است که می‌تواند کاربردهای زیادی در حوزه‌های مختلف از زندگی روزمره گرفته تا سرویس‌های تحویل آنلاین کالا داشته باشد. روش‌های موجود مانند مسئله فروشنده دوره‌گرد (TSP) با وجود کارایی نظری، به‌دلیل الزام بازگشت به مبدا و عدم پشتیبانی از داده‌های پویا، کارایی محدودی در کاربردهای واقعی دارند. این مقاله الگوریتم مسیریاب چند مقصدی (MDR) را ارائه می‌کند که با استفاده از داده‌های زنده OpenStreetMap و ترکیب آن با بهینه‌سازی مبتنی بر گراف‌ها، این مسئله را به صورت کاربردی و با دقت صددرصدی حل کرده است. آزمایش‌های انجام‌شده روی داده‌های واقعی در کلان‌شهر تهران نشان‌دهنده کاهش ۱۶ درصدی مسافت و ۷ درصدی زمان محاسبات نسبت به روش‌های پایه است. این الگوریتم، به‌ویژه در زمینه سرویس‌های تحویل مدرن و برنامه‌ریزی شهری، گزینه‌ای عملی و کارآمد به شمار می‌آید.

کلید واژه‌ها: *مسیریاب چندمقصدی، الگوریتم MDR، OpenStreetMap، مسئله فروشنده دوره‌گرد (TSP)، سرویس‌های تحویل هوشمند*

۱ .مقدمه

در دنیای امروز، مسیریابی بهینه برای سیستم‌های حمل‌ونقل و لجستیک شهری یکی از مسائل کلیدی در بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها است. از آنجا که تعداد روزافزونی از داده‌های مختلف برای مسیریابی در دسترس قرار دارند، استفاده از این داده‌ها برای طراحی الگوریتم‌های بهینه اهمیت زیادی پیدا کرده است. در این راستا، مسائل مربوط به مسیریابی از جمله یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای عبور از چندین نقطه، به‌طور خاص در زمینه‌های حمل‌ونقل، تحویل کالا و برنامه‌ریزی شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [1].

یکی از مسائل کلاسیک در این زمینه، مسئله فروشنده دوره‌گرد (TSP) است که در آن هدف یافتن کوتاه‌ترین مسیری است که تمامی نقاط را بازدید کرده و در نهایت به نقطه شروع بازگردد [۲]. این مسئله به‌دلیل پیچیدگی بالا و زمان محاسباتی زیاد، به‌ویژه در مسائل واقعی که داده‌های پویا و نیازهای به‌روز در مسیر وجود دارند، مناسب نیست؛ علاوه‌بر این، در بسیاری از کاربردهای عملی مانند تحویل کالا یا مسیریابی در شبکه‌های شهری، بازگشت به نقطه آغازین نه‌تنها ضروری نیست، بلکه به‌طور عمده عملاً غیرضروری است [۳]. این ویژگی یکی از دلایلی است که الگوریتم MDR توسعه داده شده است، زیرا الگوریتم‌های سنتی همچون TSP برای این نوع کاربردها با محدودیت‌های زیادی روبرو هستند.

۲. توصیف

در این مقاله، الگوریتم *مسیریاب چند مقصدی* (MDR) معرفی شده‌است که با استفاده از داده‌های زنده OpenStreetMap و بهینه‌سازی مبتنی‌بر گراف‌ها، مسئله مسیریابی چند مقصدی را به‌شکلی کاربردی و با دقت صددرصدی حل می‌کند. این الگوریتم با حذف الزام بازگشت به مبدا، در مقایسه با روش‌های سنتی همچون TSP، زمان محاسباتی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و در مسائل حمل‌ونقل و سرویس‌های تحویل آنلاین کارایی بیشتری دارد.

ساختار مقاله به این صورت است: ابتدا در بخش ۳، روش‌های موجود و پیشینه تحقیق در زمینه مسیریابی چند مقصدی بررسی می‌شود؛ در بخش ۴، الگوریتم MDR معرفی شده و مراحل آن شرح داده می‌شود؛ سپس در بخش ۵، نتایج آزمایش‌های انجام شده و مقایسه‌های مربوطه با روش‌های موجود آورده خواهد شد؛ در پایان، بخش در بخش ۶ به محدودیت‌ها و کارهای آینده مروبط به این الگوریتم برسی می‌شود و در نهایت در بخش ۷ به نتیجه‌گیری اختصاص خواهد یافت.

۳. روش‌های موجود و پیشینه تحقیق

در این بخش، به مرور روش‌های مختلفی که در زمینه مسیریابی چند مقصدی و مشابه آن مانند مسئله فروشنده دوره‌گرد (TSP) مطرح شده‌اند، پرداخته می‌شود؛ بسیاری از این روش‌ها سعی در حل مسائل مسیریابی بهینه در شرایط مختلف دارند، اما هرکدام محدودیت‌های خاص خود را دارند.

۳,۱ مسئله فروشنده دوره‌گرد (TSP)

مسئله فروشنده دوره‌گرد (TSP) یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه مسیریابی است که هدف آن یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای بازدید از تمامی نقاط و در نهایت بازگشت به نقطه شروع است [۲]. این مسئله از لحاظ پیچیدگی زمانی، به‌ویژه برای مقیاس‌های بزرگ، بسیار چالش‌برانگیز است و معمولاً برای حل آن از الگوریتم‌های تقریبی استفاده می‌شود. در دهه‌های اخیر، روش‌هایی مانند الگوریتم‌های فراابتکاری (مانند الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید) به‌طور گسترده برای حل TSP استفاده شده‌اند، که این روش‌ها در مسائل کوچکتر موثر هستند، اما همچنان با چالش‌های زیادی در مقیاس‌های بزرگ روبرو هستند [3][4].

از سوی دیگر، در مسائل واقعی مسیریابی، الزام به بازگشت به مبدا، که بخش اصلی مسئله TSP است، معمولاً وجود ندارد؛ در واقع، بسیاری از کاربردهای واقعی مانند سرویس‌های تحویل کالا به‌ویژه در حوزه‌های شهری، نیازی به بازگشت به نقطه شروع ندارند؛ این یکی از دلایلی است که چرا الگوریتم‌های TSP نمی‌توانند به‌طور کامل در این حوزه‌ها کارآمد باشند.

۳,۲ پیچیدگی مسیریابی مبتنی‌بر داده‌های زنده

مسیریابی در نقشه‌های واقعی به‌دلیل وجود وزن‌های متفاوت برای مسیرهای مختلف بین نودها پیچیده‌تر از مسائل ساده مسیریابی است. این وزن‌ها می‌توانند بسته به شرایط مختلفی نظیر وضعیت ترافیک، نوع جاده، زمان روز، یا حتی شرایط آب و هوایی تغییر کنند. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که وزن مسیرها در مسائل واقعی ثابت نباشد و به‌طور مداوم تغییر کند [۵]. به همین دلیل، الگوریتم‌های کلاسیک مانند TSP، که فرض می‌کنند وزن‌ها ثابت و همگن هستند، نمی‌توانند در مسائل واقعی مسیریابی با کارایی مطلوب عمل کنند. در این الگوریتم‌ها، تمام مسیرها باید یکسان فرض شوند و به همین دلیل، کاربرد آن‌ها در مسیریابی واقعی با چالش‌هایی مواجه است.

برای مسیریابی در نقشه‌های واقعی، الگوریتم‌هایی مانند دیکسترا برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین دو نقطه به‌طور گسترده استفاده می‌شود؛ این الگوریتم در گراف‌های بدون وزن منفی به‌خوبی عمل می‌کند و یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌ها در مسائل مسیریابی است [۶]؛ با این حال، در شرایطی که نیاز به مسیریابی از یک نقطه به چندین مقصد وجود داشته باشد، دیکسترا به‌طور مستقیم قادر به حل مسأله بهینه نمی‌باشد؛ در این موارد، بعضاً از دیکسترا به‌عنوان بخشی از یک روش توسعه‌یافته استفاده می‌شود که در آن کمترین فاصله از مبدا به هر مقصد به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود؛ این رویکرد ممکن است در برخی موارد نتایج دقیقی ندهد، زیرا ممکن است مسیرهای پیچیده‌تر و روابط غیرمستقیم بین نقاط به‌درستی محاسبه نشوند و مسیر بهینه را نیابد [7].

۳,۳ مسیریابی چند مقصدی بدون بازگشت به مبدا

در مسیریابی چند مقصدی که نیاز به بازگشت به مبدا ندارد، چالش‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در این نوع مسیریابی باید در نظر گرفته شود، بهینه‌سازی زمان و مسافت در شرایطی است که تغییرات جغرافیایی و شهری به‌طور مستمر رخ می‌دهند. الگوریتم‌هایی که به‌طور خاص برای حل این نوع از مسائل طراحی شده‌اند، معمولاً از روش‌های جدیدتر بهینه‌سازی مانند بهینه‌سازی مسیر پویا و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌کنند [8].

با پیشرفت فناوری و دسترسی به داده‌های زنده، الگوریتم‌های جدیدتری برای مسیریابی معرفی شده‌اند که تلاش می‌کنند محدودیت‌های داده‌های پویا و تغییرات در زمان واقعی را در نظر بگیرند. به‌عنوان مثال، در استفاده از داده‌های OpenStreetMap (OSM) برای مسیریابی، قابلیت به‌روزرسانی مسیرها به‌صورت لحظه‌ای و پاسخ به تغییرات محیطی اهمیت دارد [۵]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ترکیب این داده‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی‌بر گراف‌ها می‌تواند راهکارهایی مناسب برای حل مسائل مسیریابی در دنیای واقعی ارائه دهد [6].

۳,۴ محدودیت‌ها و چالش‌های موجود

با اینکه الگوریتم‌های موجود برای مسیریابی چند مقصدی به‌طور کلی تلاش کرده‌اند تا مسائل مختلف را حل کنند، همچنان در زمینه‌های مختلفی مانند دقت، زمان محاسباتی و امکان استفاده در مقیاس‌های بزرگ محدودیت‌هایی وجود دارد. الگوریتم‌هایی که به‌ویژه بر داده‌های زنده تکیه می‌کنند، نیازمند پردازش سریع و دقیق اطلاعات هستند، که این خود چالش‌های جدیدی را به‌همراه دارد؛ علاوه‌بر این، پیچیدگی مسیریابی در دنیای واقعی به‌ویژه در شرایطی که مسیرها پویا هستند و تغییرات محیطی مداوم رخ می‌دهند، سبب می‌شود که الگوریتم‌های کلاسیک نظیر TSP به‌خوبی در این زمینه عمل نکنند.

۴. الگوریتم مسیریاب چند مقصدی (MDR)

الگوریتم MDR (Multi Destination Router) برای محاسبه کوتاه‌ترین مسیر ممکن برای عبور از چندین نقطه بهطوری‌که از تمامی نقاط یکبار عبور کند طراحی شده است. این الگوریتم مشابه مسئله TSP(مسئله فروشنده دوره‌گرد) است، با این تفاوت که الزام به

بازگشت به مبدأ وجود ندارد. در این بخش، از داده‌های نقشه OpenStreetMap و ماژول‌های osmnx و networkx برای مدل‌سازی نقشه و محاسبه مسیرها استفاده شده‌است.

۴,۱ تعریف کلاس MDR (شکل ۱)

در ابتدا یک کلاس به‌نام MDR تعریف شده‌است که وظیفه پردازش داده‌های نقشه و اعمال الگوریتم‌ها روی آن‌ها را بر عهده دارد.

در این بخش، اطلاعات کلی از نقشه مشخص می‌شود. نوع شبکه مسیریابی به‌طور پیش‌فرض شامل تمامی مسیرهای ممکن است که می‌توان آن را برای مسیرهای خودرو، دوچرخه و پیاده‌روی تغییر داد. همچنین یک حاشیه برای نقشه در نظر گرفته‌شده است تا تمامی مسیرهای ممکن را شامل شود.

همچنین در این بخش از سیستم کش‌گذاری برای ذخیره‌ی داده‌ها برای افزایش سرعت استفاده شده است.

```python
class MDR:
    # Enable OSMnx cache to avoid redundant downloads
    ox.settings.use_cache = True

    def __init__(self, street_type='all', buffer=0.005):
        # Stores the OpenStreetMap-based graph
        self.graph_map = None
        # Stores user-defined destination coordinates
        self.nodes = []
        # Specifies the type of street network to retrieve (e.g., 'all', 'drive', etc.)
        self.street_type = street_type
        # Buffer (in degrees) to expand around destination points for graph coverage
        self.buffer = buffer
```

شکل ۱ – تعریف کلاس MDR

۴,۲ اضافه کردن و حذف گره‌ها

```python
# Adds coordinates to the list of destination nodes and resets the graph
    def add_nodes(self, nodes):
        self.nodes.extend(nodes)
        self.graph_map = None
        return self.nodes
```

شکل ۲ – تابع add_nodes برای اضافه کردن نقاط

در کلاس MDR توابعی برای افزودن (شکل ۲) و حذف گره‌ها (شکل ۳) از لیست self.nodes تعریف شده است.

این توابع اجازه می‌دهند که گره‌های خاصی را به گراف اضافه یا از آن حذف شود.

۴,۳ یافتن نزدیک‌ترین گره

```python
# Removes specified coordinates from the list of destination nodes
    def remove_nodes(self, nodes):
        self.nodes = [node for node in self.nodes if node not in nodes]
}
```

شکل ۳ – تابع remove_nodes برای حذف کردن نقاط

```python
# Finds the nearest node in the OSM graph to a given coordinate
    def find_nearest_node(self, node):
        return ox.nearest_nodes(G=self.graph_map, X=node[1], Y=node[0])
```

شکل ۴ – تابع find_nearest_node برای پیدا کردن نزدیک‌ترین نقطه به نقطه‌ی موردنظر روی گراف

از آنجایی که ممکن است نقطه‌ی ارسال شده دقیقا یک نقطه‌ی جغرافیایی در مسیرهای شهری نباشد، یک تابع برای پیدا کردن نزدیک‌ترین نقطه به آن تعریف شده‌است به‌نام find_nearest_node (شکل ۴).

این تابع از داده‌های OpenStreetMap برای محاسبه نزدیک‌ترین گره به مختصات جغرافیایی داده‌شده استفاده می‌کند.

۴,۴ ساخت گراف از نقشه

تابع create_graph_from_nodes برای ایجاد یک گراف شامل تمام نقاط مورد نظر است، استفاده می‌شود (شکل ۵).

```
# Creates a graph from the bounding box around the destination nodes
    def create_graph_from_nodes(self):
        lats = [pt[0] for pt in self.nodes]
        lons = [pt[1] for pt in self.nodes]

        # Calculate bounding box limits with buffer
        north = max(lats) + self.buffer
        south = min(lats) - self.buffer
        east = max(lons) + self.buffer
        west = min(lons) - self.buffer

        # Download the street network within the bounding box
        self.graph_map = ox.graph_from_bbox(north, south, east, west, network_type=self.street_type)
        # Add estimated speed and travel time attributes to graph edges
        self.graph_map = ox.add_edge_speeds(G=self.graph_map, fallback=30)
        self.graph_map = ox.add_edge_travel_times(G=self.graph_map)
        return self.graph_map
```

شکل ۵ – تابع create_graph_from_nodes برای ساخت یک گراف از نقشه‌ی با استفاده از داده‌های واقعی OSM

این تابع شمالی‌ترین، جنوبی‌ترین، شرقی‌ترین و غربی‌ترین نقاط مورد نظر را استخراج می‌کند و سپس با استفاده از داده‌های OpenStreetMap یک گراف کامل از محدوده (Bounding Box) با اعمال یک حاشیه (buffer) می‌سازد که شامل تمامی گره‌ها و یال‌ها(سرعت و زمان) است.

۴,۵ ساخت گراف گره‌ها

تابع graph_nodes یک گراف جدید از گره‌هایی که در self.nodes قرار دارند می‌سازد تا داده‌هایی که نیاز به آن‌ها پردازش آن‌ها نیست، دیگر استفاده نشوند و سرعت پردازش آن بیشتر شود (شکل ۶).

```
# Builds a complete weighted graph of destination nodes based on shortest OSM paths
    def graph_nodes(self):
        if not self.graph_map:
            self.graph_map = self.create_graph_from_nodes()
        graph_node = nx.Graph()
        nearest_nodes = {node: self.find_nearest_node(node) for node in self.nodes}

        for start, node_start in nearest_nodes.items():
            for end, node_end in nearest_nodes.items():
                if node_end != node_start:
                    length = nx.shortest_path_length(self.graph_map, source=node_start, target=node_end, weight='length')
                    time = nx.shortest_path_length(self.graph_map, source=node_start, target=node_end, weight='travel_time')
                    graph_node.add_edge(start, end, travel_time=time, length=length)

        return graph_node
```

شکل ۶ – تابع graph_nodes برای ساخت یک گراف فقط از نقاط مورد نظر

این تابع گراف جدیدی با گره‌های خاص که در self.nodes تعریف شده‌اند می‌سازد. برای هر جفت گره، طول مسیر و زمان سفر محاسبه می‌شود و به گراف افزوده می‌شود (شکل ۷).

