

Predicting Failure of Electric Motors in Building Facilities Using Machine Learning and Data Mining: A Case Study of Military Training Center

Ali Velayati¹, Farshid Farokhizadeh*², Ali Asghar Jaryan³

1. Master , Faculty of Industrial Engineering, Khaje Nasir-din Toosi, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Maintenance Engineering, Faculty of Science and Engineering, Imam Hussein Officers
and Guard Training University, Tehran, Iran.

3. Techer, Department of Maintenance Engineering, Faculty of Defense Science and Engineering, Imam Hussein Officers
and Guard Training University, Tehran, Iran.

Received:2024/10/31

Accepted:2025/01/04

Abstract

In Introduction: In today's world, preventive maintenance of building facilities, particularly electric motors, is of paramount importance due to their critical role in water supply, heating, and cooling systems. With the advent of Industry 4.0 technologies, utilizing data mining and machine learning for failure prediction and optimizing preventive maintenance has become a necessity.

Objective: This study aims to develop a predictive model for the preventive maintenance of electric motors in building facilities using machine learning and data mining algorithms.

Methodology: This applied–developmental research employs a mixed–methods approach (qualitative–quantitative). The data consists of two main parts: 1) Records from the maintenance system (137) of Military Training Center, comprising 6,848 repair records, and 2) Simulated operational data for an electric motor, including variables such as temperature, rotational speed, torque, and tool wear. After preprocessing the data using Python, various machine learning algorithms, including Random Forest, Decision Tree, Support Vector Machine (SVM), and Logistic Regression, were evaluated.

Findings: The Random Forest algorithm demonstrated the best performance with an accuracy of 99.6% on the test data. This model can predict electric motor failures with high accuracy and identify hidden patterns in operational data. The results also indicate that this approach can reduce unexpected downtime, extend equipment lifespan, and optimize maintenance costs.

Conclusion: This research demonstrates that integrating data mining and machine learning can be effectively applied for the predictive maintenance of electric motors in building facilities, leading to improved system reliability, safety, and operational efficiency.

Keywords: Data Mining Machine Learning Repairs and Preventive Maintenance Maintenance of Building Facilities and Equipment Electromotor Failure Prediction.

2. Corresponding Author mail: f.farokhi@ihuo.ac.ir





پیش بینی خرابی الکتروموتورها در تأسیسات ساختمانی با استفاده از یادگیری ماشین و داده کاوی: مطالعه موردی یک مرکز آموزش نظامی

علی ولایتی^۱، فرشید فرخی زاده^{۲*}، علی اصغر جریان^۳

۱. کارشناسی ارشد، گروه سیستم، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی نگهداری و تعمیرات، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)، تهران، ایران.

۳. مدرس، گروه مهندسی نگهداری و تعمیرات، دانشکده علوم و مهندسی دفاعی، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)، تهران، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

چکیده

مقدمه: در دنیای امروزی، نگهداری پیشگیرانه از تجهیزات ساختمانی به ویژه الکتروموتورها به دلیل نقش حیاتی آنها در سیستم های آبرسانی، گرمایش و سرمایش، از اهمیت بالایی برخوردار است. با ظهور فناوری های صنعت ۴.۰، استفاده از داده کاوی و یادگیری ماشین برای پیش بینی خرابی ها و بهینه سازی نت پیشگیرانه به یک ضرورت تبدیل شده است.

هدف: پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل پیش بینانه برای نگهداری پیشگیرانه الکتروموتورها در تأسیسات ساختمانی با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین و داده کاوی انجام شده است.

روش تحقیق: این پژوهش از نوع کاربردی-توسعه ای و با روش آمیخته (کیفی-کمی) انجام شده است. داده های مورد استفاده شامل دو بخش اصلی بودند: (۱) داده های ثبت شده در سامانه ۱۳۷ مرکز آموزشی مورد مطالعه شامل ۶۸۴۸ رکورد تعمیرات، و (۲) داده های شبیه سازی شده یک الکتروموتور شامل متغیرهای عملیاتی مانند دما، سرعت چرخش، گشتاور و میزان سایش. پس از پیش پردازش داده ها با پایتون، الگوریتم های مختلف یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، درخت تصمیم، SVM و رگرسیون لجستیک ارزیابی شدند.

یافته ها: الگوریتم جنگل تصادفی با دقت ۹۹.۶٪ در داده های آزمایشی بهترین عملکرد را نشان داد. این مدل قادر به پیش بینی خرابی های الکتروموتور با دقت بالا و شناسایی الگوهای پنهان در داده های عملیاتی است. نتایج همچنین نشان داد که با استفاده از این روش می توان زمان خرابی های غیرمنتظره را کاهش داد، عمر مفید تجهیزات را افزایش داد و هزینه های نگهداری را بهینه کرد.

نتیجه گیری: پژوهش حاضر نشان می دهد که تلفیق داده کاوی و یادگیری ماشین می تواند به صورت مؤثری برای نگهداری پیشگیرانه الکتروموتورها در تأسیسات ساختمانی به کار رود و منجر به بهبود قابلیت اطمینان، ایمنی و بهره وری سیستم ها شود.

واژه های کلیدی: داده کاوی یادگیری ماشین تجهیزات ساختمان الکتروموتور نت پیشگیرانه پیش بینی خرابی.





۱- مقدمه

در دنیای امروزه، حفظ و نگهداری صحیح تأسیسات و تجهیزات ساختمانی از اهمیت بسیاری برخوردار است. با توجه به پیچیدگی و تعداد زیاد این تجهیزات، استفاده از روش‌های پیشگیرانه می‌تواند به بهبود عملکرد، صرفه‌جویی در هزینه‌ها و کاهش خسارات به شدت کمک کند [۱۵]. نسبت به کل هزینه‌های تولید کالاها، هزینه‌های مربوط به نگهداری و تعمیر ساختمان ۱۵٪ تا ۴۰٪ هزینه‌ها را تشکیل می‌دهند. به‌طور خاص، منبع اصلی از اتلاف در فعالیت‌های نگهداری و تعمیر قرار دارد [۱۶]. این امر تعجب‌آور نیست که با ظهور صنعت ۴٫۰ که چهارمین انقلاب صنعتی است، یکی از حوزه‌هایی که در آن سرمایه‌گذاری‌های زیادی انجام می‌شود و تحقیقات بسیاری وجود دارد، دقیقاً حوزه نگهداری و تعمیر باشد. هدف این است که بتوان وضعیت سلامت دستگاه‌ها و اجزای حیاتی آن‌ها را استنباط کرده و از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی زمانی که باید با جایگزینی یا تعمیرات مداخله کرد، استفاده کرد [۱۹]. فناوری‌های صنعت ۴٫۰ به‌منظور اجرای راه‌حلی برای چنین مشکلاتی مناسب هستند. طرح کلی به شرح زیر است: استفاده از داده‌های موجود و حسگرهای نصب‌شده روی دستگاه‌ها برای جمع‌آوری اطلاعات مربوط، ارتباط این اطلاعات به‌صورت زمان واقعی با یک مرکز تجمیع، تجزیه و تحلیل و استفاده از مدل‌های یادگیری تجهیز برای استخراج اطلاعات مفید درباره وضعیت سلامت دستگاه‌ها که برای پشتیبانی از تصمیمات و برنامه‌های نگهداری و تعمیر به کار گرفته خواهد شد [۲۲]. با این حال، برخی از مشکلات که در حین اجرای واقعی این سیستم‌ها پیش می‌آیند، به خوبی شناخته شده‌اند. این مشکلات شامل موارد زیر است: (۱) درصد بالای نویز در داده‌های جمع‌آوری‌شده؛ وجود نویز در داده‌های جمع‌آوری‌شده در سیاق تولید صنعتی، یکی از چالش‌های اصلی است. این نویز می‌تواند تأثیر منفی بر دقت و قابلیت پیشگیرانه مدل‌های یادگیری تجهیز داشته باشد. (۲) هزینه محاسباتی موردنیاز برای برنامه‌های یادگیری تجهیز بر روی حجم زیادی از داده: اجرای برنامه‌های یادگیری تجهیز بر روی حجم بالایی از داده‌ها ممکن است هزینه محاسباتی زیادی داشته باشد. این مسئله می‌تواند محدودیت‌هایی را برای سازمان‌ها ایجاد کند. (۳) نیاز به داده‌های تاریخی با ارتباط با وضعیت سلامت نسبی: برای انجام یادگیری تجهیز، نیازمند داده‌های تاریخی با ارتباط به وضعیت سلامت نسبی وجود دارد. همچنین، وابستگی زیادی به عامل انسانی وجود دارد که باید صحت این برچسب‌گذاری را تصدیق کند [۲۶].

مسئله‌ای که در زمینه به‌کارگیری داده‌کاوی و یادگیری ماشین برای نت پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمان مطرح است، عملکرد غیرمنظم و قطعی در فرایندهای نت است. اغلب در شرایط فعلی، این فرایندها بر اساس برنامه‌های زمان‌بندی‌شده و با استفاده از روش‌های سنتی انجام می‌شوند که ممکن است باعث عدم تشخیص به‌موقع مشکلات و نیازهای تعمیراتی شود و در نتیجه به افزایش هزینه‌ها و خسارات بیشتر منجر شود [۲۷]. به‌طورکلی، مسائلی مانند عدم تشخیص به‌موقع مشکلات، برنامه‌ریزی نامناسب تعمیرات، هزینه‌های اضافی ناشی از عدم پیش‌بینی نیازهای تعمیراتی، افزایش خطرات ایمنی و کاهش بهره‌وری در عملکرد تجهیزات و تأسیسات مطرح می‌شوند. این مسائل منجر به تأخیر در تعمیرات، افزایش هزینه‌ها، ایجاد خطرات بیشتر برای ایمنی ساختمان و کاهش عمر مفید تجهیزات می‌شود. این موضوع به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت و اداره ساختمان‌ها و تجهیزات صنعتی مطرح است [۱۵].

بنابراین به‌طورکلی در زمینه نت پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمان، مشکلاتی وجود دارد که عبارت‌اند از: عدم شناسایی به‌موقع، برنامه‌ریزی نامناسب تعمیرات، هزینه‌های اضافی [۱۹]، افزایش خطرات ایمنی، بهره‌وری پایین، اطلاعات غیرمنظم، کاهش عمر مفید، نبود استانداردها، محدودیت منابع، عدم امکان پیش‌بینی [۲۸].



این چالش نیازمند روش‌هایی است که بتوانند به‌طور مؤثر و کارآمد نگهداری و تعمیرات تجهیزات را برنامه‌ریزی کرده و از عیب‌یابی‌های ناگهانی جلوگیری نمایند [۳۶]. برای حل مشکلات در زمینه نت پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمان، می‌توان از راهکارهایی استفاده کرد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: استفاده از داده‌کاوی و تحلیل داده‌ها؛ با تحلیل دقیق داده‌های تاریخی مرتبط با تجهیزات و تأسیسات، می‌توان الگوهای خرابی و نیازهای تعمیراتی را شناسایی و به‌موقع اقدامات پیشگیرانه انجام داد. پیش‌بینی خرابی‌ها: با استفاده از الگوریتم‌های پیشگیرانه، می‌توان به پیش‌بینی خرابی‌ها و مشکلات احتمالی پرداخت و اقدامات مناسب را انجام داد [۱۵]. بهبود برنامه‌ریزی تعمیرات: با استفاده از تحلیل داده‌های تاریخی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، می‌توان برنامه‌ریزی بهینه‌تری برای نت ایجاد کرد و از هدر رفت هزینه‌های زیاد جلوگیری کرد. ایجاد سیستم‌های هوشمند: استفاده از حسگرها و دستگاه‌های جمع‌آوری داده به‌منظور پایش و نظارت بر عملکرد تجهیزات و تأسیسات، می‌تواند به‌طور خودکار به تشخیص مشکلات و ارسال هشدارهای لازم کمک کند. آموزش و آگاهی‌بخشی: آموزش کارکنان در مورد روش‌های بهینه نت پیشگیرانه و ارائه آگاهی‌های لازم در خصوص شناسایی و پیشگیری از مشکلات، می‌تواند به بهبود عملکرد کلی فرایندها کمک کند. لذا با استفاده از این راهکارها، می‌توان بهبود مستمری در عملکرد و کاهش هزینه‌های مربوط به نت پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمانی داشت [۴۰].

الکتروموتورها به‌عنوان یکی از تجهیزات و تأسیسات ساختمان شناخته می‌شوند که علی‌رغم کارایی و اهمیت بالا در ساختمان‌ها، با چالش‌های متعددی در راستای خرابی و تعمیرات مواجه هستند [۱۰]. مشکلاتی که ممکن است در نگهداری و تعمیر الکتروموتورها در ساختمان‌ها به وجود آید عبارت‌اند از: خرابی ناگهانی: الکتروموتورها ممکن است به‌طور ناگهانی خراب شده و عملکرد آن‌ها متوقف شود که این موضوع می‌تواند منجر به نقصان عملکرد ساختمان و ناراحتی ساکنان گردد. نگهداری ناقص: عدم انجام نت منظم الکتروموتورها می‌تواند باعث کاهش عمر مفید و کارایی آن‌ها شود و درنهایت هزینه‌های اضافی برای تعمیر و تعویض آن‌ها را ایجاد کند. افت کیفیت آب: در صورت ناکافی بودن نت، الکتروموتورها ممکن است به‌مرورزمان باعث افت کیفیت آب شود که این موضوع می‌تواند به مشکلات سلامتی مربوط شود [۲۸]. افزایش مصرف انرژی: الکتروموتورهای کارکرده و ناقص ممکن است به‌صورت نامنظم انرژی را مصرف کنند که این امر باعث افزایش هزینه‌های انرژی ساختمان گردد. نقصان کارایی سیستم: عملکرد نامناسب الکتروموتورها می‌تواند به نقصان کارایی سیستم‌های آبیاری، گرمایش یا سرمایش ساختمان منجر شود که این موضوع ممکن است به مشکلات راحتی و رفاه ساکنان آسیب بزند [۱۱].

