

توسعه و ارزیابی یک سیستم خبره فازی هوشمند برای ارزیابی وضعیت تجهیزات و پشتیبانی از تصمیم نگهداری و تعمیرات در صنعت بازیافت لاستیک‌های فرسوده

D

Development and Evaluation of an Intelligent Fuzzy Expert System for Equipment Condition Assessment and Maintenance Decision Support in the Waste Tire Recycling Industry

چکیده

افزایش تولید لاستیک‌های فرسوده، نیاز به رویکردهای هوشمند برای بهبود بهره‌وری و کاهش خرابی‌های ناگهانی در مراکز بازیافت را ضروری ساخته است. باوجود پژوهش‌های گسترده در مدیریت پسماند، تاکنون چارچوب یکپارچه مبتنی بر هوش مصنوعی برای تصمیم‌گیری نگهداری ارائه نشده است. پژوهش حاضر باهدف طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی یک سیستم خبره فازی هوشمند انجام شده است تا ضمن ارزیابی وضعیت تجهیزات، تصمیم‌گیری در زمینه اولویت‌بندی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات سامانه‌های بازیافت لاستیک‌های فرسوده را بهبود بخشد. چارچوب پیشنهادی بر پایه تلفیق نظام‌مند دانش خبرگان نگهداری (با بیش از ۱۵ سال سابقه)، شاخص‌های عینی قابلیت اطمینان تجهیزات، و منطق فازی برای مدیریت عدم قطعیت طراحی شده است. سیستم شامل ۷ متغیر ورودی (ارتعاش، دمای کاری، شدت سایش، فراوانی خرابی، MTBF، MTTR و امتیاز بازرسی)، ۲ متغیر خروجی (شاخص سلامت تجهیزات و اولویت نگهداری)، و ۲۳ قاعده فازی است. پیاده‌سازی در محیط پایتون انجام شده و از روش استنتاج ممدانی و غیرفازی‌سازی مرکز ثقل استفاده شده است. داده‌های پژوهش شامل ۱۰۰۰ رکورد شبیه‌سازی شده از ۱۰ نوع تجهیز اصلی مراکز بازیافت است و ارزیابی سیستم از طریق معیارهای آماری شامل ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق، و دقت طبقه‌بندی صورت گرفته است. سیستم خبره فازی توسعه‌یافته، ضریب همبستگی ۰.۹۲۶۶، میانگین خطای مطلق ۰.۱۰۹۷، و دقت ۹۳.۱ درصد در بازه ± 20 واحد از شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی شده را نشان داد. دقت سیستم در شناسایی تجهیزات بحرانی ۹۱ درصد و دقت کلی طبقه‌بندی اولویت نگهداری ۵۹.۷ درصد محاسبه شد. متغیرهای شدت سایش و ارتعاش بیشترین تأثیر را بر کاهش سلامت تجهیزات دارند. سیستم موفق به شناسایی ۱۰۶ تجهیز بحرانی شد. سیستم پیشنهادی با عملکرد مناسب در شرایط عدم قطعیت، ابزاری کارآمد برای خودکارسازی ارزیابی، شفافیت تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی تخصیص منابع در صنعت بازیافت لاستیک است و قابلیت توسعه به سایر صنایع را دارد.

کلمات کلیدی: ارزیابی وضعیت تجهیزات، بازیافت لاستیک‌های فرسوده، سیستم خبره فازی، نگهداری هوشمند.

نوع مقاله: پژوهشی

مصطفی یوسفی طرزجان

۱- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه جامع علمی کاربردی، تهران، ایران.