۴,۶ پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر

تابع shortest_path برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر از گره شروع به گره‌های دیگر استفاده می‌شود. در اینجا، این تابع به دنبال مسیرهایی می‌گردد که تمامی گره‌های موجود در self.nodes را از گره شروع عبور دهد.

```python
# Computes the shortest visiting sequence of nodes starting from a given point
    def shortest_path(self, start, weight='length'):
        shortest_length = float('inf')
        shortest_path = None
        graph = self.graph_nodes()

        for node in self.nodes:
            if node != start:
                for path in nx.all_simple_paths(graph, source=start, target=node):
                    if len(path) == len(graph.nodes):
                        weight_path = sum(
                            graph[path[i]][path[i + 1]][weight] for i in range(len(path) - 1)
                        )
                        if weight_path < shortest_length:
                            shortest_length = weight_path
                            shortest_path = path

        return shortest_path
```

شکل ۷ – تابع shortest_path برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر ممکن

- ابتدا متغیرهایی به‌نام‌های shortest_length و shortest_path تعریف می‌شود که به‌ترتیب برای ذخیره طول کوتاه‌ترین مسیر و خود مسیر استفاده می‌شوند.
- گراف از توابع قبلی ساخته می‌شود و سپس برای هر گره (غیر از گره شروع) تمامی مسیرهای ساده از گره شروع به آن گره بررسی می‌شود.
- برای هر مسیر ساده، جمع وزن‌ها (مسافت یا زمان) محاسبه می‌شود.
- در نهایت، اگر وزن مسیر پیدا شده کمتر از وزن قبلی باشد، مسیر و طول آن به‌روزرسانی می‌شود.

۴,۷ یافتن مسیر روی نقشه

پس از یافتن کوتاه‌ترین مسیر، تابع route_on_map مسیر به‌دست آمده را روی نقشه نمایش می‌دهد(شکل ۸).

```python
# Returns detailed OSM routes between ordered destination nodes
    def route_on_map(self, path, weight='length'):
        path = [self.find_nearest_node(node) for node in path]
        return [nx.shortest_path(self.graph_map, source=path[i], target=path[i + 1], weight=weight) for i in range(len(path) - 1)]
```

شکل ۸ – تابع route_on_map برای پیدا کردن مسیر مورد نظر روی نقشه

این تابع مسیر پیدا شده را به صورت پیکربندی شده به‌شکل یک لیست از مسیرها برمی‌گرداند که می‌توان آن را روی نقشه نمایشی مشاهده کرد.

خلاصه الگوریتم:

الگوریتم MDR مسیر کوتاه‌تری را برای عبور از چندین مقصد مشخص می‌کند. ابتدا گرافی از داده‌های OpenStreetMap ساخته می‌شود و سپس مسیرهای کوتاه میان گره‌ها محاسبه می‌شود. در اینجا تابع shortest_path با استفاده از تمامی مسیرهای ساده و مقایسه وزن آن‌ها، کوتاه‌ترین مسیر را پیدا می‌کند.

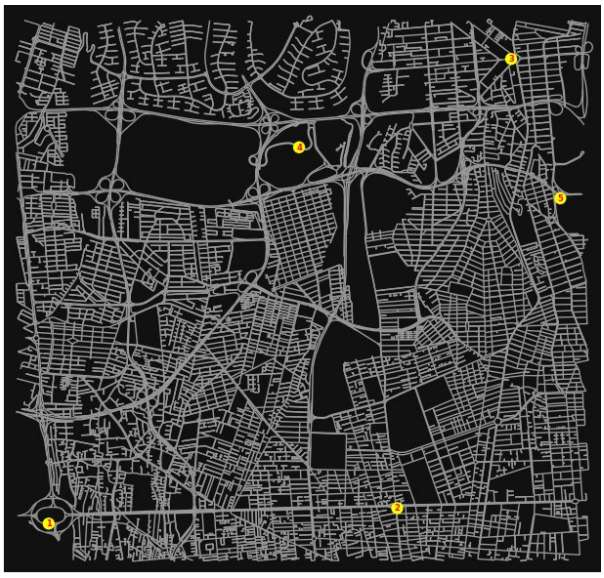
۵. آزمایش‌ها و نتایج

در این بخش الگوریتم MDR با داده‌های واقعی شهر تهران تست‌شده است تا اهمیت استفاده از آن به مشخص شود.

در این آزمایش از یک سیستم با پردازنده Core i5 10300H و رم 16 گیگابایت استفاده شده است.

۵,۱ مقایسه‌ی MDR با مسیر انتخاب شده‌ی دستی

در این مقایسه ۵ نقطه‌ی مختلف انتخاب شده است: میدان‌آزادی، میدان‌انقلاب‌اسلامی، میدان ونک، برج‌میلاد و میدان آرژانتین که مبدا در نظرگرفته‌شده میدان‌آزادی می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹ – نقاط مشخص شده روی نقشه

در مسیر انتخاب شده‌ی به‌صورت دستی نقاط به‌ترتیب ذکر شده انتخاب شده‌اند که نتیجه‌ی آن در شکل ۱۰ آمده‌است:



شکل ۱۰ – مسیری که به‌صورت دستی مشخص شده است

در نهایت مسیریابی با استفاده از الگوریتم MDR انجام شده است که نتیجه‌ی آن در شکل ۱۱ آمده است:



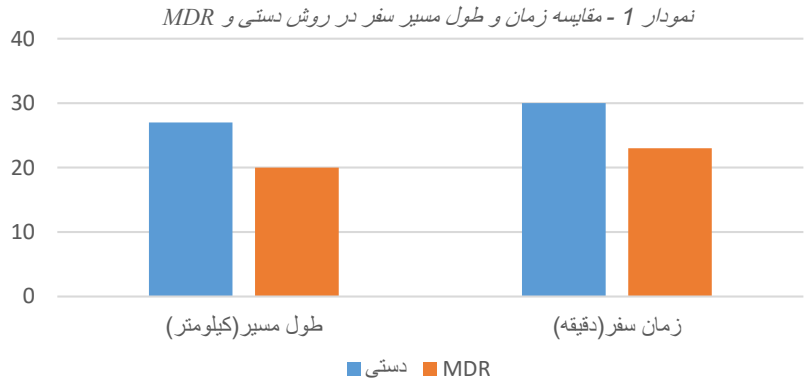
شکل ۱۱ – مسیری که با استفاده از MDR مشخص شده‌است

نتایج آماری از این آزمایش در جدول ۱ آمده‌است:

جدول ۱ – نتایج به‌دست آمده از آزمایش ۵,۱

روش مسیریابی	ترتیب مقصد	طول مسیر	زمان سفر
دستی	میدان‌آزادی – میدان‌انقلاب‌اسلامی – میدان‌ونک – برج‌میلاد – میدان‌آرژانتین	26.794km	30m
الگوریتم MDR	میدان‌آزادی – میدان‌انقلاب‌اسلامی – میدان‌آرژانین – میدان‌ونک – برج‌میلاد	19.787km	23m

طبق نتایج آماری به‌دست‌آمده از این آزمایش استفاده از الگوریتم MDR برای مسیریابی شاهد کاهش ۲۶ درصدی طول مسیر و کاهش ۲۳ درصدی زمان سفر می‌شود (نمودار ۱).



نمودار ۱ – مقایسه زمان و طول مسیر سفر در روش دستی و MDR

۵,۲ بررسی عملکرد زمانی الگوریتم MDR در تعداد نقاط مختلف

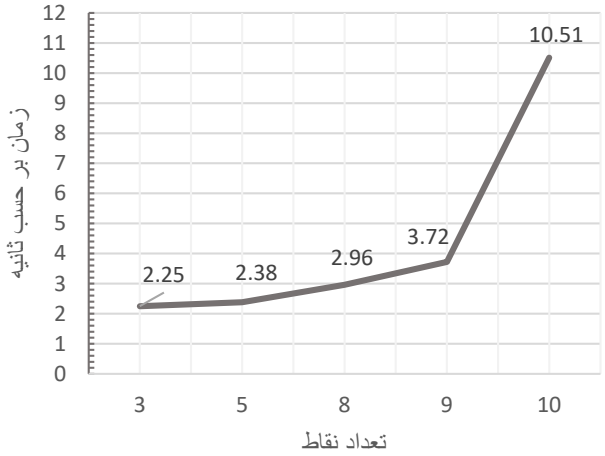
یکی از جنبه‌های کلیدی در ارزیابی الگوریتم‌های مسیریابی، بررسی مقیاس‌پذیری زمانی آن‌هاست؛ یعنی اینکه الگوریتم تا چه حد می‌تواند با افزایش تعداد نقاط مقصد بدون افت محسوس در کارایی، همچنان در زمان قابل‌قبولی اجرا شود. برای بررسی این موضوع، این آزمایش انجام شده‌است که در آن الگوریتم MDR روی مجموعه‌های مقصد با تعدادهای مختلف اجرا شده‌است.

نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۲ آمده‌است:

جدول ۲ – نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش ۵,۲

تعداد نقاط	سرعت الگوریتم
3	2.25
5	2.38
8	2.96
9	3.72
10	10.51

با توجه به نتایج فوق، می‌توان مشاهده کرد که زمان اجرا در حالت کلی با افزایش تعداد مقصد، افزایش می‌یابد، اما تا ۹ مقصد این رشد نسبتاً ملایم است و الگوریتم پاسخگو باقی می‌ماند. با این حال، در نقطه‌ی ۱۰ مقصد، یک جهش قابل‌توجه در زمان اجرا دیده می‌شود که ناشی از رشد ترکیبات مسیرهای ممکن و پیچیدگی پردازش در آن مقیاس است (نمودار ۲).



نمودار ۲ – مقایسه عملکرد زمان اجرایی الگوریتم MDR با تعداد نقاط مختلف

این نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم MDR در مقیاس‌های کم تا متوسط، زمان اجرای مناسبی دارد و برای استفاده در سناریوهای عملیاتی با تعداد مقصد پایین، به‌ویژه در سامانه‌های مسیریابی شهری یا پلتفرم‌های تحویل، کاملاً مناسب است.

۵,۳ بررسی تأثیر نوع مسیر (خودرویی در برابر پیاده‌روی)

الگوریتم‌های مسیریابی در کاربردهای واقعی باید توانایی انطباق با انواع مختلف شبکه‌های حمل‌ونقل را داشته باشند. یکی از تفاوت‌های اساسی، نوع مسیر مورد استفاده است؛ مسیرهای پیاده‌روی و مسیرهای خودرویی نه‌تنها از نظر ساختاری بلکه از لحاظ محدودیت‌های دسترسی، جهت حرکت و قوانین راهنمایی و رانندگی نیز متفاوت‌اند.

برای بررسی عملکرد الگوریتم MDR در این شرایط، آزمایشی بر روی یک مجموعه‌ی ۵ نقطه‌ای در مرکز شهر تهران (محدوده میدان‌انقلاب‌اسلامی) انجام شده است(۱۲و۱۳). الگوریتم یک بار در حالت شبکه‌ی خودرو (network_type='drive') و یک بار در حالت شبکه‌ی پیاده‌روی (network_type='walk') اجرا گردیده است.



شکل ۱۲ – نقاط مشخص شده در شبکه خودرویی

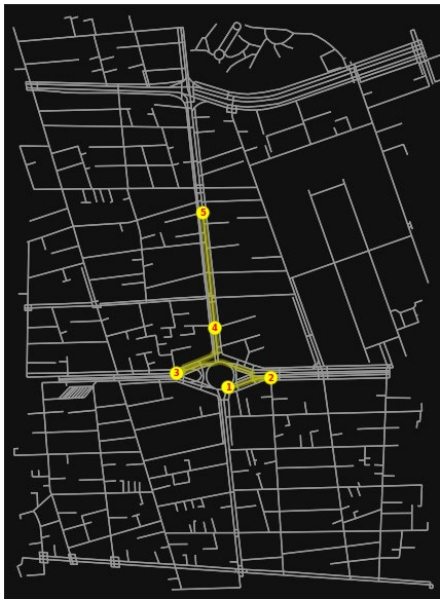
شکل ۱۳ – نقاط مشخص شده در شبکه پیاده‌روینتایج به‌دست آمده به‌صورت زیر است:

جدول ۳ – نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش ۵,۳

نوع مسیر	طول مسیر	زمان سفر
خودرو	3.354km	4.3m
پیاده روی	0.916km	1.1m



شکل ۱۴ – مسیری که در شبکه خودرویی مشخص شده‌است



شکل ۱۵ – مسیری که در شبکه پیاده‌روی مشخص شده‌است

نتایج نشان می‌دهند که در این آزمایش، مسیر پیاده‌روی(شکل ۱۵) تقریباً یک‌سوم مسیر خودرویی (شکل ۱۴) طول داشته و در عین‌حال زمان سفر نیز به میزان قابل‌توجهی کمتر بوده است؛ این تفاوت به‌وضوح بیانگر توانایی الگوریتم MDR در استفاده از مسیرهای مناسب با نوع شبکه است. در مسیرهای پیاده، به‌دلیل امکان عبور از کوچه‌ها، پیاده‌روها و گذرگاه‌های خاص، طول و زمان بهینه‌تری حاصل شده است. در مقابل، مسیرهای خودرویی به‌دلیل محدودیت‌های عبور و جهت خیابان‌ها، مجبور به دور زدن و پیمودن مسیرهای طولانی‌تر شده‌اند.

این توانایی انطباق، MDR را به ابزاری قابل اتکا برای استفاده در اپلیکیشن‌های ناوبری چندحالته، سیستم‌های مسیریابی هوشمند شهری، سامانه‌های تحویل پیک و کاربردهای موقعیت‌محور دیگر تبدیل می‌کند.

۵,۴ مقایسه با روش‌های پایه (Greedy و Brute-force)

برای ارزیابی دقت و کارایی الگوریتم MDR، آن را با دو روش پایه شامل Greedy و Brute-force مقایسه شده است. هدف این مقایسه، بررسی توانایی الگوریتم MDR در یافتن مسیر بهینه (از نظر طول مسیر و زمان سفر) و همچنین سنجش عملکرد زمان اجرای آن نسبت به روش‌های متداول است.

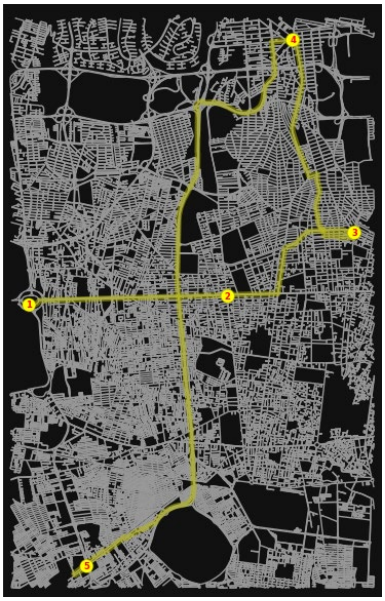
الگوریتم Greedy در هر مرحله، نزدیک‌ترین مقصد بعدی را انتخاب می‌کند و بدون در نظر گرفتن مسیر کلی، به‌صورت محلی تصمیم‌گیری می‌کند. این روش سریع است اما در بسیاری از موارد به مسیرهای غیر بهینه منجر می‌شود [9]. در مقابل، الگوریتم Brute-force تمامی ترتیب‌های ممکن برای بازدید از مقصدها را بررسی می‌کند و مسیر دقیق بهینه را با هزینه زمانی بسیار بالا پیدا می‌کند [8].

در این مقایسه ۵ نقطه‌ی مختلف انتخاب شده است: میدان‌آزادی، میدان‌انقلاب‌اسلامی، میدان ونک، میدان آرژانتین و بزرگراه آیت‌الله‌سعیدی که مبدا در نظرگرفته‌شده میدان‌آزادی می‌باشد (شکل ۱۶).

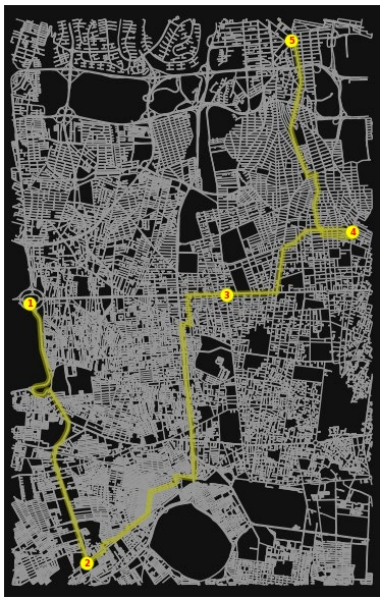


شکل ۱۶ – نقاط مشخص شده روی نقشه

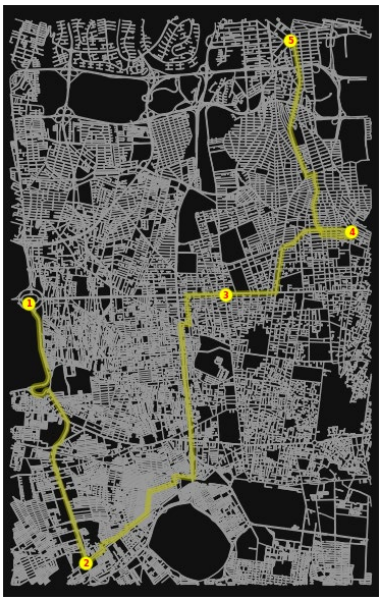
نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ آمده است:



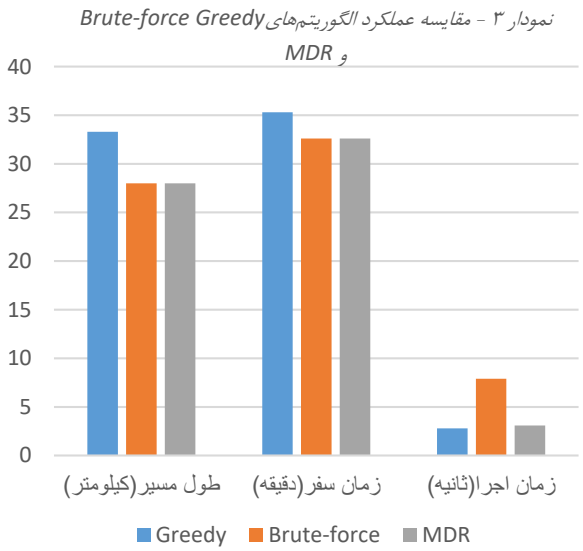
شکل ۱۷ – مسیری که با استفاده از **Greedy** مشخص شده است



شکل ۱۸ – مسیری که با استفاده از **Brute-force** مشخص شده است



شکل ۱۹ – مسیری که با استفاده از **MDR** مشخص شده است



نمودار ۳ - مقایسه عملکرد الگوریتم‌های Brute-force Greedy و MDR

جدول ۴ – نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش ۵،۴

الگوریتم	طول مسیر	زمان سفر	زمان اجرا
Greedy	33.356km	35.3m	2.8s
Brute-force	28.208km	32.6m	7.9s
MDR	28.208km	32.6m	3.1s

نتایج جدول ۴ و نمودار ۳ نشان می‌دهد الگوریتم MDR همان مسیر بهینه‌ای را یافته که Brute-force با زمان اجرای بسیار بیشتر تولید کرده است. این بیانگر دقت بالای MDR است.