همچنین با توجه به اهمیت الکتروموتورها در ساختمان، توجه به این تأسیسات اهمیت ویژه‌ای دارد. اهمیت ویژه الکتروموتورها عبارت‌اند از: (۱) الکتروموتورها به‌عنوان دستگاه‌هایی که آب را از منبعی مثل چاه یا مخزن به سیستم‌های توزیع آب ساختمان انتقال می‌دهند، امکان فراهم کردن آب برای مصرف در ساختمان را فراهم می‌کنند. (۲) الکتروموتورها در سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان نقش اساسی دارند، زیرا آب یا مایعات را از طریق سیستم‌های لوله‌کشی به رادیاتورها یا سیستم‌های تهویه مناسب منتقل می‌کنند [۱۰]. (۳) وجود الکتروموتورهای عملی و کارآمد در سیستم‌های آب‌رسانی، گرمایش و سرمایش، به‌راحتی استفاده و رفاه ساکنان ساختمان کمک می‌کند. (۴) الکتروموتورها به حفظ شرایط بهداشتی و بهداشت آب در ساختمان‌ها کمک می‌کنند، زیرا به تأمین آب تمیز و مناسب برای مصارف مختلف می‌پردازند. (۵) الکتروموتورها در سیستم‌های آبیاری محیط‌هایی مانند باغ‌ها، فضای سبز و حیاط‌ها نقش مهمی دارند و به حفظ زیبایی و بهبود محیط زندگی کمک می‌کنند. [۱۲]؛ بنابراین، انجام پژوهش در این زمینه به



سازمان‌ها و صنایع کمک می‌کند تا عملکرد خود را بهبود بخشند، هزینه‌ها را کاهش دهند و به نحوه‌ای مسئولیت‌پذیرانه و انسانی‌تر به منابع محیط‌زیست نگرسته و به ایمنی و اطمینان از تجهیزات و تأسیسات خود افزوده شوند. بهبود این مسائل نیازمند استفاده از روش‌های نوین و کارا است، اما بررسی میدانی و پیشینه پژوهش حاکی از آن است که مطالعات در این زمینه با محدودیت‌های متعددی مواجه بوده است؛ به‌طوری‌که پژوهش‌های داخلی در زمینه نت الکتروموتورها و با استفاده از هوش مصنوعی انجام نشده و لذا با توجه به مسائل بیان‌شده، انجام نت پیشگیرانه الکتروموتورها بر اساس استفاده از داده‌کاوی و یادگیری ماشین می‌تواند به بهبود عملکرد، کاهش هزینه‌ها و افزایش عمر مفید آن‌ها کمک کند. هوش مصنوعی مانند داده‌کاوی و یادگیری ماشین است تا با تحلیل داده‌های تاریخی و پیش‌بینی الگوهای خرابی، امکان ارائه برنامه‌های نت پیشگیرانه و بهینه‌سازی فرآیندهای مربوطه فراهم شود. در این راستا سؤال اصلی که پژوهش حاضر به دنبال پاسخگویی به آن است عبارت است از: چگونه می‌توان با استفاده از داده‌کاوی و یادگیری ماشین به نت پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمان پرداخت؟

۲- مبانی نظری و پیشینه شناسی تحقیق

۲-۱- داده‌کاوی

داده‌کاوی فرآیندی است که در آن اطلاعات موجود در مجموعه‌های بزرگ داده‌ها (مانند پایگاه‌های داده، فایل‌های متنی، وب‌سایت‌ها و غیره) به دنبال الگوها، روابط، قوانین یا ترکیبات مخفی و مفید می‌گردد. این فرآیند با استفاده از روش‌های آماری، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و الگوریتم‌های متنوعی انجام می‌شود [۱۳]. هدف اصلی داده‌کاوی، استخراج اطلاعات قابل‌استفاده و مفیدی از داده‌های بزرگ و پیچیده است که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های آینده و بهبود عملکرد کسب‌وکارها، سازمان‌ها یا سیستم‌های مختلف کمک کند. ازجمله روش‌های متداول داده‌کاوی می‌توان به خوشه‌بندی، تحلیل روابط، تشخیص الگوها، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری اشاره کرد [۱۴].

داده‌کاوی فرایند تجزیه و تحلیل حجم عظیمی از مجموعه داده‌ها و استخراج اطلاعات مفید از آن‌ها برای کمک به سازمان‌ها برای حل مشکلات، پیش‌بینی روندها، کاهش خطرات و یافتن فرصت‌های جدید است؛ درواقع داده‌کاوی مانند استخراج واقعی است؛ زیرا در هر دو معدن چیان برای یافتن منابع و عناصر ارزشمند در ذخایر حاوی این عناصر ارزشمند کاوش می‌کنند. داده‌کاوی هم چنین ایجاد روابط و یافتن الگوها، ناهنجاری‌ها و هم‌بستگی در داده‌ها برای حل مسائل مختلف را شامل است. داده‌کاوی گاهی نیز کشف دانش در داده نامیده می‌شود [۱].

بنابراین به‌طورکلی، داده‌کاوی فرآیندی است که در آن اطلاعات موجود در مجموعه‌های بزرگ داده‌ها (مانند پایگاه‌های داده، فایل‌های متنی، وب‌سایت‌ها و غیره) به دنبال الگوها، روابط، قوانین یا ترکیبات مخفی و مفید می‌گردد. هدف اصلی داده‌کاوی، استخراج اطلاعات مفید و قابل‌استفاده از داده‌های بزرگ و پیچیده است. این فرآیند با استفاده از فنون متنوعی ازجمله آمار، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، الگوریتم‌های داده‌کاوی و الگوریتم‌های دیگر انجام می‌شود. داده‌کاوی برای شناسایی الگوهای مخفی، پیش‌بینی رویدادها، کشف روابط میان داده‌ها، دسته‌بندی اطلاعات و تصمیم‌گیری‌های بهتر به کار می‌رود [۲].

داده‌کاوی معمولاً از چهار مرحله اصلی تشکیل شده است: تعیین اهداف، جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی و ارزیابی نتایج. فرآیند داده‌کاوی معمولاً شامل چندین مرحله است که عبارت‌اند از:





- ۱) تعریف مسئله: در این مرحله، مسئله کسب و کار یا سؤال‌های مرتبط تعریف می‌شوند. مشکل باید به خوبی درک شود تا اطمینان حاصل شود که فرآیند داده‌کاوی با اهداف و اهداف سازمان همسو است [۱۷].
- ۲) آماده‌سازی داده‌ها: در این مرحله داده‌ها جمع‌آوری، پاک‌سازی، یکپارچه‌سازی و به قالبی تبدیل می‌شوند که می‌توان از آن برای تجزیه و تحلیل استفاده کرد. این مرحله بسیار مهم است زیرا کیفیت داده‌های مورد استفاده در تجزیه و تحلیل می‌تواند به طور قابل توجهی بر نتایج تأثیر بگذارد.
- ۳) کاوش داده‌ها: در این مرحله از فنون تحلیل داده‌های اکتشافی برای شناسایی الگوها، روندها و روابط در داده‌ها استفاده می‌شود. هدف دستیابی به درک عمیق‌تر از داده‌ها و شناسایی متغیرهایی است که ممکن است در مدل‌های پیش‌بینی مفید باشند [۱۸].
- ۴) ساخت مدل: در این مرحله از الگوریتم‌های آماری و یادگیری ماشین برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی استفاده می‌شود. مدل‌ها بر روی زیرمجموعه‌ای از داده‌ها آموزش داده می‌شوند و با استفاده از زیرمجموعه‌ای متفاوت از داده‌ها اعتبارسنجی می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که دقیق و قابل اعتماد هستند.
- ۵) ارزیابی مدل: در این مرحله، عملکرد مدل‌ها با استفاده از معیارهایی ارزیابی می‌شود. هدف انتخاب بهترین مدل برای مشکل موجود است [۳].
- ۶) استقرار: در این مرحله، مدل انتخاب شده در فرآیند کسب و کار یا پروژه تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کار ممکن است شامل ایجاد یک رابط کاربری، تنظیم فرآیندهای خودکار یا سایر وظایف مورد نیاز برای عملیاتی کردن مدل باشد.
- ۷) نظارت و نگهداری: در این مرحله مدل از نظر دقت و عملکرد در طول زمان پایش می‌شود. ممکن است به روزرسانی‌ها و بهبودهایی در مدل انجام شود تا اطمینان حاصل شود که مؤثر و مرتبط باقی می‌ماند [۲۰].

۲-۲- یادگیری ماشین

یادگیری ماشین یک زیرشاخه از هوش مصنوعی است که به ماشین‌ها و سیستم‌های کامپیوتری امکان می‌دهد از داده‌ها یاد بگیرند و بدون نیاز به برنامه‌ریزی صریح، الگوها و روابط را شناسایی کنند و تصمیم‌هایی را بگیرند [۲۷]. در فرآیند یادگیری ماشین، الگوریتم‌ها و مدل‌هایی به ماشین‌ها ارائه می‌شود تا از طریق تحلیل داده‌ها و تجربیات خود، قابلیت تشخیص الگوها، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری را به دست آورند. این فرآیند بر مبنای ریاضیات، آمار، اصول بهینه‌سازی و نظریه احتمال استوار است. یادگیری ماشین می‌تواند در موارد مختلفی از جمله تشخیص الگوها در داده‌های پزشکی، پیش‌بینی رفتار مشتریان در بازاریابی، تصویربرداری پزشکی، خودران‌سازی در خودروها و موارد دیگر مورد استفاده قرار گیرد [۳۶].

یادگیری ماشین فرایند کشف الگوریتم‌هایی است که تجربه‌های حاصل از داده‌ها را بهبود می‌بخشند. یادگیری ماشین طراحی، مطالعه و توسعه الگوریتم‌هایی است که به ماشین‌ها اجازه می‌دهد بدون دخالت انسان یاد بگیرند و وظایف مشخصی را انجام دهند. یادگیری ماشین ابزاری است برای هوشمندتر کردن ماشین‌ها و حذف عنصر انسانی (اما نه حذف خود انسان؛ که این اشتباه است) [۲۱]. ارتباط یادگیری ماشین با داده‌کاوی این است که داده‌کاوی از جمله فعالیت‌هایی است که در فرآیند یادگیری ماشین برای استخراج الگوها، روابط و اطلاعات مفید از داده‌ها استفاده می‌شود. یادگیری ماشین به عنوان یک روش فعال در داده‌کاوی، مدل‌ها و



پیش‌بینی خرابی الکتروموتورها در تأسیسات ساختمانی با استفاده از یادگیری ماشین و داده‌کاوی: مطالعه موردی یک مرکز آموزش نظامی

الگوریتم‌هایی را برای تحلیل و استخراج دانش از داده‌های بزرگ و پیچیده ارائه می‌دهد. به این ترتیب، یادگیری ماشین به عنوان یکی از ابزارهای اصلی داده‌کاوی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا الگوها و اطلاعات مفیدی که در داده‌ها پنهان شده‌اند، شناسایی و بهره‌برداری شوند [۴].

کاربردهای یادگیری ماشین بسیار گسترده و متنوع هستند و در اکثر صنایع و حوزه‌های علمی و فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از مهم‌ترین کاربردهای یادگیری ماشین عبارت‌اند از:

- ❖ پیش‌بینی و پیش‌بینی: استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رویدادها، مثل پیش‌بینی رفتار مشتریان، پیش‌بینی میزان فروش، پیش‌بینی قیمت‌ها و غیره.
- ❖ تصویربرداری و شناسایی الگوها: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تشخیص الگوها و شناسایی اشیاء در تصاویر و ویدئوها، مانند تشخیص چهره، شناسایی اشیاء و سوژه‌ها و غیره [۲۸].
- ❖ دسته‌بندی و تقسیم‌بندی: استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای دسته‌بندی داده‌ها به دسته‌های مختلف، مانند تشخیص اسپم ایمیل‌ها، تشخیص بیماری‌ها، دسته‌بندی محصولات و غیره.
- ❖ بهبود عملکرد سیستم‌ها: استفاده از یادگیری ماشین برای بهبود عملکرد سیستم‌ها و مواردی مانند خودران‌سازی خودروها، سیستم‌های هوشمند خانه، سیستم‌های پیشنهاددهنده، موتورهای جستجو و غیره.
- ❖ ترجمه ماشینی: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای ترجمه خودکار متون و محتواها به زبان‌های مختلف، مانند ترجمه ماشینی متون وب‌سایت‌ها، مقالات علمی، متون تجاری و غیره [۲۳].

کاربردهای داده‌کاوی نیز بسیار گسترده و متنوع هستند و در اکثر صنایع و حوزه‌های کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از کاربردهای مهم داده‌کاوی عبارت‌اند از:

- پیش‌بینی و تحلیل رفتار مشتریان: استفاده از داده‌کاوی برای پیش‌بینی رفتارهای مشتریان، تحلیل الگوهای خرید، شناسایی مشتریان پتانسیل و بهبود استراتژی‌های بازاریابی.
- تصمیم‌گیری مبتنی بر داده: استفاده از داده‌کاوی برای ارائه اطلاعات تصمیم‌سازی به مدیران و تصمیم‌گیران در سازمان‌ها، مانند شناسایی الگوهای موفقیت، پیش‌بینی عملکرد و بهبود فرآیندهای کسب‌وکار.
- کشف الگوها و روابط: استفاده از داده‌کاوی برای شناسایی الگوها، روابط و اطلاعات مخفی در داده‌های بزرگ و پیچیده، مانند کشف الگوهای مرتبط با بیماری‌ها در داده‌های پزشکی یا روابط میان عوامل مؤثر در تحولات اقتصادی [۳۶].
- پیش‌بینی و تحلیل مالی: استفاده از داده‌کاوی برای پیش‌بینی روندهای مالی، تحلیل سرمایه‌گذاری‌ها، شناسایی ریسک‌ها و فرصت‌های سرمایه‌گذاری.

بهبود عملکرد و کارایی سیستم‌ها: استفاده از داده‌کاوی برای بهبود عملکرد سیستم‌ها و فرآیندهای کسب‌وکار، مانند بهبود عملکرد سامانه‌های مدیریت مشتریان، بهبود فرآیندهای تولید و مدیریت زنجیره تأمین و غیره [۲۵].



۲-۳- نت پیشگیرانه تجهیزات ساختمان

نت پیشگیرانه به مجموعه اقداماتی اشاره دارد که به منظور جلوگیری از وقوع خرابی و مشکلات در تجهیزات و تأسیسات صورت می‌گیرد. در این روش، نت به صورت پیشین و پیشگیرانه انجام می‌شود به طوری که مشکلات و خرابی‌های محتمل در تجهیزات و تأسیسات شناسایی و از پیش رفع شوند [۴۰]. این روش از تحلیل داده‌های تاریخی، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، آزمون و تعمیر قبل از وقوع خرابی، استفاده از فناوری‌های مبتنی بر حسگر و مانیتورینگ وضعیت تجهیزات و دستگاه‌ها و تعیین بازه‌های مناسب برای نت بهره می‌برد. این روش باعث کاهش هزینه‌های تعمیرات ناگهانی، افزایش عمر مفید تجهیزات، افزایش بهره‌وری و کاهش خطرات احتمالی مرتبط با خرابی‌ها می‌شود [۱۱].

به گفته استانداردهای بریتانیا، نگهداری ترکیبی از تمامی اقدامات فنی، اداری و مدیریتی در طول دوره عمر یک دارایی است که قصد دارد آن را در یک وضعیتی که بتواند عملکرد مورد نیاز را انجام دهد، حفظ یا به آن بازگرداند. رویکردهای مدیریت نگهداری می‌توانند به سه گروه اصلی زیر تقسیم شوند:

- نگهداری اصلاحی: همچنین به عنوان نگهداری واکنشی یا نگهداری تا شکست شناخته می‌شود که شامل مداخله پس از بروز خرابی است. به تجهیزات این امکان داده می‌شود تا زمانی که خراب شود، عمل کند [۱۰].
- نگهداری پیشگیرانه: شامل انجام عملیات بازرسی و نگهداری درحالی‌که تجهیزات هنوز در حال اجرا هستند به منظور کاهش احتمال خرابی‌هاست. نگهداری پیشگیرانه می‌تواند یا بر اساس زمان (مانند برنامه زمانی) یا بر اساس استفاده (به عنوان مثال، هر ۱۰۰ کیلومتر) باشد. این رویکرد به کاهش تعداد خرابی‌ها کمک می‌کند، اما باعث انجام بازرسی‌های غیرضروری و همچنین بروز خرابی‌های برنامه‌ریزی نشده می‌شود که هزینه نگهداری را افزایش می‌دهد.
- نگهداری پیش‌بینی: این رویکرد بر اساس استفاده از داده‌های نظارت بر شرایط برای پیش‌بینی وضعیت سلامت آینده دستگاه است. این رویکرد هدفش پیش‌بینی زمان، مکان و کدام اجزاء ممکن است با خرابی مواجه شوند است [۵].

