کاربردهای اینترنت اشیاء در نگهداری و تعمیرات پیشگویانه

آرمین مختاری[۱]، سید حامد موسوی راد[۲*]، سیاوش بیات[۳] و علیرضا افتخاری[۴]
[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Mokhtari@eng.uk.ac.ir
[۲]دانشیار بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، S.H.Moosavirad@uk.ac.ir
[۳]استادیار پژوهشکده الکترونیک، دانشگاه صنعتی شریف، Bayat@sharif.ir
[۴]کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی، شرکت فولاد زرند ایرانیان، Eftekhari55@ut.ac.ir

چکیده : نگهداری و تعمیرات پیشگویانه، متداول‌ترین مثالی است که برای پیشنهادات بازار بر بستر اینترنت اشیاء صنعتی ذکر شده است و در حال جذب سرمایه صنایع و توجه تحقیقات است. مرور نظام‌مند ادبیات حوزه نگهداری و تعمیرات با تمرکز بر اینترنت اشیاء جهت درک بهتر این حوزه و یافتن شکاف‌های تحقیقاتی هدف اصلی این مقاله است. در این پژوهش، مقالات اخیر در حوزه کاربردهای اینترنت اشیاء در نگهداری و تعمیرات پیشگویانه استخراج شد و با طبقه‌بندی پژوهش‌ها و شناخت شکاف‌های تحقیقاتی سه نتیجه حاصل شد. . اولاً، بهره‌گیری از اینترنت اشیاء در نگهداری و تعمیرات پیشگویانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دوماً، اگرچه علی‌رغم استفاده از تکنولوژی‌های اینترنت اشیاء و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پژوهش‌های اخیر، ارزیابی عملکرد این سیستم‌ها و شناسایی عوامل موثر بر عملکرد آن‌ها ضروری است. سوماً، در تحقیقات آتی می‌توان در زمینه انتخاب تکنولوژی و الگوریتم مطلوب از میان طیف وسیع گزینه‌های در دسترس، اقدام کرد.

کلید واژه‌ها: اینترنت اشیاء، اینترنت اشیاء صنعتی، نگهداری و تعمیرات پیشگویانه، پایش وضعیت

۱- مقدمه

تعویض تجهیزات پس از خرابی یا در دوره‌های زمانی از پیش تعیین شده برنامه‌های نگهداری و تعمیرات سنتی هستند که اغلب به دلیل تعویض زود هنگام تجهیزات منجر به هزینه‌های اضافی می‌شوند یا با تعویض دیررس، باعث توقف برنامه‌ریزی نشده، در خطوط تولید می‌شوند که به کاهش شدید ظرفیت و محصول می‌انجامد [1].

در نگهداری و تعمیرات پیشگویانه، داده‌های عملیاتی ماشین دائماً و به صورت متناوب برای پشتیبانی تصمیمات مرتبط با کارکرد و نگهداری و تعمیرات ماشین اندازه‌گیری و ضبط می‌شوند. به تولیایی تبدیل این داده‌های خام به اطلاعات قابل اقدام برای تسهیل تصمیم‌گیری در زمینه نگهداری و تعمیرات، نگهداری و تعمیرات پیشگویانه گویند. عارضه‌یابی، پیشگویی، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط ، زمانبندی نگهداری و تعمیرات و تصمیم‌گیری ازجمله مثال‌هایی از جنبه‌های کلیدی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه هستند [4]–[2].

اینترنت اشیاء مفهومی جدید در دنیای فناوری و ارتباطات است که به عنوان یک فناوری مدرن قابلیت ارسال داده از طریق شبکه های ارتباطی، اعم از اینترنت یا اینترانت، را برای هر چیزی (انسان، حیوان یا اشیاء) فراهم می‌کند [5]. به لطف تحولات سریع در پروتکل‌های داده، دستگاه‌های هوشمند و فناوری‌ها، اینترنت اشیاء با ادغام سیستم‌ها و اتصال دستگاه‌ها، سیستم‌ها و افراد، فرایندهای تولید را متحول کرده است [1].

نگهداری و تعمیرات پیشگویانه، متداول‌ترین مثالی است که برای پیشنهادات بازار بر بستر اینترنت اشیاء صنعتی ذکر شده است [6].