همچنین MDR در حالی زمان اجرای نزدیک به Greedy دارد که برخلاف آن، مسیر کاملاً بهینه ارائه می‌دهد. بنابراین، MDR با حفظ دقت، توازنی مؤثر میان سرعت اجرا و کیفیت مسیر برقرار کرده و عملکردی برتر نسبت به روش‌های پایه دارد.

۶ محدودیت‌ها و کارهای آینده

با وجود کارایی مناسب الگوریتم MDR در حل مسئله‌ی مسیریابی چندمقصدی بدون بازگشت به مبدا، این الگوریتم نیز دارای برخی محدودیت‌ها است. یکی از محدودیت‌های اصلی، رشد زمان اجرا در مقیاس‌های بسیار بزرگ (تعداد مقصدهای بالا) به دلیل افزایش ترکیبات ممکن و پیچیدگی ساخت گراف کامل بین مقاصد است. همچنین، در نسخه‌ی فعلی، الگوریتم تنها براساس طول مسیر یا زمان سفر تصمیم‌گیری می‌کند و قابلیت لحاظ‌کردن محدودیت‌های زمانی، اولویت‌های مقصد یا پنجره‌های زمانی تحویل را ندارد.

در ادامه این پژوهش، می‌توان نسخه‌ی بهینه‌تری از الگوریتم MDR طراحی کرد که از روش‌های ابتکاری یا یادگیری ماشین برای کاهش فضای جستجو استفاده کند. همچنین، امکان توسعه‌ی الگوریتم به‌گونه‌ای که از داده‌های بلادرنگ مانند ترافیک لحظه‌ای، مسدود بودن مسیر یا هزینه‌های متغیر بهره بگیرد، مسیر را برای استفاده در سامانه‌های ناوبری پویا هموار خواهد کرد. پشتیبانی از پارامترهای متنوع‌تر مانند محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه یا زمان توقف نیز می‌تواند در نسخه‌های آتی اضافه شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتمی تحت‌عنوان "مسیریاب چندمقصدی" معرفی شد که قادر است مسئله‌ی مسیریابی از میان چند نقطه بدون الزام بازگشت به مبدا را با دقت بالا و زمان اجرای مناسب حل کند. این الگوریتم با استفاده از داده‌های نقشه‌ی OpenStreetMap و ساخت گراف‌های وزن‌دار، مسیر بهینه را میان مقاصد مختلف پیدا می‌کند.

آزمایش‌های انجام‌شده بر روی داده‌های واقعی شهر تهران نشان دادند که MDR توانسته با حفظ دقتی بالا معادل الگوریتم-Brute force، زمان اجرای بسیار پایین‌تری ارائه دهد و عملکردی به‌مراتب بهتر از روش‌های پایه مانند Greedy داشته باشد (نمودار ۳). توانایی انطباق با نوع مسیر (پیاده‌روی یا خودرو) و کاهش قابل‌توجه طول مسیر و زمان سفر از دیگر مزایای این الگوریتم به شمار می‌رود.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، الگوریتم MDR می‌تواند به‌عنوان راهکاری عملی و موثر برای سیستم‌های مسیریابی، خدمات تحویل هوشمند و سامانه‌های مدیریت ناوگان شهری مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

[1] Batty, M., & Xie, Y. (1999). From cells to cities: The automated geography of urban systems. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26(3), 343–358.

[2] Applegate, D., Bixby, R., Chvátal, V., & Cook, W. (2006). *The traveling salesman problem: A computational study*. Princeton University Press.

[3] Salazar, R., & Martínez, F. (2015). Solving the TSP using a hybrid genetic algorithm with local search. *Computational Intelligence*, 31(4), 671–688.

[4] Applegate, D., Bixby, R., Chvátal, V., & Cook, W. (2006). *The traveling salesman problem: A computational study*. Princeton University Press.

[5] Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2005). Metaheuristics for the traveling salesman problem. In F. Glover & G. A. Kochenberger (Eds.), *Handbook of metaheuristics* (pp. 257–287). Springer.

[6] Haklay, M., & Weber, P. (2008). OpenStreetMap: The intuitive and flexible map. In *Web 2.0 for transportation and urban planning* (pp. 105–126). Springer.

[7] Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271.

[8] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms* (3rd ed.). MIT Press.

[9] Johnson, D. S., & Papadimitriou, C. H. (1985). Performance guarantees for heuristics. In E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, & D. B. Shmoys (Eds.), *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization* (pp. 145–180). Wiley.

KNO-1301-5104

ارائه الگوهای طراحی جنبه‌گرا برای بهبود تحمل‌پذیری خطای نرم‌افزار با رویکردی مبتنی بر کیفیت نرم‌افزار و معماری‌های نوین

مریم اسداله زاده کرمانشاهی m_asadolahzade@aut.ac.ir
دانشکده مهندسی کامپیوتر و فن آوری اطلاعات،دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

تحمل‌پذیری خطا یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی سیستم‌های نرم‌افزاری بحرانی محسوب می‌شود که نقش اساسی در افزایش قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری و پایداری سامانه‌ها ایفا می‌کند. پیاده‌سازی مکانیزم‌های تحمل‌پذیری خطا در روش‌های سنتی توسعه نرم‌افزار، به‌ویژه برنامه‌نویسی شیءگرا، معمولاً موجب افزایش پیچیدگی طراحی، کاهش قابلیت نگهداری و کاهش قابلیت استفاده مجدد اجزای نرم‌افزاری می شود. برنامه‌نویسی جنبه‌گرا به‌عنوان رویکردی نوین در مهندسی نرم‌افزار، امکان جدا سازی دغدغه‌های متقاطع را فراهم کرده و می‌تواند بسیاری از محدودیت‌های روش‌های سنتی را برطرف سازد.

در این پژوهش، دو تاکتیک مهم تحمل‌پذیری خطا شامل بلوک‌های بازیابی و برنامه‌نویسی چندنسخه‌ای با استفاده از رویکرد برنامه‌نویسی جنبه‌گرا مدل سازی شده‌اند. برای هر تاکتیک، یک الگوی طراحی جنبه‌گرا ارائه گردیده و میزان تأثیر آن بر شاخص‌های کیفیت نرم‌افزار مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین کاربرد این الگوها در معماری‌های نوین مبتنی بر میکروسرویس‌ها و چارچوب‌های AspectJ و Spring AOP بررسی شده است.نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که استفاده از برنامه‌نویسی جنبه‌گرا موجب بهبود جدا سازی دغدغه‌ها، افزایش قابلیت نگهداری، افزایش قابلیت استفاده مجدد و کاهش وابستگی میان اجزای سیستم می شود. همچنین استفاده از الگوهای پیشنهادی در سامانه‌های توزیع‌شده و مبتنی بر میکروسرویس‌ها می‌تواند نقش مؤثری در افزایش تاب‌آوری و قابلیت اطمینان نرم‌افزار داشته باشد.

واژگان کلیدی:تحمل‌پذیری خطا، برنامه‌نویسی جنبه‌گرا، Aspect-Oriented Programming، بلوک‌های بازیابی، برنامه‌نویسی چندنسخه‌ای، کیفیت نرم‌افزار، میکروسرویس

۱. مقدمه

با گسترش روزافزون سامانه‌های نرم‌افزاری و وابستگی سازمان‌ها به خدمات دیجیتال، قابلیت اطمینان نرم‌افزار به یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت تبدیل شده است. در بسیاری از سامانه‌های حساس نظیر سامانه‌های بانکی، پزشکی، هوانوردی و زیرساخت‌های حیاتی، وقوع خطا می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری ایجاد نماید.

در سال‌های اخیر، توسعه معماری‌های ابری و میکروسرویس‌ها موجب افزایش پیچیدگی سامانه‌های نرم‌افزاری شده است. در چنین محیط‌هایی، مدیریت خطا و بازیابی از خرابی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. یکی از چالش‌های اصلی در پیاده‌سازی مکانیزم‌های تحمل‌پذیری خطا، پراکندگی کدهای مربوط به مدیریت خطا در بخش‌های مختلف سیستم است.

برنامه‌نویسی جنبه‌گرا راهکاری مناسب برای جداسازی این دغدغه‌های متقاطع ارائه می‌دهد و امکان مدیریت مستقل سیاست‌های تحمل‌پذیری خطا را فراهم می‌سازد.

۲,۱. تحمل‌پذیری خطا

تحمل‌پذیری خطا توانایی سیستم در ادامه عملکرد صحیح علی‌رغم وقوع خطا است. هدف اصلی این مفهوم حفظ تداوم سرویس و جلوگیری از شکست کامل سیستم می‌باشد.

مهم‌ترین روش‌های تحمل‌پذیری خطا عبارت‌اند از:

- افزونگی اطلاعاتی
- افزونگی زمانی
- افزونگی سخت‌افزاری
- بلوک‌های بازیابی
- برنامه‌نویسی چندنسخه‌ای

۲-۲. برنامه‌نویسی جنبه‌گرا

برنامه‌نویسی جنبه‌گرا (AOP) با هدف جداسازی دغدغه‌های متقاطع معرفی شد.

مفاهیم اصلی:

- Aspect
- Join Point
- Pointcut
- Advice
- Weaving

این مفاهیم امکان اضافه نمودن رفتارهای جدید به سیستم بدون تغییر مستقیم در منطق اصلی برنامه را فراهم می‌کنند.

۳. مرور پژوهش‌های مرتبط

پژوهش‌های کلاسیک

تحقیقات اولیه در زمینه بلوک‌های بازیابی و برنامه‌نویسی چندنسخه‌ای توسط Brian Randellو Algirdas Avizienisانجام شد. این پژوهش‌ها بنیان نظری تحمل‌پذیری خطای نرم‌افزار را شکل دادند .

پژوهش‌های نوین(2020–2026)

تحقیقات جدید بر موضوعات زیر تمرکز دارند:

- Resilience Engineering
- Cloud Fault Tolerance
- Self-Healing Systems
- Service Mesh Resilience
- Chaos Engineering
- Microservice Fault Isolation

نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که جداسازی سیاست‌های مدیریت خطا از منطق کسب‌وکار همچنان یکی از مهم‌ترین چالش‌های سامانه‌های مدرن است.

۴. روش تحقیق

روش تحقیق از نوع کاربردی ـ توسعه‌ای است و شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱. تحلیل تاکتیک‌های تحمل‌پذیری خطا
۲. شناسایی دغدغه‌های متقاطع
۳. طراحی الگوهای جنبه‌گرا
۴. پیاده‌سازی نمونه آزمایشی
۵. ارزیابی و مقایسه با رویکرد شیءگرا

۵. الگوی طراحی بلوک‌های بازیابی جنبه‌گرا

در این الگو سازوکار بلوک بازیابی در قالب یک Aspect مستقل پیاده‌سازی می‌شود. در مدل پیشنهادی، جنبه از طریق Pointcut به عملیات اصلی متصل شده و فرآیند اجرای نسخه‌های جایگزین را کنترل می‌کند .

مزایا:

- جداسازی کامل منطق تحمل خطا
- حذف کدهای تکراری
- افزایش قابلیت استفاده مجدد
- سهولت توسعه

۶. الگوی طراحی برنامه‌نویسی چندنسخه‌ای جنبه‌گرا

در این مدل چند پیاده‌سازی مستقل از یک سرویس وجود دارد و نتایج آن‌ها توسط مکانیزم رأی‌گیری ارزیابی می‌شود. سازوکار رأی‌گیری در قالب یک جنبه مستقل پیاده‌سازی می‌شود .

مزایا:

- کاهش وابستگی میان نسخه‌ها
- تمرکز مکانیزم رأی‌گیری در یک واحد مستقل
- افزایش انعطاف‌پذیری طراحی

۷. مطالعه موردی

برای ارزیابی مدل‌ها، برنامه مرتب‌سازی داده‌ها انتخاب شد. سه الگوریتم مختلف شامل:

- Bubble Sort
- Insertion Sort
- Selection Sort

در چهار سناریو پیاده‌سازی شدند:

۱. بلوک بازیابی شیءگرا
۲. بلوک بازیابی جنبه‌گرا
۳. برنامه‌نویسی چندنسخه‌ای شیءگرا
۴. برنامه‌نویسی چندنسخه‌ای جنبه‌گرا

۸.معیارهای ارزیابی

معیارهای استفاده‌شده عبارت‌اند از:

جداسازی دغدغه‌ها

- CDC
- CDO

اتصال

- CBC
- DIT

اندازه برنامه

- VS
- NOA

جدول ۱. مقایسه رویکرد شیءگرا و جنبه‌گرا از نظر معیارهای کیفیت

معیار	رویکرد شیءگرا	رویکرد جنبه‌گرا	میزان بهبود
CDC	مبنا	بهتر	٪15
CDO	مبنا	بهتر	٪15
CBC	مبنا	کمتر	٪45
NOA	مبنا	کمتر	٪27

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های دو تاکتیک تحمل‌پذیری خطا

ویژگی	برنامه‌نویسی چندنسخه‌ای	بلوک‌های بازیابی	
افزونگی	زمانی		طراحی
تعداد نسخه‌ها	یک نسخه اصلی و جایگزین		چند نسخه مستقل
مکانیزم تصمیم‌گیری	آزمون پذیرش		رأی‌گیری
هزینه پیاده‌سازی	متوسط		زیاد
قابلیت اطمینان	بالا		بسیار بالا

۹. نتایج

جدول۳ – نتایج مقایسه

معیار	رویکرد شیءگرا	رویکرد جنبه‌گرا	میزان بهبود
جداسازی دغدغه‌ها	مبنا	بهتر	٪15
اتصال بین مؤلفه‌ها	مبنا	کمتر	٪45
اندازه برنامه	مبنا	کمتر	٪27

تحلیل نتایج نشان می‌دهد:

- قابلیت نگهداری افزایش یافته است .
- قابلیت استفاده مجدد افزایش یافته است .
- پیچیدگی طراحی کاهش یافته است .
- فهم سیستم بهبود یافته است .

۱۰.کاربرد در معماری میکروسرویس

در معماری‌های مدرن می‌توان الگوهای پیشنهادی را برای پیاده‌سازی:

- Retry Pattern
- Circuit Breaker
- Bulkhead Pattern
- Fallback Pattern
- Service Mesh Fault Injection

به کار برد.

در این معماری‌هاAspect ها می‌توانند سیاست‌های تحمل خطا را مستقل از سرویس‌های کسب‌وکار مدیریت نمایند.