مطالعات نتایج جالبی را با بهینه‌سازی دوره‌های بازرسی نشان دادند. با این حال، خرابی‌های برنامه‌ریزی نشده همچنان روی می‌دهند. تحقیقات مختلف بر روی اتخاذ فنون نگهداری صنعتی مانند تجزیه و تحلیل ارتعاش مکانیکی برای نظارت بر نصب‌های ساختمان با استفاده از تبدیل فوری و منطق فازی یا فنون شبیه‌سازی برای شناسایی خطا تمرکز کردند؛ به طور مشابه، مدل‌های آماری ازجمله رگرسیون خطی و غیرخطی برای شناسایی و تشخیص خطا در واحدهای HVAC استفاده شد. با این حال، هزینه بالای مدل‌سازی و شبیه‌سازی، همچنین محدودیت در تعمیم مدل‌ها بر روی نصب‌های مشابه، استفاده از این فنون در حوزه مدیریت تسهیلات را محدود کرده است [۶].

نگهداری و تعمیر اصلاحی پس از شناسایی یک خطا انجام می‌شود، به عبارت دیگر، یک مداخله فقط زمانی انجام می‌شود که یک خطا از دستگاه رخ دهد به همین دلیل به عنوان نگهداری و تعمیر واکنشی نیز تعریف می‌شود [۱۵]. این ساده‌ترین استراتژی برای استفاده است و یکی از کم‌هزینه‌ترین استراتژی‌هایی است که می‌توان پیاده‌سازی کرد. با این حال، هزینه‌های این استراتژی مربوط به زمان توقف دستگاه‌ها هستند بنابراین، این امر منجر به توقف تولید و کاهش کلی در بهره‌وری می‌شود. علاوه بر این، امکان برنامه‌ریزی مداخلات نیز وجود ندارد، زیرا خلل می‌تواند در هر زمان فعالیتی رخ دهد. در نهایت، رویکرد اصلاحی نیازمند است که تمام قطعات یکی اجزای اصلی، یا حداقل آن‌هایی که برای تولید حیاتی هستند، همیشه در انبار موجود باشند [۷].



استراتژی‌های نت در واقع روش‌ها و برنامه‌هایی هستند که برای حفظ و بهبود عملکرد و عمر مفید تجهیزات، دستگاه‌ها و ساختارها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این استراتژی‌ها به منظور جلوگیری از خرابی‌ها، کاهش هزینه‌ها، بهبود بهره‌وری و افزایش عمر مفید تجهیزات اجرا می‌شوند [۲۹]. در زیر به برخی از استراتژی‌های مهم نت اشاره می‌شود:

- نگهداری پیشگیرانه: در این روش، تجهیزات به طور منظم و برنامه‌ریزی شده بررسی و تعمیر می‌شوند تا از خرابی و خطرات احتمالی جلوگیری شود. این موارد شامل تعویض قطعات فرسوده، تنظیم و تعمیرات دوره‌ای و مداوم و آزمایش‌های روتین است.
- نگهداری اصلاحی: در این روش، تعمیرات و تغییرات لازم بر روی تجهیزات به صورت پاسخ به خرابی‌ها و مشکلات انجام می‌شود. هدف اصلی این روش، بازیابی سریع تجهیزات به حالت عادی و ادامه عملکرد آن‌هاست. این روش مبتنی بر تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای خرابی تجهیزات است.
- نگهداری پیش‌بینانه یا پیش‌بینی‌گر: در این روش، با استفاده از فنون مانیتورینگ و حسگرها، داده‌های عملکرد تجهیزات جمع‌آوری و تحلیل می‌شوند تا با پیش‌بینی خرابی‌های آتی و نیازمندی‌های تعمیراتی، تعمیرات برنامه‌ریزی شده و به موقع انجام شود [۲۶].
- نگهداری مبتنی بر شرایط: در این روش، تعمیرات بر اساس شرایط و وضعیت فعلی تجهیزات انجام می‌شود. عواملی مانند حسگرها، نشانگرها و سیستم‌های مانیتورینگ برای تشخیص وضعیت تجهیزات استفاده می‌شوند و تعمیرات فقط در صورت نیاز انجام می‌شوند.
- نت مبتنی بر قابلیت اطمینان: در این روش، تمرکز بر روی نت تجهیزاتی است که برای فرآیندها و عملکرد کلی سازمان حیاتی هستند. با تحلیل ریسک و تأثیرات خرابی‌ها، برنامه‌ریزی برای تعمیرات بهینه و راهبردهای نگهداری تعیین شده و اجرا می‌شود.
- نگهداری مشارکتی: در این روش، مشارکت و همکاری بین گروه‌های مختلف در فرآیند نت ترویج می‌یابد. گروه‌های تولید، نگهداری، تعمیرات و مهندسی با همکاری و تبادل اطلاعات، برنامه‌ریزی و انجام فعالیت‌های نت را اجرا می‌کنند [۱۱].
- نگهداری مدیریت‌شده: در این روش، فعالیت‌های نت به صورت مدیریت‌شده و برنامه‌ریزی شده انجام می‌شود. از سیستم‌های مدیریت نت برای برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات، مدیریت قطعات یدکی و ثبت اطلاعات استفاده می‌شود.
- نگهداری مبتنی بر عمر اقتصادی یا نت مبتنی بر چرخه عمر تجهیز: در این روش، نت بر اساس عمر اقتصادی تجهیزات انجام می‌شود. تصمیم‌گیری‌ها بر اساس فنون و مدل‌های تحلیل عمر اقتصادی صورت می‌گیرد و تجهیزات در مراحل مختلف عمر خود (مانند استخدام، بهره‌برداری، خاتمه عمر) تعمیر شده و بهبود می‌یابند.

این استراتژی‌ها می‌توانند به صورت جداگانه یا ترکیبی استفاده شوند و بسته به نیازها و شرایط خاص هر سازمان، استراتژی‌های مناسب تعیین می‌شوند. همچنین، با پیشرفت فناوری، استراتژی‌های نوینی مانند نگهداری مبتنی بر هوش مصنوعی و اینترنت اشیا نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵].

تأسیسات و تجهیزات ساختمان عبارت‌اند از سامانه‌ها، دستگاه‌ها و تجهیزاتی که برای ارائه خدمات مختلف در ساختمان‌ها استفاده می‌شوند. این موارد شامل انواع سیستم‌های مهم مانند سیستم‌های برقی، آبیاری، گرمایش، سرمایش، تهویه مطبوع، آتش‌نشانی،



امنیتی، لوله‌کشی و سایر تجهیزات مورد نیاز برای فعالیت‌های مختلف ساختمان می‌شود. این تأسیسات و تجهیزات اساسی برای ایجاد شرایط زندگی راحت و ایمن برای ساکنان و کاربران ساختمان فراهم می‌کنند و نقش بسیار مهمی در عملکرد و کارایی ساختمان ایفا می‌کنند [۱۲].

نت تأسیسات و تجهیزات ساختمان فرآیندی است که به منظور حفظ و بهبود عملکرد و کارایی تمامی تأسیسات و تجهیزات مورد استفاده در ساختمان‌ها انجام می‌شود. این فرآیند شامل اقداماتی مانند بازرسی دوره‌ای، تعمیرات پیشگیرانه، تعمیرات تعمیرگاهی، تعویض قطعات و تجهیزات فرسوده، تمیزکاری و نگهداری عمومی می‌شود. هدف اصلی این فرآیند از پیشگیری از خرابی‌ها، بهبود عمر مفید تجهیزات، افزایش ایمنی و ایجاد شرایط راحت و بهینه برای ساکنان یا کاربران ساختمان است [۱۵]. از مزایای این فرآیند می‌توان به کاهش هزینه‌های ناگهانی تعمیرات، افزایش بهره‌وری و کاهش خطرات مرتبط با عدم عملکرد تأسیسات و تجهیزات اشاره کرد [۱۴]. الکتروموتور، دستگاهی است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. این دستگاه به طور گسترده در صنایع و تأسیسات مختلف به کار می‌رود و می‌تواند در انواع مختلفی از جمله موتورهای AC و DC، موتورهای القایی و موتورهای بدون جاروبک (براشلس) وجود داشته باشد. از موارد مهم استفاده عملیاتی از الکتروموتور در تأسیسات و تجهیزات ساختمان می‌توان به سیستم‌های تهویه مطبوع، پمپ‌ها، آسانسور و بالابر، ماشین‌آلات صنعتی، تجهیزات روشنایی و تجهیزات برقی خانگی اشاره کرد. استفاده از الکتروموتورها در این زمینه‌ها به بهبود کارایی، کاهش مصرف انرژی و افزایش عمر تجهیزات کمک می‌کند [۱۱].

در ادامه به بررسی خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در این حوزه پرداخته شده است.

جدول ۱. پیشینه پژوهش

پژوهشگران	سال انجام	موضوع پژوهش	نتایج و یافته‌ها
صلاحی و همکاران	۱۴۰۲	ارائه مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی نت پیشگیرانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها و اختلال در تسهیلات	نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم NSGA-II در مقایسه با الگوریتم MOPSO جواب‌های مناسب‌تری را ارائه می‌کند. هرچند الگوریتم MOPSO نسبت به الگوریتم NSGA-II از نظر زمان حل مسئله از کارایی بیشتری برخوردار است، مقدار این برتری قابل ملاحظه نیست و نمی‌توان آن به عنوان مبنای قطعی مقایسه دو الگوریتم در نظر گرفت.
جوادی و همکاران	۱۴۰۲	طراحی مدل پویای هوشمند نت پیشگیرانه در صنعت نساجی و پوشاک در تعامل با تولید با بهره‌برداری از شبکه عصبی مصنوعی-فازی	می‌توان ادعا نمود که اگر وضعیت «عامل فناوری در نت» خوب باشد یعنی دقیقاً ۰/۹۱۲۹؛ و وضعیت «عامل کارکنان در نت» خوب (کران بالای تابع عضویت خوب) باشد یعنی دقیقاً ۰/۹۲۳۹؛ و وضعیت «عامل محیط کار در نت» نسبتاً خوب باشد یعنی دقیقاً ۰/۸۸۵۹؛ و وضعیت «عامل کیفیت در نت» کاملاً خوب باشد.
مروتی و همکاران	۱۴۰۱	مطالعه مدیریت فرایندهای نت با رویکرد ترکیبی چارچوب طبقه‌بندی فرایندها و داده‌کاوی	داده‌های نه‌ماهه مربوط به گزارش خرابی تجهیزات، برای اطلاع از روند خرابی‌های اتفاق افتاده، بررسی روابط موجود در بین آن‌ها و همچنین کمک به مهندسی مجدد فرایندها، استخراج شده و با استفاده از فنون داده‌کاوی تحلیل شدند. در آخر نیز با توجه به مسائل و مشکلات موجود و همچنین چارچوب طبقه‌بندی فرایندهای نت واحد آموزشی، راهکارهای عملی و متناسب با شرایط دانشگاه از طریق نظرسنجی خبرگان مشخص و با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی اولویت‌بندی شدند.



توکل و مقدم و همکاران	۱۴۰۱	بررسی زمان بندی کار کارگاهی بلادرنگ و نت پیشگویانه پویا با استفاده از یادگیری ماشین	نتایج به دست آمده از روش های دیگر زمان بندی، خروجی های بهتری را از خود نشان می دهد. مدل نت پیشگویانه، با چهار روش مدل سازی یادگیری مورد ارزیابی و کیفیت مدل ها مورد بررسی قرار می گیرد. با انتخاب و اضافه کردن بهترین مدل خرابی ماشین به مدل یادگیری تقویتی زمان بندی، کارهای بلادرنگ وارد شده به کارگاه، به ماشین ها تخصیص داده می شوند. با مقایسه روش مطرح شده و روش های پیشین مشخص شد که بهترین عملکرد را از خود نشان داده است.
سالک و همکاران	۱۴۰۱	مدل سازی داده محور مدت زمان تداوم وقفه در شبکه توزیع برق با در نظر گرفتن نت پیشگیرانه و تحلیل اثر آن	نواوری ها و مشارکت های این پژوهش را می توان: (۱) مدل سازی داده محور زمان تداوم وقفه با استفاده از الگوریتم های مختلف خطی و غیرخطی، (۲) در نظر گرفتن اثر محل استقرار گروه تعمیرات و ترافیک شهری به صورت مدت زمان رسیدن گروه تعمیرات به محل حادثه، (۳) در نظر گرفتن تاریخچه انجام عملیات نگهداری پیشگیرانه در مدل سازی زمان تداوم وقفه و تحلیل حساسیت زمان تداوم وقفه نسبت به عملیات نگهداری پیشگیرانه و (۴) تحلیل تأثیر ویژگی های ورودی بر پیش بینی زمان تداوم وقفه دانست.
گلرخی و همکاران	۱۴۰۰	ارائه چارچوبی برای تدوین سند راهبردی مدیریت نت ساختمان ها و تأسیسات در سازمان های نظامی	الزامات اصلی یک سند راهبردی شامل تعیین استاندارد شرایط ساختمان، نحوه ارزیابی، تعیین برنامه زمان بندی فعالیت های نگهداری و تعمیر مطابق با ارزیابی ها، تعیین سطح خدمات مورد انتظار از دارایی ها، تدوین برنامه فعالیت های نگهداری و نحوه تخصیص و تأمین مالی برای اجرای آن ها. تجزیه و تحلیل داده های جمع آوری شده نشان می دهد که الزامات شناسایی شده در سازمان های کشور نیز حائز اهمیت است و باید در فرآیند تدوین سند راهبردی مدیریت نگهداری و تعمیر مورد توجه قرار گیرد.
ال رافائی و همکاران	۲۰۲۳	پیش بینی فعالیت های نگهداری و تعمیر با استفاده از الگوی متوالی تعمیم یافته و قوانین تداعی در داده کاوی	رویکرد داده کاوی در تعیین توالی نگهداری و تعمیر مؤثر است که زمان خرابی را کاهش می دهد و در نتیجه بهره وری و در دسترس بودن را افزایش می دهد. این مطالعه یک چارچوب داده کاوی برای پیش بینی الگوهای متوالی فعالیت های نگهداری و تعمیر پیشنهاد کرد. چارچوب شامل جمع آوری داده ها، پیش بینی فعالیت های نگهداری و تعمیر با و بدون ویژگی ها و سپس مقایسه بین نتایج پیش بینی بود.
آگوستینی و همکاران	۲۰۲۲	رویکرد یادگیری ماشینی برای نگهداری پیش بینانه در یک سیستم مدیریت ساختمان پیشرفته	یک استراتژی نگهداری و تعمیر پیش بینانه را با استفاده از سیستم های یادگیری ماشین برای کاهش خرابی ها در سیستم های کارخانه فنی مسکونی ارائه می کند که پیشرفت های قابل توجهی را در عملکرد کلی نشان می دهد. ادغام سیستم مدیریت ساختمان با فناوری هایی مانند BIM، AIM، IoT و یادگیری ماشینی می تواند به طور قابل توجهی کارایی نگهداری و تعمیر را افزایش دهد.
استبان و همکاران	۲۰۲۲	داده کاوی در سیستم های نگهداری و تعمیر پیش بینانه: طبقه بندی و بررسی سامانمند	این بررسی اولین طبقه بندی را ارائه می کند که مستلزم مراحل مختلفی است که در هر فرآیند داده کاوی برای حل یک مشکل نگهداری و تعمیر پیش بینانه در نظر گرفته می شود و وظایف نگهداری پیش بینانه را با وظایف اصلی داده کاوی برای حل آن ها مرتبط می کند.