نگهداری و تعمیرات پیشگویانه با اینترنت اشیاء در حال جذب سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی از صنایع است و توجه تحقیقات را به خود جلب کرده است [7]. پیاده سازی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه و اینترنت اشیاء در صنایع فرصت‌های بسیار زیادی را فراهم می‌آورد. تشخیص زودتر از موعد خرابی به سازمان‌ها در افزایش تولید، کاهش هزینه تجهیزات، بهبود شرایط کاری، بهبود ایمنی محیط، بهبود کیفیت محصول، کاهش ضایعات مواد مصرفی و ذخیره نیرو کمک می‌کند. بطور میانگین باعث کاهش ۷۰ تا ۷۵ درصدی خاموشی ماشین‌آلات در صنایع می‌شود [8].

هدف اصلی این مقاله مرور نظام‌مند ادبیات حوزه نگهداری و تعمیرات با تمرکز بر اینترنت اشیاء جهت درک بهتر این حوزه و یافتن شکاف‌های تحقیقاتی است. بخش دوم روش تحقیق حاضر را شرح می‌دهد، بخش سوم به مرور نظام‌مند ادبیات موضوعی

این حوزه اختصاص دارد و در بخش پایانی نتایج و پیشنهادات ارائه خواهد شد.

۲-روش تحقیق

در این پژوهش، مقالات اخیر در حوزه کاربردهای اینترنت اشیاء در نگهداری و تعمیرات پیشگویانه با جستجوی کلمات کلیدی IoT و Predictive Maintenance در پایگاه Google Scholar استخراج شد و ادبیات این حوزه برای پی بردن به ظرفیت تحقیقاتی موجود در این زمینه به صورت سیستماتیک مرور شد. با طبقه‌بندی پژوهش‌ها و شناخت شکاف‌های تحقیقاتی نتایج نهایی حاصل شد.

۳-نتایج

در زمینه استفاد از اینترنت اشیاء در حوزه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه ایوز و آلاپای در پژوهشی یک سیستم نگهداری و تعمیرات داده محور[1] برای خطوط تولید صنایع توسعه دادند. این سیستم با استفاده از داده‌های آنی تولید شده از سنسورهای اینترنت اشیاء و روش‌های یادگیری ماشین، سیگنال‌های خرابی‌های احتمالی را قبل از وقوع شناسایی می‌کرد. ایشان یک روش نگهداری و تعمیرات پیش‌گویانه مبتنی بر یادگیری ماشین end-to-end را برای صنعت ارائه کردند که تمام اجزای سازنده را در یک محیط کارخانه واقعی ادغام می‌کرد، از سنسورهای اینترنت اشیا گرفته تا توسعه مدل‌های یادگیری ماشین و ایجاد هشدارها. آن‌ها نشان دادند که این سیستم برای داده های سریع، در زمان واقعی، موثر و با ابعاد بالا مقیاس پذیر است. خروجی مدل ایشان زمان تخمینی مفید باقی ملنده تا خرابی را بیان می‌کرد. نتایج ارزیابی‌های ایوز و آلپای نشان داد که سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پیشنهادی آن‌ها در گرفتن سیگنال‌های خرابی ماشین‌آلات با استفاده از داده‌های آنی سنسور موثر است و می‌تواند با انجام اقدامات پیشگیرانه پیشنهاد شده توسط سیستم، از توقف احتمالی تولید جلوگیری کند.

محدودیت پژوهش آن‌ها این بود که داده‌ها فقط از یک کارخانه جمع آوری شده بود و مدل‌های یادگیری ماشین براساس خطوط تولید یک کارخانه ساخته شده بود که در همه موارد در تولید قابل تعمیم نیست. اگرچه با تغییرات جزئی در پیکربندی سیستم، روش آن‌ها در محیط‌های تولیدی مشابه قابل پیاده‌سازی بود [1].

شریق حسین و همکاران در مقاله‌ای یک سیستم نگهداری و تعمیرات ناوگان به نام Car e-Talk ارائه کردند. این سیستم برای نظارت بر سلامت خودرو و گزارش هرگونه ناهنجاری و اطلاعات نزدیکترین مرکز نگهداری و تعمیرات از فناوری اینترنت اشیاء و رایانش ابری[2] استفاده می‌کرد. سیستم پیشنهادی ایشان عمر مفید خودرو، بهره‌وری ناوگان و کارایی آن را افزایش می‌داد زیرا قادر بود آمار و ارقام سلامت خودرو را در لحظه پایش کند، سلامتی و نگهداری و تعمیرات ناوگان را پیشگویی کند، عیب‌یابی‌های خودرو را بهبود بخشد و گزارش خودکار انجام دهد [9].