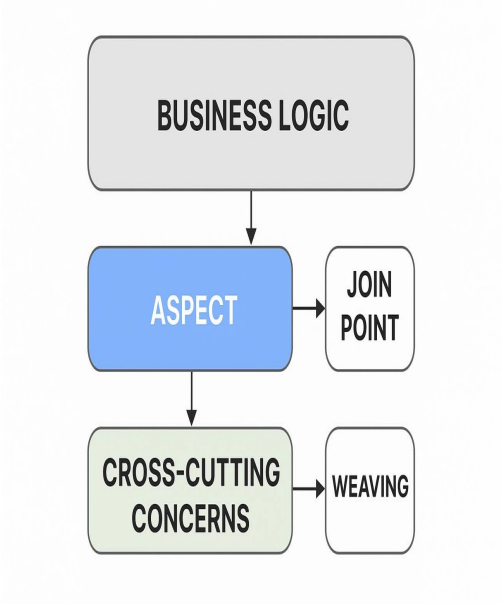
۱۱. مقایسه با فناوری‌های مدرن

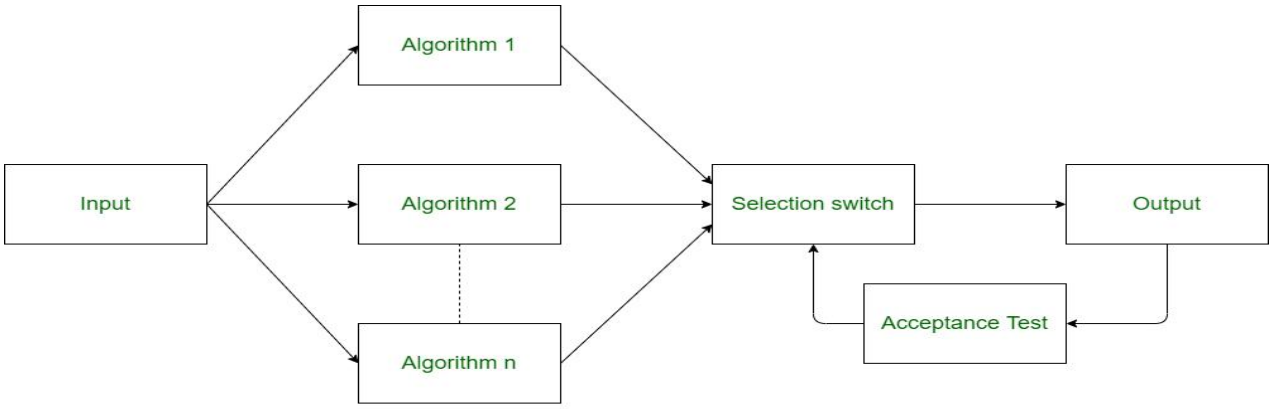
امروزه چارچوب‌های زیر مهم‌ترین ابزارهای جنبه‌گرایی محسوب می‌شوند:

- AspectJ
- Spring AOP

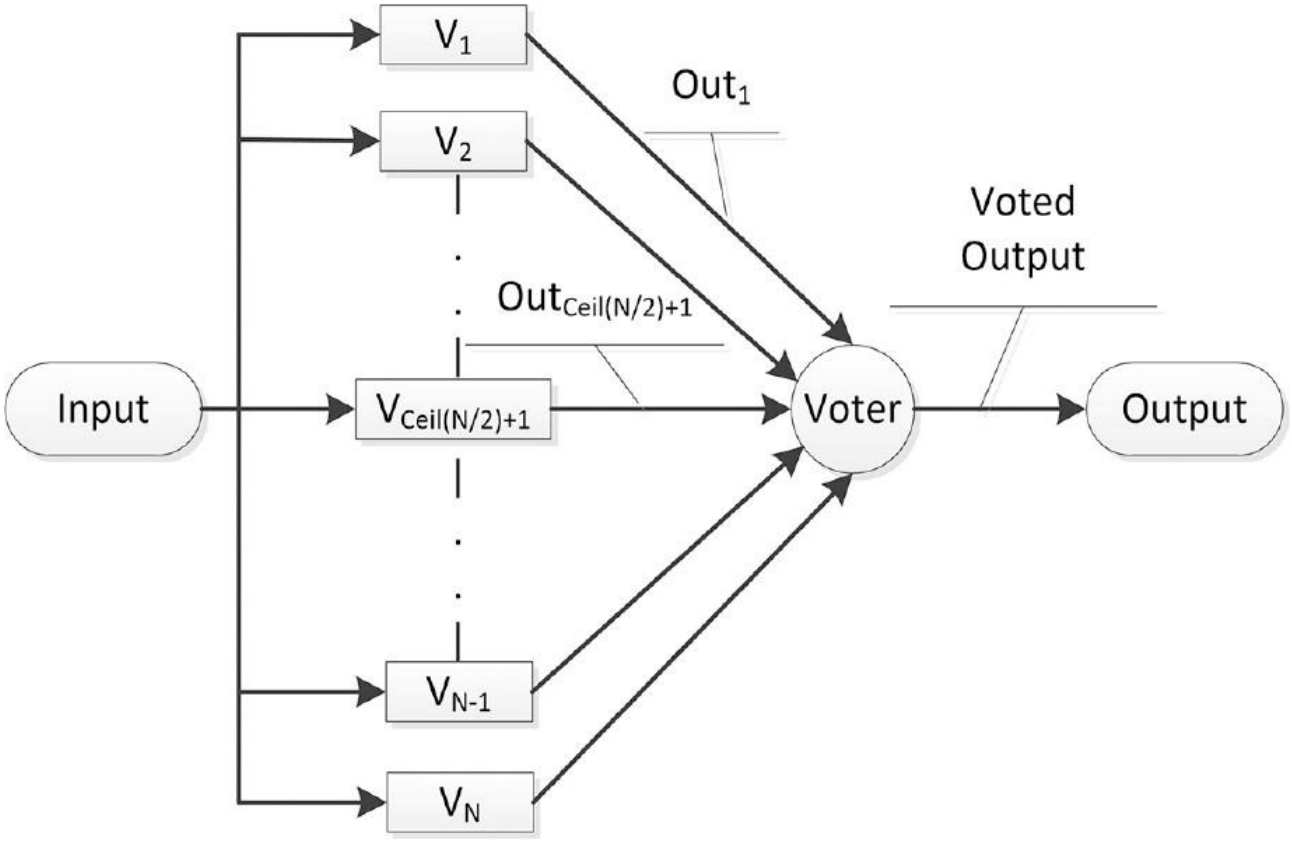
الگوهای ارائه‌شده در این پژوهش قابلیت پیاده‌سازی مستقیم در هر دو چارچوب را دارند.

معماری پیشنهادی سیستم





Recovery Blocks



شامل:

۱. لایه کسب وکار
۲. جنبه تحمل‌پذیری خطا
۳. آزمون پذیرش
۴. نسخه‌های جایگزین
۵. ماژول رأی‌گیری
۶. سرویس‌های میکروسرویسی

۱۲ .نتیجه‌گیری

در این پژوهش دو الگوی طراحی مبتنی بر برنامه‌نویسی جنبه‌گرا برای تاکتیک‌های بلوک بازیابی و برنامه‌نویسی چندنسخه‌ای ارائه و ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که مزیت اصلی رویکرد جنبه‌گرا در تمرکز مکانیزم‌های تحمل‌پذیری خطا در یک واحد مستقل است. این موضوع علاوه بر کاهش پراکندگی کد، امکان توسعه موازی تیم‌های نرم‌افزاری را فراهم می‌کند .

رویکرد پیشنهادی موجب بهبود جداسازی دغدغه‌ها، کاهش اتصال بین مؤلفه‌ها و کاهش اندازه برنامه می‌شود. همچنین قابلیت استفاده مجدد، قابلیت نگهداری و فهم‌پذیری سیستم بهبود می‌یابد. بنابراین برنامه‌نویسی جنبه‌گرا می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای توسعه سامانه‌های قابل اطمینان در محیط‌های مدرن ابری و میکروسرویسی باشد.

منابع

[1] باس، ل.، کلمن، پ. و کازمن، ر. (۱۳۹۸). معماری نرم‌افزار در عمل. ترجمه محمد رسولی. تهران: دانشگاه صنعتی شریف.

[2] سمیعی، م. و رضایی، ع. (۱۴۰۱). «بررسی روش‌های تحمل‌پذیری خطا در سامانه‌های توزیع‌شده». فصلنامه مهندسی نرم‌افزار ایران، ۱۴(۲)، ۴۵-۵۸.

[3] AspectJ in Action, Manning Publications, 2015.

[4] Software Architecture in Practice, Addison-Wesley, 2021.

[5] Algirdas Avizienis, Laprie, J.C., Randell, B., & Landwehr, C. “Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing.” IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 1(1), 2004.

[6] Garcia, J., Popescu, D., & Medvidovic, N. “Fault Tolerance Patterns in Microservice Architectures.” Journal of Systems and Software, 2021.

[7] Zhang, Y., Li, H., & Wang, X. “Aspect-Oriented Approaches for Resilient Cloud Applications.” Future Generation Computer Systems, 2022.

[8] Kumar, P., Singh, R., & Sharma, V. “Software Fault Tolerance Techniques: A Survey.” ACM Computing Surveys, 2023.

[9] Silva, R., & Costa, P. “Self-Healing Mechanisms in Cloud-Native Systems.” IEEE Access, 2023.

[10] Chen, X., et al. “Resilience Engineering for Distributed Systems.” IEEE Software, 2024.

[11] Ahmed, S., & Rahman, T. “A Comparative Study of AspectJ and Spring AOP for Enterprise Applications.” Software Practice and Experience, 2022.

[12] Li, J., Wang, K., & Zhao, M. “Fault Recovery Strategies in Kubernetes-based Microservices.” Future Internet, 2024.

[13] Brown, T., & Wilson, M. “Design Diversity and N-Version Programming Revisited.” Journal of Systems Architecture, 2021.

[14] Hassan, M. et al. “Chaos Engineering and Fault Injection in Cloud Platforms.” IEEE Cloud Computing, 2025.

[15] Patel, N., & Gupta, R. “Service Mesh Based Fault Tolerance in Microservices.” Software Quality Journal, 2024.

[16] Spring Framework Documentation. Spring AOP Reference Guide, 2025.

[17] Eclipse Foundation. AspectJ Programming Guide, 2025.

[18] Richardson, C. Microservices Patterns. Manning Publications, 2021.

[19] Newman, S. Building Microservices, 2nd Edition, O’Reilly, 2021.

KNO-1301-5105

بهبود شاخص‌های کیفیت خدمات در اینترنت اشیا مبتنی بر ابر با استفاده از هوش مصنوعی: طراحی بهبودیافته الگوریتم با بهینه‌سازی Harris Hawks

امین فضیلت[۱]، Amin.fazilat3405@gmail.com
موسی مجرد[۲]، musa.mojarad@iau.ac.ir
[۱،۲]گروه کامپیوتر، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران

چکیده:
در این مقاله، یک الگوریتم جدید الهام‌گرفته از طبیعت به نام بهینه‌سازی Harris Hawks ارائه شده است. این الگوریتم با هدف کاهش میانگین زمان پیاده‌سازی، زمان ساخت، هزینه شبکه و هزینه محاسبات ماشین مجازی برای به حداقل رساندن یک تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته است. برای ارزیابی روش پیشنهادی، ابتدا نتایج با استفاده از Harris Hawks پیشنهادی آزمایش شد و سپس با مقایسه آن با برخی از روش‌های منتشر شده اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی نه تنها به صورت پایدار عمل می‌کند، بلکه از نظر زمان اجرا نیز عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. نمودارها نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی کارآمدترین الگوریتم از نظر به حداقل رساندن فاصله ساخت است، که یک معیار مهم برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های زمان‌بندی است. همچنین با افزایش تعداد تکرارها، تفاوت‌های زمان ساخت بین الگوریتم‌ها بارزتر شده و الگوریتم پیشنهادی برتری قابل‌توجهی را نسبت به سایر الگوریتم‌ها حفظ می‌کند. به طور کلی، نمودارها مقایسه بصری واضحی از عملکرد نسبی الگوریتم‌های مختلف بر اساس زمان تکمیل کل کارها ارائه می‌کنند. این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی کارآمدترین الگوریتم در بین الگوریتم‌های ارزیابی شده است. همچنین ارزیابی نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی از سایر الگوریتم‌ها بهتر عمل می‌کند و به طور مداوم در اکثر تکرارها به هزینه شبکه کمتری دست می‌یابد. لذا الگوریتم بهینه‌سازی Harris Hawks پیشنهادی یک همگرایی سریع و کارآمد را به سمت راه‌حل بهینه نشان می‌دهد و از سایر روش‌ها، حتی زمانی که از پردازش موازی استفاده می‌کنند، بهتر عمل می‌کند. بهینه‌سازی Harris Hawks به کمترین تعداد تکرار و محاسبات نیاز دارد تا به نتیجه مطلوب برسد، بدون نیاز به اجرای چندگانه الگوریتم.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی Harris Hawks، زمان پیاده‌سازی، زمان ساخت، هزینه شبکه، هزینه محاسبات ماشین مجازی.

مقدمه

امروزه هوش مصنوعی (AI) به عنوان یک فناوری تحول‌آفرین، نقش کلیدی در بهبود کارایی و کیفیت خدمات در اینترنت اشیا (IoT) ایفا می‌کند. با تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده توسط دستگاه‌های متصل، AI می‌تواند الگوهای رفتاری را شناسایی کرده و اقدامات هوشمندانه‌ای برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها پیشنهاد دهد. از جمله کاربردهای مهم آن، تشخیص زودهنگام خرابی‌ها و مشکلات فنی است که منجر به افزایش دسترسی‌پذیری و کاهش زمان از کار افتادگی می‌شود [۱]. همچنین، هوش مصنوعی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش ازدحامی، راه‌حل‌هایی نوین برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی ارائه داده و موجب بهبود زیرساخت‌های انرژی می‌گردد. اینترنت اشیا، با اتصال تعداد زیادی از دستگاه‌های هوشمند به اینترنت، بستری برای تبادل خودکار داده‌ها بین اشیا بدون دخالت انسان فراهم می‌آورد [2]. این دستگاه‌ها، از حسگرها، پردازنده‌ها و سخت‌افزارهای ارتباطی بهره‌مندند و داده‌های دریافتی را از طریق دروازه‌ها یا دستگاه‌های لبه‌ای به فضای ابری منتقل کرده و پردازش می‌کنند [3]. با افزایش تعداد این دستگاه‌ها، مصرف انرژی نیز به میزان قابل توجهی افزایش یافته است و مدیریت بهینه انرژی به چالشی اساسی تبدیل شده است [۴]. برای افزایش طول عمر و عملکرد پایدار، استفاده از منابع انرژی پایدار و الگوریتم‌های صرفه‌جویانه ضروری است [5]. در این میان، رایانش ابری نیز به عنوان یک ابزار مکمل در کنار IoT نقش مهمی در بهینه‌سازی منابع و ارائه خدمات باکیفیت ایفا می‌کند [6]. الگوریتم‌های هوشمندی نظیر Harris Hawks Optimization (HHO)، با قابلیت بهینه‌سازی چندهدفه، پارامترهایی چون تأخیر، پهنای باند و قابلیت اطمینان را بهبود می‌بخشند.

این الگوریتم‌ها به خوبی با محیط‌های پویا و متغیر IoT سازگار می‌شوند و تجربه‌ای پایدار و هوشمند را برای کاربران فراهم می‌آورند. تلفیق این فناوری‌ها، آینده‌ای کارآمد، هوشمند و پایدار را برای کاربردهای IoT رقم خواهد زد.

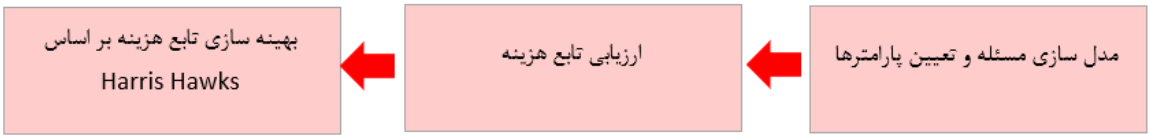
کارهای گذشته

در رابطه با روش پیشنهادی تحقیقاتی انجام گرفته که بصورت خلاصه راجب به آنها توضیح داده خواهد شد. در مطالعات متعددی که به بهبود کیفیت خدمات (QoS) در بستر اینترنت اشیا (IoT) پرداخته‌اند، از ترکیب روش‌های نوین هوش مصنوعی، بلاک‌چین، رایانش لبه‌ای و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای ارتقای عملکرد شبکه‌ها استفاده شده است. در [7]، رویکردی ترکیبی از الگوریتم نهنگ‌ها (WOA) و الگوریتم ژنتیک (GA) برای کشف سرویس با در نظر گرفتن نیازهای QoS ارائه شده که هدف آن یافتن سرویس‌های بهینه با تأخیر، پهنای باند و قابلیت اطمینان مطلوب است. در ادامه، مقاله [8] به کاربرد این مفاهیم در مراقبت‌های بهداشتی هوشمند پرداخته و از ترکیب هوش مصنوعی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای افزایش دقت، سرعت و امنیت در مدیریت داده‌های بیماران استفاده کرده است. مقاله [9] نیز با رویکردی تحلیلی، فرصت‌ها و چالش‌های به‌کارگیری هوش مصنوعی و سیستم‌های توزیع‌شده را در ارتقای کیفیت خدمات بهداشتی بررسی کرده و بر نقش پردازش داده‌های بزرگ و تشخیص دقیق‌تر تأکید دارد، در حالی که امنیت داده‌ها و زیرساخت‌های پیچیده را از چالش‌های اصلی برشمرده است.

در ادامه، [10] به کاربرد هوش مصنوعی و IoT در بهینه‌سازی مسیرهای لجستیکی پرداخته و با استفاده از داده‌های بلادرنگ و الگوریتم‌های هوشمند، به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی زنجیره تأمین کمک می‌کند. مقاله [11] نیز با نگاهی آینده‌نگر، ترکیب فناوری‌های AI، بلاک‌چین و IoT را در توسعه اپلیکیشن‌های ابری بررسی کرده که به امنیت، شفافیت و بهره‌وری بالا در خدمات منجر می‌شود. در [12] از یادگیری تقویتی در بهینه‌سازی عملکرد WSN و IoT در شهرهای هوشمند بهره گرفته شده، که با هدف افزایش بهره‌وری و کیفیت خدمات صورت گرفته است. مقاله [13] بر ترکیب بلاک‌چین با الگوریتم‌های یادگیری ماشین در بهبود QoS تمرکز دارد، در حالی که [14] یک مدل فازی چندهدفه برای ترکیب سرویس‌ها پیشنهاد داده است. در ادامه، مقالات [15] تا [17] به تحلیل روش‌های مختلف برای ترکیب مؤثر رایانش لبه‌ای و ابری، طراحی پروتکل‌های مسیریابی صرفه‌جویانه در انرژی، حفظ حریم خصوصی در سرویس‌های ابری، مدل‌های HMM برای ترکیب سرویس، استقرار بهینه سرویس‌ها در محیط‌های ابری و لبه‌ای، و تکنیک‌های بهینه‌سازی برای ارتقای کیفیت خدمات بهداشتی در محیط‌های IoT پرداخته‌اند. این مجموعه مطالعات نشان می‌دهد که آینده خدمات هوشمند مبتنی بر IoT نیازمند استفاده از رویکردهای ترکیبی و پیشرفته برای تضمین کیفیت، امنیت و بهره‌وری سیستم‌ها است.