نتایج نشان می‌دهد که انواع و درجه‌های مختلف ساختمان‌های سبز بر اساس فناوری‌های ساختمان سبز متفاوت است. به‌طور خاص، یک ساختمان سبز با درجه بالا تأکید بیشتری بر فناوری‌های ساختمان سبز تهویه مطبوع، کاهش CO ₂ و محیط‌های داخلی دارد. این مطالعه همچنین نشان داد که دقت شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی پایه‌ها و هزینه‌های ساختمان سبز می‌تواند به بالای ۸۰ درصد برسد.	بررسی استفاده از فنون داده‌کاوی برای کشف پذیرش فناوری، درجه‌ها و هزینه‌های پروژه‌های ساختمان سبز	۲۰۲۲	جان و همکاران
یافته‌های اصلی این پژوهش شامل پتانسیل چارچوب برای پیش‌بینی خرابی‌ها، مزایای نگهداری پیش‌بینی‌شده در کاهش خرابی‌ها و هزینه‌ها و اهمیت جمع‌آوری داده‌ها و بهبود مستمر است.	نگهداری و تعمیر پیش‌بینانه در تأسیسات ساختمان: رویکرد مبتنی بر یادگیری ماشین	۲۰۲۱	بابالویی و همکاران
الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ANN و SVM) برای پیش‌بینی وضعیت آینده اجزای MEP مورد استفاده قرار گرفتند که منجر به برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیر کارآمد می‌شود. این چارچوب با موفقیت در یک مثال گویا اعمال شد که امکان‌سنجی این رویکرد را نشان می‌دهد.	چارچوب برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیر پیش‌بینانه مبتنی بر داده برای اجزای MEP بر اساس BIM و IoT با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین	۲۰۲۰	چنگ و همکاران

بر اساس پیشینه مورد بررسی، این پژوهش علی‌رغم مورد مطالعه آن که نسبت به پژوهش‌های گذشته با پرداختن به نت پیشگیرانه الکتروموتور دارای نوآوری است، در روش آن یعنی استفاده از داده‌کاوی و یادگیری ماشین در راستای این هدف نیز نوآوری مشاهده می‌شود. موضوع این پژوهش در استفاده از داده‌کاوی و یادگیری ماشین برای نت پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمان، در تلفیق دو حوزه مهم علم داده و مهندسی ساختمانی و نظام‌های مدیریت تجهیزات است. با استفاده از روش‌های پیشرفته داده‌کاوی و یادگیری ماشین، می‌توان الگوهای پنهان در داده‌های تاریخی مربوط به تأسیسات و تجهیزات را شناسایی کرده و با استفاده از آن‌ها، پیش‌بینی خرابی‌ها و مشکلات احتمالی را انجام داد. این رویکرد نوآورانه کمک می‌کند تا با بهبود برنامه‌ریزی نت، به بهینه‌سازی منابع و هزینه‌ها و بهبود کارایی و عمر مفید تأسیسات و تجهیزات ساختمانی پرداخته شود. این تلفیق بین داده‌کاوی و مهندسی ساختمانی یک دید نوآورانه و شگرف به مدیریت نت در ساختمان‌ها ارائه می‌دهد که می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی و ایمنی ساکنان و همچنین بهبود کارایی ساختمان‌ها و صرفه‌جویی در هزینه‌ها منجر شود.

در حوزه نظری، این شکاف معمولاً به وجود آمدن مدل‌ها و تئوری‌هایی اشاره دارد که در حال حاضر در حال توسعه و ارتقاء هستند. برای مثال، در زمینه به‌کارگیری داده‌کاوی و یادگیری ماشین برای نت پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمان، تئوری‌ها و مدل‌هایی وجود دارد که از آن‌ها برای پیش‌بینی خرابی‌ها، بهینه‌سازی زمان‌بندی تعمیرات و بهبود بهره‌وری استفاده می‌شود؛ اما هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری برای توسعه و بهبود این تئوری‌ها وجود دارد. انتقال دانش نظری به عملیات عملی و صنعتی نیز یکی از مواردی است که در حوزه نظری ممکن است شکاف وجود داشته باشد. این شامل ایجاد روش‌ها و الگوریتم‌هایی است که بتوانند دانش نظری را به صورت عملی و کاربردی در نت پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمان اجرا کنند.

در زمینه تجربی، شکاف ممکن است به مسائلی اشاره کند که در فرآیند اجرای پروژه‌ها و انجام تحقیقات عملی واقع می‌شود. برای مثال، ممکن است به مشکلاتی مانند کمبود داده‌های کافی، عدم دسترسی به تجهیزات یا فناوری‌های لازم و یا مشکلات امنیتی در استفاده از داده‌های حساس اشاره شود. عدم انطباق بین نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های مدل‌ها نیز می‌تواند یک شکاف تجربی





مهم باشد. ممکن است مدل‌های طراحی شده در محیط‌های کنترل شده به خوبی عمل کنند، اما در محیط‌های واقعی و در مواجهه با شرایط مختلف، عملکرد آن‌ها قابل انتظار نباشد.

لذا این پژوهش با بررسی این موضوع و ارائه مدل کاربردی، به دنبال پر کردن شکاف‌های پژوهشی موجود در این حوزه می‌باشد.

۳- روش‌شناسی تحقیق

پژوهش حاضر در حوزه خدمات فنی و مهندسی و با موضوع به‌کارگیری داده‌کاوی و یادگیری ماشین برای نت‌پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمان انجام شده است. این پژوهش از نظر هدف توسعه‌ای-کاربردی بوده و با روش آمیخته انجام شده است. از آنجایی که پیاده‌سازی روش‌های نت‌پیشگیرانه و یادگیری ماشین در ساختمان‌ها هنوز جدید است، تحقیقات تجربی کمی در مورد این موضوع وجود دارد. برای جمع‌آوری داده‌ها و تکمیل پژوهش ادبیات، نویسندگان از مصاحبه حضوری با کارشناسان فعال در مدیریت خدمات مهندسی دانشگاه استفاده کردیم. مصاحبه با چهار کارشناس انجام شد. اهداف مصاحبه‌ها عبارت بودند از: (۱) شناسایی ابزارهای واقعی مورد استفاده در محیط ساختمان، (۲) شناسایی داده‌های موجود و (۳) ارزیابی دیدگاه آن‌ها از چارچوب. از نتایج مصاحبه‌ها در کنار ادبیات تحقیق برای شناسایی فهرست منابع داده در محیط ساختمان استفاده شد. جامعه و نمونه آماری در این پژوهش، داده‌های ثبت شده در سامانه ۱۳۷ دانشگاه است که مربوط به نت تأسیسات و تجهیزات دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع) می‌باشد. در این پژوهش از دو نوع داده استفاده شده است. در نوع اول از داده‌های نت ثبت شده در پایگاه داده دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع) به منظور ارائه گزارش‌های تحلیلی استفاده شده است؛ و نوع دوم شامل داده‌های ثبت شده برای یک الکتروموتور برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌شود. با توجه به هدف این پژوهش، نتایج و دستاوردهای به دست آمده می‌تواند برای تجهیزات و تأسیسات دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع) و همچنین مسئولین مربوطه در حوزه خدمات فنی و مهندسی کاربردی باشد. پژوهش حاضر، در دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع) اجرا شده است. بازه زمانی اجرای پژوهش حاضر، از پاییز ۱۴۰۲ لغایت تابستان ۱۴۰۳ است. در این پژوهش از روش‌های تحلیل داده‌های آماری مانند رگرسیون خطی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خرابی‌ها، بهینه‌سازی برنامه‌های تعمیرات و بهبود عملکرد تجهیزات استفاده می‌شود. چارچوب موردنظر در این پژوهش در پنج مرحله سازماندهی شده است: جمع‌آوری داده، پردازش داده، توسعه مدل، اطلاع‌رسانی خطا و بهبود مدل. داده‌ها از تأسیسات مختلف الکتروموتور و... (HVAC) با استفاده از دستگاه‌های اینترنت اشیا (IoT) و یک سیستم خودکارسازی ساختمان (BAS) جمع‌آوری شد. سپس از داده‌کاوی و یک مدل یادگیری عمیق برای پیش‌بینی شکست‌ها استفاده شد. این چارچوب در پنج مرحله سازماندهی شده است: جمع‌آوری داده، پردازش داده، توسعه مدل، اطلاع‌رسانی خطا و بهبود مدل. لذا چارچوب فرآیندی روش پژوهش حاضر، در شکل زیر ارائه شده است.



شکل ۱. چارچوب فرآیندی پژوهش

۴- یافته‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها

۴-۱- توصیف داده‌های تحقیق

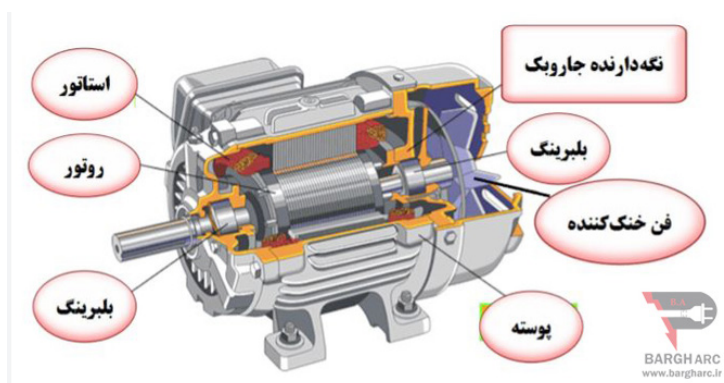
الکتروموتورها یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین دستگاه‌های الکتریکی در صنعت و ساختمان‌ها هستند. این دستگاه‌ها بر اساس اصول مغناطیسی و الکتریکی کار می‌کنند و به دلیل کارایی بالا، قدرت بالا و استفاده از انرژی الکتریسیته، در بسیاری از موارد جایگزینی مناسب برای موتورهای سوختی محسوب می‌شوند. الکتروموتورها در انواع مختلفی و با اصول مختلفی ساخته می‌شوند، اما دو نوع اصلی آن‌ها عبارت‌اند از: موتورهای القایی (Induction Motors) و موتورهای جداسدنی (DC Motors).

یکی از انواع مهم الکتروموتور، موتور القایی است. این نوع موتورها بر پایه اصول الکترومغناطیسی عمل می‌کنند. زمانی که جریان الکتریکی از طریق موتور عبور می‌کند، یک میدان مغناطیسی در موتور ایجاد می‌شود. این میدان مغناطیسی باعث حرکت یک شفت در موتور می‌شود که به عنوان خروجی کار مفید محسوب می‌شود. یکی از ویژگی‌های جالب موتورهای القایی این است که نیازی به اتصال مستقیم به منبع برق ندارند. به عنوان مثال، در موتورهای القایی سه فاز، جریان الکتریکی توسط سیم‌های فازی به موتور ارسال می‌شود و به دلیل اصول القایی، موتور به حرکت درمی‌آید. موتورهای القایی دارای مزایای زیادی همچون ساختار ساده، قیمت مناسب، کارایی بالا و نیاز به نگهداری کمتر هستند. این موتورها در بسیاری از کاربردها مانند پمپ‌ها، فن‌ها، کارخانه‌های تولیدی و خودروها استفاده می‌شوند. البته موتورهای جداسدنی (DC Motors) نیز اهمیت زیادی دارند. این موتورها بر پایه اصول الکترومغناطیسی ماهیتی دارند که با تغییر جهت جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی و به تبع آن حرکت شفت موتور تغییر می‌کند. این موتورها نیز در بسیاری از



پیش‌بینی خرابی الکتروموتورها در تأسیسات ساختمانی با استفاده از یادگیری ماشین و داده‌کاوی: مطالعه موردی یک مرکز آموزش نظامی

کاربردها مانند دیسک‌های سخت، رله‌ها، رباتیک و صنایع کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کل، الکتروموتورها با توجه به انواع و اصول مختلفی که برای ساخت آن‌ها استفاده می‌شود، نقش بسیار مهمی در توسعه صنعت و فناوری بازی می‌کنند و به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در انتقال و تبدیل انرژی الکتریکی به حرکت مکانیکی شناخته می‌شوند.



شکل ۲. اجزای الکتروموتور

پایگاه داده شامل یک فایل اکسل از داده‌های تعمیرات و تعمیرکاران است که شامل ۶۸۴۸ رکورد می‌شود. این پایگاه داده شامل ۹ فیلد به نام‌های کد برگه، تاریخ ثبت، ساعت ثبت، تعمیرکار، درخواست دهنده، توضیحات تعمیر، انجام، مرجوعی و نیاز به خرید است. در جدول زیر یک نمونه از داده‌ها قابل مشاهده است.

جدول ۲. نمونه داده‌های نت

کد برگه	تاریخ ثبت	ساعت ثبت	تعمیرکار	درخواست دهنده	توضیحات تعمیر	انجام	مرجوعی	نیاز به خرید
۶۹۵۸	۱۴۰۲/۰۹/۰۵	۹:۲۴	مسعود اسدی	مرتضی حیدرلکی	تعویض شیلینگ سرویس بهداشتی	FALSE	FALSE	FALSE
۶۹۵۷	۱۴۰۲/۰۹/۰۵	۷:۱۵	وحید مشایخی	قیطاسی	تعویض ترموستات فن کوئل	FALSE	FALSE	FALSE
۶۹۳۱	۱۴۰۲/۰۹/۰۲	۷:۰۸	رامین پذیرایی	شیخی	خرابی شیر آب	FALSE	FALSE	FALSE
۶۹۵۹	۱۴۰۲/۰۹/۰۵	۹:۳۰	احسان احمدوند	مرتضی حیدرلکی	تعویض لامپ	FALSE	FALSE	FALSE

داده‌های پژوهش از سامانه ۱۳۷ دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع) و برای مطالعه موردی از داده‌های ثبت شده برای یک دستگاه الکتروموتور استخراج شده است. برای آماده‌سازی و پیش‌پردازش داده‌ها از زبان برنامه‌نویسی پایتون که یک زبان سطح بالا است استفاده شده است. همچنین با استفاده از تابع describe خلاصه‌ای از شاخص‌های مهم داده به دست آمده است که جدول زیر را شامل می‌شود.