رویکرد نگهداری و تعمیرات پیشگویانه بر پایه اینترنت اشیاء در تجهیزات پزشکی توسط شمایله و همکاران در یک مقاله پیشنهاد شد. روش پیشنهادی ایشان بر سه محور متکی بود: (۱) درک فیزیکی از خرابی، (۲) جمع‌آوری آنی پارامترهای صحیح با استفاده از تکنولوژی اینترنت اشیاء و (۳) استفاده از ابزار یادگیری ماشین جهت پیشگویی و طبقه‌بندی تجهیزات سالم و معیوب. از منظر اقتصادی، روش پیشنهادی ایشان نشان داد که تا ۲۵٪ صرفه‌جویی در هزینه‌های تشخیص و تعمیر و دوره بازگشت سرمایه یک ساله را فراهم می‌آورد.

ایشان پس از مطالعه سوابق نگهداری و تعمیرات تجهیزات و انجام تحلیل حساسیت خرابی، مهمترین خرابی‌ها را بر اساس حساسیت آن‌ها تعیین و رتبه‌بندی کردند. سپس، حالت خرابی غالب شبیه‌سازی شد و با استفاده از متداول‌ترین ابزارهای یادگیری ماشین، داده‌ها جمع‌آوری، طبقه بندی و مدل‌سازی شد. در پایان آن‌ها با امکان‌سنجی اقتصادی نشان‌دادند روش مذکور ارزش سرمایه‌گذاری را دارد [10].

چنگ و همکاران چارچوبی برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه‌ی داده محور با بهره‌گیری از اینترنت اشیاء ارائه کردند. آن‌ها با تمرکز بر تاسیسات برق، مکانیک و لوله‌کشی[3] از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیشگویی شرایط استفاده کردند تا بفهمند اجزا نیاز به نگهداری دارند یا باید قبل از موعد تعویض شوند تا بتوانند طول عمر تاسیسات را افزایش دهند. ایشان به این موضوع پرداختند که مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[4] و اینترنت اشیاء چگونه پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه را تسهیل می‌کنند و امکان‌سنجی استراتژی نگهداری و تعمیرات

[1] Data Driven
[2] Cloud Computing
[3] Mechanical, Electrical, Plumbing (MEP)
[4] Building Information Modeling (BIM)

بلند مدت و پویا را در مدیریت نگهداری و تعمیرات تاسیسات[5] بهبود می‌دهد.

ساختار چارچوب پیشنهادی ایشان متشکل از دو لایه اطلاعات و عملیات بود. در لایه اطلاعات، ادغام داده‌ها و پردازش جریان داده به منظور انتقال داده میان ماژول‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، شبکه حسگرهای اینترنت اشیاء و سیستم مدیریت تاسیسات صورت گرفت. در لایه عملیاتی برای نگهداری و تعمیرات پیشگویانه چهار ماژول استفاده شد، شامل (۱) ماژول مانیتورینگ شرایط و هشدار خرابی، (۲) ماژول ارزیابی شرایط، (۳) ماژول پیشگویی شرایط و (۴) ماژول برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات. این چارچوب هوشمند، یک حلقه کنترلی در مانیتورینگ، پیشگویی و نگهداری و تعمیرات تاسیسات ساختمان تشکیل داد [11].

کامپیر و همکاران در مقاله‌ای با تحقیقات گسترده و آنالیز ادبیات علمی و فنی، چشم‌اندازی جامع از مسائل فعلی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه ارائه کردند. هدف نهایی ایشان فهم عمیق‌تر محدودیت‌ها و نقاط قوت، فرصت‌ها و چالش‌های این مدل از نگهداری و تعمیرات پویا بود. بر همین اساس، پژوهش آن‌ها برخی از مسائل اصلی را بیان کرد که برای توسعه و گسترش نگهداری و تعمیرات پیشگویانه با اینترنت اشیاء در صنایع، لازم است حل شوند. به گفته ایشان برای توسعه کامل نگهداری پیشگویانه و استقرار عملی آن، ساخت مدل‌های یکپارچه هزینه-فایده که شامل تأثیر نگهداری پیشگویانه بر کل مدیریت دارایی باشد، مهم است [7].

