

فصلنامه علمی پژوهشی در ایمنی، سلامت و محیط زیست

ارائه یک مدل پویای ارزیابی ریسک تجهیزات کارگاهی با رویکرد نگهداری پیش بینانه و شاخص ایمنی غیر خطی در مراکز آموزش مهارت محور

فرشید فرخی زاده^{*۱}

۱- نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی نگهداری و تعمیرات، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)، تهران، ایران

مشخصات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۷
انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۲۱
نویسنده مسئول:

f.farokhi@ihuo.ac.ir

کلید واژه‌ها:
مدیریت ریسک تجهیزات،
نگهداری پیش بینانه،
پویایی شناسی سیستم،
ایمنی کارگاه‌های آموزشی،
عوامل زیان آور شغلی

کارگاه‌های آموزشی مهارت محور، با وجود نقش حیاتی در تربیت نیروی کار، به دلیل استفاده مکرر از تجهیزات، همواره در معرض مخاطرات ناشی از خرابی و فرسودگی هستند. این خرابی‌ها، فراتر از یک مسئله هزینه‌ای، به عنوان عامل اصلی ایجاد حوادث شغلی و تشدید عوامل زیان آور محیط کار محسوب می‌شوند و سلامت کاربران را به مخاطره می‌اندازند. هدف این پژوهش، ارائه مدلی جامع برای بهینه‌سازی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات (نت) با رویکردی پیش‌دستانه است تا ضمن کاهش هزینه‌ها، ایمنی و سلامت کارگاه‌ها را ارتقاء دهد. این مطالعه با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها و شبیه‌سازی در نرم‌افزار ونسیم انجام شد. متغیرهای کلیدی مؤثر بر خرابی و ایمنی تجهیزات شناسایی و مدل علی- معلولی ترسیم گردید. سه سناریوی اصلی نگهداری (اصلاحی، پیشگیرانه و پیش‌بینانه) بر اساس داده‌های یک مرکز آموزشی نمونه، شبیه‌سازی و از منظر هزینه‌های چرخه عمر، قابلیت اطمینان، دسترسی پذیری و زمان توقف (به عنوان معیارهای غیرمستقیم ریسک) مقایسه شدند. نتایج نشان داد استراتژی نگهداری پیش‌بینانه (مبتنی بر اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های بزرگ) در مقایسه با روش‌های دیگر، به طور چشمگیری کارآمدتر است. این استراتژی منجر شد که نرخ خرابی در سناریوی پیش‌بینانه ایده‌آل به ۱۰ درصد و در سناریوی واقع بینانه به ۱۸ درصد کاهش یافت و دسترسی پذیری تجهیزات در سناریوی پیش‌بینانه به ۹۸ درصد و در سناریوی واقع بینانه به ۹۵ درصد رسید. این بهبودها به معنای مستقیم کاهش زمان توقف، کاهش مواجهه کارکنان با تجهیزات ناایمن و در نتیجه، کاهش چشمگیر ریسک بروز حوادث و عوامل زیان آور شغلی در محیط کارگاه می‌باشد. سرمایه‌گذاری بر روی استراتژی‌های نوین نگهداری و تعمیرات، یک اقدام راهبردی در راستای مدیریت ریسک، ارتقاء ایمنی و سلامت شغلی و پایداری محیط‌های آموزشی است. مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان ابزاری توانمند برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در جهت کاهش مخاطرات عملیاتی و بهبود شرایط کار در کارگاه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License- CC BY) در دسترس شما قرار گرفته است.

۱- مقدمه

کارگاه‌های آموزشی، به عنوان بستر اصلی آموزش‌های مهارت‌محور، نقشی بی‌بدیل در تربیت نیروی انسانی ماهر و کارآمد ایفا می‌کنند. در این مراکز، فراگیران با استفاده از تجهیزات پیشرفته و تحت نظارت مربیان، دانش نظری را به عمل تبدیل می‌کنند. با این حال، ماهیت عملیاتی این محیط‌ها آن‌ها را در معرض چالش‌های جدی قرار می‌دهد. استفاده مداوم، گاهی نادرست و فشارهای کاری بالا، منجر به استهلاک سریع و افزایش احتمال خرابی تجهیزات می‌شود. این خرابی‌ها، صرفاً یک مسئله فنی و اقتصادی نیستند؛ بلکه به یکی از مهم‌ترین عوامل زیان‌آور شغلی و منابع ایجاد سوانح و حوادث در محیط کار تبدیل می‌شوند [۱]. کار با تجهیزات معیوب، خطرات جانی و مالی جبران‌ناپذیری را برای کاربران به همراه داشته و سلامت و ایمنی آن‌ها را به مخاطره می‌اندازد. همچنین، توقف عملیات کارگاه به دلیل خرابی، نه تنها کیفیت آموزش را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه می‌تواند به عنوان یک عامل تنش‌زا و فشار روانی بر روی کارکنان و مربیان عمل کرده و زمینه‌ساز بروز خطاهای انسانی گردد.

رویکردهای سنتی مدیریت نگهداری و تعمیرات (نت)، که اغلب به روش «تعمیر پس از خرابی» (اصلاحی) خلاصه می‌شود، در پاسخ به این چالش‌ها کاملاً ناکارآمد است. این رویکرد منفعلانه، نه تنها هزینه‌های سرسام‌آوری را به صورت تعمیرات اضطراری و توقف‌های ناگهانی به سیستم تحمیل می‌کند، بلکه بستری را برای فعالیتهای پرخطر فراهم می‌سازد. تجهیزات خراب، محیط کار را ناایمن کرده و ریسک حوادثی مانند برق‌گرفتگی، سوختگی، بریدگی و سایر آسیب‌های فیزیکی را به شدت افزایش می‌دهد [۲].

در مقابل، رویکردهای نوین و فعالانه‌تری در عرصه مدیریت نگهداری و تعمیرات پدیدار شده‌اند که می‌توانند به عنوان ابزاری قدرتمند برای ارزیابی و مدیریت ریسک در محیط‌های کارگاهی عمل کنند. نگهداری پیشگیرانه با برنامه‌ریزی منظم تعمیرات، می‌کوشد تا از وقوع خرابی‌های ناگهانی جلوگیری کند و بدین ترتیب، ثبات و ایمنی نسبی را به محیط کار بازگرداند [۳]. به موازات آن، نگهداری پیش‌بینانه با بهره‌گیری از فناوری‌های

پیشرفته‌ای مانند اینترنت اشیا^۱ و تحلیل داده‌های بزرگ^۲ گامی فراتر نهاده است. این رویکرد با پایش مستمر وضعیت تجهیزات و پیش‌بینی دقیق زمان خرابی، امکان تعمیر را در کم‌هزینه‌ترین و ایمن‌ترین زمان ممکن فراهم می‌آورد و از بروز شرایط اضطراری و مخاطره‌آمیز جلوگیری به عمل می‌آورد [۴ و ۵].