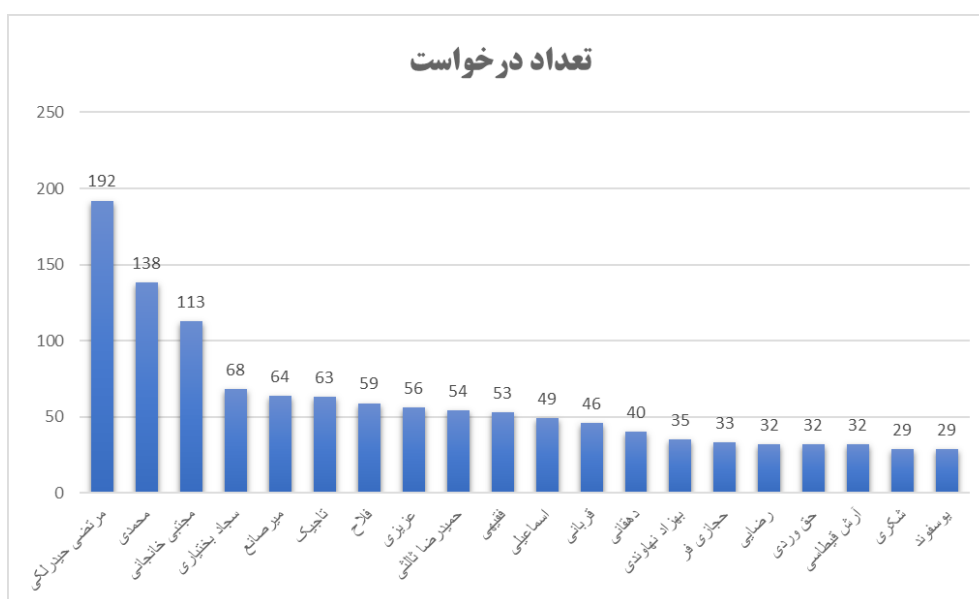
جدول ۳. اطلاعات شاخص‌های مهم

تعداد	تعمیرکاران	درخواست دهندگان	توضیحات	انجام کار	مرجوعی	نیاز به خرید
۶۷۵۲	۶۷۷۵	-	۶۸۴۸	۶۸۴۸	۶۸۴۸	۶۸۴۸
۶۲	۴۷۰	-	۲	۲	۲	۲
حسین سیمایی	مرتضی حیدرلکی	خرابی کولر	True	False	False	False

همان‌طور که در جدول بالا مشاهده می‌کنید تعداد تعمیرکاران منحصربه‌فرد ۶۲ و تعداد درخواست دهندگان منحصربه‌فرد ۴۷۰ نفر است. همچنین فیلدهای انجام کار، مرجوعی و نیاز به خرید به علت ماهیت دودویی تعداد منحصربه‌فرد آن‌ها شامل True/False است. بیشترین تعمیرات توسط آقای حسین سیمایی صورت گرفته است. بیشترین درخواست نیز متعلق به آقای مرتضی حیدرلکی است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید بیشترین تعمیرات مربوط به خرابی کولر است از این رو تجهیز انتخابی به منظور پیاده‌سازی مدل یادگیری ماشین از قطعات کولر انتخاب گردیده است.

با بررسی بیشتر فیلد انجام کار که مشخص می‌کند آیا کار مذکور انجام شده است یا خیر مشاهده می‌شود از کل کارها ۴۹۵۳ کار انجام شده و ۱۸۹۵ کار انجام نشده است. نمودار دایره‌ای کارهای انجام شده به همراه درصد انجام کارها در ذیل این پاراگراف قابل مشاهده است. ۷۲ درصد تعمیرات با موفقیت به پایان رسیده است. ۱ نشانه انجام کار و ۰ نشانه عدم انجام کار است. همچنین ۳ درصد قطعات مرجوعی و ۹۷ درصد مرجوعی نبوده‌اند. در مورد قطعات نیاز به خرید نیز ۱۰۷۲ درصد قطعات نیاز به خرید داشته‌اند و ۹۸۰۲۶ درصد قطعات نیاز به خرید نداشته‌اند.

همچنین با شمارش درخواست دهندگان مشاهده می‌شود که بیشترین درخواست از سمت آقای مرتضی حیدرلکی صورت گرفته است. در نمودار زیر بیست نفر پر درخواست داده‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۳. بیست نفر پر درخواست



تجزیه و تحلیل و نتایج این مطالعه در مورد استفاده از فنون داده‌کاوی و یادگیری ماشین برای نت پیش‌بینانه تجهیزات و امکانات ساختمان ارائه شده است. به طور خاص، بر روی یک دستگاه الکتروموتور به عنوان مطالعه موردی تمرکز می‌شود. هدف اصلی نشان دادن این است که چگونه این فنون می‌توانند نیازهای نت را پیش‌بینی کنند که به طور بالقوه منجر به صرفه‌جویی در هزینه و افزایش کارایی عملیاتی شود. یک الکتروموتور که معمولاً به عنوان موتور الکتریکی شناخته می‌شود، یک جزء حیاتی در بسیاری از کاربردهای صنعتی و تجاری است. انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند تا وظایف مختلفی را انجام دهد، از رانندگی ماشین‌آلات گرفته تا برق‌رسانی به لوازم خانگی. راندمان، قابلیت اطمینان و طول عمر الکتروموتورها برای عملکرد روان بسیاری از سیستم‌ها حیاتی است و نگهداری آن‌ها را به یک جنبه حیاتی در مدیریت صنعتی تبدیل می‌کند.

داده‌های این تجزیه و تحلیل از مجموعه داده‌های مربوط به نگهداری و تعمیر پیش‌بینی شده به دست آمد. مجموعه داده شامل ویژگی‌های مختلفی است که ویژگی‌های عملیاتی و خرابی تجهیزات را توصیف می‌کند. مجموعه داده اولیه حاوی شناسه‌های منحصر به فرد و شناسه‌های محصول بود که برای تمرکز بر ویژگی‌های مربوطه برای تجزیه و تحلیل حذف شدند.

جدول ۴. ویژگی‌های کلیدی در مجموعه داده

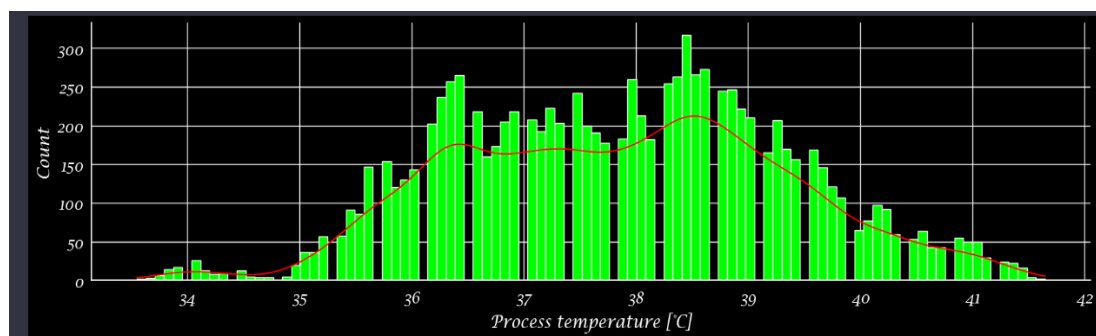
Type	کیفیت تجهیز به عنوان مثال M به معنای Medium است
[Air temperature]K	دمای هوا به کلوین
[Process temperature]K	دمای فرآیند به کلوین
(Rotational speed(rpm	سرعت چرخش موتور
(Torque(Nm	گشتاور
[Tool wear [min	میزان سایش تجهیز
Target	آیا شکست رخ داده است یا خیر؟ (دودویی)
Failure Type	نوع شکست

لازم به ذکر است اهداف شامل دو ستون Target و Failure Type است و نباید یکی از این ستون‌ها جزو ویژگی‌های مدل در نظر گرفته شود. نمونه داده‌ها در جدول زیر قابل مشاهده است.

	Type	Air temperature [K]	Process temperature [K]	Rotational speed [rpm]	Torque [Nm]	Tool wear [min]	Target	Failure Type
5460	M	303.000000	312.400000	1526	36.100000	142	0	No Failure
718	L	297.500000	308.800000	1477	39.000000	127	0	No Failure
2418	L	298.900000	308.300000	1660	34.400000	9	0	No Failure
9614	M	299.100000	310.300000	1441	43.900000	94	0	No Failure
8349	M	298.700000	309.500000	1487	33.600000	183	0	No Failure
3533	L	302.000000	311.000000	1563	36.200000	8	0	No Failure

شکل ۴. نمونه داده‌های الکتروموتور

تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی (EDA) برای درک توزیع و روابط درون داده‌ها انجام شد. آمار خلاصه و تجسم برای به دست آوردن بینش در مورد ویژگی‌های مجموعه داده استفاده شد. در ابتدای امر با رسم چند نمودار پراکندگی و توزیع داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودارهای زیر توزیع پراکندگی تعداد قطعات نسبت به دمای هوا، دمای فرآیند و اختلاف دمای این دو متغیر را نشان می‌دهد.



شکل ۵. پراکندگی قطعات نسبت به دمای فرآیند

با استفاده از توابع محاسباتی زبان برنامه نویسی پایتون جداول زیر تعداد تجهیزات برحسب نوع تجهیز، دچار شکست و یا عدم شکست و نوع شکست به دست آمده است.

جدول ۵. تعداد تجهیزات برحسب نوع تجهیز

تعداد	نوع
۶۰۰۰	(L(Low
۲۹۹۷	(M(Medium
۱۰۰۳	(H(High

تعداد	شکست (دودویی)
۹۶۶۱	۰
۳۳۹	۱

تعداد	نوع شکست
۹۶۵۲	No Failure
۱۱۲	Heat Dissipation Failure
۹۵	Power Failure
۷۸	Overstrain Failure
۴۵	Tool Wear Failure
۱۸	Random Failures

۴-۲- تحلیل آماری داده‌های نت

در این بخش توصیفی از ستون "[Torque [Nm]" (گشتاور) ارائه می‌شود و از دو نمودار مهم یعنی نمودار هیستوگرام و نمودار جعبه‌ای برای بررسی و نمایش توزیع این ویژگی استفاده می‌کند. این تحلیل می‌تواند به درک عمیق‌تر از توزیع داده‌ها و شناسایی ویژگی‌های آماری مهم مانند میانگین، میانه و مد کمک کند.

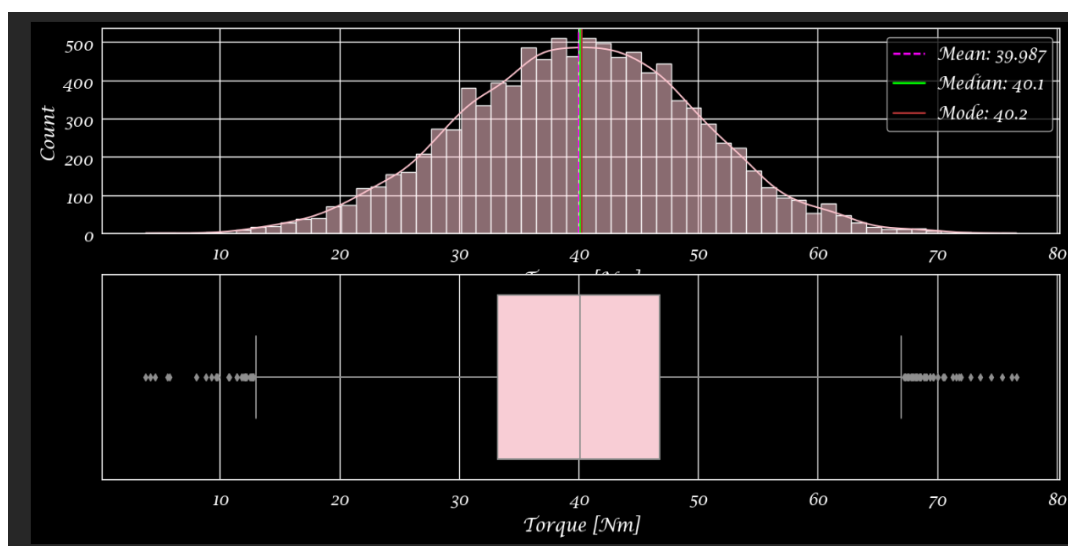


نمودار هیستوگرام با خط چگالی: در قسمت بالای نمودار، هیستوگرام توزیع داده‌های "Torque [Nm]" به همراه یک خط چگالی تخمینی (Kernel Density Estimate) رسم شده است. هیستوگرام نشان می‌دهد که داده‌ها چگونه در طول محور گشتاور توزیع شده‌اند. همچنین سه خط عمودی به رنگ‌های مختلف برای نمایش میانگین (Mean)، میانه (Median) و مد (Mode) در این نمودار رسم شده‌اند:

- میانگین: با خط نقطه‌چین مغناطیسی (Magenta) نمایش داده شده است و موقعیت متوسط گشتاور را نشان می‌دهد.
- میانه: با خط سبز لیمویی (Lime) نشان داده شده و نشان‌دهنده مقداری است که نیمی از داده‌ها کمتر از آن و نیمی بیشتر از آن قرار دارند.
- مد: با خط قهوه‌ای (Brown) مشخص شده و بیشترین تکرار را در داده‌ها نشان می‌دهد.

این اطلاعات کمک می‌کنند تا بتوان فهمید توزیع داده‌ها به چه صورت است (نرمال، چوله به راست یا چوله به چپ) و آیا میانگین، میانه و مد نزدیک به هم هستند یا تفاوت قابل توجهی دارند.

در بخش پایین، یک نمودار جعبه‌ای برای ویژگی "Torque [Nm]" رسم شده است. نمودار جعبه‌ای ابزار مناسبی برای نمایش محدوده بین چارکی (IQR)، نقاط بیرونی (Outliers) و چارک‌های اول و سوم است. این نمودار اجازه می‌دهد که به سرعت داده‌های دارای نقاط پرت یا عدم تقارن شناسایی شوند و توزیع داده‌ها را در بازه‌های مختلف نشان می‌دهد. این تحلیل به طور مستقیم به بررسی و تفسیر توزیع یک ویژگی مهم در داده‌ها می‌پردازد. نمودار هیستوگرام و جعبه‌ای به عنوان ابزارهای بصری، کمک می‌کنند تا به سرعت ویژگی‌های کلیدی توزیع داده‌ها را شناسایی کرده و از این اطلاعات برای تصمیم‌گیری‌های بعدی در مراحل مدل‌سازی استفاده کرد. برای مثال، اگر داده‌ها چوله باشند یا نقاط پرت زیادی داشته باشند، ممکن است نیاز به پیش‌پردازش داده‌ها و تعدیل آن‌ها قبل از استفاده در مدل‌های یادگیری ماشین باشد.



شکل ۶. نمودار هیستوگرام و جعبه‌ای گشتاور



الگوریتم‌های یادگیری ماشین مجموعه‌ای از فنون و روش‌ها هستند که به سیستم‌ها این امکان را می‌دهند تا از داده‌ها یاد بگیرند و بدون برنامه‌ریزی صریح، تصمیم‌گیری کنند. این الگوریتم‌ها به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف، از جمله تحلیل داده، پیش‌بینی و شناسایی الگوها استفاده می‌شوند. انواع الگوریتم‌های یادگیری ماشین:

(۱) یادگیری با نظارت (Supervised Learning)

(۲) یادگیری بدون نظارت (Unsupervised Learning)

(۳) یادگیری نیمه نظارت (Semi-supervised Learning)

(۴) یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning)

۴-۳- جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest) یکی از فنون پیشرفته یادگیری ماشین است که برای حل مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. این الگوریتم به‌عنوان یک روش یادگیری گروهی (Ensemble Learning) شناخته می‌شود و از ترکیب چندین درخت تصمیم برای بهبود دقت پیش‌بینی و کاهش خطر بیش‌برازش (Overfitting) استفاده می‌کند. جنگل تصادفی شامل مجموعه‌ای از درختان تصمیم است که به‌صورت تصادفی از زیرمجموعه‌های مختلف داده‌ها و ویژگی‌ها ساخته می‌شوند. هر درخت تصمیم به‌طور مستقل پیش‌بینی می‌کند و در نهایت، پیش‌بینی نهایی بر اساس رأی‌گیری (Voting) بین درختان انجام می‌شود. اجزای جنگل تصادفی عبارت‌اند از: درختان تصمیم: هر درخت تصمیم به‌صورت مستقل ساخته می‌شود و از یک زیرمجموعه تصادفی از داده‌ها و ویژگی‌ها استفاده می‌کند. رأی‌گیری: برای طبقه‌بندی، کلاسی که بیشترین رأی را از درختان دریافت کند به‌عنوان نتیجه نهایی انتخاب می‌شود. در رگرسیون، میانگین پیش‌بینی‌های درختان محاسبه می‌شود.

عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی به‌صورت زیر است:

- نمونه‌برداری تصادفی: از مجموعه داده اصلی، نمونه‌های تصادفی (با جایگزینی) انتخاب می‌شود. این فرآیند به نام «بگینگ» (Bagging) شناخته می‌شود.
- ساخت درختان تصمیم: برای هر نمونه انتخاب‌شده، یک درخت تصمیم ساخته می‌شود. در این مرحله، به‌جای استفاده از تمام ویژگی‌ها، تنها یک زیرمجموعه تصادفی از ویژگی‌ها برای تقسیم کردن در گره‌ها انتخاب می‌شود.
- رأی‌گیری یا میانگین‌گیری: پس از ساخت تمام درختان، برای طبقه‌بندی، رأی‌گیری انجام می‌شود و برای رگرسیون، میانگین پیش‌بینی‌های درختان محاسبه می‌شود.

مزایای جنگل تصادفی عبارت‌اند از: دقت بالا: جنگل تصادفی معمولاً دقت بالاتری نسبت به یک درخت تصمیم منفرد دارد و می‌تواند به‌خوبی با داده‌های پیچیده و غیرخطی کار کند. کاهش خطر بیش‌برازش: با استفاده از چندین درخت تصمیم و رأی‌گیری، خطر بیش‌برازش به‌شدت کاهش می‌یابد. قابلیت کار با داده‌های گم‌شده: جنگل تصادفی می‌تواند با داده‌های ناقص به‌خوبی کار کند و به‌طور طبیعی از داده‌های گم‌شده صرف‌نظر کند. تفسیر ویژگی‌ها: این الگوریتم می‌تواند اهمیت ویژگی‌ها را محاسبه کند و به شناسایی ویژگی‌های تأثیرگذار کمک کند. معایب آن نیز شامل: پیچیدگی محاسباتی: ساخت و آموزش چندین درخت تصمیم ممکن است زمان‌بر و نیازمند منابع محاسباتی بیشتری باشد. کاهش قابلیت تفسیر: در مقایسه با درختان تصمیم، جنگل تصادفی کمتر



قابل تفسیر است و درک نحوه تصمیم‌گیری مدل دشوارتر است. مدل‌های بزرگ: در صورت وجود تعداد زیادی از درختان، مدل ممکن است به شدت بزرگ شود و زمان پیش‌بینی را افزایش دهد.

جنگل تصادفی در زمینه‌های مختلفی کاربرد دارد، از جمله: پزشکی: تشخیص بیماری‌ها و پیش‌بینی نتایج درمان. مالی: ارزیابی ریسک اعتباری و شناسایی تقلب. بازاریابی: شناسایی مشتریان هدف و پیش‌بینی رفتار خرید. اکولوژی: طبقه‌بندی گونه‌ها و تجزیه و تحلیل زیستگاه‌ها. الگوریتم جنگل تصادفی به عنوان یک ابزار قدرتمند در یادگیری ماشین، به دلیل دقت بالا، کاهش خطر بیش‌برازش و قابلیت کار با داده‌های پیچیده، در بسیاری از زمینه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، توجه به معایب آن و استفاده از فنون بهینه‌سازی می‌تواند به بهبود عملکرد این الگوریتم کمک کند.

در این بخش، مدل جنگل تصادفی برای تحلیل و پیش‌بینی بر روی داده‌های آزمون مورد استفاده قرار گرفته است. جنگل تصادفی یکی از الگوریتم‌های قدرتمند یادگیری ماشین است که بر پایه ترکیب چندین درخت تصمیم (Decision Trees) عمل می‌کند. این مدل به دلیل قابلیت‌های پیشرفته‌اش در تعمیم و قدرت پیش‌بینی بالا به طور گسترده‌ای در مسائل دسته‌بندی و رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل عملکرد مدل جنگل تصادفی با استفاده از دقت، گزارش طبقه‌بندی و ماتریس سردرگمی این امکان را می‌دهد که به طور جامع‌تری عملکرد مدل خود را ارزیابی کنید. این تحلیل‌ها به شناسایی نقاط قوت و ضعف مدل کمک کرده و به بهبود بهینه‌سازی مدل‌های یادگیری ماشین شما یاری می‌رساند. با استفاده از این اطلاعات، می‌توانید تصمیمات بهتری برای بهبود عملکرد مدل‌های خود اتخاذ کنید و قابلیت‌های پیش‌بینی آن‌ها را ارتقاء دهید.

نتایج عددی ارزیابی الگوریتم جنگل تصادفی در جدول زیر قابل مشاهده است. همچنین ماتریس سردرگمی الگوریتم در شکل زیر ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج عددی ارزیابی الگوریتم جنگل تصادفی

Training Accuracy	%۱۰۰٫۰
Model Accuracy Score	%۹۹٫۶

Classification Report				
	precision	recall	score-f1	support
۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱۹۲۱
۱	۰٫۹۰	۰٫۹۵	۰٫۹۲	۱۹
۲	۱٫۰۰	۰٫۷۸	۰٫۸۸	۹
۳	۰٫۸۸	۰٫۹۴	۰٫۹۱	۱۶
۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۳
۵	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۳۲
accuracy			۱٫۰۰	۲۰۰۰
macro avg	۰٫۷۹	۰٫۷۷	۰٫۷۸	۲۰۰۰
weighted avg	۰٫۹۹	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۲۰۰۰





توضیحات جدول:

Training Accuracy: دقت مدل در داده‌های آموزشی

Model Accuracy: دقت مدل در داده‌های آزمایشی

Support: تعداد نمونه‌ها در هر کلاس

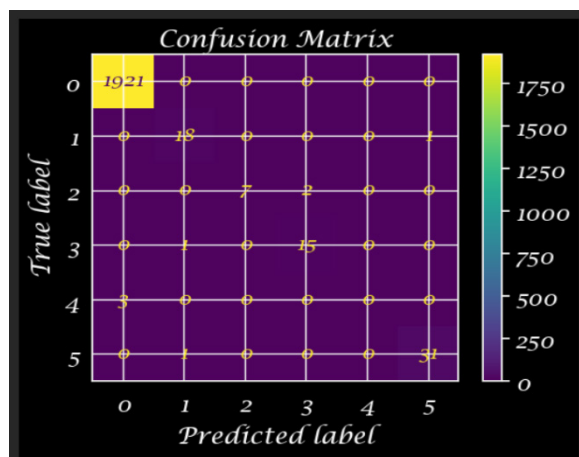
F1-Score: میانگین هماهنگ دقت و یادآوری

Recall: نسبت نمونه‌های درست شناسایی شده به کل نمونه‌های واقعی

Precision: نسبت نمونه‌های درست شناسایی شده به کل نمونه‌های پیش‌بینی شده

Macro Avg: میانگین ساده مقادیر Precision، F1-Score، Recall بدون توجه به تعداد نمونه‌ها

Weighted Avg: میانگین وزنی مقادیر Precision، F1-Score، Recall با توجه به تعداد نمونه‌ها



شکل ۷. ماتریس سردرگمی الگوریتم جنگل تصادفی

ساخت و مقایسه عملکرد

برای ارزیابی و مقایسه مدل‌های مختلف یادگیری ماشین، نتایج دقت مدل‌ها بر روی داده‌های آموزشی و آزمون در جدول زیر جمع‌آوری شده است. این مقایسه کمک می‌کند تا تصویری واضح از عملکرد هر مدل نسبت به دیگر مدل‌ها داشته باشید و بتوانید تصمیم بهتری درباره انتخاب مدل مناسب برای مسئله خود بگیرید.

جدول ۷. نتایج دقت مدل‌ها بر روی داده‌های آموزشی و آزمون

	Model	Training Accuracy	Model Accuracy Score
۱	SVM	۹۶٫۷۲	۹۶٫۲۰
۲	Logistic Regression	۹۶٫۶۴	۹۶٫۰۵
۳	Random Forest	۱۰۰٫۰۰	۹۹٫۶۰
۴	Decision Tree	۱۰۰٫۰۰	۹۹٫۱۰



مقایسه دقت‌های آموزشی و مدل برای هر یک از مدل‌های یادگیری ماشین به شما این امکان را می‌دهد که مدل مناسب را برای مسئله خود انتخاب کنید. مدل‌هایی که دقت آموزشی و دقت مدل بالاتری دارند، معمولاً عملکرد بهتری در یادگیری و پیش‌بینی دارند، اما باید توجه داشته باشید که دقت آموزشی بالا ممکن است نشان‌دهنده بیش‌برازش باشد. همچنین، برای انتخاب بهترین مدل، علاوه بر دقت، تحلیل‌های دیگر مانند گزارش طبقه‌بندی و ماتریس سردرگمی نیز باید مدنظر قرار گیرد. این مقایسه و تحلیل به شما کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری برای انتخاب مدل و بهینه‌سازی عملکرد آن بگیرید.

نتایج پیش‌بینی الگوریتم جنگل تصادفی

در این بخش، به تحلیل پیش‌بینی‌های مدل جنگل تصادفی پرداخته شده است. این تحلیل به منظور ارزیابی دقت و عملکرد مدل در پیش‌بینی برچسب‌های کلاس بر روی داده‌های آزمون انجام شده است. برای این منظور، پیش‌بینی‌های مدل با برچسب‌های واقعی مقایسه شده و نتایج به صورت جدول ارائه شده‌اند. این الگوریتم بهترین نتیجه را داشته و از آن برای پیش‌بینی داده‌های جدید استفاده شده است.

(۱) ایجاد جدول مقایسه: برای بررسی دقت پیش‌بینی‌های مدل جنگل تصادفی، یک جدول مقایسه از دو ستون اصلی تهیه شده است:

❖ **برچسب‌های واقعی (Actual):** این ستون شامل برچسب‌های اصلی داده‌های آزمون است که به عنوان مرجع برای مقایسه با پیش‌بینی‌های مدل استفاده می‌شود.

❖ **پیش‌بینی‌های مدل (Predicted):** این ستون شامل پیش‌بینی‌هایی است که مدل جنگل تصادفی برای داده‌های آزمون تولید کرده است.

با مقایسه این دو ستون، می‌توان مشاهده کرد که مدل در پیش‌بینی برچسب‌ها تا چه اندازه دقیق عمل کرده است.

(۲) مشاهده نمونه‌های تصادفی: برای تحلیل دقیق‌تر، نمونه‌هایی تصادفی از جدول مقایسه نمایش داده شده‌اند. این روش به شما این امکان را می‌دهد که به طور تصادفی و بدون بررسی تمام داده‌ها، نمونه‌هایی را که مدل به درستی یا به طور نادرست پیش‌بینی کرده است، بررسی کنید. این تحلیل می‌تواند به شناسایی الگوهای خاص یا مشکلات مدل کمک کند.

(۳) تحلیل نتایج: با بررسی و تحلیل جدول مقایسه، می‌توان به نکات زیر پی برد:

❖ **عملکرد مدل:** تحلیل پیش‌بینی‌های مدل نسبت به برچسب‌های واقعی، ارزیابی دقیقی از دقت مدل را ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی درست برچسب‌ها چگونه عمل کرده است.

❖ **شناسایی مشکلات:** نمونه‌هایی که مدل به طور نادرست پیش‌بینی کرده است می‌تواند نشان‌دهنده مشکلات خاص یا نقاط ضعف مدل باشد. این اطلاعات می‌تواند به بهبود مدل و بهینه‌سازی آن کمک کند.

❖ **الگوهای خاص:** تحلیل داده‌ها ممکن است نشان دهد که مدل به برخی ویژگی‌ها یا الگوهای خاص حساس است که می‌تواند به شناسایی و رفع مشکلات مدل کمک کند.

بررسی و تحلیل پیش‌بینی‌های مدل جنگل تصادفی از طریق مقایسه برچسب‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده، اطلاعات دقیق و مفیدی را درباره عملکرد مدل فراهم می‌آورد. این تحلیل به شناسایی نقاط قوت و ضعف مدل کمک کرده و به بهبود و بهینه‌سازی



مدل‌های آینده یاری می‌رساند. استفاده از جدول مقایسه و ویژگی‌های بصری برای تحلیل دقیق‌تر داده‌ها و نتایج، فرآیند ارزیابی مدل را تسهیل کرده و به تحلیلگران کمک می‌کند تا نتایج را به طور مؤثرتری بررسی کنند.

جدول ۴-۱۴. جدول مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده

ردیف	Actual	Predicted
۸۱۴۶	۰	۰
۳۱۳۰	۰	۰
۸۸۱۵	۰	۰
۲۱۰۸	۰	۰
۷۳	۰	۰

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

با توجه به اهمیت تأسیسات ساختمانی و کاربردهای فراوانی که هوش مصنوعی در زمینه نت پیشگیرانه این تجهیزات مانند الکتروموتور دارد و شکاف‌ها و محدودیت‌های مطالعاتی موجود در این حوزه، پژوهش حاضر به دنبال پاسخ‌گویی به این سؤال است که چگونه می‌توان با استفاده از داده‌کاوی و یادگیری ماشین به نت پیشگیرانه تأسیسات و تجهیزات ساختمان پرداخت؟ این سؤال، شروعی برای جست‌وجوی ادبیات پژوهش بود و پس از بررسی خیل عظیمی از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه متغیرهای پژوهش، مشخص شد پژوهش‌های محدودی در حوزه متغیرهای این پژوهش انجام شده و شکاف‌های مطالعاتی در این حوزه مشاهده می‌گردد و همچنین پژوهش‌هایی که به نت پیشگیرانه در الکتروموتور و با روش یادگیری ماشین و داده‌کاوی پردازد انجام نشده است. تدوین مبانی و بررسی پیشینه پژوهش، شروعی بر به‌کارگیری روش پژوهش در راستای تحلیل داده‌ها و بررسی یافته‌های پژوهش بود. به‌طور کلی روش انجام پژوهش در این مطالعه به این صورت است که ابتدا داده‌های پژوهش جمع‌آوری شده و پس از آن به پیش‌پردازش داده‌ها پرداخته شد. در ادامه از طریق روش‌های یادگیری ماشین و داده‌کاوی به ساخت مدل، ارزیابی مدل و بهبود مدل پرداخته شده و تلاش شده تا اجرای مدل‌ها با شبیه‌سازی در محیط واقعی انجام شود. به‌نوعی که با تحلیل داده‌های پژوهش از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین و داده‌کاوی، مدل بهینه نت پیشگیرانه الکتروموتور مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مدلی بهینه در این حوزه ارائه شده است.

در این پژوهش از دو نوع داده استفاده شده است. نوع اول که از داده‌های نت ثبت شده در پایگاه داده دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع) به‌منظور ارائه گزارش‌های تحلیلی استفاده شده است. نوع دوم شامل داده‌های ثبت شده برای یک الکتروموتور برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌باشد. علت اینکه از دو نوع داده استفاده شده است برمی‌گردد به نوع داده‌های ثبت شده در پایگاه داده نت دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع). اساساً این داده‌ها کمی نبوده و برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین مناسب نیستند؛ از این رو از داده‌های مناسب برای یک تجهیز خاص (الکتروموتور) برای پیاده‌سازی الگوریتم‌ها استفاده شده است. لذا در این پژوهش ما بر روی داده‌های مربوط به الکتروموتور کار کردیم که این داده‌ها، داده‌های شبیه‌سازی می‌باشند که به ازای هر داده آموزشی متغیرهایی ذخیره شده‌اند که برخی ویژگی‌ها، ویژگی‌های آموزشی را بیان می‌کنند و برخی متغیرها دیگر متغیرهایی هستند که به دنبال پیش‌بینی آن‌ها هستیم و در نهایت عملکرد الکتروموتور را نشان می‌دهند.