نانگیا و همکاران در یک مطالعه، ساختاری برای نگهداری و تعمیرات پیشگویانه بر پایه اینترنت اشیاء صنعتی پیشنهاد دادند. مدل پیشگویانه آن‌ها برای پیشگویی خرابی ناگهانی در ماشین‌آلات صنعتی، در مطالعه موردی صنعت جانبی خودرو به نمایش در آمد و نتیجتاً به فعال‌سازی چرخه تولید و نگهداری و تعمیرات هوشمند منجر شد [8].

روش مدل‌های اجماعی خود سازمان یافته(COSMO)[6] مثالی از سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگویانه برای ناوگان اتوبوس‌های حمل و نقل عمومی است که سعی در تشخیص اتوبوس‌های معیوبی دارد که از بقیه ناوگان اتوبوسرانی عدول می‌کنند. کیلین و همکاران در مقاله‌ای معماری اینترنت اشیاء جدیدی را برای نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پیشنهاد کردند و یک الگوریتم یادگیری ماشین نیمه نظارت شده[7] را پیشنهاد کردند که تلاش می‌کند انتخاب حسگر را در COSMO را بهبود بخشد. ایشان با کمک شرکت حمل و نقل Outaouais، نمونه اولیه کوچکی از این معماری را پیاده‌سازی کردند و داده‌های سنسور J1939 را به دست آوردند[12].

لای و همکاران در یک پژوهش نشان دادند چگونه فناوری اینترنت اشیاء می‌تواند با استفاده از نظارت از راه دور، سرویس‌دهی تجهیزات توزیع‌یافته آسانسور را راه‌اندازی کند تا گذار از نگهداری و تعمیرات سنتی اصلاحی و زمان محور را به نگهداری و تعمیرات پیشگویانه‌تر شرایط محور تسهیل کند و باعث دستیابی به مزایای مختلف شود. آن‌ها با یک مطالعه موردی دقیق، شواهدی عملی ارائه کردند که نشان می‌داد اینترنت اشیاء، شرکت‌های آسانسوری را قادر می‌سازد تا به نگهداری و تعمیرات شرایط محور دست یابند.

به گفته ایشان یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا و سایر فناوری‌های پیشرفته باعث افزایش ایمنی و اطمینان تجهیزات آسانسور می‌شود، عمر مفید آن‌ها را طولانی‌تر می‌کند، مشکلات و وقفه‌های تجاری حاصل از توقف تجهیزات به حداقل می‌رساند و تعمیرات اساسی را کاهش داده یا از بین می‌برد، بنابراین هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را بسیار کاهش می‌دهد. نوآوری اصلی مقاله ایشان در نمایش تجربی فواید و چالش‌های نگهداری و تعمیرات شرایط محور با اینترنت اشیا نسبت به نگهداری و تعمیرات مرسوم اصلاحی و زمان محور آسانسورها بود [13].

پائولی و لین در مطالعه‌ای راه‌حل‌های ارائه شده بر بستر اینترنت اشیاء صنعتی، یک شرکت صنعتی اروپایی بزرگ را در دو بعد تجزیه و تحلیل کردند: (۱) تنوع راه‌حل‌های بیان‌شده (۲) تنوع قابلیت‌های نمایش داده شده. نتایج اولیه بررسی‌های ایشان نشان داد سناریوهای حل شده توسط راه‌حل‌های اینترنت اشیاء صنعتی بسیار زیاد است، در حالی که تنوع قابلیت‌ها عمدتاً به نظارت محدود می‌شود. مطالعه پائولی و لین بینش تجربی در زمینه زایایی بسترهای اینترنت اشیاء صنعتی را فراهم کرد [6].

خادمی و همکاران در یک مقاله ضمن ارائه روشی برای غلبه بر محدودیت‌های پایش وضعیت[8] با ارتعاش، پتانسیل‌های استفاده از اینترنت اشیاء در نگهداری و تعمیرات هوشمند را نشان دادند. ایشان توضیح دادند اینترنت اشیاء صنعتی چگونه می‌تواند با آنالیز لرزش به پایش وضعیت ماشین‌آلات دوار کمک کند. همچنین برای تبدیل ماشین آلات دوار به وسایل اینترنت اشیاء،

[5] Facility Maintenance Management (FMM)
[6] Consensus Self-organized Models
[7] Semi-Supervised
[8] Condition Monitoring

یک روش را با افزودن سخت‌افزاری که بر اساس الزامات طراحی و توسعه داده شده بود پیشنهاد کردند [14].