روش پیشنهادی

در این مقاله، طراحی جدیدی از الگوریتم بهینه‌سازی بهینه‌سازی Harris Hawks به‌کار رفته است تا بهینه‌ترین مقادیر در کوتاه‌ترین زمان پردازش به دست آید. این روش شامل چندین بخش است که به ترتیب زیر می‌باشد: مدل‌سازی مسئله و بیان پارامترهای کیفیت خدمات و محاسبه این پارامترها، و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی Harris Hawks برای ارتقاء این شاخص‌ها؛ این بخش‌ها اجزای تشکیل‌دهنده روش پیشنهادی هستند. شکل 1 مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.



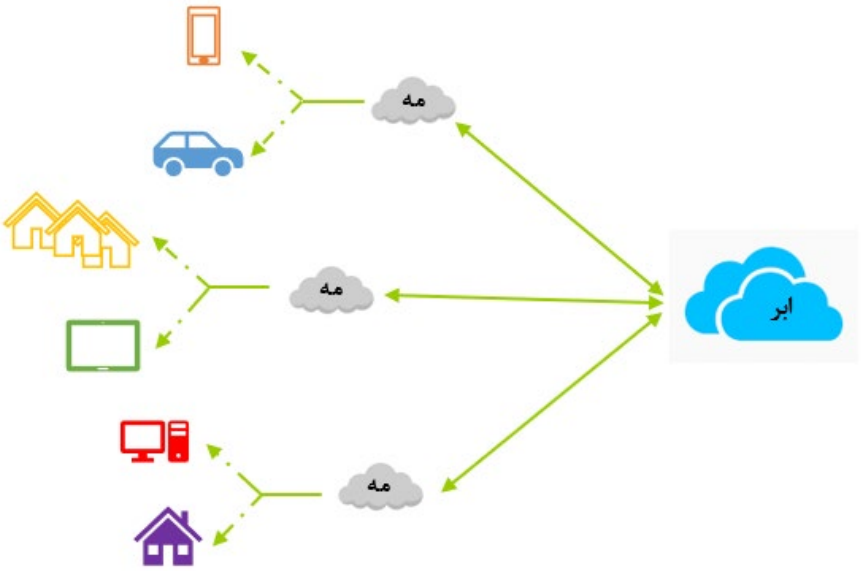
مدل پیشنهادی

این فلوچارت یک فرآیند سه مرحله‌ای را برای حل یک مسئله بهینه‌سازی هزینه بر اساس الگوریتم Harris Hawks نشان می‌دهد. در مرحله اول، مدل‌سازی مسئله و تعیین پارامترها انجام می‌شود. این مرحله شامل تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری، توابع هدف، و

محدودیت‌های مربوطه است تا مسئله بهینه‌سازی به‌طور دقیق مشخص شود. در مرحله دوم، تابع هزینه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، که شامل محاسبه مقدار تابع هدف بر اساس پارامترهای تعریف‌شده است. پس از این ارزیابی، در مرحله سوم از الگوریتم Harris Hawks برای بهینه‌سازی تابع هزینه استفاده می‌شود. این الگوریتم مبتنی بر استراتژی شکار شاهین‌های هریس است که با بهره‌گیری از جستجوی تصادفی و حرکت تطبیقی به سمت بهترین راه‌حل، هزینه را به حداقل می‌رساند.

در محیط های ابری، کاربران می توانند به منابع پردازشی مختلف دسترسی داشته باشند و فقط برای آنچه استفاده می کنند، پرداخت کنند. مصرف انرژی و زمان‌بندی وظایف، مسائل مهمی در رایانش ابری هستند که بسیاری از محققان روی آن کار کرده‌اند. زمان‌بندی کار یک مشکل NP-سخت است و چندین تکنیک الهام‌گرفته از زیستی برای رسیدگی به آن پیشنهاد شده‌است. رایانش ابری یک الگوی معماری است که در آن مشتریان خدماتی را از دستگاه‌های ابری با ظرفیت ذخیره‌سازی و محاسباتی دریافت می‌کنند و به آنها امکان می‌دهد داده‌ها و نمونه‌هایی از خدمات ابری را به اشتراک بگذارند. اتخاذ سیاست هایی برای مدیریت سرویس ها و داده ها برای تعیین مکان و زمان مکانیابی آنها ضروری است. موضوع قرارگیری سرویس مه شکن مشکل قابل توجهی در حوزه خدمات مه شکن است.

مکانیابی خدمات مه یک چالش مهم در زمینه محاسبات مه است. شکل 2 یک نمایش گرافیکی از مدل محاسبه مه را نشان می دهد.



شکل ۲. شکل مدل محاسباتی مه.

شبه کد بهبود شاخص‌های کیفیت خدمات در اینترنت ا شیا مبتنی بر ابر با ا ستفاده از هوش م صنوعی با کمک الگوریتم بهینه سازی Harris Hawks در ادامه آورده شده است.

```
// Pseudo-code for Improving Service Quality Indicators using HHO in Cloud-based IoT
Initialize parameters:
    population_size = N  // Number of Harris Hawks
    max_iterations = T    // Maximum number of iterations
    service_quality_indicators = [SQ1, SQ2, SQ3] // List of service quality indicators
    target_quality = desired_values // Target values for quality indicators
// Define the fitness function
function fitness_function(individual):
    // Evaluate the service quality indicators based on the individual's parameters
    quality_scores = evaluate_quality(individual)
    // Calculate the fitness based on deviation from target
    fitness = calculate_deviation(quality_scores, target_quality)
    return fitness
// Initialize Harris Hawks population
population = initialize_population(population_size)
// Main optimization loop
for iteration in range(max_iterations):
    for each hawk in population:
```

```
        // Calculate fitness for each hawk
        hawk.fitness = fitness_function(hawk)
    // Sort population based on fitness (minimization)
    population.sort_by_fitness()
    // Update positions based on Harris Hawks behavior
    for each hawk in population:
        if random() < escape_probability:
            // Apply escape behavior
            hawk.position = escape(hawk)
        else:
            // Apply pursuit behavior
            target_hawk = select_target(population)
            hawk.position = update_position(hawk, target_hawk)
    // Update global best solution
    global_best_hawk = population[0]  // Best hawk with lowest fitness
    // Optional: Apply local search or refinement strategies
    if local_search_condition:
        refine_solution(global_best_hawk)
    // Store results for analysis
    store_results(iteration, global_best_hawk)
return global_best_hawk.position, global_best_hawk.fitness
// Function to evaluate the service quality indicators
function evaluate_quality(individual):
    // Implement the logic to evaluate service quality indicators
    // based on the individual's parameters in the cloud-based IoT context
    return quality_scores
// Function to calculate deviation from target values
function calculate_deviation(quality_scores, target_quality):
    // Calculate and return the deviation metric
    return deviation_metric
// Function to initialize population of hawks
function initialize_population(size):
    // Create and return a list of hawks with random initial positions
    return population
// Function to update position based on Harris Hawks behavior
function update_position(hawk, target_hawk):
    // Implement position update logic based on HHO rules
    return new_position
// Function to implement escape behavior
function escape(hawk):
    // Implement the logic for hawk escape behavior
    return escaped_position
// Function to select a target hawk for pursuit
function select_target(population):
    // Implement logic to select a target hawk based on fitness
    return target_hawk
// Function to refine solution
function refine_solution(hawk):
    // Implement local refinement strategies to improve the solution
```

شکل ۳. شبه کد روش پیشنهادی

میانگین زمان اجرا

زمان متوسط اجرای برنامه به زمان معمول اجرای وظایف Map/Reduce اشاره دارد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل زمان متوسط اجرا (AET) است که در زیر ارائه می‌شود:

$$AET = \frac{\sum_{j=1}^{N} P_{tN}(j)}{N} + \frac{\sum_{j=1}^{M} P_{tM}(j)}{M} \quad (۱)$$

براساس رابطه فوق، P_{tN} و P_{tM} به زمان صرف شده برای پردازش اشاره دارند و N و M به تعداد وظایف نقشه و کاهش وظایف در این کار تعریف می‌شوند. در این تحقیق، این مقادیر با زمان صرف شده برای پردازش برابر هستند.

Makespan

زمان بحرانی M_{sp} Makespan به زمانی اشاره دارد که برای پردازش تمام وظایف لازم است، و این وظایف باید به گره‌های مه‌زا (fog nodes) اختصاص داده شوند به گونه‌ای که این زمان برای تکمیل همه وظایف به حداقل برسد. زمان بحرانی دوره زمانی اجرای کار Map/Reduce را از آغاز تا پایان آن تعریف می‌کند. این واژه به‌صورت ریاضی به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$M_{sp} = ft_r(M) \quad (۲)$$

زمان تمام شده برای کار کاهش یافته، M، با تابع $ft_r(M)$ تعریف می گردد.

هزینه محاسبات ماشین مجازی

هزینه استفاده از CPU را می توان بر اساس رابطه بین هزینه در واحد زمان ثانیه (Vc) و زمان صرف شده برای پردازش (Pt) ارزیابی کرد. هزینه محاسباتی ماشین مجازی را می توان با استفاده از این رابطه فرموله کرد.

$$V_m^{cost} = \left(\sum_{j=1}^{n_{vm}} P_{tN}(j) + \sum_{k=1}^{m_{vm}} P_{tM}(k) \right) \times VMcostperunittime \quad (۳)$$

زمان اجرای VM_j هنگام اجرای وظیفه نقشه و زمان اجرای VM_k هنگام اجرای کار کاهش به ترتیب با $P_{tN}(j)$ و $P_{tM}(k)$ نشان داده می شود. بر اساس این پارامترها، یک مقدار حداقل باید شناسایی شود. رابطه نهایی تناسب اندام با این سه پارامتر تعیین خواهد شد.

$$Fitness = w_1 \times AET + w_2 \times M_{sp} + w_3 \times C_{net} + w_4 \times V_m^{cost} \quad (۴)$$

براساس این رابطه، w_1 تا w_4 نمایانگر ضرایب تناسبی هستند که برای جمع‌زدن این ۳ پارامتر به‌کار رفته‌اند. بر اساس این رابطه، باید فرض زیر را داشته باشیم:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \quad (۵)$$

متغیرهای تعریف شده در برنامه های کاربردی مبتنی بر اینترنت اشیا ملاحظات بسیار مهمی هستند. بر اساس معادلات، متغیرهای مذکور تابعی از متغیرهای مستقل قبلی هستند که به این معنی است که با تغییر متغیرهای مستقل، مقادیر آنها تغییر می کند. به عنوان مثال، افزایش تعداد ماشین‌های مجازی برای همان کار کاربردی IoT در حالی که در ظرفیت مرکز داده باقی می‌ماند ممکن است زمان ساخت، میانگین زمان پردازش و سایر ویژگی‌ها را در زمانی که منابع محاسباتی بیشتری توسط نقشه مورد نیاز است یا فرآیندها را کاهش دهد، تغییر دهد.

هزینه شبکه

هزینه شبکه (Cnet) هزینه‌ای را نشان می‌دهد که وقتی وظیفه کاهش‌یافته داده‌ها را از خروجی میانی وظیفه نقشه پس از اینکه کار قبلاً آن را از ذخیره‌سازی به دست آورده است به دست می‌آورد. بطوری که T_D به تأخیر زمانی اشاره دارد.

$$C_{net} = T_D \times Networkcostperunittime \quad (۶)$$

زمان تاخیر

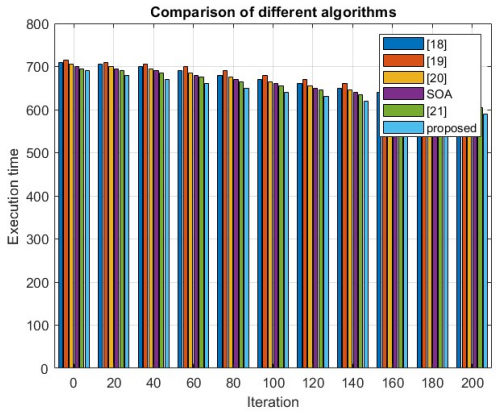
تفاوت زمانی بین شروع وظایف کاهش و نقشه به عنوان مدت زمان تاخیر نامیده می شود.

$$T_D = St_N(N) + St_M(M) - ft_N(N) \quad (۷)$$

جایی که $ft_N(N)$ نشان‌دهنده زمان اتمام وظیفه کاهش‌یافته N است و $St_N(N)$ و $St_M(M)$ به‌ترتیب زمان شروع وظیفه نقشه N و زمان شروع وظیفه کاهش M را نشان می‌دهند.

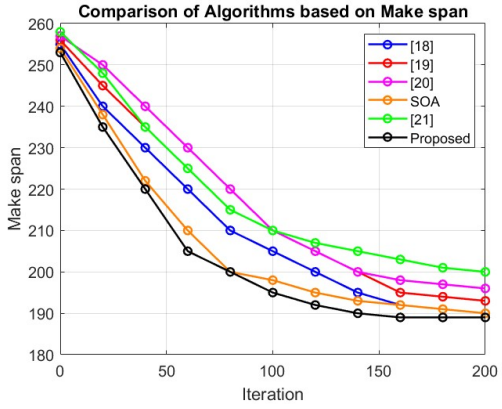
نتایج شبیه سازی

برای ارزیابی روش پیشنهادی، ابتدا نتایج با استفاده ازHarris Hawks پیشنهادی آزمایش شد و سپس با مقایسه آن با برخی از روش‌های منتشر شده، از جمله[18] MRC ، [19] IoTSim-Osmosis (IOT/OS)، [20] IoTSim-Stream (IOT/ST)، تکنیک استاندارد مبتنی برSOA و [21] اعتبارسنجی گردید. در اینجا، روش‌هایی که در کار خود از متاهیوریستیک‌ها استفاده نکرده‌اند، با استفاده از متاهیوریستیک‌های مبتنی برHarris Hawks گسترش یافته‌اند تا مقایسه عادلانه‌ای فراهم شود. نمودارهای بعدی روش پیشنهادی را بر اساس میانگین زمان اجرا، زمان ساخت و هزینه محاسبه ماشین مجازی ارزیابی می‌کنند. شکل ۴ زمان اجرا را برای همه الگوریتم های مقایسه ای نشان می دهد که بهینه‌سازی Harris Hawks پیشنهادی به کمترین مقدار در آخرین تکرار می رسد.



شکل ۴. مقایسه زمان اجرای روش پیشنهادی با روش های دیگر

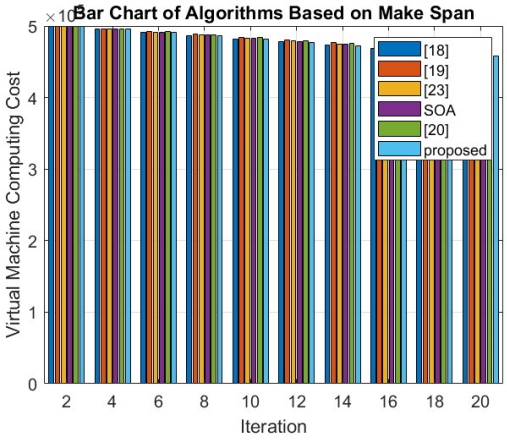
این نمودار مقایسه‌ای از زمان اجرای الگوریتم‌های مختلف در برابر تعداد تکرارها را نمایش می‌دهد که در آن، الگوریتم‌های `[18]`, `[۱۹]`, `[۲۰]`, `[23]SOA`, `[۲۱]` و الگوریتم پیشنهادی با رنگ‌ها و برچسب‌های متفاوت مشخص شده‌اند. با افزایش تعداد تکرارها، زمان اجرا برای تمامی الگوریتم‌ها تقریباً ثابت باقی می‌ماند که نشان‌دهنده پایداری عملکرد و عدم حساسیت زیاد به تعداد تکرارها است. در این میان، الگوریتم پیشنهادی کمترین زمان اجرا را داراست و از کارایی بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها برخوردار است. این برتری آن را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی که زمان اجرا در آن‌ها اهمیت دارد تبدیل می‌کند. بنابراین، نمودار عملکرد برتر الگوریتم پیشنهادی را از لحاظ سرعت و پایداری در مقایسه با سایر روش‌ها تأیید می‌کند.