داده‌های پایگاه داده نت، اطلاعات جامعی از تعمیرات انجام‌شده، تاریخ، ساعت، تعمیرکار و درخواست دهنده ارائه دادند که مورد تحلیل قرار گرفت تا الگوهای کلیدی شناسایی شوند. نتایج حاکی از این بودند که اکثر تعمیرات در زمان‌های مشخصی از روز صورت می‌گیرد و برخی افراد بیشترین درخواست‌ها و تعمیرات را داشته‌اند.

به کمک الگوریتم تحلیل، مؤلفه‌های اصلی داده‌ها را از فضای اصلی چندبعدی به یک فضای جدید تصویر کردیم و نشان دادیم که اگر فقط تعدادی ویژگی‌های داده‌ها در فضای جدید را در نظر بگیریم، حدود ۹۹ درصد اطلاعات را حفظ کرده‌ایم. این ویژگی‌ها در فضای جدید درواقع هرکدام ترکیب خطی تمامی ویژگی‌ها در فضای اصلی هستند و تناظر یک‌به‌یک بین دو فضا وجود ندارد. این روش به ما کمک می‌کند تا بتوانیم داده‌ها با ابعاد بالا را در فضای جدید با ابعاد کمتر بدون از دست دادن اطلاعات زیاد ترسیم کنیم و دید خوبی نسبت به داده‌ها به دست آوریم.

در ادامه الگوریتم‌های مختلفی را روی داده‌های مجموعه آموزشی در فضای اصلی آموزش دادیم و بعد بر روی داده‌های مجموعه آزمایشی اعمال کردیم تا مقادیر متغیرهای هدف یا همان ویژگی‌های اصلی ذکرشده در بالا را پیش‌بینی کنیم. داده‌های مجموعه آزمایشی در مرحله آموزش الگوریتم توسط الگوریتم دیده نشده بودند. هر الگوریتم دارای ابر پارامترهای مختص به خود است که این ابر پارامترها می‌بایستی به درستی به روش اعتبارسنجی از روی داده‌های اعتبارسنجی تعیین شوند و در بخش مربوط به هر الگوریتم این ابر پارامترها را معرفی کرده و نتایج داده‌های اعتبارسنجی را به منظور انتخاب ابر پارامترها نشان دادیم. بر اساس پژوهش‌های قبلی که بر روی داده‌های تجهیزات ساختمانی اعمال شده است، میانگین دقت پیش‌بینی حدود ۸۵ درصد است که با انتخاب صحیح هاپر پارامترها این میزان را به میزان بالاتری ارتقاء دادیم. علاوه بر این در الگوریتم دیگر نیز میانگین دقت پیش‌بینی را با انتخاب صحیح هاپر پارامترها به پیش‌بینی صحیح بالا رساندیم. همچنین در این مطالعه ما به تحلیل مؤلفه‌های اصلی پرداختیم که در مطالعات پیشین به آن پرداخته نشده بود.

در زمینه استفاده از داده‌کاوی و یادگیری ماشین، چندین الگوریتم پرکاربرد مانند درخت تصمیم، جنگل‌های تصادفی، ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مورد ارزیابی قرار گرفتند. این الگوریتم‌ها کمک کردند تا پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از وقوع خرابی‌ها و نیاز به تعمیرات الکتروموتورها انجام شود. نتایج نشان داد که با استفاده صحیح از این روش‌ها، می‌توان به‌طور مؤثر خرابی‌های غیرمنتظره را کاهش داد، طول عمر تجهیزات را افزایش داد و هزینه‌های نگهداری بهینه‌سازی شده را به دست آورد. به‌طور خلاصه، پژوهش نشان‌دهنده پتانسیل بالای داده‌کاوی و یادگیری ماشین در بهبود فرآیندهای نت الکتروموتورها به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی تأسیسات ساختمانی است. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای توسعه بیشتر و پیاده‌سازی عملی در سایر تأسیسات و تجهیزات مشابه مورد استفاده قرار گیرند؛ بنابراین به‌طورکلی نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارت‌اند از:

- (۱) دسته‌بندی اطلاعات مربوط به نت الکتروموتور؛
- (۲) تعیین عوامل مهم در پایش طول عمر الکتروموتور؛
- (۳) استفاده از پارامترهای اثرگذار برای تعیین مدت زمان مناسب برای چک کردن پارامترهای فنی دستگاه و نیز احتمال بالای نیاز به تعمیر دستگاه در مدت زمان بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده؛
- (۴) ارائه مدل پیشنهادی برای اولین بار با رویکرد برد-برد و تعریف برنامه نت پیشگیرانه برای تجهیزات پیچیده‌ای که وارانتهی برایشان در نظر گرفته شده با تغییری که در تابع هدف اعمال شده است.





با بررسی، تحلیل و مقایسه انجام شده، می‌توان به نکات زیر پی برد:

- ❖ عملکرد مدل: تحلیل پیش‌بینی‌های مدل نسبت به برچسب‌های واقعی، ارزیابی دقیقی از دقت مدل را ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی درست برچسب‌ها چگونه عمل کرده است.
- ❖ شناسایی مشکلات: نمونه‌هایی که مدل به‌طور نادرست پیش‌بینی کرده است می‌تواند نشان‌دهنده مشکلات خاص یا نقاط ضعف مدل باشد. این اطلاعات می‌تواند به بهبود مدل و بهینه‌سازی آن کمک کند.
- ❖ الگوهای خاص: تحلیل داده‌ها ممکن است نشان دهد که مدل به برخی ویژگی‌ها یا الگوهای خاص حساس است که می‌تواند به شناسایی و رفع مشکلات مدل کمک کند.

بررسی و تحلیل پیش‌بینی‌های مدل جنگل تصادفی از طریق مقایسه برچسب‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده، اطلاعات دقیق و مفیدی را درباره عملکرد مدل فراهم می‌آورد. این تحلیل به شناسایی نقاط قوت و ضعف مدل کمک کرده و به بهبود و بهینه‌سازی مدل‌های آینده یاری می‌رساند. استفاده از جدول مقایسه و ویژگی‌های بصری برای تحلیل دقیق‌تر داده‌ها و نتایج، فرآیند ارزیابی مدل را تسهیل کرده و به تحلیلگران کمک می‌کند تا نتایج را به‌طور مؤثرتری بررسی کنند.

راه‌حل پیشنهادی نشان داده شده به ما اجازه می‌دهد تا ناهنجاری‌هایی را که روی دستگاه رخ می‌دهد شناسایی و طبقه‌بندی کنیم. این نیاز به داشتن یک مجموعه داده از قبل در شروع را حذف می‌کند و به شما امکان می‌دهد بدون نیاز به آن شروع کنید و فقط تشخیص ناهنجاری را انجام دهید و طبقه‌بندی را به‌عنوان خطاهایی که واقعا در دستگاه رخ می‌دهد معرفی کنید و از آن‌ها برای تشخیص در دفعات بعد استفاده کنید. محدودیت‌های اصلی که با آن مواجه می‌شویم، زمان مورد نیاز برای آموزش در مراحل آزمایشی پیشرفته است که در آن چارچوب داده‌ای کامل از نظر کلاس‌ها و ورودی‌ها وجود دارد. درواقع، طبقه‌بندی کننده باید هر بار که کل مجموعه داده‌ها را افزایش یا اصلاح می‌کند، دوباره آموزش داده شود. به همین دلیل، منطقی است که از یک چارچوب داده تولیدشده با انتخاب ویژگی استفاده کنیم. به این ترتیب می‌توان مقدار کمی از داده‌های ذخیره‌شده و سرعت آموزش خوب الگوریتم را حفظ کرد؛ بنابراین فرض بر این است که در سناریوهای واقعی، این عملیاتی است که باید فقط به‌صورت دوره‌ای، در پس‌زمینه یا در زمان‌هایی که ماشین‌ها در حال تولید نیستند، انجام شود و خود را به استفاده از مدل‌های تشخیص ناهنجاری به‌عنوان طبقه‌بندی کننده در طول فرآیند محدود کنند. به علاوه، وابستگی شدید به عامل انسانی همچنان باقی است. درواقع این کاربران هستند که طبقه‌بندی را انجام می‌دهند.

سیستم توسعه‌یافته ثابت کرده است که می‌تواند ناهنجاری‌ها را طبقه‌بندی و تشخیص دهد، بنابراین عملکردهای تشخیصی را ممکن می‌سازد. پس از آزمایش ترکیب‌های مختلف برای استخراج و انتخاب ویژگی‌ها، بهترین روش پیش‌پردازش داده‌های خام با توجه به مدل یادگیری ماشینی مورد استفاده، به‌ویژه در مورد طبقه‌بندی و تشخیص ناهنجاری، ارزیابی شد. تمام داده‌هایی که استفاده شد، از یک مدل واقعی و نه از شبیه‌سازی می‌آیند. حسگر قرارگرفته بر روی دستگاه، مقادیر فیزیکی را در حین کارکرد دستگاه جمع‌آوری کرده است که درواقع به حالت خرابی رسیده است. با توجه به فنون تجزیه و تحلیل داده‌ها و تشخیص ناهنجاری، یک رویکرد داده محور بر اساس الگوریتم‌های یادگیری ماشین انتخاب شد. طبقه‌بندی کننده‌ها درواقع دقت بسیار خوبی در تمایز بین حالت‌ها نشان داده‌اند، اما آن‌ها باید بر روی مجموعه داده کاملی از همه خطاها آموزش ببینند تا شناسایی شوند. استفاده موازی از مدل‌های تشخیص ناهنجاری امکان غلبه بر این محدودیت را فراهم می‌کند، زیرا آن‌ها می‌توانند تشخیص دهند که ورودی جدید در



هیچ‌یک از کلاس‌های خطای شناخته‌شده قرار نمی‌گیرد. راه‌حل پیشنهادی دقیقاً مبتنی بر این مفهوم از یادگیری پیشرو است که از شناسایی یک ناهنجاری عمومی با دانستن تنها وضعیت عملکرد عادی شروع می‌شود و به کارگران نگهداری و تعمیر اجازه می‌دهد تا مجموعه عیوب شناخته‌شده را همان‌طور که روی ماشین‌ها رخ می‌دهند، افزایش دهند.

سیستم نگهداری و تعمیر پیش‌بینانه توسعه‌یافته در این پژوهش پتانسیل بهبود قابل‌توجه راندمان و قابلیت اطمینان الکتروموتورها در تأسیسات و تجهیزات ساختمان را دارد. با استفاده از فنون داده‌کاوی و یادگیری ماشین، این سیستم می‌تواند ناهنجاری‌ها را شناسایی کرده و خرابی‌های احتمالی را پیش‌بینی کند، امکان نگهداری و تعمیر پیشگیرانه و کاهش زمان خرابی را فراهم می‌کند. پیاده‌سازی این سیستم می‌تواند مزایای متعددی را به همراه داشته باشد از جمله: کاهش زمان خرابی: با پیش‌بینی خرابی‌های بالقوه، می‌توان نگهداری و تعمیر را به‌طور پیشگیرانه برنامه‌ریزی کرد، زمان خرابی را کاهش داد و تأثیر آن بر عملیات ساختمان را به حداقل رساند. بهره‌وری بهبود یافته: سیستم برنامه‌های نگهداری و تعمیر را بهینه می‌کند و زمان و منابع مورد نیاز برای فعالیت‌های نگهداری و تعمیر را کاهش می‌دهد. صرفه‌جویی در هزینه: با کاهش زمان توقف و بهینه‌سازی برنامه‌های نگهداری و تعمیر، سیستم می‌تواند به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیر و افزایش طول عمر الکتروموتورها کمک کند. قابلیت اطمینان افزایش یافته: سیستم تضمین می‌کند که دارایی‌های حیاتی به‌طور منظم نگهداری می‌شوند و قابلیت اطمینان کلی تأسیسات و تجهیزات ساختمان را افزایش می‌دهد. ایمنی پیشرفته: با شناسایی خرابی‌ها و ناهنجاری‌های احتمالی، سیستم می‌تواند به جلوگیری از حوادث کمک کند و محیط کاری امن‌تری را برای کارکنان نگهداری و تعمیر و ساکنان ساختمان تضمین کند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، می‌توان مقایسه‌ای را میان نتایج این پژوهش و برخی پژوهش‌های گذشته انجام داد. پژوهشی که دقیقاً با این روش‌ها و در تجهیزات مشابه با این موضوع پردازد انجام نشده و این پژوهش کاملاً نو می‌باشد؛ اما می‌توان نتایج حاصل از این پژوهش را به نوع غیرمستقیم با پژوهش‌های زیر همخوان دانست. توکلی مقدم و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی زمان‌بندی کار کارگاهی بلادرنگ و نت پیشگویانه پویا با استفاده از یادگیری ماشین پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های دیگر زمان‌بندی، خروجی‌های بهتری را از خود نشان می‌دهد. مدل نت پیشگویانه، با چهار روش مدل‌سازی یادگیری مورد ارزیابی و کیفیت مدل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. با انتخاب و اضافه کردن بهترین مدل خرابی ماشین به مدل یادگیری تقویتی زمان‌بندی، کارهای بلادرنگ وارد شده به کارگاه، به ماشین‌ها تخصیص داده می‌شوند. با مقایسه روش مطرح‌شده و روش‌های پیشین مشخص شد که بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. مروتی و همکاران (۱۴۰۱) به مطالعه مدیریت فرایندهای نت با رویکرد ترکیبی چارچوب طبقه‌بندی فرایندها و داده‌کاوی پرداختند. بدین منظور ابتدا واحد فناوری اطلاعات دانشگاه با سایر سازمان‌های مشابه مقایسه شد و فرایندهای مربوط به نت تجهیزات رایانه‌ای مستندسازی شدند. در ادامه داده‌های نه‌ماهه مربوط به گزارش خرابی تجهیزات، برای اطلاع از روند خرابی‌های اتفاق افتاده، بررسی روابط موجود در بین آن‌ها و همچنین کمک به مهندسی مجدد فرایندها، استخراج شده و با استفاده از فنون داده‌کاوی تحلیل شدند. راد و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی توسعه رویکردهای داده‌کاوی به‌منظور برنامه‌ریزی نت پیشگویانه خودروهای سبک دفاعی پرداختند. با اتکا به اصول داده‌کاوی و از طریق نرم‌افزار اس. پی. اس. اس. مادلر به گروه‌بندی خودروها بر اساس فواصل بین خرابی (کیلومتر) با الگوریتم درخت سی. اند. آر. پرداخته شد و الگوی نت پیشگیرانه‌ای ارائه شد که بر اساس خصوصیات فیزیکی و تابع عمر سیستم بوده و در نهایت باعث افزایش عمر سیستم و کاهش هزینه نت می‌گردد. ال رافائی و همکاران (۲۰۲۳) به پیش‌بینی فعالیت‌های نگهداری و تعمیر



با استفاده از الگوی متوالی تعمیم یافته و قوانین تداعی در داده کاوی پرداختند. نتایج نشان داد که چارچوب پیشنهادی به طور مؤثر فعالیت های نگهداری بعدی و برنامه ریزی نگهداری پیشگیرانه را بر اساس ویژگی های محصول پیش بینی می کند. در نتیجه، رویکرد داده کاوی در تعیین توالی نگهداری و تعمیر مؤثر است که زمان خرابی را کاهش می دهد و در نتیجه بهره وری و در دسترس بودن را افزایش می دهد. این مطالعه یک چارچوب داده کاوی برای پیش بینی الگوهای متوالی فعالیت های نگهداری و تعمیر پیشنهاد کرد. چارچوب شامل جمع آوری داده ها، پیش بینی فعالیت های نگهداری و تعمیر با و بدون ویژگی ها و سپس مقایسه بین نتایج پیش بینی بود.