کاناوادی و سین در یک پژوهش با استفاده از مدل خود همبسته میانگین متحرک تقلیل شده (ARIMA)[9] بر اساس سری‌های زمانی جمع‌آوری شده از سنسورهای مختلف یک دستگاه برش، خرابی‌های احتمالی و نقص‌های کیفی را پیشبینی کردند که به بهبود عملکرد کلی کارخانه منجر شد. ارائه پیشگویی برای ماشین‌آلات صنعتی به منظور افزایش تولید و جلوگیری از افت کیفی هدف اصلی ایشان بود [15].

در یک پژوهش دال و سولانکی با ورود به حوزه اینترنت اشیاء در صنعت خودرو، بیان کردند چگونه می‌توان از مفهوم «خودروی متصل[10]» برای پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه‌ی خودرو استفاده کرد. آن‌ها پروتکل پیام‌رسان MQTT (یکی از پروتکل‌های رایج اینترنت اشیاء) و نحوه‌ی پیاده‌سازی آن را برای این منظور بررسی کردند و به شبیه‌سازی ارسال اطلاعات سنسورهای «خودروی متصل» به فضای ابری پرداختند. نهایتاً ایشان کاهش هزینه نگهداری پیشگویلنه خودرو نسبت به نگهداری دوره‌ای را محاسبه کردند و چالش‌های پیاده سازی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه را برشمردند [16].

جدول ۱ خلاصه‌ای است از پژوهش‌هایی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

محققین	موضوع مورد مطالعه	نتایج/ یافته‌ها
ایوز و آلاپای (۲۰۲۱)	نگهداری و تعمیرات پیشگویانه داده محور مبتنی بر یادگیری ماشین	تخمین عمر مفید باقی‌مانده تا خرابی ماشین‌آلات با استفاده از داده‌های سنسورهای اینترنت اشیاء قبل از وقوع خرابی
حسین و همکاران (۲۰۲۰)	ارائه یک سیستم نگهداری و تعمیرات ناوگان بر پایه اینترنت اشیاء و رایانش ابری	افزایش عمر مفید خودرو و بهره‌وری و کارایی ناوگان در پی پایش آمار و ارقام آنی سلامت خودرو، پیشگویی سلامتی و نگهداری و تعمیرات ناوگان، بهبود عیب‌یابی‌های خودرو و گزارش دهی خودکار.
شمایله و همکاران (۲۰۲۰)	پیاده‌سازی رویکرد نگهداری و تعمیرات پیشگویانه بر پایه اینترنت اشیاء در تجهیزات پزشکی و امکان‌سنجی اقتصادی این موضوع	- رتبه‌بندی مهمترین خرابی‌ها و شبیه‌سازی حالت خرابی غالب - جمع‌آوری داده، طبقه‌بندی و مدل‌سازی با استفاده از رایج‌ترین ابزارهای یادگیری ماشین - تا ۲۵٪ صرفه‌جویی در هزینه‌های عیب‌یابی و تعمیر - دوره بازگشت سرمایه یکساله
چنگ و همکاران(۲۰۲۰)	ارائه چارچوبی برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه‌ی داده محور، با بهره‌گیری از اینترنت اشیاء و تمرکز بر تاسیسات برق، مکانیک و لوله‌کشی ساختمان	- پیشگویی شرایط با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین - تشکیل یک حلقه کنترلی در مانیتورینگ، پیشگویی و نگهداری و تعمیرات تاسیسات ساختمان
کامپیر و همکاران (۲۰۲۰)	ارائه چشم‌انداز جامع مسائل فعلی نگهداری و تعمیرات مجهز به اینترنت اشیاء با هدف درک عمیق‌تر محدودیت‌ها، نقاط قوت، چالش‌ها و فرصت‌های این حوزه.	- نگهداری و تعمیرات پیشگویانه با قابلیت IoT توجه تحقیقات و سرمایه قابل توجه صنایع را به خود جلب کرده. - زنجیره ارزش نگهداری و تعمیرات پیشگویانه بسیار طولانی تر است، از جمله بسیاری از فعالیت های بالادست و پایین دست، جمع آوری داده ها و اجرای کار نگهداری و تعمیرات.
نانگیا و همکاران (۲۰۲۰)	پیشنهاد ساختاری برای نگهداری و تعمیرات پیشگویانه بر پایه اینترنت اشیاء صنعتی (مطالعه موردی صنعت جانبی خودرو)	- فعال‌سازی چرخه تولید و نگهداری و تعمیرات هوشمند. - حجم عظیمی داده‌های تولیدی باید با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌های کلان ذخیره و تجزیه و تحلیل شوند.