با وجود این مزایا، چالش اصلی مدیران مراکز آموزشی مهارت‌محور، عدم وجود یک چارچوب تحلیلی و عملیاتی برای انتخاب بهینه‌ترین استراتژی نت با در نظر گرفتن همزمان ابعاد اقتصادی، فنی و ایمنی است. تصمیم‌گیری در این حوزه با دغدغه‌های جدی از جمله کمبود اعتبارات، فرسودگی تجهیزات، کمبود مربیان متخصص و در نهایت، اولویت‌بندی ایمنی و سلامت کاربران، به شدت پیچیده شده است. بازرسی‌های دوره‌ای اغلب نشان می‌دهد که بسیاری از کارگاه‌ها از نظر تجهیزات دچار نقص فنی، فرسودگی و یا عدم کارایی هستند که این امر، ریسک عملیاتی و ایمنی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف دانشی طراحی شده است. هدف اصلی، ارائه یک مدل جامع مبتنی بر شبیه‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها^۳ است تا بتواند تأثیر متقابل سیاست‌های مختلف نگهداری و تعمیرات (اصلاحی، پیشگیرانه و پیش‌بینانه) را بر شاخص‌های کلیدی عملکرد تجهیزات شبیه‌سازی کند. این مدل به مدیران امکان می‌دهد تا با نگاهی سیستمی، پیامدهای هر استراتژی را بر کاهش هزینه‌ها، افزایش قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری و مهم‌تر از همه، ارتقاء سطح ایمنی و کاهش عوامل زیان‌آور محیط کار پیش‌بینی و مقایسه نمایند. در این چارچوب، «دسترسی‌پذیری» و «کاهش زمان توقف» نه تنها به عنوان شاخص‌های کارایی، بلکه به عنوان معیارهای غیرمستقیم ایمنی در نظر گرفته می‌شوند؛ زیرا هرچه زمان توقف و خرابی کمتر باشد، مواجهه کارکنان با شرایط پرخطر و تجهیزات ناایمن نیز کاهش می‌یابد. در نهایت، این پژوهش به دنبال ارائه راهکارهای عملی برای تبدیل مراکز آموزشی مهارت‌محور به محیط‌هایی ایمن‌تر، سالم‌تر و با بهره‌وری بالاتر است. پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل جامع مبتنی بر

1. IoT

2. Big Data

3. System Dynamics

نگوین و همکاران در سال ۲۰۲۱ مطالعه‌ای جامع با هدف بهینه‌سازی نگهداری پیش‌بینانه در سیستم‌های تولیدی انجام دادند. در این پژوهش، از یک مدل پویا برای تحلیل تأثیر سیاست‌های مختلف نت بر عملکرد سیستم استفاده شد. روش تحقیق شامل شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها و تحلیل رفتار بلندمدت تجهیزات تحت شرایط مختلف نگهداری بود. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب استراتژی‌های پیش‌بینانه با پایش مداوم وضعیت تجهیزات، می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را به طور چشمگیری کاهش دهد و قابلیت اطمینان را افزایش دهد. این مدل توانست به مدیران تولید در تصمیم‌گیری‌های بهتر در شرایط پیچیده کمک کند [۱].

هاشمیان در سال ۲۰۲۱ پژوهشی درباره پایش وضعیت و نگهداری پیش‌بینانه سیستم‌های حیاتی در نیروگاه‌های هسته‌ای انجام داد. این تحقیق بر استفاده از حسگرهای پیشرفته برای جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای از تجهیزات و پیش‌بینی خرابی‌ها متمرکز بود. روش تحقیق شامل تحلیل داده‌های بلادرنگ و توسعه الگوریتم‌های پیش‌بینی بود. یافته‌های پژوهش نشان داد که نگهداری پیش‌بینانه در سیستم‌های حیاتی می‌تواند ریسک خرابی‌های ناگهانی را به میزان چشمگیری کاهش دهد و ایمنی سیستم‌ها را افزایش دهد [۱۴].

بوسدیکس و همکاران در سال ۲۰۲۰، یک مرور جامع درباره تصمیم‌گیری در نگهداری پیش‌بینانه انجام دادند. آن‌ها در مقاله خود به تحلیل ادبیات مرتبط با پیش‌بینی خرابی تجهیزات و ابزارهای مورد استفاده برای این منظور پرداختند. روش تحقیق شامل مرور نظام‌مند مقالات مرتبط و دسته‌بندی آن‌ها بر اساس تکنیک‌های تصمیم‌گیری بود. یافته‌ها نشان داد که ترکیب تحلیل داده‌های بزرگ و ابزارهای یادگیری ماشین با سیاست‌های نگهداری پیش‌بینانه، می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری کمک کند. این مطالعه همچنین به توسعه یک چارچوب پژوهشی برای تحقیقات آینده در این حوزه اشاره کرد [۳].

زونت و همکاران در سال ۲۰۲۰، در پژوهشی به بررسی تأثیر تحلیل داده‌های بزرگ و اینترنت اشیا در نگهداری پیش‌بینانه پرداختند. آن‌ها با استفاده از مطالعه موردی در صنایع تولیدی، نشان دادند که تحلیل داده‌های

شبیه‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها طراحی شده است. نوآوری این پژوهش در مقایسه با مطالعات پیشین، عبارت است از: (۱) توسعه یک مدل پویا با قابلیت شبیه‌سازی همزمان چهار سناریوی نگهداری (اصلاحی، پیشگیرانه، پیش‌بینانه و واقع‌بینانه)، (۲) طراحی یک شاخص ایمنی غیرخطی مبتنی بر روش AHP و توابع سیگموئید، (۳) ارائه یک سناریوی واقع‌بینانه که محدودیت‌های پیاده‌سازی فناوری‌های نوین (از جمله خطای سنسورها و منحنی یادگیری پرسنل) را در نظر می‌گیرد و (۴) اعتبارسنجی جامع مدل از طریق آزمون‌های رفتار مرجع، تحلیل حساسیت و آزمون حالت حدی.

بر این اساس، مدل طراحی‌شده با بهره‌گیری از حلقه‌های بازخورد مثبت و منفی، امکان تحلیل رفتار پویای سیستم و شناسایی نقاط اهرمی برای بهبود ایمنی و کاهش هزینه‌ها را فراهم می‌آورد.

۲- پیشینه پژوهش

کومار و تاکور در سال ۲۰۲۳ به بررسی چارچوب‌های مبتنی بر اینترنت اشیا برای نگهداری پیش‌بینانه در صنایع تولیدی پرداختند. روش آن‌ها شامل مرور ادبیات و ارائه چارچوبی برای پیاده‌سازی اینترنت اشیا در سیستم‌های نت بود. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از اینترنت اشیا در پایش لحظه‌ای وضعیت تجهیزات، امکان پیش‌بینی دقیق خرابی‌ها را فراهم می‌کند و هزینه‌های مرتبط با تعمیرات اضطراری را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. آن‌ها همچنین تأکید کردند که استفاده از داده‌های بلادرنگ، بهره‌وری سیستم‌های تولیدی را بهبود می‌بخشد [۴].

دیجوردیویس و کینزیویک در سال ۲۰۲۲، تأثیر هوش مصنوعی بر نگهداری پیش‌بینانه در سیستم‌های لجستیکی را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی، نشان دادند که ترکیب الگوریتم‌های هوش مصنوعی با سیستم‌های اینترنت اشیا می‌تواند دقت پیش‌بینی خرابی‌ها را افزایش دهد. نتایج این مطالعه نشان داد که این ترکیب فناوری می‌تواند هزینه‌های نگهداری را تا ۲۰ درصد کاهش داده و زمان توقف تجهیزات را به حداقل برساند [۶].

داده‌های بزرگ به مدیران این امکان را داده است که سیاست‌های نگهداری را بر اساس رفتار واقعی تجهیزات تنظیم کنند.

از تحلیل پیشینه مشخص است که هرچند مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است، اما شکاف‌هایی همچنان در استفاده ترکیبی از ابزارهای مدل‌سازی و فناوری‌های پیشرفته برای بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات در محیط‌های آموزشی وجود دارد. پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر کاربرد این فناوری‌ها در صنایع تولیدی و نیروگاه‌ها متمرکز بوده‌اند، درحالی‌که تجهیزات کارگاهی آموزشی با چالش‌های متفاوتی روبه‌رو هستند؛ از جمله استفاده مکرر توسط کاربران غیرمتخصص و حساسیت بالا نسبت به توقف عملیات.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی در زمینه بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات با استفاده از شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها انجام شده است، اما شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی وجود دارد: (۱) عدم ارائه سناریوهای واقع‌بینانه با در نظر گرفتن محدودیت‌های پیاده‌سازی، (۲) عدم طراحی شاخص‌های ایمنی غیرخطی، و (۳) عدم اعتبارسنجی جامع مدل‌ها. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف‌ها طراحی شده است.

۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف طراحی و شبیه‌سازی مدلی جامع برای بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات تجهیزات کارگاهی در مراکز آموزشی انجام شده است. در این راستا، از رویکرد شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها برای تحلیل روابط میان متغیرهای کلیدی و پیش‌بینی اثرات سیاست‌های مختلف نگهداری و تعمیرات بر عملکرد تجهیزات استفاده شده است. ابزار اصلی مورد استفاده در این پژوهش، نرم‌افزار ونسیم بوده که برای طراحی مدل‌های علی-معلولی و نمودارهای نرخ-جریان به کار گرفته شده است.

پژوهش حاضر از نوع کاربردی است و از یک رویکرد مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای تحلیل مسئله استفاده می‌کند. مراحل انجام پژوهش عبارت‌اند از:

۱. شناسایی متغیرهای کلیدی و روابط میان آن‌ها.

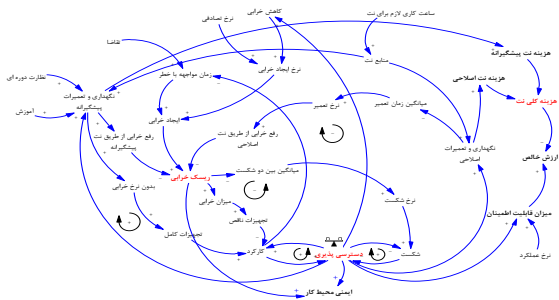
جمع‌آوری شده از طریق اینترنت اشیاء می‌تواند الگوهای خرابی تجهیزات را شناسایی کند و زمان بهینه تعمیرات را پیش‌بینی نماید. نتایج پژوهش بیانگر کاهش ۲۵ درصدی خرابی‌های ناگهانی و بهبود قابل توجه در بهره‌وری تجهیزات بود [۵].

بررسی پیشینه تحقیق به‌طور شفاف نشان داد که مدیریت نگهداری و تعمیرات (نت) نقشی حیاتی در بهره‌وری و عملکرد بلندمدت تجهیزات ایفا می‌کند. استفاده از رویکردهای سنتی مانند "تعمیر پس از خرابی" به دلیل هزینه‌های بالای توقف‌های ناگهانی و تأثیرات منفی بر کیفیت خدمات، به تدریج جای خود را به استراتژی‌های پیشگیرانه و پیش‌بینانه داده است. نگهداری پیشگیرانه با جلوگیری از خرابی‌های غیرمنتظره، و نگهداری پیش‌بینانه با پیش‌بینی دقیق خرابی‌ها از طریق تحلیل داده‌ها، به عنوان دو ستون اصلی استراتژی‌های مدرن نت شناخته می‌شوند.

تحقیقات متعددی، نظیر پژوهش‌های نگوین و همکاران (۲۰۲۱)، محمدی و سعیدی‌مهرآباد (۲۰۲۱) و زونتا و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر شگرف ابزارهای مدل‌سازی و فناوری‌های هوشمند را بر بهبود سیاست‌های نت برجسته کرده‌اند. شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها، که به‌طور مؤثر در تحلیل روابط پیچیده بین متغیرها استفاده می‌شود، توانسته است اثر سیاست‌های نگهداری پیشگیرانه و پیش‌بینانه بر شاخص‌هایی همچون قابلیت اطمینان، هزینه‌های چرخه عمر و بهره‌وری تجهیزات را مشخص کند. این ابزار به مدیران امکان می‌دهد که تصمیمات خود را بر اساس شواهد قابل پیش‌بینی و تحلیل بلندمدت اتخاذ کنند.

فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء و تحلیل داده‌های بزرگ نیز نقش مهمی در ارتقای سیاست‌های نگهداری و تعمیرات ایفا کرده‌اند. استفاده از اینترنت اشیاء، همان‌طور که در پژوهش‌های کومار و تاکور (۲۰۲۳) و دیجوردیویس و کینزیویک (۲۰۲۲) نشان داده شد، امکان جمع‌آوری و پایش مداوم داده‌های عملیاتی تجهیزات را فراهم کرده است. این داده‌ها، هنگامی که با الگوریتم‌های یادگیری ماشین تحلیل شوند، می‌توانند زمان بهینه تعمیرات را پیش‌بینی کنند و خرابی‌های ناگهانی را به حداقل برسانند. از سوی دیگر، تحلیل

با توجه به عامل‌های احصاء شده از بررسی مطالعات پیشین، روابط علت- معلول بین آن‌ها تشکیل شد. این نمودار از طریق مصاحبه و هم‌فکری با صاحب‌نظران و خبرگان مدنظر پژوهش مورد بازنگری و اصلاح گردید و در نهایت روابط به شرح شکل شماره ۱ به‌عنوان مبنایی جهت انجام سایر مراحل پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

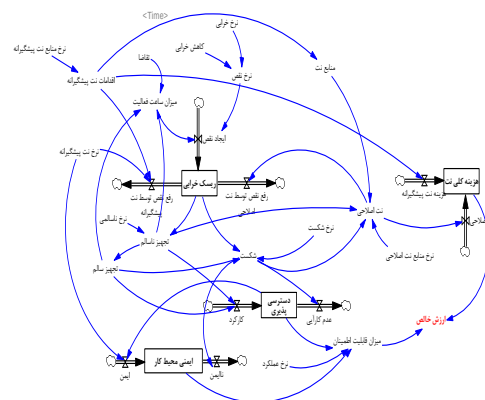


پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست / سال ۱۴۰۵ / دوره ۴ / شماره ۳ / پاییز ۱۴۰۵

نگهداری پیش‌بینانه: استفاده از فناوری‌های اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های بزرگ برای پیش‌بینی خرابی‌ها و انجام تعمیرات در زمان مناسب.

با توجه به نمودار علی- معلولی پژوهش و همچنین فنون و روش‌های موجود در مباحث پویایی‌شناسی سیستم‌ها، مدل انباشت - جریان مربوطه در نرم‌افزار ونسیم طبق شکل شماره ۲ طراحی و ایجاد شد. دلیل استفاده از این نرم‌افزار برای انجام امور شبیه‌سازی تسهیل فهم مدل و نیز نگارش معادلات آن و همچنین شناخت کامل پژوهشگران نسبت به آن می‌باشد [۱۵].

بر اساس مسئله پژوهش و مبتنی بر نمودار علی معلولی ارائه شده، از آنجایی که هدف تحقیق بهبود برون‌دادهای سیستم نگهداری و تعمیرات تجهیزات کارگاهی - آموزشی می‌باشد، متغیرهای تعداد نقص، هزینه کل نگهداری و دسترس‌پذیری به عنوان متغیر انباشت در نظر گرفته شده‌اند و متغیر ارزش خالص متغیر خروجی و هدف نهایی پژوهش است. نمودار انباشت و جریان یکپارچه در نتیجه تلفیق سه زیرسیستم نقص یا خرابی، در دسترس بودن دستگاه و هزینه‌های نگهداری و تعمیر به صورت شکل ۲ قابل ارائه می‌باشد.



شکل ۲. نمودار انباشت - جریان

در این پژوهش به منظور تکمیل فرآیند شبیه‌سازی و انجام آزمون‌های مدل طراحی شده و همچنین اضافه کردن معادلات هر عامل، از روش‌های مختلفی استفاده شده است.

همان‌طور که فارستر بیان می‌کند، ۵ روش مختلف برای پیدا کردن معادلات در یک مسئله پویایی‌شناسی سیستم وجود دارد:

(۱) استفاده از اصول و نظریات فیزیکی موجود بین عوامل،

(۲) استفاده از داده‌ها و روابط آماری موجود بین عوامل مدل،

(۳) استفاده از نظرات خبرگان موضوع،

(۴) استفاده از نظرات عمومی جامعه مورد مطالعه،

(۵) استفاده از نظر طراح مدل.