با توجه به نتایج و مطالعات حاصل از این پژوهش، در ادامه پیشنهادهایی جهت بهبود عملکرد در حوزه مورد مطالعه ارائه شده است. با اجرای این پیشنهادها، می توان همواره از وجود یک سیستم نگهداری و تعمیر پیش بینانه که کارایی، قابلیت اطمینان و مقرون به صرفه بودن تأسیسات و تجهیزات ساختمان را بهبود بخشد و در حال بهبود مستمر باشد، اطمینان حاصل کرد.

- جمع آوری و یکپارچه سازی داده ها: ایجاد یک سیستم جامع جمع آوری داده ها که داده ها را از منابع مختلف مانند حسگرها، سوابق نگهداری و تعمیر و مشخصات تجهیزات یکپارچه می کند. اطمینان از کیفیت و سازگاری داده ها برای بهبود دقت مدل های پیش بینی اهمیت دارد.

- تجزیه و تحلیل هزینه - منفعت: انجام یک تحلیل هزینه - فایده برای تعیین کمیت مزایای مالی نگهداری و تعمیر پیش بینی شده در مقایسه با رویکردهای سنتی نگهداری و تعمیر واکنشی.

- برنامه آزمایشی و مقیاس بندی: شروع با یک برنامه آزمایشی تا سیستم نگهداری و تعمیر پیش بینانه در مقیاس کوچک آزمایش شود و سپس افزایش آن برای پوشش تجهیزات و امکانات بیشتر.

- نظارت بر وضعیت: اجرای فنون پایش وضعیت، مانند آنالیز ارتعاش، پایش دما و نظارت بر فشار برای شناسایی ناهنجاری ها و پیش بینی خرابی های احتمالی در الکتروموتورها.

- الگوریتم های یادگیری ماشین: از الگوریتم های یادگیری ماشینی مانند درخت های تصمیم گیری، جنگل های تصادفی و شبکه های عصبی برای تجزیه و تحلیل داده ها و پیش بینی خرابی های تجهیزات استفاده شود. استفاده از فنون یادگیری عمیق برای تجزیه و تحلیل داده های پیچیده تر نیز کاربرد دارد.

- استراتژی های نگهداری پیش بینانه: توسعه مستمر استراتژی های نگهداری پیش بینانه بر اساس نتایج تحلیل داده ها و مدل های یادگیری ماشین. این ممکن است شامل برنامه ریزی نگهداری، تعویض قطعات، یا تنظیم شرایط عملیاتی برای جلوگیری از خرابی باشد.

- سیستم های مانیتورینگ و هشدار بی درنگ: اجرای سیستم های نظارت و هشدار بی درنگ برای آگاه کردن کارکنان نگهداری و تعمیر از مشکلات احتمالی که امکان اقدام سریع برای جلوگیری از خرابی و کاهش هزینه های نگهداری و تعمیر را فراهم می کند.

- همکاری و اشتراک دانش: تقویت همکاری بین کارکنان نگهداری و تعمیر، مدیران تأسیسات و تحلیلگران داده برای اطمینان از مؤثر بودن سیستم نگهداری و تعمیر پیش بینانه و پاسخگویی به نیازهای همه ذینفعان.





- بهبود مستمر: به‌روزرسانی و اصلاح مداوم سیستم نگهداری پیش‌بینانه بر اساس داده‌های جدید، بازخورد کارکنان نگهداری و تعمیر و پیشرفت‌های یادگیری ماشین و تجزیه و تحلیل داده‌ها.
- امنیت سایبری و حفاظت از داده‌ها: تضمین امنیت و یکپارچگی سیستم نگهداری پیش‌بینانه با اجرای اقدامات امنیت سایبری قوی و حفاظت از داده‌های حساس.

جهت پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود که به محدودیت‌های پژوهش نیز توجه شود. پیشنهادهایی جهت مطالعه محققین ارائه می‌شود: استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری به منظور بهبود روش‌های یادگیری ماشین؛ ترکیب روش پیشنهادی و مدل‌های بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی نت برای افزایش دقت روش‌ها و ارائه برنامه عملیاتی مبتنی بر وضعیت؛ ادغام سیستم‌های نگهداری پیش‌بینانه با دستگاه‌های اینترنت اشیا و محاسبات لبه‌ای برای بهبود پردازش داده‌های بلادرنگ و کاهش تأخیر؛ کاربرد سیستم‌های چندعاملی و هوش ازدحامی برای بهینه‌سازی استراتژی‌های نگهداری پیش‌بینانه و بهبود هماهنگی وظایف نگهداری و تعمیر.

معمولاً هر محقق برای شروع و ادامه کار پژوهشی خود با موانع و محدودیت‌هایی مواجه خواهد شد و در انجام این پژوهش، مشکلات و محدودیت‌های چندی قابل بیان است که به آن‌ها اشاره می‌شود: محدودیت در دستیابی به داده‌های باکیفیت و در دسترس؛ پیچیدگی سیستم‌ها و تجهیزات ساختمانی؛ مقیاس‌پذیری و تعمیم‌پذیری: توسعه مدل‌هایی که می‌توانند به انواع ساختمان‌ها، اندازه‌ها و پیکربندی‌های تجهیزات مختلف مقیاس شوند، می‌تواند یک چالش باشد.



۶- منابع و مآخذ

۶-۱- فارسی

- ۱) جوادی، مریم، فاطمی، شهرام، عزیزی، نجف. (۱۴۰۳). طراحی مدل پویای هوشمند نت پیشگیرانه در صنعت نساجی و پوشاک در تعامل با تولید با بهره‌برداری از شبکه عصبی مصنوعی-فازی. مدیریت مهندسی و رایانش نرم، ۹(۲)، ۶۳-۹۰.
- ۲) صلاحی، صادق، دانشور، زهرا، همایون‌فر، عادل. (۱۴۰۲). ارائه مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی نت پیشگیرانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها و اختلال در تسهیلات. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۳(۱)، ۱۰۵-۱۳۹.
- ۳) فریدنی، فرانک. (۱۴۰۲). نقش صنعت ۴/۰ در بهبود عملکرد زنجیره تأمین با میانجی‌گری چابکی و انعطاف‌پذیری. نشریه علمی رویکردهای پژوهشی نوین مدیریت و حسابداری، ۷(۲۶)، ۸۵۹-۸۷۱.
- ۴) آقاجانی، حسین، رجبی، محمد، کفشگر، فاطمه زهرا. (۱۳۹۹). مطالعه تطبیقی شناسایی و اولویت‌بندی ابعاد فرصت‌ها و چالش‌های مدیریت کیفیت در صنعت ۴ با استفاده از فن BWM. فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم‌های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق)، ۱۴(۵۰)، ۱۳۲-۱۴۷.
- ۵) کامران راد، رضا، فرخی زاده، فرشید. (۱۴۰۰). توسعه رویکردهای داده‌کاوی به منظور برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیش‌گویانه خودروهای سبک دفاعی. علمی‌اندیشه آماد، ۲۰(۷۷)، ۱۱۱-۱۳۶. doi:10.22109/lot.10.22.34.96689
- ۶) مروتی شریف‌آبادی، علی، زنجیرچی، آرمان، عباس‌آبادی، ام‌البنین. (۱۴۰۱). مدیریت فرایندهای نت با رویکرد ترکیبی چارچوب طبقه‌بندی فرایندها و داده‌کاوی. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۲(۲)، ۱۷۵-۱۹۸.
- ۷) سربی، زهرا، شکوه‌یار، مهتاب، حقیقت‌منفرد، جلال. (۱۴۰۰). سیاست‌گذاری نت پیشگویانه در مراکز فراوری نفت و گاز. فصلنامه مطالعات مدیریت راهبردی، ۱۲(۴۸)، ۶۵-۸۳.
- ۸) توکلی مقدم، هاند، ذگردی، سید حسام‌الدین، ناصری، امین. (۱۴۰۱). زمان‌بندی کار کارگاهی بلادرنگ و نت پیشگویانه پویا با استفاده از یادگیری ماشین. تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، ۷(۳)، ۴۹۶-۵۱۵.
- ۹) فلاح‌پور، علی، راعی، حسن، توکلی، حسین. (۱۴۰۳). پیش‌بینی نگهداشت وجه نقد با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده در شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران. مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار.

۶-۲- انگلیسی

- 10) Manea, E., Milităru, C., & Manea, M. G. (2021). Assessments regarding the planning and control of activities and resources for ship repair and maintenance works. Scientific Bulletin "Mircea cel Batran" Naval Academy, 24(1), 201-210.
- 11) Constantin, A., Nițecu, C., Stănescu, M., & Roșu, L. (2011). Operation Improvement of an Irrigation Water Supply Floating Pumping Station in Constantza County. "OVIDIUS" UNIVERSITY ANNALS-





- CONSTANTZA Year XIII–Issue 13, 7.
- 12) Zheng, R., & Zhou, Y. (2021). Comparison of three preventive maintenance warranty policies for products deteriorating with age and a time-varying covariate. *Reliability Engineering & System Safety*, 213, 107676.
 - 13) Wu, C., Pan, R., Zhao, X., & Wang, X. (2024). Designing preventive maintenance for multi-state systems with performance sharing. *Reliability Engineering & System Safety*, 241, 109661.
 - 14) Indriartiningtias, R., Ibrahim, U. F., & Anna, I. D. (2024). Preventive Maintenance Policy to Improve the Effectiveness of XYZ Machine. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 517, p. 05025). EDP Sciences.
 - 15) M, Manfre. (2020). Creation of a Machine Learning model for the Predictive Maintenance of an engine equipped with a rotating shaft. Master Degree Thesis, Electronic Engineering Master Degree, Sistemi Elettronici Course.
 - 16) Liu, Y., Zhang, Q., Ouyang, Z., & Huang, H. Z. (2021). Integrated production planning and preventive maintenance scheduling for synchronized parallel machines. *Reliability Engineering & System Safety*, 215, 107869.
 - 17) Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of cleaner production*, 252, 119869.
 - 18) Peres, R. S., Jia, X., Lee, J., Sun, K., Colombo, A. W., & Barata, J. (2020). Industrial artificial intelligence in industry 4.0–systematic review, challenges and outlook. *IEEE access*, 8, 220121–220139.
 - 19) Xu, X., Lu, Y., Vogel–Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0–Inception, conception and perception. *Journal of manufacturing systems*, 61, 530–535.
 - 20) Khang, A., Abdullayev, V., Hahanov, V., & Shah, V. (Eds.). (2024). *Advanced IoT Technologies and Applications in the Industry 4.0 Digital Economy*. CRC Press.
 - 21) Rath, K. C., Khang, A., & Roy, D. (2024). The Role of Internet of Things (IoT) Technology in Industry 4.0 Economy. In *Advanced IoT Technologies and Applications in the Industry 4.0 Digital Economy* (pp. 1–28). CRC Press.
 - 22) Al–Refaie, A., Abu Hamdieh, B., & Lepkova, N. (2023). Prediction of maintenance activities using generalized sequential pattern and association rules in data mining. *Buildings*, 13(4), 946.
 - 23) Kalathas, I., & Papoutsidakis, M. (2021). Predictive maintenance using machine learning and data mining: A pioneer method implemented to Greek railways. *Designs*, 5(1), 5.





- 24) Ruschel, E., Santos, E. A. P., & Loures, E. D. F. R. (2020). Establishment of maintenance inspection intervals: an application of process mining techniques in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 53–72.
- 25) Martinez, P., Mohamed, E., Mohsen, O., & Mohamed, Y. (2020). Comparative study of data mining models for prediction of bridge future conditions. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(1), 04019108.
- 26) Tian, Z., Lu, Z., & Lu, Y. (2024). Investigation into Data Mining for Analysis and Optimization of Direct Maintenance Costs in Civil Aircraft Operations. *International Journal of Informatics and Information Systems*, 7(1), 28–36.
- 27) Nakhaei, A., Zadeh, M. K., & Bagheri, R. (2024, February). Hemodialysis Arteriovenous Fistula Survival: Analysis of Medication Impact during the Maintenance Phase Using Data Mining. In 2024 20th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP) (pp. 1–6). IEEE.
- 28) Arafat, M. Y., Hossain, M. J., & Alam, M. M. (2024). Machine learning scopes on microgrid predictive maintenance: Potential frameworks, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 190, 114088.
- 29) Angeles, E., & Kumral, M. (2020). Optimal inspection and preventive maintenance scheduling of mining equipment. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20(4), 1408–1416.
- 30) Lu, Y. J., Lee, W. C., & Wang, C. H. (2023). Using data mining technology to explore causes of inaccurate reliability data and suggestions for maintenance management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 83, 105063.
- 31) Jiang, Y., Yang, G., Li, H., & Zhang, T. (2023). Knowledge driven approach for smart bridge maintenance using big data mining. *Automation in Construction*, 146, 104673.
- 32) Ni, F., Zang, H., & Qiao, Y. (2024, January). Smartfix: Leveraging machine learning for proactive equipment maintenance in industry 4.0. In The 2nd International scientific and practical conference “Innovations in education: prospects and challenges of today” (January 16–19, 2024) Sofia, Bulgaria. International Science Group. 2024. 389 p. (p. 313).
- 33) Gupta, P., Gurulakshmi, A. B., Nijhawan, G., Praveen, P., Tyagi, L. K., & Hussien, R. A. (2024). A review on Machine Learning Enhanced Predictive Maintenance for Electric Vehicle Power Electronics: A Pathway to Improved Reliability and Longevity. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 505, p. 03017). EDP Sciences.
- 34) Chakroun, A., Hani, Y., Elmhamedi, A., & Masmoudi, F. (2024). A predictive maintenance model for health assessment of an assembly robot based on machine learning in the context of smart plant. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1–19.





- 35) Mistry, D., & Hough, J. (2024). Data-Driven Approach to State of Good Repair: Predicting Rolling Stock Service Life with Machine Learning for State of Good Repair Backlog Reduction and Long-Range Replacement Cost Estimation in Small Urban and Rural Transit Systems. *Transportation Research Record*, 03611981241235197.
- 36) Theissler, A., Pérez-Velázquez, J., Kettelgerdes, M., & Elger, G. (2021). Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry. *Reliability engineering & system safety*, 215, 107864.
- 37) Arena, S., Florian, E., Zennaro, I., Orrù, P. F., & Sgarbossa, F. (2022). A novel decision support system for managing predictive maintenance strategies based on machine learning approaches. *Safety science*, 146, 105529.
- 38) Liao, H. Y., Boregowda, K., Cade, W., & Behdad, S. (2021, August). Machine Learning to Predict Medical Devices Repair and Maintenance Needs. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 85413, p. V005T05A012). American Society of Mechanical Engineers.
- 39) Abidi, M. H., Mohammed, M. K., & Alkhalefah, H. (2022). Predictive maintenance planning for industry 4.0 using machine learning for sustainable manufacturing. *Sustainability*, 14(6), 3387.
- 40) Ren, Y. (2021). Optimizing predictive maintenance with machine learning for reliability improvement. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 7(3), 030801.
- 41) Zhao, X., Cai, J., Mizutani, S., & Nakagawa, T. (2021). Preventive replacement policies with time of operations, mission durations, minimal repairs and maintenance triggering approaches. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 819–829.
- 42) Zhang, Z., Tang, Q., & Chica, M. (2021). Maintenance costs and makespan minimization for assembly permutation flow shop scheduling by considering preventive and corrective maintenance. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 549–564.