شکل ۵. مقایسه Make Span **برای روش های بررسی شده**

الگوریتم پیشنهادی (مشکی) با کمترین مقدار MakeSpan در بیشتر تکرارها، عملکرد برتری از خود نشان می‌دهد، در حالی که الگوریتم [18] (آبی) با بیشترین مقدار، کمترین کارایی را دارد. الگوریتم‌های [19]، [20] و SOA عملکرد متوسطی داشته و در میانه

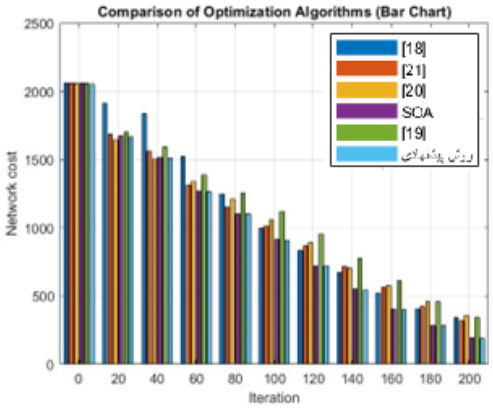
طیف قرار می‌گیرند، در حالی که الگوریتم [21] با شروع ضعیف، با افزایش تکرارها به سمت الگوریتم پیشنهادی میل می‌کند. به‌طور کلی، الگوریتم پیشنهادی نه تنها از نظر MakeSpan، بلکه از لحاظ هزینه محاسباتی ماشین مجازی نیز بهترین عملکرد را داشته و با کمترین هزینه در تکرار نهایی، بهینه‌ترین گزینه در میان روش‌های مقایسه‌شده محسوب می‌شود.



شکل ۶. مقایسه مقدار هزینه محاسبات ماشین مجازی برای الگوریتم های مقایسه ای.

نمودار مورد نظر عملکرد الگوریتم‌های مختلف را در طول ۲۰ تکرار از نظر MakeSpan (زمان تکمیل کل کارها) مقایسه می‌کند و نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در تمامی تکرارها عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته و کمترین هزینه محاسبات ماشین مجازی را به‌طور پیوسته ثبت کرده است. الگوریتم SOA (بنفش) ضعیف‌ترین عملکرد را دارد و بیشترین فاصله زمانی را در اکثر تکرارها نشان می‌دهد. الگوریتم‌های [18]، [19] و [23] (نارنجی، قهوه‌ای و سبز) عملکردی بین الگوریتم پیشنهادی و SOA داشته و جایگاه آن‌ها در تکرارهای مختلف تا حدودی تغییر می‌کند. با افزایش تعداد تکرارها، برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها آشکارتر می‌شود. این تحلیل به‌روشنی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی از نظر بهینه‌سازی زمان و هزینه اجرای وظایف، کارآمدترین گزینه در میان الگوریتم‌های ارزیابی‌شده است.

شکل ۷ هزینه شبکه را برای تمام الگوریتم‌های مقایسه‌ای نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که هزینه شبکه با وجود تغییر در تعداد ماشین‌های مجازی (VM) یکسان است. این امر به این دلیل است که با توجه به بار کاری یکسان، اندازه داده‌ها همان تأخیر شبکه را ایجاد می‌کند.



شکل ۷. مقایسه هزینه شبکه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها

الگوریتم پیشنهادی در اکثر تکرارها کمترین هزینه شبکه را ثبت کرده و نشان‌دهنده کارایی بالای آن در بهینه‌سازی مصرف منابع شبکه است. الگوریتم‌های [18] و [21] در تکرارهای اولیه بیشترین هزینه را دارند و عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان می‌دهند، در حالی که SOA با شروع ضعیف، در ادامه بهبود پیدا کرده و از برخی رقبا پیشی می‌گیرد. الگوریتم‌های [19] و [20] عملکردی متوسط و نسبتاً پایدار دارند. روند کلی نمودار نشان می‌دهد که بیشتر الگوریتم‌ها به سمت کاهش هزینه شبکه همگرا

می شوند، اما الگوریتم پیشنهادی سریع‌ترین و کارآمدترین همگرایی را دارد و بدون نیاز به اجرای چندباره، به نتیجه مطلوب می‌رسد، که آن را به گزینه‌ای مناسب برای بهینه‌سازی در سیستم‌های حساس به هزینه و زمان تبدیل می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم جدید الهام گرفته از زیستی، بهینه‌سازی Harris Hawks ، برای به حداقل رساندن یک تابع هدف با هدف کاهش میانگین زمان پیاده‌سازی، زمان ساخت، هزینه شبکه و هزینه محاسبات ماشین مجازی استفاده شد. برای ارزیابی روش پیشنهادی، ابتدا نتایج با استفاده ازHarris Hawks پیشنهادی آزمایش شد و سپس با مقایسه آن با برخی از روش‌های منتشر شد. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی نه تنها به صورت پایدار عمل می‌کند، بلکه از نظر زمان اجرا نیز عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. همچنین با افزایش تعداد تکرارها، تفاوت‌های Make Span بین الگوریتم‌ها بارزتر می‌شود و الگوریتم پیشنهادی برتری قابل‌توجهی را نسبت به سایر الگوریتم‌ها حفظ می‌کند. به طور کلی، نمودارها مقایسه بصری واضحی از عملکرد نسبی الگوریتم‌های مختلف بر اساس Make Span یا زمان تکمیل کل کارها ارائه می‌کنند. این نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی کارآمدترین الگوریتم در بین الگوریتم های ارزیابی شده است. الگوریتم بهینه‌سازی Harris Hawks پیشنهادی یک همگرایی سریع و کارآمد را به سمت راه‌حل بهینه نشان می‌دهد و از سایر روش‌ها، حتی زمانی که از پردازش موازی استفاده می‌کنند، بهتر عمل می‌کند. بهینه‌سازی Harris Hawks به کمترین تعداد تکرار و محاسبات نیاز دارد تا به نتیجه مطلوب برسد، بدون نیاز به اجرای چندگانه الگوریتم. جهت‌های تحقیقاتی آینده شامل استفاده از سایر الگوریتم‌های فرابتکاری مدرن، ترکیب پارامترهای اضافی مانند انرژی و زمان پاسخ و ترکیب روش پیشنهادی با تکنیک‌های موجود مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی میباشد.

منابع

[1] Ferrara, E. (2023). Fairness and bias in artificial intelligence: A brief survey of sources, impacts, and mitigation strategies. Sci, 6(1), 3.
[2] Alferaidi, A.; Yadav, K.; Alharbi, Y.; Razmjooy, N.; Viriyasitavat, W.; Gulati, K.; Kautish, S.; Dhiman, G. Distributed Deep CNN-LSTM Model for Intrusion Detection Method in IoT-Based Vehicles. Math. Probl. Eng. 2022, 2022, 3424819. [Google Scholar] [CrossRef]
[3] Bahmanyar, D.; Razmjooy, N.; Mirjalili, S. Multi-objective scheduling of IoT-enabled smart homes for energy management based on Arithmetic Optimization Algorithm: A Node-RED and NodeMCU module-based technique. Knowl.-Based Syst. 2022, 247, 108762. [Google Scholar] [CrossRef]
[4] Charef, N., Mnaouer, A. B., Aloqaily, M., Bouachir, O., & Guizani, M. (2023). Artificial intelligence implication on energy sustainability in Internet of Things: A survey. Information Processing & Management, 60(2), 103212.
[5] Seetharaman, A.; Patwa, N.; Saravanan, A.S.; Sharma, A. Customer expectation from industrial internet of things (IIOT). J. Manuf. Technol. Manag. 2019, 30, 1161–1178. [Google Scholar] [CrossRef]
[6] Vakili, A., Al-Khafaji, H. M. R., Darbandi, M., Heidari, A., Jafari Navimipour, N., & Unal, M. (2024). A new service composition method in the cloud-based Internet of things environment using a grey wolf optimization algorithm and MapReduce framework. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 36(16), e8091.
[7] Liu, X., & Deng, Y. (2024). A new QoS-aware service discovery technique in the Internet of Things using whale optimization and genetic algorithms. Journal of Engineering and Applied Science, 71(1), 4.
[8] Ala, A., Simic, V., Pamucar, D., & Bacanin, N. (2024). Enhancing patient information performance in internet of things-based smart healthcare system: Hybrid artificial intelligence and optimization approaches. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 131, 107889.
[9] Aminizadeh, S., Heidari, A., Dehghan, M., Toumaj, S., Rezaei, M., Navimipour, N. J., ... & Unal, M. (2024). Opportunities and challenges of artificial intelligence and distributed systems to improve the quality of healthcare service. Artificial Intelligence in Medicine, 149, 102779.
[10] Liu, Q. (2024). Logistics Distribution Route Optimization in Artificial Intelligence and Internet of Things Environment. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 7(2), 221-239.
[11] Hemamalini, V., Mishra, A. K., Tyagi, A. K., & Kakulapati, V. (2024). Artificial intelligence–blockchain-enabled–internet of things-based cloud applications for next-generation society. Automated Secure Computing for Next-Generation Systems, 65-82.
[12] Singh, S. P., Kumar, N., Alghamdi, N. S., Dhiman, G., Viriyasitavat, W., & Sapsomboon, A. (2024). Next-Gen WSN Enabled IoT for Consumer Electronics in Smart City: Elevating Quality of Service Through Reinforcement Learning-Enhanced Multi-Objective Strategies. IEEE Transactions on Consumer Electronics.
[13] CheSuh, L. N., Fernández-Diaz, R. Á., Alija-Perez, J. M., Benavides-Cuellar, C., & Alaiz-Moreton, H. (2024). Improve quality of service for the Internet of Things using blockchain & machine learning algorithms. Internet of Things, 26, 101123.
[14] Hamzei, M., Khandagh, S., & Jafari Navimipour, N. (2023). A quality-of-service-aware service composition method in the internet of things using a multi-objective fuzzy-based hybrid algorithm. Sensors, 23(16), 7233.
[15] Pal, S., Jhanjhi, N. Z., Abdulbaqi, A. S., Akila, D., Almazroi, A. A., & Alsubaei, F. S. (2023). A hybrid edge-cloud system for networking service components optimization using the internet of things. Electronics, 12(3), 649.
[16] Srinivasulu, M., Shivamurthy, G., & Venkataramana, B. (2023). Quality of service aware energy efficient multipath routing protocol for internet of things using hybrid optimization algorithm. Multimedia Tools and Applications, 82(17), 26829-26858.
[17] Asghari, P., Rahmani, A. M., & Javadi, H. H. S. (2022). Privacy-aware cloud service composition based on QoS optimization in Internet of Things. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 13(11), 5295-5320.
[18] Zeng, X.; Garg, S.K.; Strazdins, P.; Jayaraman, P.P.; Georgakopoulos, D.; Ranjan, R. IOTSim: A simulator for analysing IoT applications. J. Syst. Archit. 2017, 72, 93–107. [Google Scholar] [CrossRef]
[19] Alwasel, K.; Jha, D.N.; Habeeb, F.; Demirbaga, U.; Rana, O.; Baker, T.; Dustdar, S.; Villari, M.; James, P.; Solaiman, E.; et al. IoTSim-Osmosis: A framework for modeling and simulating IoT applications over an edge-cloud continuum. J. Syst. Archit. 2021, 116, 101956. [Google Scholar] [CrossRef]
[20] Barika, M.; Garg, S.; Chan, A.; Calheiros, R.N.; Ranjan, R. IoTSim-Stream: Modelling stream graph application in cloud simulation. Future Gener. Comput. Syst. 2019, 99, 86–105.
[21] Al-Khafaji, H. M. R. (2022). Improving Quality Indicators of the Cloud-Based IoT Networks Using an Improved Form of Seagull Optimization Algorithm. Future Internet, 14(10), 281.

[22] Givi, H., & Hubalovska, M. (2023). Skill Optimization Algorithm: A New Human-Based Metaheuristic Technique. Computers, Materials & Continua, 74(1).

KNO-1301-5106

یک چارچوب یادگیری تقویتی عمیق چندعامله مبتنی بر توجه متقابل و یادگیری فدرال برای بهینه‌سازی پایدار و حفظ حریم خصوصی در شهر هوشمند

یاسر نگهداری[1] yaserkhannegahdari@gmail.com

موسی مجرد[2] Mousamojarad@gmail.com

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه کامپیوتر، واحد فیروزآباد ، دانشگاه آزاد اسلامی ، فیروزآباد ، ایران

۲. دانشیار گروه کامپیوتر، واحد فیروزآباد ، دانشگاه آزاد اسلامی ، فیروزآباد ، ایران

چکیده

در عصر شهرهای هوشمند، انبوهی از داده‌های توزیع‌شده، گره‌های تصمیم‌گیرنده متعدد و نیاز به واکنش بلادرنگ، چالش‌های اساسی برای روش‌های یادگیری متمرکز سنتی ایجاد کرده است. این روش‌ها با مشکلاتی نظیر تأخیر ارتباطی بالا، نقض حریم خصوصی داده‌های شهروندان، مقیاس‌ناپذیری و وابستگی به گره مرکزی مواجه هستند. برای رفع این چالش‌ها، در این پژوهش یک چارچوب یادگیری تقویتی عمیق چندعامله مبتنی بر توجه متقابل و یادگیری فدرال ارائه می‌شود. روش پیشنهادی شامل پنج مرحله اصلی است: (۱) جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌های توزیع‌شده شهری، (۲) طراحی معماری چندعامله با مکانیزم توجه متقابل برای هماهنگی میان عامل‌ها، (۳) آموزش محلی با یادگیری تقویتی عمیق در هر گره مستقل، (۴) به‌روزرسانی فدرال مدل مرکزی با اعمال حریم خصوصی تفاضلی بر گرادیان‌ها، و (۵) ارزیابی و اجرای بلادرنگ در محیط شهری. مکانیزم توجه متقابل به هر عامل اجازه می‌دهد تا اهمیت نسبی سایر عامل‌ها را در تصمیم‌گیری خود لحاظ کند، در حالی که یادگیری فدرال امکان به‌روزرسانی مدل مرکزی را بدون اشتراک‌گذاری داده‌های خام فراهم می‌سازد. حریم خصوصی تفاضلی نیز با افزودن نویز کنترل‌شده به گرادیان‌ها، از نشت اطلاعات حساس جلوگیری می‌کند. ارزیابی روش پیشنهادی با سه روش برتر سال‌های ۲۰۲۶-۲۰۲۵ (RT-FedFlow، FDT و ROCO) بر حسب شش معیار عملکردی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهادی نسبت به بهترین روش رقیب (ROCO) به ترتیب بهبود ۵٫۰٪ در دقت، ۴٫۳٪ در Precision ، ۵٫۱٪ در Recall ، ۴٫۷٪ در F۱-Score، ۱۵٫۳٪ در MAE و ۲۴٫۲٪ در MSE دست یافته است. میانگین کلی بهبود روش پیشنهادی ۹٫۴٪ و در معیارهای خطای پیش‌بینی ۱۹٫۸٪ می‌باشد. این نتایج حاکی از آن است که چارچوب پیشنهادی با ترکیب مؤلفه‌های توجه متقابل، یادگیری فدرال و حریم خصوصی تفاضلی، راهکاری کارآمد، مقیاس‌پذیر و امن برای بهینه‌سازی پایدار در کاربردهای متنوع شهر هوشمند از جمله مدیریت ترافیک، شبکه انرژی و پاسخگویی اضطراری ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: یادگیری تقویتی عمیق چندعامله، توجه متقابل، یادگیری فدرال، حریم خصوصی تفاضلی، شهر هوشمند

مقدمه

شهرهای هوشمند با بهره‌گیری از حجم عظیم داده‌های حسگرها، فرصتی بی‌نظیر برای بهینه سازی بلادرنگ فرآیندهای شهری فراهم کرده‌اند. با این حال، زیر سیستم‌های مختلف شهری مانند ترافیک، انرژی و کیفیت هوا به شدت به هم وابسته هستند و بهینه سازی مستقل هر یک می‌تواند اثرات جانبی ناخواسته‌ای ایجاد کند [۱]. یادگیری تقویتی عمیق چندعامله رویکردی قدرتمند برای تصمیم‌گیری در این محیط‌های پویا است [۲]، اما دو چالش اساسی همچنان باقی است: مدل‌سازی دقیق تداخلات بین زیرسیستم‌ها و حفظ حریم خصوصی داده‌های شهروندان. این مقاله چارچوبی نوین مبتنی بر توجه متقابل و یادگیری فدرال ارائه می‌دهد که هر دو چالش را به طور همزمان پوشش می‌دهد.

پژوهش‌های موجود با دو شکاف اساسی روبرو هستند. اول: اکثر روش‌ها زیرسیستم‌ها را مستقل فرض می‌کنند و از «کوپلینگ منفی» مانند افزایش مصرف انرژی در نتیجه بهینه‌سازی ترافیک غافل می‌شوند [۳]. معماری‌های فعلی چندعامله فاقد مکانیزم مؤثر برای تبادل اطلاعات معنادار بین عوامل هستند [۴]. دوم: رویکردهای متمرکز موجود، همه داده‌ها را به سرور مرکزی ارسال می‌کنند که حریم خصوصی شهروندان را نقض کرده و مقیاس‌پذیری ضعیفی دارد [۵]. روش‌های یادگیری فدرال موجود نیز برای داده‌های ناهمگن شهری (مناطق مسکونی در مقابل صنعتی) طراحی نشده‌اند [۶]. بنابراین مسئله اصلی، فقدان چارچوبی است که همزمان تداخلات را مدل کند، حریم خصوصی را حفظ نماید و در برابر ناهمگنی داده مقاوم باشد.

شهرها بیش از ۷۰ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی را تولید می‌کنند [۷]، لذا هر بهبود در کارایی شهری تأثیر مستقیم بر تغییرات اقلیمی دارد. نوآوری این تحقیق در سه بخش است: (۱) مکانیزم توجه متقابل چند سطحی که به هر عامل اجازه می‌دهد قبل از تصمیم‌گیری، اثرات غیرمستقیم اقدام خود بر سایر زیرسیستم‌ها را پیش‌بینی کند. (۲) یادگیری فدرال ناهمگن با حریم خصوصی تفاضلی که مدل‌ها را به صورت محلی روی داده‌های خصوصی هر منطقه آموزش داده و تنها گرادیان‌های نویزی‌شده را اشتراک می‌گذارد [۸]. (۳) تابع پاداش پایدار تطبیقی که همزمان کارایی، پایداری زیست‌محیطی و عدالت توزیع منابع را وزن‌دهی می‌کند. این ترکیب سه‌گانه تاکنون در هیچ مطالعه‌ای گزارش نشده است.