با توجه به تأکید ایشان در کتاب خود، مدل‌ساز موظف است که بنا به شرایط مورد مطالعه به ترتیب به بررسی امکان به‌کارگیری هر یک از موارد بالا اقدام نماید و در نهایت در صورتی که هیچ یک از ۴ حالت بالا ممکن نباشد، با توجه به دیدگاه خود به تعریف معادلات بپردازد [۱۵]. البته باید اشاره نمود که در نهایت با انجام آزمون‌های تعریف شده برای مدل‌های پویا طراحی شده سعی می‌شود که از بروز اختلاف آن‌ها با واقعیت جلوگیری شود.

در تعیین معادلات مدل این پژوهش علاوه بر اطلاعات آماری موجود در مورد مطالعاتی از نظرات خبرگان و مدل‌ساز نیز استفاده شده است. برخی از ضرایب معادلات به علت آنکه جز اطلاعات محرمانه مورد مطالعه محسوب می‌شود، با توجه به تجربه و نظر پژوهشگران، توسط ایشان برآورد شده است و دیگر روابط با توجه به اطلاعات آماری و مصاحبه با خبرگان موضوع تعیین شده است.

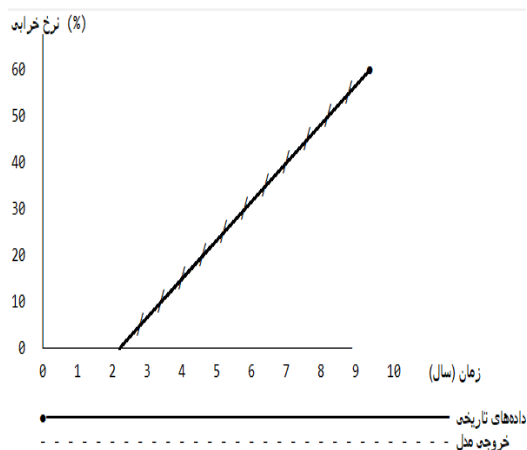
معادلات مدل

معادله‌های استفاده شده در مدل این پژوهش در جدول شماره ۱ تشریح شده است.

جدول ۱. معادلات اصلی مدل

ردیف	متغیر	معادله متغیر	توضیحات
۱	ارزش خالص	$INTEG(Revenue - Total Costs, 100000)$	انباشت
۲	تعداد تجهیزات معیوب	$INTEG(Defect Rate - Defect Elimination, 5)$	انباشت
۳	هزینه کل نت	$INTEG(Maintenance Cost Rate, 0)$	انباشت
۴	انتخاب دستی سناریو	۴ تا ۱	نرخ
۵	انتخاب خودکار سناریو بر اساس ارزش خالص	IF THEN ELSE(Net Value < 60000, 1, IF THEN ELSE(Net Value < 90000, 2, IF THEN ELSE(Net Value < 120000, 3, 4)))	کمکی
۶	انتخاب نهایی	IF THEN ELSE(Scenario Switch = 0, Net-Based	کمکی

موجود از مرکز آموزشی نمونه (دوره ۵ ساله) مقایسه گردید. داده‌های واقعی نشان‌دهنده یک روند صعودی تدریجی در نرخ خرابی به دلیل فرسودگی تجهیزات بود. مدل طراحی‌شده با ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰,۹۳ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل ۲,۴ درصد، توانست این روند را با دقت قابل‌قبولی بازتولید کند. مولفه‌های تجزیه MSE شامل خطای بایاس (Bias) به میزان ۰,۱، خطای واریانس (Variance) به میزان ۰,۳ و خطای کوواریانس (Covariance) به میزان ۰,۶ بوده که نشان‌دهنده تمرکز خطا بر روی کوواریانس و عدم وجود بایاس سیستماتیک در مدل است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، خروجی مدل (خط ممتد) با داده‌های تاریخی (خط چین) تطابق قابل‌قبولی دارد.



شکل ۳: مقایسه خروجی مدل با داده‌های تاریخی (آزمون رفتار مرجع)

ب) آزمون تحلیل حساسیت پارامترها^۲: به منظور بررسی تأثیر عدم قطعیت در پارامترهای ورودی بر خروجی‌های کلیدی، تحلیل حساسیت یک‌طرفه و چندمتغیره انجام شد. بدین منظور، پارامترهای کلیدی مانند «نرخ پایه خرابی» و «هزینه واحد تعمیرات پیشگیرانه» در بازه $\pm 20\%$ درصد تغییر داده شدند. نتایج نشان داد که خروجی مدل (ارزش خالص) بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات در «نرخ پایه خرابی» دارد. با این حال، حتی در سناریوی بدبینانه (افزایش ۲۰ درصدی نرخ پایه خرابی)، استراتژی نگهداری پیش‌بینانه همچنان عملکرد برتر خود را نسبت به سه سناریوی دیگر حفظ می‌کند. نمودار نوارهای اطمینان (شکل ۴) نشان می‌دهد که محدوده تغییرات خروجی در سطح اطمینان

2. Sensitivity Analysis

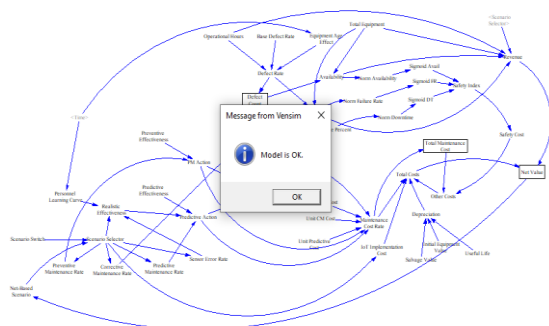
ردیف	متغیر	معادله متغیر	توضیحات
	سناریو	Scenario, Scenario Switch	
۷	نرخ تعمیرات اصلاحی	IF THEN ELSE(Senario Selector = 1, Defect Rate * 0.8, IF THEN ELSE(Senario Selector = 2, Defect Rate * 0.3, IF THEN ELSE(Senario Selector = 3, Defect Rate * 0.1, Defect Rate * 0.2)))	کمی
۸	نرخ تعمیرات پیشگیرانه	IF THEN ELSE(Senario Selector >= 2, 0.5, 0)	کمی
۹	نرخ تعمیرات پیش‌بینانه	IF THEN ELSE(Senario Selector >= 3, 0.7, 0)	کمی
۱۰	اثر بخشی واقع‌گرایانه	IF THEN ELSE(Senario Selector = 4, 0.6 * (1 - Sensor Error Rate) * Personnel Learning Curve, 0.6)	کمی
۱۱	شاخص ایمنی غیرخطی	$1/(1+e^{-k1})$ (Availability-Threshold1))* SigmoidAvail + $1/(1+e^{-k2})$ (1-FailureRate-Threshold2)))* SigmoidFR + $1/(1+e^{-k3})$ (1-Downtime-Threshold3)))* SigmoidDDT	کمی
۱۲	تابع سیگموئید دسترسی‌پذیری	$1 / (1 + \text{EXP}(-10 * (\text{Norm Availability} - 0.7)))$	کمی
۱۳	تابع سیگموئید نرخ خرابی	$1 / (1 + \text{EXP}(-10 * (\text{Norm Failure Rate} - 0.6)))$	کمی
۱۴	تابع سیگموئید زمان توقف	$1 / (1 + \text{EXP}(-10 * (\text{Norm Downtime} - 0.8)))$	کمی
۱۵	هزینه پایه‌سازی IoT	IF THEN ELSE(Senario Selector = 3, 20000, IF THEN ELSE(Senario Selector = 4, 10000, 0))	کمی
۱۶	سایر هزینه‌ها	$11000 + 0.05 * \text{Total Maintenance Cost} + \text{Safety Cost}$	کمی
۱۷	کل هزینه‌ها	Maintenance Cost Rate + Depreciation + Other Costs + IoT Implementation Cost	کمی

اعتبارسنجی و اعتباربخشی مدل

هدف غایی از اعتبارسنجی مدل‌های سیستم‌های پویا، اطمینان از درست عمل کردن رفتار ساختاری مدل و فرآیند مدل‌سازی متناسب با شرایط واقعی و مدنظر می‌باشد [۱۶]. در این پژوهش، اعتبارسنجی مدل در چهار سطح انجام شده است:

الف) آزمون رفتار مرجع^۱: برای اطمینان از اینکه مدل قادر به بازتولید رفتارهای واقعی سیستم است، رفتار متغیر کلیدی «نرخ خرابی تجهیزات» در مدل، با داده‌های تاریخی

1. Reference Mode Test



شکل ۶. نتایج آزمون بررسی مدل

آزمون‌ها نشان می‌دهند که سیستم از حالت طبیعی خود خارج نشده و رفتار نسبتاً پایداری دارد در شرایط حدی بالا به سطح مطلوب نزدیک می‌شود و در شرایط حدی پایین، میزان کمینه برای سیستم ایجاد می‌شود.