[9] AutoRegressive Integrated Moving Average

[10] Connected Car

کیلین و همکاران (۲۰۱۹)	پیشنهاد یک معماری جدید اینترنت اشیاء برای نگهداری و تعمیرات پیشگویانه و یک الگوریتم یادگیری ماشین نیمه‌نظارت شده	یک رویکرد یادگیری ماشین نیمه نظارت شده به نام ICOSMO برای بهبود انتخاب ویژگی سنسور در روش COSMO ارائه شد.
لای و همکاران (۲۰۱۹)	نگهداری و تعمیرات شرایط محور بهره‌مند از اینترنت اشیاء برای سرویس آسانسورها	- اینترنت اشیاء، شرکت‌های آسانسوری را قادر می‌سازد تا به نگهداری و تعمیرات شرایط محور دست یابند. - یکپارچه سازی اینترنت اشیا و سایر فناوری‌های پیشرفته هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را بسیار کاهش می‌دهد. - نمایش تجربی فواید و چالش‌های نگهداری و تعمیرات شرایط محور با اینترنت اشیا نسبت به نگهداری و تعمیرات مرسوم اصلاحی و زمان محور آسانسورها
پائولی و لین (۲۰۱۹)	تجزیه وتحلیل راه‌حل‌های ارائه شده بر بستر اینترنت اشیاء صنعتی در یک شرکت صنعتی اروپایی بزرگ	سناریوهای حل شده توسط راه‌حل‌های اینترنت اشیاء صنعتی بسیار زیاد است، در حالی که تنوع قابلیت‌ها عمدتاً به نظارت محدود می‌شود.
خادمی و همکاران (۲۰۱۹)	ارائه روشی برای غلبه بر محدودیت‌های پایش وضعیت[11] با ارتعاش	- آنالیز لرزش با بهره گیری از اینترنت اشیاء برای پایش وضعیت ماشین آلات. - پیشنهاد یک روش برای تبدیل ماشین آلات دوار به وسایل اینترنت اشیاء، با افزودن سخت‌افزار
کاناوادی و سین (۲۰۱۸)	یادگیری ماشین برای نگهداری و تعمیرات پیشگویانه ماشین‌آلات صنعتی با استفاده از داده‌های سنسورهای اینترنت اشیاء	- پیشگویی خرابی‌های احتمالی و نقص‌های کیفی بر اساس سری‌های زمانی جمع‌آوری شده از سنسورهای دستگاه برش - بهبود عملکرد کلی کارخانه
دال و سولانکی (۲۰۱۷)	استفاده از مفهوم «خودروی متصل[12]» برای پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه‌ی خودرو	- بررسی پروتکل MQTT - شبیه‌سازی ارسال اطلاعات از خودرو به فضای ابری - محاسبه کاهش هزینه نسبت به نگهداری دوره‌ای

جدول ۱: خلاصه‌ای از تحقیقات بررسی شده

۴- نتیجه گیری

با توجه به پژوهش‌های اخیر اهمیت به‌کارگیری اینترنت اشیاء در نگهداری و تعمیرات پیشگویانه و تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از سنسورهای اینترنت اشیاء در این حوزه غیرقابل انکار است. اگرچه در این پژوهش‌ها از روش‌های مختلفی همچون الگوریتم‌های متنوع یادگیری ماشین استفاده شده است، اما ارزیابی عملکرد تکنولوژی‌های اینترنت اشیاء و الگوریتم‌های مختلف و انتخاب تکنولوژی و الگوریتم مناسب و کارا از میان گزینه‌های موجود موضوعاتی است که در پژوهش‌های اخیر مغفول مانده است.

پژوهش حاضر با مرور نظام‌مند ادبیات نگهداری و تعمیرات در حوزه اینترنت اشیاء به سه نتیجه رسید. اولاً، این حوزه توجه ویژه‌ای را به خصوص در سال‌های اخیر در صنعت و تحقیقات به خود جلب کرده است و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دوماً، اگرچه از تکنولوژی‌های اینترنت اشیاء و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پژوهش‌های اخیر استفاده شده است، اما لزوم ارزیابی عملکرد این سیستم‌ها و شناسایی عوامل موثر بر عملکرد آن‌ها محسوس است. سوماً، در تحقیقات آتی می‌توان در زمینه انتخاب تکنولوژی و الگوریتم مطلوب از میان طیف وسیع گزینه‌های در دسترس، اقدام کرد.