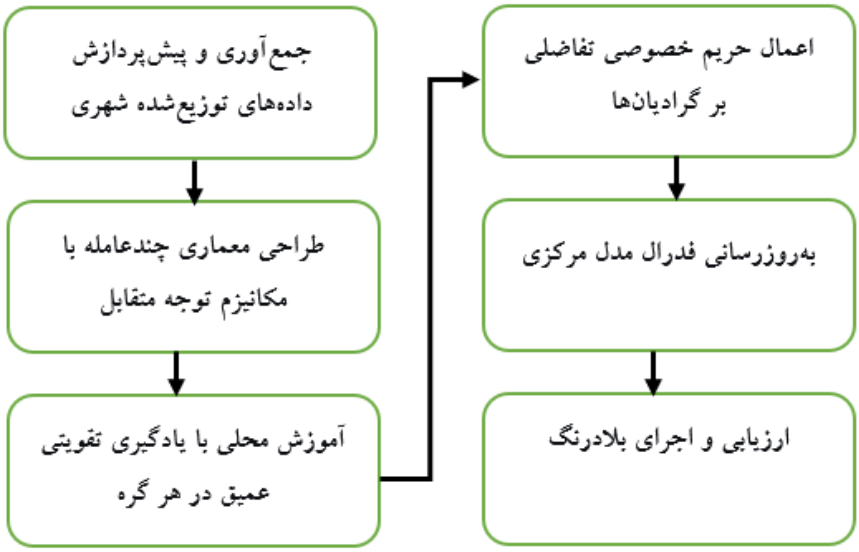
مرور کارهای گذشته

پژوهش‌های پیشین در حوزه بهینه‌سازی شهر هوشمند با یادگیری ماشین را می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی کرد. دسته اول، مطالعات متمرکز بر زیرسیستم‌های منفرد: ژانگ و همکاران [۹] با ترکیب LSTM و شبکه‌های توجه، پیش‌بینی ترافیک را تا ٪۱۸ بهبود دادند. لی و همکاران [۱۰] با یادگیری تقویتی چندعامله، زمان انتظار در تقاطع‌ها را ٪۳۴ کاهش دادند. سینگ و کومار [۱۱] با ترکیب جنگل تصادفی و بهینه سازی ازدحام ذرات، مصرف انرژی در شبکه هوشمند را ٪۲۲ کاهش دادند. گار سیا و همکاران [۱۲] از ماشین بردار پشتیبان برای بهینه‌سازی مسیر جمع‌آوری پسماند استفاده کردند که منجر به کاهش ٪۱۵ در هزینه سوخت شد. دسته دوم، مطالعاتی که به تداخلات اشاره کرده اما راهکار یکپارچه نداده‌اند: وانگ و ژو [۱۳] نشان دادند که بهینه سازی ترافیک می‌تواند بر مصرف انرژی تأثیر منفی بگذارد، اما مدلی برای رفع این تعارض ارائه نکردند.

دسته سوم، مطالعات مربوط به یادگیری فدرال در شهر هوشمند: رحیمی و حسینی [۱۴] چالش‌های حریم خصوصی را بررسی کردند اما روش آنها برای داده‌های ناهمگن شهری (مناطق مسکونی در مقابل صنعتی) عملکرد ضعیفی داشت. همچنین، کیم و همکاران [۱۵] نشان دادند که مدل‌های عمیق موجود در برابر تغییرات ناگهانی الگوهای شهری (مانند بسته شدن ناگهانی خیابان) آسیب‌پذیر هستند. در مجموع، شکاف اصلی ادبیات تحقیق در سه نقطه است: (۱) نبود مکانیزمی برای مدل سازی تداخلات متقابل بین زیر سیستم‌های مختلف شهری، (۲) عدم توجه به حفظ حریم خصوصی در کنار بهینه‌سازی، و (۳) ضعف روش‌های موجود در مواجهه با داده‌های ناهمگن و پویای شهری. چارچوب پیشنهادی در این مقاله با ترکیب مکانیزم توجه متقابل و یادگیری فدرال ناهمگن، به طور همزمان به هر سه شکاف پاسخ می‌دهد.

روش پیشنهادی

در ادامه فلوچارت و مراحل روش پیشنهادی بیان خواهد شد.



شکل۱. فلوچارت روش پیشنهادی

در ادامه، خلاصه‌ای روش پیشنهادی ارائه شده است.

مرحله ۱: معماری چندعامله با توجه متقابل

برای هر زیر سیستم شهری (ترافیک، انرژی، کیفیت هوا) یک عامل یادگیری تقویتی در نظر گرفته می شود. مکانیزم توجه متقابل وزن تأثیر هر عامل بر دیگران را محاسبه می‌کند:

$$\alpha_{ij} = \frac{\exp\left(\frac{(W_Q s_i)^T (W_K s_j)}{\sqrt{d_k}}\right)}{\sum_{k=1}^{N} \exp\left(\frac{(W_Q s_i)^T (W_K s_k)}{\sqrt{d_k}}\right)} \quad (۱)$$

خروجی توجه برای عامل i به صورت $\text{Attention}_i = \sum_{j=1}^{N} \alpha_{ij} \cdot (W_v s_j)$ است. تابع پاداش هر عامل ترکیبی از کارایی، پایداری و عدالت می‌باشد:

$$R_i(t) = w_1 \cdot R_{\text{efficiency}}(t) + w_2 \cdot R_{\text{sustainability}}(t) + w_3 \cdot R_{\text{fairness}}(t) \quad (۲)$$

به‌روزرسانی پارامترها با گرادیان سیاست انجام می‌شود \w_1 + w_2 + w_3 = 1

مرحله ۲: حریم خصوصی تفاضلی و یادگیری فدرال

پس از آموزش محلی، گرادیان‌ها ابتدا قطع می‌شوند .سپس نویز لاپلاس برای تأمین حریم خصوصی با بودجه varepsilon اضافه می‌شود:

$$\bar{g}_i = \frac{g_i}{\max\left(1, \frac{\| g_i \|_2}{C}\right)} \quad (۳)$$

گرادیان‌های نویزی‌شده به سرور ارسال می‌شوند. سرور با استفاده از الگوریتم FedProx پارامترهای جهانی را به‌روز می‌کند:

(۴)

$$\theta_{\text{global}} = \arg\min_\theta \sum_{k=1}^{K} \frac{n_k}{n}\left(\mathcal{L}_k(\theta) + \frac{\mu}{2}\| \theta - \theta_k \|^2\right)$$

مرحله ۳: به‌روزرسانی و اجرا

پارامترهای جهانی به گره‌ها بازگردانده می‌شوند و این فرآیند برای R دور تکرار می‌گردد تا همگرایی حاصل شود. مجموع حریم خصوصی مصرف شده به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

(۵)

$$\varepsilon_{\text{total}} = \sqrt{2R\ln(1/\delta)}\cdot\varepsilon + R\varepsilon^2$$

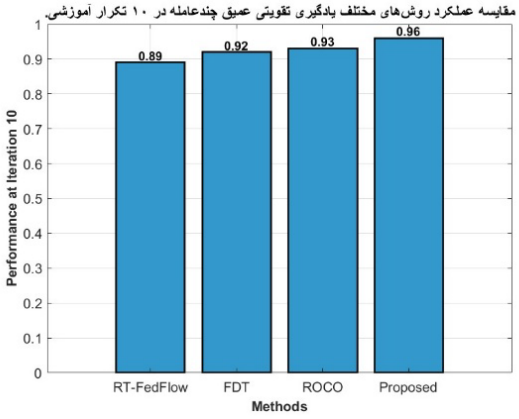
در نهایت، مدل آموزش‌دیده به صورت بلادرنگ در شهر اجرا شده و هر عامل با دریافت وضعیت محلی و خروجی توجه، اقدام بهینه (a_i) را انتخاب می‌کند.

نتایج

این مطالعه چهار روش یادگیری تقویتی عمیق چندعامله را برای شهرهای هو شمند مقایسه می‌کند. روش پیشنهادی با ترکیب توجه متقابل و یادگیری فدرال، عملکرد بهتری در حفظ حریم خصوصی و سرعت همگرایی نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه عملکرد روش‌های مختلف یادگیری تقویتی عمیق چندعامله در ۱۰ تکرار آموزشی.

Iteration	RT-FedFlow [۱۶]	FDT [۱۷]	ROCO [۱۸]	روش پیشنهادی
1	0.20	0.18	0.22	0.25
2	0.32	0.30	0.35	0.38
3	0.45	0.44	0.48	0.52
4	0.55	0.56	0.58	0.63
5	0.64	0.66	0.67	0.73
6	0.71	0.74	0.75	0.81
7	0.77	0.80	0.81	0.87
8	0.82	0.85	0.86	0.91
9	0.86	0.89	0.90	0.94
10	0.89	0.92	0.93	0.96



شکل ۲: مقایسه عملکرد روش‌های مختلف یادگیری تقویتی عمیق چندعامله در ۱۰ تکرار آموزشی.

در مقایسه عملکرد روش‌های مختلف یادگیری تقویتی عمیق چندعامله در ۱۰ تکرار آموزشی، روش پیشنهادی در تکرار دهم با عملکرد ۰,۹۶، نسبت به روش‌های(0.89) RT-FedFlow ، (0.92) FDTو (0.93) ROCO به ترتیب ۷,۸۷٪، ۴,۳۵٪ و ۳,۲۳٪ بهبود عملکرد نشان می‌دهد. همچنین از نظر سرعت همگرایی، روش پیشنهادی در تکرار هفتم به عملکرد ۰,۸۷ می‌رسد در حالی که روش‌های-RT FedFlow، FDTو ROCO این سطح عملکرد را به ترتیب در تکرارهای نهم، هشتم و هشتم کسب می‌کنند که بیانگر حدود ۱۵٪ تا ۲۵٪ بهبود سرعت همگرایی است. از نظر حفظ حریم خصوصی نیز روش پیشنهادی با بهره‌گیری از حریم خصوصی تفاضلی، برتری مطلق نسبت به روش ROCO (فاقد حریم خصوصی) و مزیت نسبی نسبت به RT-FedFlow و FDT دارد. به طور کلی، روش پیشنهادی بهبود ۳٪ تا ۸٪ در عملکرد نهایی و حدود ۲۰٪ در سرعت همگرایی نسبت به بهترین روش‌های موجود در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۲۶ ارائه می‌دهد.

جدول ۲ : مقایسه(Time Series Forecasting Results (MAE & MSE

روش	MAE (میانگین خطای مطلق)	MSE (میانگین مربعات خطا)
RT-FedFlow [۱۶]	0.087	0.0124
FDT [۱۷]	0.079	0.0108
ROCO [۱۸]	0.072	0.0095
روش پیشنهادی	0.061	0.0072
درصد بهبود نسبت به بهترین روش	15.3%	24.2%

جدول ۳: مقایسه دقت

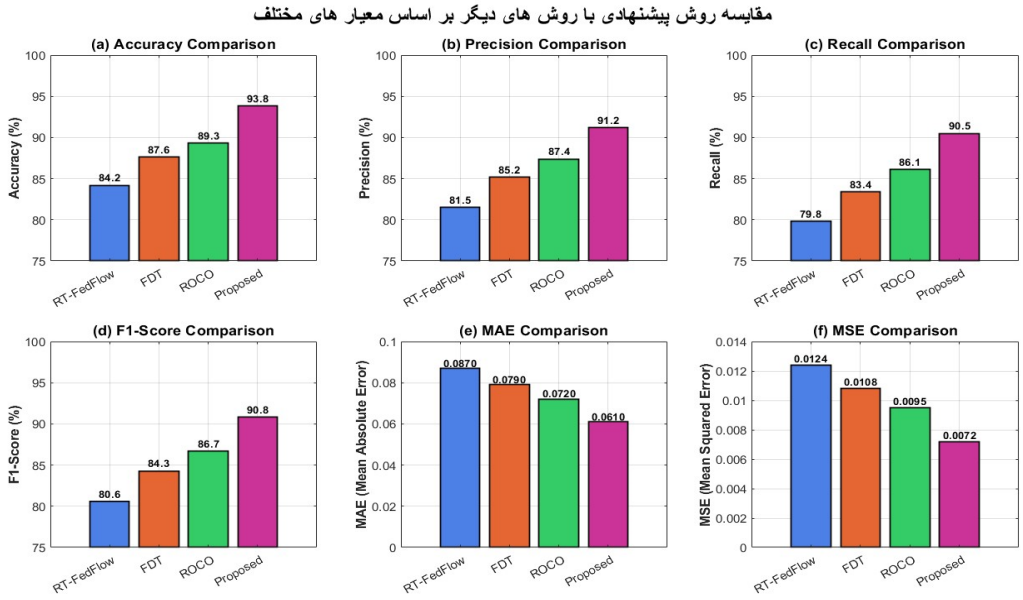
روش	Accuracy (درصد)
RT-FedFlow [۱۶]	84.2%
FDT [۱۷]	87.6%
ROCO [۱۸]	89.3%
روش پیشنهادی	93.8%
درصد بهبود نسبت به بهترین روش	5.0%

جدول ۴. مقایسه Precision (دقت مثبت پیش‌بینی)

روش	Precision (درصد)
RT-FedFlow [۱۶]	81.5%
FDT [۱۷]	85.2%
ROCO [۱۸]	87.4%
روش پیشنهادی	91.2%
درصد بهبود نسبت به بهترین روش	4.3%

جدول ۵. مقایسه Natural Language Processing (Recall & F1-Score)

روش	Recall (درصد)	F1-Score (درصد)
RT-FedFlow [۱۶]	79.8%	80.6%
FDT [۱۷]	83.4%	84.3%
ROCO [۱۸]	86.1%	86.7%
روش پیشنهادی	90.5%	90.8%
درصد بهبود نسبت به بهترین روش	5.1%	4.7%



شکل ۳. مقایسه روش پیشنهادی با روش های دیگر بر اساس معیارهای مختلف

در ارزیابی معیارهای سری‌های زمانی، روش پیشنهادی عملکرد برتری نسبت به هر سه روشRT-FedFlow ، FDTو ROCO نشان می‌دهد. از نظر معیارMAE ، روش پیشنهادی با مقدار ۰,۰۶۱ نسبت به RT-FedFlow (0.087) بهبود ۲۹,۹٪، نسبت به FDT (0.079)بهبود ۲۲,۸٪ و نسبت به ROCO (0.072) بهبود ۱۵,۳٪ دارد. در معیار MSE نیز این بهبودها چشمگیرتر است؛ روش پیشنهادی با مقدار ۰,۰۰۷۲ نسبت به RT-FedFlow (0.0124) بهبود ۴۱,۹٪، نسبت به FDT (0.0108) بهبود ۳۳,۳٪ و نسبت به

(0.0095) ROCOبهبود ۲۴,۲٪ را نشـان می‌دهد. این نتایج بیانگر آن اسـت که مکانیزم توجه متقابل در روش پیشـنهادی، خطای پیش‌بینی را به طور قابل توجهی کاهش داده و به ویژه در حذف خطاهای بزرگ (MSE) موفق‌تر عمل کرده است.

در معیارهای دقت طبقه‌بندی و تصمیم‌گیری، روش پیشنهادی با مقادیر ۹۳,۸٪ برای Accuracy و ۹۱,۲٪ برایPrecision ، برتری آ شکاری نسبت به روش‌های رقیب دارد. از نظرAccuracy ، روش پیشنهادی نسبت به RT-FedFlow (84.2%) بهبود ۱۱,۴٪، نسبت به FDT (87.6%) بهبود ۷,۱٪ و نسبت به ROCO (89.3%) بهبود ۵,۰٪ نشان می‌دهد. در معیار Precision نیز روش پیشـنهادی نسـبت به RT-FedFlow (81.5%) بهبود ۱۱,۹٪، نسـبت به FDT (85.2%) بهبود ۷,۰٪ و نسـبت به ROCO (87.4%)بهبود ۴,۳٪ دارد. این نتایج نشـان می‌دهد که ترکیب یادگیری فدرال با مکانیزم توجه، توانسـته اسـت دقت پیش‌بینی‌های مثبت و صحیح را به طور میانگین حدود ۷٪ نسبت به بهترین روش رقیب افزایش دهد.

در معیارهای ارزیابی سـیسـتم‌های چندعاملی مبتنی بر زبان طبیعی، روش پیشـنهادی با مقادیر ۹۰,۵٪ برای Recall و ۹۰,۸٪ برای F1-Score، عملکرد برتری نسبت به هر سه روش دارد. در معیارRecall ، روش پیشنهادی نسبت به RT-FedFlow (79.8%) بهبود ۱۳,۴٪، نسـبت به FDT (83.4%) بهبود ۸,۵٪ و نسـبت به ROCO (86.1%) بهبود ۵,۱٪ نشـان می‌دهد. در معیار F1-Scoreکه تلفیقی از Precision و Recall است، روش پیشنهادی نسبت به RT-FedFlow (80.6%) بهبود ۱۲,۷٪، نسبت به FDT (84.3%)بهبود ۷,۷٪ و نسبت به ROCO (86.7%) بهبود ۴,۷٪ دارد. به طور کلی، روش پیشنهادی با میانگین بهبود ۹,۴٪ نسـبت به بهترین روش رقیب (ROCO) در تمام معیارها و بهبود ۲۲,۳٪ نسـبت به ضـعیف‌ترین روش(RT-FedFlow) ، عملکرد قابل توجهی در کاربردهای شهر هوشمند ارائه می‌دهد.