در مرحله چهارم، تحلیل خروجی‌های مدل و ارزیابی سناریوهای مختلف انجام شد:

- تغییرات نرخ خرابی، هزینه‌های چرخه عمر، ایمنی در محیط کارگاه و دسترسی‌پذیری تجهیزات در طول زمان.
- مقایسه شاخص‌های کلیدی در سناریوی مختلف.
- تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر تغییر پارامترها مانند نرخ تعمیرات پیشگیرانه و پیش‌بینانه.

۴- یافته‌های پژوهش

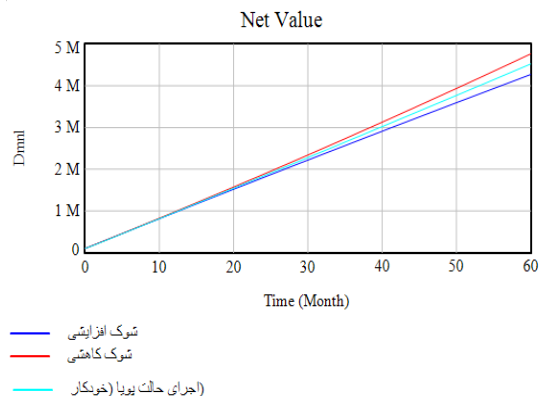
در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه سناریوی نگهداری و تعمیرات (اصلاحی، پیشگیرانه و پیش‌بینانه) با استفاده از مدل طراحی‌شده در نرم‌افزار ونسیم ارائه شده است. این نتایج، تأثیر سیاست‌های مختلف بر شاخص‌های کلیدی عملکرد تجهیزات مانند نرخ خرابی، هزینه‌های چرخه عمر، دسترسی‌پذیری تجهیزات، ایمنی در محیط کارگاه و زمان توقف را تحلیل می‌کند.

الف) سناریوی ۱: نگهداری اصلاحی

این سناریو، که بازتاب‌دهنده روش سنتی "تعمیر پس از خرابی" است، نتایج زیر را به همراه داشت:

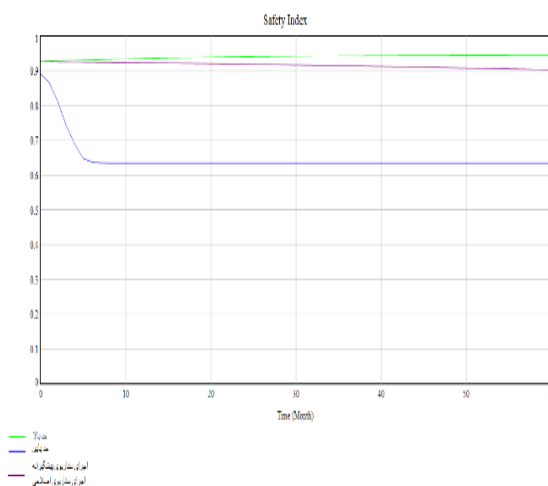
- نرخ خرابی تجهیزات به ۴۰ درصد رسید، که نشان‌دهنده تعداد بالای خرابی‌های غیرمنتظره است.

۹۵ درصد، کمتر از ۱۵ درصد است که نشان‌دهنده استحکام مدل می‌باشد.



شکل ۴. نتایج تحلیل حساسیت

ج) **آزمون حالت حدی:** در این آزمون رفتار متغیرهای اصلی مدل در حالت‌های حدی (مقادیر بسیار زیاد و بسیار کم) بررسی شد. نتایج نشان داد که در شرایط ایده‌آل (نرخ خرابی صفر و زمان توقف صفر)، شاخص ایمنی به عدد نزدیک ۹۵ درصد میل می‌کند و در شرایط فاجعه‌بار (نرخ خرابی و زمان توقف در حداکثر مقدار)، این شاخص به کمتر از ۶۵ درصد سقوط می‌کند که با منطق شهری و انتظارات سیستم، همخوانی کامل دارد.



شکل ۵. رفتار شاخص ایمنی در شرایط حدی (وضعیت ایده‌آل و فاجعه‌بار)

د) **آزمون ساختاری:** ساختار و تمامی معادلات مدل از نظر هماهنگی مورد بررسی قرار گرفتند و از صحت ساختاری و ابعادی تمامی روابط ریاضی اطمینان حاصل شد.

- هزینه‌های چرخه عمر تجهیزات، ۴۰ درصد کمتر از نگهداری اصلاحی و ۱۵ درصد کمتر از نگهداری پیشگیرانه بود.

- دسترسی‌پذیری تجهیزات به ۹۸ درصد افزایش یافت، که نشان‌دهنده بهترین عملکرد در میان سناریوها بود.

- زمان توقف تجهیزات به کمتر از ۵ درصد کاهش یافت.

- ایمنی در محیط کار بالای ۹۰ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده ایمنی بسیار بالای محیط کارگاه است.

- تحلیل: این سناریو بهترین عملکرد را از نظر کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری تجهیزات نشان داد. با این حال، نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه در فناوری‌های پیشرفته است.

(د) سناریوی ۴: نگهداری واقع‌بینانه

این سناریو، که نگهداری پیش‌بینانه را با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی شبیه‌سازی می‌کند، نتایج واقع‌بینانه‌تری نسبت به سناریوهای قبلی ارائه داد. در این سناریو، عواملی مانند خطای سنسورها (۱۰ درصد)، منحنی یادگیری پرسنل (۵۰٪ اثربخشی در ۶ ماه اول) و هزینه‌های پیاده‌سازی زیرساخت IoT (۱۰,۰۰۰ دلار) لحاظ شده است. نتایج نشان داد که نرخ خرابی به ۱۸ درصد، دسترسی‌پذیری به ۹۵ درصد و هزینه‌ها به ۶۸ درصد پایه کاهش می‌یابد.

جدول ۲. مقایسه سناریوها

شاخص	نگهداری اصلاحی	نگهداری پیشگیرانه	نگهداری پیش‌بینانه	نگهداری واقع‌بینانه
نرخ خرابی تجهیزات	۴۰٪	۳۰٪	۱۰٪	۱۸٪
هزینه‌های نت	۱۰۰٪	۷۰٪	۶۰٪	۶۸٪
دسترسی‌پذیری تجهیزات	۸۰٪	۹۰٪	۹۸٪	۹۵٪
ایمنی در محیط کار	۴۰٪	۷۶٪	۹۴٪	۸۵٪
زمان توقف تجهیزات	۲۰٪	۱۰٪	۵٪	۸٪

- هزینه‌های چرخه عمر تجهیزات بالاترین مقدار را داشت (۱۰۰ درصد پایه هزینه) که ناشی از تعمیرات اضطراری و توقف‌های پیش‌بینی نشده بود.

- دسترسی‌پذیری تجهیزات حدود ۸۰ درصد بود، اما خرابی‌های مکرر تأثیر منفی بر بهره‌وری داشت.

- مدت زمان توقف تجهیزات ۲۰ درصد از کل زمان عملیاتی را شامل شد.

- ایمنی در محیط کار ۴۰ درصد می‌باشد، بنابراین محیط کارگاه پرخطر و نیازمند اقدام فوری می‌باشد.

- تحلیل: این روش به دلیل هزینه‌های بالای توقف و نرخ خرابی بالا، به‌وضوح ناکارآمد است.