[11] Condition Monitoring
[12] Connected Car

مراجع

[1] S. Ayvaz and K. Alpay, "Predictive Maintenance System for Production Lines in Manufacturing: A Machine Learning Approach Using IoT Data in Real-Time," *Expert Syst. Appl.*, vol. 173, p. 114598, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.114598.

[2] J. Bokrantz, A. Skoogh, C. Berlin, T. Wuest, and J. Stahre, "Smart Maintenance: an empirically grounded conceptualization," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 223, p. 107534, May 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107534.

[3] M. C. Carnera, "Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study," *Decis. Support Syst.*, vol. 38, no. 4, pp. 539–555, 2005, doi: 10.1016/j.dss.2003.09.003.

[4] J. Lee, C. Jin, Z. Liu, and H. D. Ardakani, "Introduction to data-driven methodologies for prognostics and health management," *Probabilistic Progn. Heal. Manag. Energy Syst.*, pp. 9–32, Apr. 2017, doi: 10.1007/978-3-319-55852-3_2.

[5] G. C. Fox, S. Kamburugamuve, and R. D. Hartman, "Architecture and measured characteristics of a cloud based internet of things," in *Proceedings of the 2012 International Conference on Collaboration Technologies and Systems, CTS 2012*, May 2012, pp. 6–12, doi: 10.1109/CTS.2012.6261020.

[6] T. Pauli and Y. Lin, "The Generativity of Industrial IoT Platforms: Beyond Predictive Maintenance ?," *Fortieth Int. Conf. Inf. Syst.*, no. December 2019, pp. 1–6, 2019, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/339290676.

[7] M. Compare, P. Baraldi, and E. Zio, "Challenges to IoT-Enabled Predictive Maintenance for Industry 4.0," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 5, pp. 4585–4597, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2957029.

[8] S. Nangia, S. Makkar, and R. Hassan, "IoT based Predictive Maintenance in Manufacturing Sector," *SSRN Electron. J.*, no. Icicc, pp. 1–7, 2020, doi: 10.2139/ssrn.3563559.

[9] S. Hussain, U. Mahmud, and S. Yang, "Car e-Talk: An IoT-enabled Cloud-Assisted Smart Fleet Maintenance System," *IEEE Internet Things J.*, vol. 4662, no. c, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/jiot.2020.2986342.

[10] A. Shamayleh, M. Awad, and J. Farhat, "IoT Based Predictive Maintenance Management of Medical Equipment," *J. Med. Syst.*, vol. 44, no. 4, p. 72, Apr. 2020, doi: 10.1007/s10916-020-1534-8.

[11] J. C. P. Cheng, W. Chen, K. Chen, and Q. Wang, "Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms," *Autom. Constr.*, vol. 112, no. January, p. 103087, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103087.

[12] P. Killeen, B. Ding, I. Kiringa, and T. Yeap, "IoT-based predictive maintenance for fleet management," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 151, no. 2018, pp. 607–613, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.04.184.

[13] C. T. A. Lai, W. Jiang, and P. R. Jackson, "Internet of Things enabling condition-based maintenance in elevators service," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 563–588, 2019, doi: 10.1108/JQME-06-2018-0049.

[14] A. Khademi, F. Raji, and M. Sadeghi, "IoT Enabled Vibration Monitoring Toward Smart Maintenance," *Proc. 3rd Int. Conf. Internet Things Appl. IoT 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/IICITA.2019.8808837.

[15] A. Kanawaday and A. Sane, "Machine learning for predictive maintenance of industrial machines using IoT sensor data," *Proc. IEEE Int. Conf. Softw. Eng. Serv. Sci. ICSESS*, vol. 2017-Novem, no. Figure 2, pp. 87–90, 2018, doi: 10.1109/ICSESS.2017.8342870.

[16] R. Dhall and V. K. Solanki, "An IoT Based Predictive Connected Car Maintenance Approach," *Int. J. Interact. Multimed. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 3, p. 16, 2017, doi: 10.9781/ijimai.2017.433.