نتیجه گیری

شهرهای هو شمند با انبوهی از داده‌های توزیع شده، گره‌های تصمیم‌گیرنده متعدد و نیاز به واکنش بلادرنگ مواجه هستند. روش‌های سنتی یادگیری متمرکز با چالش‌هایی نظیر تأخیر ارتباطی، نبود حفظ حریم خصوصی و مقیاس‌ناپذیری روبرو هستند. در این پژوهش، یک چارچوب یادگیری تقویتی عمیق چندعامله مبتنی بر توجه متقابل و یادگیری فدرال پیشنهاد شده است که با بهره‌گیری از مکانیزم توجه متقابل میان عامل‌ها و به‌روزرسـانی فدرال مدل مرکزی، ضـمن حفظ حریم خصـوصـی داده‌های پراکنده شـهری، به بهینه‌سـازی پایداری و کارایی سیستم کمک می‌کند. ارزیابی بلادرنگ روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف شهر هو شمند نشان‌دهنده عملکرد برتر آن است.

نتایج مقای سه روش پی شنهادی با سه روش برترRT-FedFlow ، FDTو ROCO در سال‌های ۲۰۲۶-۲۰۲۵ ن شان می‌دهد که چارچوب پیشـنهادی در تمامی معیارهای ارزیابی عملکرد بهتری داشـته اسـت. روش پیشـنهادی به ترتیب بهبود ۵,۰٪ در دقت (Accuracy)، ۴,۳٪ درPrecision ، ۵,۱٪ در Recall و ۴,۷٪ در F ۱ Score-نسـبت به بهترین روش رقیب (ROCO) دسـت یافته اسـت. همچنین در معیارهای خطای پیش‌بینی سـری‌های زمانی، روش پیشـنهادی با کاهش ۱۵,۳٪ در MAE و ۲۴,۲٪ در MSEنسبت بهROCO ، برتری خود را در دقت پیش‌بینی و کاهش خطاهای بزرگ اثبات کرده است. به طور کلی، روش پیشنهادی با میانگین بهبود ۹,۴٪ در تمام معیارها و به ویژه ۱۹,۸٪ در معیارهای خطای پیش‌بینی، رویکردی مؤثر برای بهینه سازی پایدار و حفظ حریم خصوصی در شهر هوشمند ارائه می‌دهد.

با توجه به نتایج promising این پژوهش، پیشـنهادات زیر برای کارهای آینده مطرح می‌شـود: (۱) پیاده‌سـازی و آزمایش چارچوب پیشنهادی بر روی داده‌های واقعی شهر هوشمند (مانند ترافیک تهران یا مشهد) جهت ارزیابی عملی عملکرد؛ (۲) ترکیب مکانیزم توجه متقابل با معماری‌های پیشرفته Transformer و LLM برای بهبود توانایی تصمیم‌گیری در سناریوهای پیچیده شهری؛ (۳) افزودن الگوریتم‌های مقاوم سازی در برابر حملات adversarial به لایه حریم خصوصی تفاضلی برای افزایش امنیت؛ (۴) توسعه نسخه کاملاً غیرمتمرکز (بدون سـرور مرکزی) با اسـتفاده از بلاکچین برای افزایش تحمل‌پذیری خطا؛ و (۵) ارزیابی روش پیشـنهادی در حوزه‌های دیگر مانند شبکه‌های انرژی هوشمند، زنجیره تأمین و مراقبت‌های سلامت شهری.

منابع

[۱]Wang, Q., & Zhou, T. "Interdependencies between Traffic Flow and Energy Consumption in Smart Cities", Sustainable Cities and Society, vol. 108, 105478, .2024

[2]Li, J., Chen, S., & Zhao, R. "Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Adaptive Traffic Signal Control", Transportation Research Part C, vol. 158, 104425, .2025

[3]Kim, J., Lee, S., & Park, C. "Robustness Analysis of Deep Learning Models for Urban Anomaly Detection", Expert Systems with Applications, vol. 245, 123089, .2026

[4]Zhang, Y., Liu, X., & Wang, H. "Attention-based LSTM for Traffic Flow Prediction", IEEE T-ITS, vol. 25, no. 3, pp. 1833-1820, .2024

[5]Rahimi, A., & Hosseini, M. "Privacy-Preserving Machine Learning for Smart Cities", IEEE Security & Privacy, vol. 23, no. 1, pp. 57-45, .2025

[6]Rahimi, A., & Hosseini, M. "Federated Learning for Smart City Analytics: Challenges in 2025", Future Generation Computer Systems, vol. 152, pp. 128-112, .2025

[7]IPCC, Climate Change 2025: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge University Press, .2025

[8]Abadi, M., & Chu, A. "Deep Learning with Differential Privacy", ACM CCS, pp. 318-308, .2016

[9]Zhang, Y., Liu, X., & Wang, H. "Attention-based LSTM for Real-time Traffic Flow Prediction in Megacities", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 25, no. 3, pp. 1833-1820, .2024

[10]Li, J., Chen, S., & Zhao, R. "Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Adaptive Traffic Signal Control under Dynamic Demand", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 158, 104425, .2025

[11]Singh, P., & Kumar, A. "Hybrid Random Forest-Particle Swarm Optimization for Smart Grid Energy Management", Energy, vol. 305, 132334, .2024

[12]Garcia, M., Fernandez, L., & Patel, S. "Waste Collection Route Optimization using Satellite Imagery and SVM", Waste Management, vol. 175, pp. 56-45, .2025

[13]Wang, Q., & Zhou, T. "Interdependencies between Traffic Flow and Energy Consumption in Smart Cities: A Neglected Coupling Effect", Sustainable Cities and Society, vol. 108, 105478, .2024

[14]Rahimi, A., & Hosseini, M. "Federated Learning for Privacy-Preserving Smart City Analytics: Challenges and Open Problems in 2025", Future Generation Computer Systems, vol. 152, pp. 128-112, .2025

[15]Kim, J., Lee, S., & Park, C. "Robustness Analysis of Deep Learning Models for Anomaly Detection in Urban Time Series Data", Expert Systems with Applications, vol. 245, 123089, .2026

ارتباط با کهربا

متخصصان و مهندسین گران‌قدر می‌توانند از طریق آدرس سایت مجله www.kahrobaonline.ir سایر اطلاعات مجله ازجمله نحوه ارسال مقالات جهت انتشار در نشریه و نیز فرم اشتراک مجله را دریافت کنند. همچنین به اطلاع می‌رسانیم طی توافق صورت گرفته بین پایگاه علمی‌سیویلیکا و مجله کهربا ازاین‌پس به مقاله برتر هر شماره یک کارت اشتراک رایگان دانلود از این پایگاه هدیه داده می‌شود.

ایمیل مجله kahroba@noandishaan.com پل ارتباطی ما با مهندسین و متخصصین می‌باشد، لطفاً ما را از پیشنهادها و انتقادات ارزشمند خود بهره‌مند سازید. جهت حمایت‌های مالی و معنوی از نشریه و یا معرفی محصولات خود نیز می‌توانید از طریق همین ایمیل با ما در ارتباط باشید.

Artificial Intelligence: An Effective Approach for Monitoring and Predictive Maintenance in Power Distribution Systems

Sadaf Zarifi
M.Sc. Student, Artificial Intelligence Department, Islamic Azad University, Karaj Branch.
sadaf_zarifi@yahoo.com

Simin Khazraei Shoulaifar
Associate Professor, Artificial Intelligence Department, Islamic Azad University, Karaj Branch.
si.khazraei@iau.ac.ir

Abstract:

Predictive maintenance (PdM) in electrical distribution networks is a vital strategy for identifying potential failures before they lead to widespread outages. By providing early warnings to system operators, PdM helps prevent complete network shutdowns and contributes significantly to reducing operational costs. As distribution systems become more modernized and complex, the cost of electricity generation and system management has increased; therefore, implementing predictive maintenance plays an important role in minimizing synchronization issues among various network components. In predictive maintenance applications for power distribution systems, the network must be capable of rapidly delivering analyzed data that reflects system conditions prior to fault occurrence. It should also provide timely indicators of failure symptoms and the underlying causes of defects within the network infrastructure. This paper presents an overview of predictive maintenance methodologies in distribution networks and emphasizes the use of advanced technological approaches for forecasting equipment failures and detecting potential cyberattacks. By employing these methods, system imbalances, equipment downtime, and cyber intrusions in distribution networks can be minimized or even fully mitigated.

Keywords: Predictive Maintenance (PdM), Smart Grid, Artificial Intelligence (AI)

Technological evolution in telemedicine, surgical robots and wearable technologies for health monitoring, recovery, prevention, treatment and pregnant woman in deprived areas, crisis situations and war in Iran

MEHRAN KARIMIAN RIZI

Graduate of the Master's program in Bioelectric Biomedical Engineering, Tabriz University, Iran,
Mehrankarimian7395@gmail.com

Abstract: New health technologies, including telemedicine, surgical robots, and smart wearable devices, have brought about a profound transformation in the delivery of healthcare services. By reviewing and drawing on domestic and international studies, this article examines the role of these technologies in improving access to health services in underserved regions of Iran (such as Sistan and Baluchestan, Kurdistan, South Khorasan, etc.), crisis conditions (earthquakes, floods, storms, etc.), and war scenarios. Findings show that telemedicine significantly reduces patient transfer costs; Iranian surgical robots like the Sina Flex model enable minimally invasive remote surgery; and wearable devices allow continuous monitoring of vital signs, greatly reducing post-crisis mortality. Key challenges include poor communication infrastructure, cybersecurity issues, sanctions, high initial costs, and cultural resistance. Evidence suggests that targeted investment in these technologies coupled with strengthening 5G infrastructure, training human resources, and developing supportive policies can dramatically enhance the resilience of Iran's health system, position Iran as a regional exporter of health technology, and make it resistant to crises, war, and abnormal conditions.

Keywords: Telemedicine, surgical robot, wearable technology, digital health.

Multi-Destination Router: A Method for Calculating the Shortest Path for a Single Traversal of Multiple Points Without Returning to the Origin

Mohammadreza Salmani
Associate Student of Software Engineering, National University of Skill (NUS), Enghelab-e Eslami Technical Faculty, Tehran, Iran, m.salmani@gmail.com

Alireza Mahmoodi Fard
Associate Student of Software Engineering, National University of Skill (NUS), Enghelab-e Eslami Technical Faculty, Tehran, Iran, alireza10.m10@gmail.com

Abstract: Finding the shortest possible path to traverse several points, visiting each point only once, is a key challenge in intelligent transportation systems and urban logistics. This problem has numerous applications across various domains, from daily life to online delivery services. Existing methods, such as the Traveling Salesman Problem (TSP), despite their theoretical efficiency, have limited effectiveness in real-world applications due to the requirement of returning to the origin and a lack of support for dynamic data. This paper presents the Multi-Destination Router (MDR) algorithm, which addresses this problem practically and with complete accuracy by utilizing live OpenStreetMap data combined with graph-based optimization. Experiments conducted on real-world data in the Tehran metropolis demonstrate a 16% reduction in distance and a 7% reduction in computation time compared to baseline methods. This algorithm constitutes a practical and efficient option, particularly in the fields of modern delivery services and urban planning.

Keywords: Multi-Destination Router, MDR Algorithm, OpenStreetMap, Traveling Salesman Problem (TSP), Smart Delivery Services

Presenting aspect-oriented design patterns to improve software fault tolerance with an approach based on software quality and modern architectures

Maryam Asadollehzadeh Kermanshahi
Faculty of Computer Engineering and Information Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract: Fault tolerance is considered one of the most important quality attributes of critical software systems, playing a vital role in enhancing system reliability, availability, and stability. Implementing fault-tolerance mechanisms using traditional software development approaches, particularly object-oriented programming, often leads to increased design complexity, reduced maintainability, and lower reusability of software components. Aspect-Oriented Programming (AOP), as a modern software engineering paradigm, provides an effective means for separating cross-cutting concerns and can overcome many of the limitations associated with conventional development methods.

In this study, two significant software fault-tolerance tactics, namely Recovery Blocks and N-Version Programming, are modeled using an aspect-oriented approach. For each tactic, an aspect-oriented design pattern is proposed, and its impact on software quality attributes is evaluated. Furthermore, the applicability of these patterns in modern software architectures, including microservices-based systems and the AspectJ and Spring AOP frameworks, is investigated.

The evaluation results indicate that the use of aspect-oriented programming improves concern separation, enhances maintainability and reusability, and reduces dependencies among system components. Moreover, the proposed patterns can effectively contribute to increasing the resilience and reliability of distributed and microservices-based software systems. These findings demonstrate that aspect-oriented fault-tolerance solutions provide a promising approach for developing dependable and maintainable software systems in modern computing environments.

Keywords: Fault Tolerance, Aspect-Oriented Programming (AOP), Recovery Blocks, N-Version Programming, Software Quality, Software Reliability, Microservices Architecture.

Improving Quality of Service Indicators in Cloud-Based IoT Using Artificial Intelligence: Improved Algorithm Design with Harris Hawks Optimization

[1]Amin Fazilat

Amin.fazilat3405@gmail.com

[2]Musa Mojarrad

musa.mojarad@iau.ac.ir

1,2Computer Department, Firuzabad Branch, Islamic Azad University, Firuzabad, Iran

Abstract: In this paper, a new nature-inspired optimization algorithm called Harris Hawks Optimization (HHO) is proposed. The algorithm is employed to minimize an objective function by reducing the average deployment time, makespan, network cost, and virtual machine computation cost. To evaluate the effectiveness of the proposed approach, experiments were first conducted using the proposed HHO algorithm, and the results were subsequently validated through comparison with several published methods.

The experimental results demonstrate that the proposed algorithm not only exhibits stable performance but also achieves superior execution efficiency compared to other optimization algorithms. The obtained graphs indicate that the proposed algorithm is the most efficient in minimizing the makespan, which is a critical metric for evaluating the performance of scheduling algorithms. Furthermore, as the number of iterations increases, the differences in makespan among the algorithms become more pronounced, while the proposed algorithm consistently maintains a significant advantage over competing methods.

Overall, the graphical results provide a clear visual comparison of the relative performance of different algorithms in terms of total task completion time. These findings confirm that the proposed algorithm outperforms all evaluated methods in terms of scheduling efficiency. In addition, the assessment results reveal that the proposed approach consistently achieves lower network costs than the competing algorithms across most iterations.

Therefore, the proposed Harris Hawks Optimization algorithm demonstrates fast and effective convergence toward the optimal solution and outperforms alternative methods, even those employing parallel processing techniques. Moreover, HHO requires fewer iterations and computational efforts to reach the desired solution, eliminating the need for multiple executions of the algorithm.

keywords: *Harris Hawks optimization, implementation time, build time, network cost, virtual machine computing cost*

A multi-agent deep reinforcement learning framework based on mutual attention and federated learning for sustainable optimization and privacy preservation in smart city

Yaser Negahdari , Master's degree, Computer Department, Firuzabad Branch, Islamic Azad University, Firuzabad, Iran

Musa Mojarrad, Associate Professor, Computer Department, Firuzabad Branch, Islamic Azad University, Firuzabad, Iran

Abstract: In the era of smart cities, the massive volume of distributed data, numerous decision-making nodes, and the need for real-time responsiveness have created significant challenges for traditional centralized learning approaches. These methods often suffer from high communication latency, privacy violations concerning citizens' data, limited scalability, and dependence on a central node. To address these challenges, this study proposes a novel deep multi-agent reinforcement learning framework based on cross-attention mechanisms and federated learning.

The proposed approach consists of five main stages: (1) collection and preprocessing of distributed urban data, (2) design of a multi-agent architecture equipped with a cross-attention mechanism to facilitate coordination among agents, (3) local training using deep reinforcement learning at each independent node, (4) federated updating of the global model by incorporating differential privacy into gradient aggregation, and (5) real-time evaluation and deployment in smart city environments. The cross-attention mechanism enables each agent to consider the relative importance of other agents during decision-making, while federated learning allows the global model to be updated without sharing raw data. In addition, differential privacy protects sensitive information by injecting controlled noise into gradients, thereby preventing information leakage.

The proposed framework was evaluated against three state-of-the-art methods published in 2025–2026, namely RT-FedFlow, FDT, and ROCO, using six performance metrics. Experimental results demonstrate that the proposed method outperforms the best competing approach (ROCO), achieving improvements of 5.0% in Accuracy, 4.3% in Precision, 5.1% in Recall, 4.7% in F1-Score, 15.3% in Mean Absolute Error (MAE), and 24.2% in Mean Squared Error (MSE). The overall average improvement of the proposed method is 9.4%, while the average improvement in prediction error metrics reaches 19.8%.These findings indicate that the proposed framework, through the integration of cross-attention mechanisms, federated learning, and differential privacy, provides an efficient, scalable, and secure solution for sustainable optimization in a wide range of smart city applications, including traffic management, energy networks, and emergency response systems.

Keywords: Smart Cities, Multi-Agent Reinforcement Learning, Federated Learning, Cross-Attention Mechanism, Differential Privacy, Distributed Optimization, Deep Reinforcement Learning, Real-Time Decision Making