(ب) سناریوی ۲: نگهداری پیشگیرانه

نگهداری پیشگیرانه نتایج بهتری نسبت به سناریوی اول ارائه داد:

- نرخ خرابی تجهیزات به ۳۰ درصد کاهش یافت، که ناشی از اقدامات منظم تعمیر و نگهداری است.

- هزینه‌های چرخه عمر نسبت به نگهداری اصلاحی، ۳۰ درصد کاهش یافت و به ۷۰ درصد پایه هزینه رسید.

- دسترسی‌پذیری تجهیزات به ۹۰ درصد افزایش یافت و زمان توقف تجهیزات به ۱۰ درصد کاهش پیدا کرد.

- ایمنی در محیط کار حدوداً بین ۷۰-۸۰ درصد می‌باشد، بنابراین محیط کارگاه با ایمنی متوسط و نیازمند بهبود می‌باشد.

- تحلیل: این روش به دلیل کاهش قابل توجه نرخ خرابی و هزینه‌ها، یک گزینه مؤثر برای مراکز با منابع محدود است.

(ج) سناریوی ۳: نگهداری پیش‌بینانه

این سناریو که بر استفاده از فناوری‌های اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های بزرگ مبتنی است، بهترین نتایج را ارائه داد:

- نرخ خرابی تجهیزات به حداقل مقدار خود (۱۰ درصد) رسید.

در مقابل، روش پیش‌بینانه با پیش‌بینی خرابی، از ورود سیستم به این حلقه مخرب جلوگیری می‌کند.

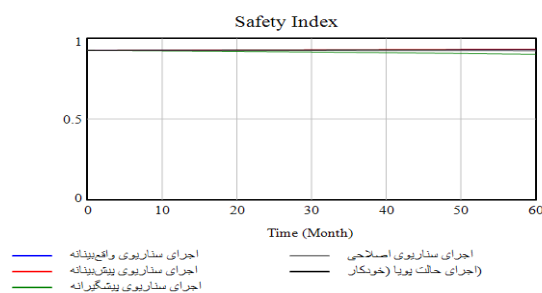


شکل ۹. نمودار مقایسه دسترسی پذیری تجهیزات در سناریوها

نمودار شماره ۹ نشان می‌دهد که دسترسی‌پذیری تجهیزات در سناریوی نگهداری پیش‌بینانه به بالاترین سطح، یعنی ۹۸ درصد، رسیده است. این افزایش به دلیل کاهش زمان توقف و مدیریت مؤثرتر تجهیزات است.

افزایش دسترسی‌پذیری در روش پیش‌بینانه به دلیل کاهش زمان توقف‌های برنامه‌ریزی نشده است. زمان توقف در این سناریو به یک حلقه بازخورد منفی (B2) تبدیل می‌شود:

پایش وضعیت → پیش‌بینی زمان خرابی → تعمیر
به‌موقع → کاهش زمان توقف → افزایش دسترسی‌پذیری.



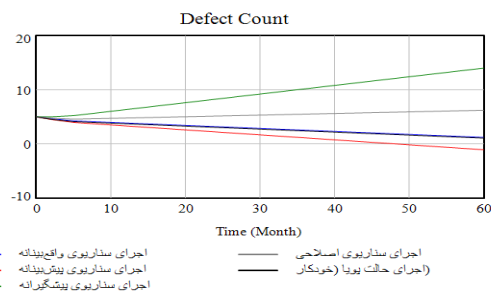
شکل ۱۰. ایمنی در محیط کار

نمودار شماره ۱۰ ایمنی در محیط کارگاه را در سناریوهای مختلف مقایسه می‌کند:

خروجی و کاربرد شاخص

خروجی اصلی: یک عدد بین ۰ تا ۱۰۰ که نشان‌دهنده سطح ایمنی محیط کارگاه است.

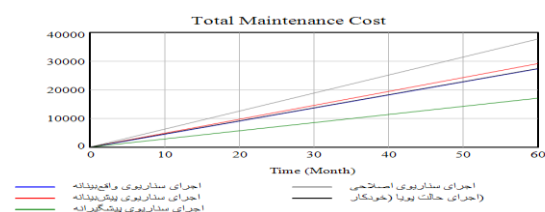
- ۸۰-۱۰۰: ایمنی عالی (محیط کم‌خطر)
- ۵۰-۸۰: ایمنی متوسط (نیازمند بهبود)



شکل ۷. نرخ خرابی تجهیزات در طول زمان

نمودار شماره ۷ تغییرات نرخ خرابی تجهیزات را در چهار سناریوی مختلف نشان می‌دهد:

تحلیل رفتار منحنی نرخ خرابی (شکل ۷) نشان می‌دهد که در سناریوی اصلاحی (خط طوسی)، یک حلقه بازخورد مثبت (تقویت‌کننده) بر سیستم حاکم است؛ به این معنا که هر خرابی منجر به تعمیرات اضطراری و سپس افزایش فشار کاری و خطای انسانی می‌شود که خود زمینه‌ساز خرابی‌های بعدی است. اما در سناریوی پیش‌بینانه (خط قرمز)، با ورود بازرسی‌های دوره‌ای و سیستم‌های هشداردهنده، یک حلقه بازخورد منفی (متعادل‌کننده) شکل می‌گیرد. این حلقه، با شناسایی و رفع نقص‌های جزئی قبل از بحرانی شدن، از فعال‌سازی حلقه تقویت‌کننده جلوگیری می‌کند.

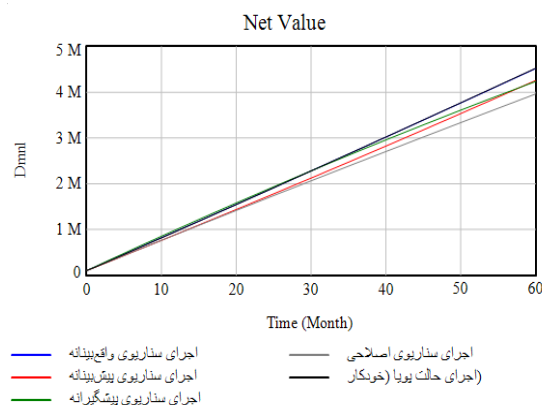


شکل ۸. نمودار مقایسه هزینه‌ها در سناریوهای مختلف

در نمودار شماره ۸ مشاهده می‌شود که هزینه‌ها در سناریوی نگهداری اصلاحی بالاترین مقدار را دارند، در حالی که نگهداری پیش‌بینانه به دلیل پیش‌بینی دقیق‌تر خرابی‌ها و جلوگیری از توقف‌های اضطراری، هزینه‌ها را به حداقل رسانده است. کاهش هزینه‌ها در سناریوی پیش‌بینانه ناشی از حذف هزینه‌های سرسام‌آور تعمیرات اضطراری است. در روش اصلاحی، یک حلقه بازخورد مثبت (R2) وجود دارد:

خرابی → تعمیر گران → کاهش بودجه → تعمیرات ناقص → خرابی بیشتر.

زمان توقف در سناریوی اصلاحی به دلیل خرابی‌های مکرر و تعمیرات طولانی‌مدت در بالاترین سطح است. در سناریوی پیش‌بینانه، زمان توقف به حداقل می‌رسد زیرا تعمیرات در زمان مناسب و با کمترین اختلال انجام می‌شود.



شکل ۱۲. اعمال همزمان سناریوها

شکل شماره ۱۲ رفتار همزمان تمام سناریوها را در یک نمودار مقایسه‌ای نشان می‌دهد. این نمودار به مدیران امکان می‌دهد تا به صورت بصری و همزمان، عملکرد هر چهار استراتژی را در یک بازه زمانی مشترک مشاهده کنند. با استفاده از این نمای ترکیبی، مدیران می‌توانند بهترین گزینه را بر اساس اولویت‌های سازمانی (کاهش هزینه، افزایش ایمنی یا بهره‌وری) انتخاب کنند. به عنوان مثال، اگر اولویت اصلی کاهش هزینه‌ها باشد، سناریوی پیش‌بینانه با ۶۰ درصد هزینه‌های پایه، بهترین عملکرد را دارد؛ اما اگر محدودیت بودجه وجود دارد، سناریوی واقع‌بینانه با ۶۸ درصد هزینه‌ها و دسترسی‌پذیری ۹۵ درصد، گزینه مناسبی محسوب می‌شود.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که استفاده از رویکردهای مدرن نگهداری و تعمیرات می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر بهره‌وری تجهیزات کارگاهی در مراکز آموزشی داشته باشد. شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها، به‌عنوان ابزار اصلی تحلیل در این تحقیق، اثربخشی سیاست‌های مختلف نگهداری و تعمیرات (اصلاحی، پیشگیرانه، واقع‌بینانه و پیش‌بینانه) را مورد بررسی قرار داد. یافته‌ها حاکی از آن است که نگهداری پیش‌بینانه، به دلیل بهره‌گیری از فناوری‌های

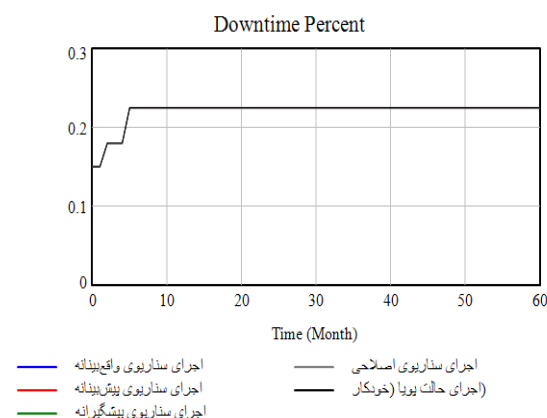
زیر ۵۰: ایمنی پایین (محیط پرخطر و نیازمند اقدام فوری)

شاخص ایمنی در سناریوی پیش‌بینانه به بالای ۹۰ درصد می‌رسد. این افزایش ناشی از کاهش زمان مواجهه کارکنان با تجهیزات ناایمن است. به عبارت دیگر، افزایش دسترسی‌پذیری و کاهش زمان توقف به طور مستقیم بر کاهش عوامل زیان‌آور شغلی تأثیرگذار است.

کاربرد در تحلیل سناریوها:

- ❖ در سناریوی اصلاحی، این شاخص به دلیل نرخ خرابی بالا و زمان توقف زیاد، به شدت پایین بود (۴۰٪).
- ❖ در سناریوی پیشگیرانه، این شاخص به حدود ۷۰-۸۰٪ می‌رسد.

در سناریوی پیش‌بینانه و واقع‌بینانه، این شاخص به بالای ۹۰٪ رسید که نشان‌دهنده ایمنی بسیار بالای محیط کارگاه است.



شکل ۱۱. زمان توقف تجهیزات

نمودار شماره ۱۱ تفاوت زمان توقف تجهیزات را در سناریوهای مختلف مقایسه می‌کند:

- ❖ نگهداری اصلاحی: بیشترین زمان توقف (۲۰ درصد زمان پایه).
- ❖ نگهداری پیشگیرانه: کاهش زمان توقف به ۱۰ درصد.
- ❖ نگهداری واقع‌بینانه: کاهش زمان توقف به ۸ درصد.
- ❖ نگهداری پیش‌بینانه: کمترین زمان توقف، معادل ۵ درصد.

نوین مانند اینترنت اشیاء و تحلیل داده‌های بزرگ، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

در سناریوی نگهداری پیش‌بینانه، هزینه‌های چرخه عمر تجهیزات به میزان قابل توجهی کاهش یافت، به طوری که هزینه‌ها ۴۰ درصد کمتر از نگهداری اصلاحی و ۱۵ درصد کمتر از نگهداری پیشگیرانه بود. علاوه بر این، نرخ خرابی تجهیزات به حداقل مقدار خود (۱۰ درصد) کاهش پیدا کرد که این به معنای کاهش مواجهه کارکنان با خطرات ناشی از تعمیرات اضطراری است، و مستقیماً به معنای کاهش خطرات شغلی و افزایش ایمنی محیط کارگاه نیز می‌باشد. همچنین دسترسی پذیری تجهیزات به ۹۸ درصد افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد پیش‌بینانه، با ارائه تحلیل‌های دقیق از داده‌های جمع‌آوری شده و پیش‌بینی دقیق زمان خرابی‌ها، می‌تواند نیاز به تعمیرات اضطراری را به شدت کاهش داده و ایمنی و بهره‌وری کلی را افزایش دهد.

نگهداری پیشگیرانه نیز به عنوان یک راهکار میانه عملکرد مثبتی نشان داد. این روش، با کاهش نرخ خرابی به ۳۰ درصد و افزایش دسترسی‌پذیری تجهیزات به ۹۰ درصد، توانست به میزان ۳۰ درصد از هزینه‌های چرخه عمر نسبت به نگهداری اصلاحی بکاهد. هرچند این روش مزایای قابل توجهی دارد، اما نسبت به نگهداری پیش‌بینانه از دقت و کارایی کمتری برخوردار است.

در مقابل، نتایج سناریوی نگهداری اصلاحی نشان داد که این رویکرد به دلیل توقف‌های مکرر، خرابی‌های پیش‌بینی نشده و هزینه‌های بالای تعمیرات اضطراری و نایمن بودن محیط کارگاه، کارایی پایینی دارد. این روش نه تنها باعث افزایش هزینه‌های چرخه عمر می‌شود، بلکه دسترسی‌پذیری تجهیزات را نیز به شدت کاهش می‌دهد.

در مجموع، یافته‌ها بر اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین و ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی در بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات تأکید می‌کنند. این پژوهش نشان داد که ادغام رویکردهای پیشگیرانه و پیش‌بینانه می‌تواند راه‌حلی مناسب برای ایجاد تعادل میان کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی تجهیزات باشد. سرمایه‌گذاری در فناوری‌های اینترنت اشیاء و تحلیل داده‌های بزرگ، همراه با آموزش کارکنان برای استفاده از این فناوری‌ها، می‌تواند

نقش مهمی در ارتقای عملکرد تجهیزات کارگاهی ایفا کند.

نتایج نشان می‌دهد که استراتژی نگهداری پیش‌بینانه، حتی با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی و هزینه‌های پیاده‌سازی (سناریوی واقع‌بینانه)، به طور قابل توجهی کارآمدتر از روش‌های سنتی است و می‌تواند به عنوان یک نقشه راه برای ارتقاء ایمنی و کاهش مخاطرات مد نظر قرار گیرد. اعداد گزارش شده (مانند نرخ خرابی ۱۰٪ در سناریوی ایده‌آل و ۱۸٪ در سناریوی واقع‌بینانه) نشان‌دهنده پتانسیل نهایی این روش است و مدیران باید آن را به عنوان یک هدف استراتژیک بلندمدت در نظر بگیرند.

پژوهش حاضر همچنین تأیید کرد که شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها ابزاری کارآمد برای تحلیل روابط پیچیده و پیش‌بینی اثرات سیاست‌های نگهداری و تعمیرات بر شاخص‌های کلیدی عملکرد است. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان یک راهنمای عملی برای مدیران مراکز آموزشی در تصمیم‌گیری بهتر و بهبود مدیریت تجهیزات مورد استفاده قرار گیرد.

توصیه فوری: برای مراکزی که بودجه کافی ندارند، حرکت از نگهداری اصلاحی به پیشگیرانه، به عنوان یک گام اولیه، می‌تواند ریسک‌های عمده را کاهش دهد.

توصیه بلندمدت: برای مراکز بزرگ، سرمایه‌گذاری بر روی زیرساخت‌های اینترنت اشیاء به عنوان یک اقدام راهبردی برای کاهش مخاطرات عملیاتی، ضروری است.

توصیه ساختاری: ایجاد یک «کمیته مدیریت ریسک تجهیزات» که با استفاده از مدل ارائه شده، به طور دوره‌ای سناریوهای مختلف را بازبینی و به‌روزرسانی کنند.

بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، با قوت بیشتری بر بُعد ایمنی تأکید شود. مثلاً «پژوهش‌های آتی می‌توانند به بررسی تأثیر مستقیم پیاده‌سازی این مدل بر شاخص‌های عینی‌تری مانند نرخ حوادث گزارش شده، میزان غیبت‌های ناشی از بیماری‌های شغلی و یا هزینه‌های جبران خسارت بپردازند و همچنین بحث ترکیب روش پویایی‌های سیستم با دیگر روشهای ریاضی امکان‌پذیر است.

research agenda', Journal of Intelligent Manufacturing, 31(2), pp. 1-19. DOI: 10.1007/s10845-019-01505-5.

- [4] Kumar, S. and Thakur, L.S. (2023) 'A review of IoT-based predictive maintenance frameworks in manufacturing', Journal of Manufacturing Processes, 91, pp. 472-489. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.014.
- [5] Zonta, T., Da Costa, C.A. and Pitangueira, F. (2020) 'Predictive maintenance: A survey using IoT and big data analytics', Computers in Industry, 123, p. 103298. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103298.
- [6] Knezevic, J. and Djurdjevic, D. (2022) 'Implementation of AI for predictive maintenance in logistics systems', Reliability Engineering & System Safety, 217, p. 107872. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107872.
- [7] Sterman, J.D. (2000) Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. McGraw-Hill Education.
- [8] Mohammadi, S. and Saidi-Mehrabad, M. (2021) 'Integrated dynamic maintenance scheduling using system dynamics approach', Journal of Industrial Engineering International, 17, pp. 673-688. DOI: 10.1007/s40092-021-00201-4.
- [9] Alaswad, S. and Xiang, Y. (2019) 'A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system', Reliability Engineering & System Safety, 184, pp. 119-134. DOI: 10.1016/j.ress.2018.07.005.
- [10] Si, X., Wang, W., Hu, C. and Zhou, D. (2019) 'Remaining useful life estimation: A review on the statistical data-driven approaches', Reliability Engineering & System Safety, 179, pp. 1-17. DOI: 10.1016/j.ress.2018.06.021.

محدودیت‌های پژوهش و پیشنهاد برای مطالعات آتی:

یکی از محدودیت‌های عمده این پژوهش، در نظر گرفتن تجهیزات کارگاهی به صورت یکپارچه و جمع‌شده است، در حالی که در عمل، هر کارگاه شامل طیف متنوعی از تجهیزات با الگوهای خرابی، شدت ریسک و الزامات نگهداری متفاوت است (به عنوان مثال، ابزارهای دستی در مقایسه با ماشین‌آلات CNC). این امر، تعمیم‌پذیری نتایج عددی را برای تک تک تجهیزات با چالش مواجه می‌کند. لذا، به محققان آتی توصیه می‌شود که مدل ارائه‌شده را با طبقه‌بندی تجهیزات بر اساس سطح ریسک و حساسیت عملیاتی (مانند رویکرد مبتنی بر تحلیل حالت‌های خرابی و آثار آن - FMEA) توسعه دهند.

همچنین، در این پژوهش فرض شده است که داده‌های مورد استفاده برای کالیبراسیون مدل، نماینده وضعیت کلی کارگاه‌های آموزشی هستند. در تحقیقات آتی، توصیه می‌شود با جمع‌آوری داده‌های تجربی از چندین مرکز آموزشی مختلف، مدل برای شرایط متنوع‌تر کالیبره شود. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود تأثیر مستقیم پیاده‌سازی این مدل بر شاخص‌های عینی‌تری مانند نرخ حوادث گزارش‌شده، میزان غیبت‌های ناشی از بیماری‌های شغلی و یا هزینه‌های جبران خسارت مورد بررسی قرار گیرد.

۶- مراجع

- [1] Nguyen, T.T., Zhou, L. and Wang, J. (2021) 'A dynamic model for optimizing predictive maintenance in manufacturing systems', Journal of Manufacturing Systems, 60, pp. 259-272. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.06.002.
- [2] Mobley, R.K. (2002) An introduction to predictive maintenance. Butterworth-Heinemann.
- [3] Bousdekis, A., Lepenioti, K., Apostolou, D. and Mentzas, G. (2020) 'Decision making in predictive maintenance: Literature review and

- [14] Hashemian, H.M. (2021) 'Condition monitoring and predictive maintenance of critical systems in nuclear power plants', *Progress in Nuclear Energy*, 137, p. 103713. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103713.
- [15] Forrester J.W. (1961) 'Industrial Dynamics', MIT Press, Cambridge, MA.
- [16] Yim, N.H., Kim, S.H., Kim, H.W. & Kwahk, K.Y. (2004) 'Knowledge Based Decision Making on Higher Level Strategic Concerns: System Dynamics Approach', *Expert Systems with Application*, No. 27, p.p. 143-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2003.12.019>.
- [11] Jardine, A.K., Lin, D. and Banjevic, D. (2019) 'Machine diagnostics and condition-based maintenance', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), pp. 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.09.012.
- [12] Wang, H. and Pham, H. (2006) *Reliability and optimal maintenance*. Springer Series in Reliability Engineering. DOI: 10.1007/978-1-84628-252-6.
- [13] Caggiano, A. and Teti, R. (2020) 'Digital factory technologies for real-time predictive maintenance in manufacturing', *Procedia Manufacturing*, 42, pp. 348–355. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.082.

Developing a Dynamic Risk Assessment Model for Workshop Equipment Using Predictive Maintenance and a Non Linear Safety Index in Skill Based Training Centers

Farshid Farrokhzadeh^{1*}

1- Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Maintenance Engineering, Faculty of Science and Engineering, Imam Hossein (AS) University of Officer and Guard Training, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 11 Oct 2026

Received in revised form: 7 May 2026

Accepted: 2026/10/09

Available online: 2026/10/13

*Correspondence:

f.farokhi@ihuo.ac.ir

Keywords:

Equipment Risk Management

Predictive Maintenance

System Dynamics

Workshop Safety

Occupational Hazardous Agents

ABSTRACT

Vocational training workshops play a critical role in developing a skilled workforce; however, the intensive and frequent utilization of equipment in these settings inevitably leads to accelerated deterioration and potential failures. Beyond the direct financial implications, equipment malfunction constitutes a primary source of occupational hazards and a significant contributor to workplace accidents, thereby posing substantial threats to the health and safety of users, including trainees, instructors, and technical staff. This study aims to develop a comprehensive model for optimizing maintenance strategies, employing a proactive approach to systematically enhance workshop safety and occupational health while concurrently reducing lifecycle costs. This applied research employs a System Dynamics (SD) modeling and simulation approach, implemented using Vensim software. Key variables influencing equipment degradation and safety performance were identified, and a causal-loop diagram was constructed to map the feedback mechanisms governing the system. A quantitative stock-and-flow model was subsequently developed and simulated under three distinct maintenance scenarios: corrective (run-to-failure), preventive (time-based), and predictive (condition-based) maintenance. The scenarios were comparatively analyzed based on key performance indicators, including lifecycle costs, equipment reliability, availability, and downtime—the latter serving as a proxy measure for indirect safety risks. The results showed that the predictive maintenance strategy (based on the Internet of Things and big data analytics) is significantly more efficient compared to other methods. This strategy resulted in a reduction in failure rates to 10% in the ideal predictive scenario and 18% in the realistic scenario, and equipment availability to 98% in the predictive scenario and 95% in the realistic scenario. These improvements directly translate into reduced downtime, reduced employee exposure to unsafe equipment, and, as a result, a significant reduction in the risk of accidents and occupational hazards in the workshop environment. The findings underscore that investment in advanced maintenance strategies should not be perceived as a mere operational expense, but rather as a strategic intervention for risk management, occupational safety enhancement, and the overall sustainability of educational training facilities. The proposed model offers a robust, evidence-based decision-support tool for managers, enabling them to effectively mitigate operational hazards and improve working conditions in workshop settings.