ایمیل نویسنده‌گان و عهده‌دار مکاتبات:

yousofi@uast.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲

۱. مقدمه

مدیریت لاستیک‌های فرسوده یکی از چالش‌های مهم در توسعه نظام‌های تولید و مصرف پایدار و اقتصاد چرخشی است. در این میان، مراکز بازیافت لاستیک به‌عنوان یکی از حلقه‌های اصلی زنجیره ارزش بازیافت، به عملکرد پایدار و قابلیت اطمینان تجهیزات وابسته‌اند. تجهیزات مورد استفاده در فرایندهای خردایش، جداسازی و آماده‌سازی لاستیک، تحت تأثیر عواملی نظیر سایش، ارتعاش، ضربه و آلودگی عملیاتی قرار دارند و کاهش وضعیت سلامت آن‌ها می‌تواند موجب افزایش توقفات، هزینه‌های نگهداری و کاهش بهره‌وری فرایند شود. از این‌رو، ارزیابی نظام‌مند وضعیت تجهیزات و اولویت‌بندی اقدامات نگهداری، یکی از الزامات مهم برای بهبود قابلیت اطمینان و تداوم عملیات در این مراکز محسوب می‌شود. به همین دلیل، طی دو دهه اخیر بیشتر کشورها سیاست‌های خود را از دفن مستقیم لاستیک‌ها به سمت بازیافت، بازیابی انرژی و اقتصاد چرخشی تغییر داده‌اند (WBCSD¹, 2019; USTMA², 2020).

موفقیت این سیاست‌ها تنها به وجود فناوری‌های بازیافت وابسته نیست؛ آنچه کمتر مورد توجه قرار گرفته، عملکرد پایدار تجهیزات این مراکز است. مراکز بازیافت لاستیک با فرایندهایی مثل خردایش، آسیاب، جداسازی فولاد و الیاف، و گاهی پیرولیز، مواد ارزشمند را به چرخه تولید باز می‌گردانند. اما این واحدها با یک چالش اساسی روبه‌رو هستند: تجهیزاتشان در شرایط بسیار سخت‌کار می‌کنند. بارهای ضربه‌ای، ارتعاشات شدید، سایش ناشی از ذرات لاستیک و آلودگی‌های فلزی، خرابی‌های مکرری ایجاد می‌کنند که می‌تواند کل خط تولید را مختل کند (Sebola et al., 2018). مطالعات انجام‌شده در حوزه مدیریت لاستیک‌های فرسوده عمدتاً بر موضوعاتی مانند سیاست‌های مدیریت پسماند، مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده (EPR)، فناوری‌های بازیافت،

ارزیابی چرخه عمر، بازیابی انرژی و توسعه اقتصاد چرخشی متمرکز بوده‌اند. برای نمونه، گزارش جامع (WBCSD, 2019) وضعیت قوانین، فناوری‌های بازیافت و سامانه‌های مدیریت لاستیک‌های فرسوده را در کشورهای مختلف بررسی کرده است (et al., 2018Sebola). با مقایسه صنعت بازیافت لاستیک آفریقای جنوبی و اتحادیه اروپا، اهمیت توسعه زیرساخت‌های بازیافت و بهبود بهره‌وری عملیاتی را نشان داده‌اند. افزون بر این، (et al., 2023Schenck) نقش فعالان غیررسمی در اقتصاد چرخشی لاستیک را مورد بررسی قرار داده‌اند. تمرکز این مقالات عمدتاً بر ابعاد مدیریتی، زیست‌محیطی و سیاست‌گذاری بوده و موضوع مدیریت هوشمند نگهداری و تعمیرات تجهیزات مراکز بازیافت کمتر مورد توجه قرار گرفته است (et al., 2023Schenck; WBCSD, 2019). قابلیت اطمینان تجهیزات یکی از عوامل کلیدی موفقیت واحدهای بازیافت محسوب می‌شود. توقف ناگهانی تجهیزاتی مانند خردکن‌های اولیه، نوارهای نقاله، سامانه‌های جداسازی مغناطیسی، آسیاب‌ها و تجهیزات انتقال مواد می‌تواند کل فرایند تولید را متوقف کرده و هزینه‌های عملیاتی، مصرف انرژی و زمان از کارافتادگی را افزایش دهد. در بسیاری از مراکز بازیافت، تصمیم‌گیری درباره زمان مناسب تعمیر یا تعویض تجهیزات همچنان مبتنی بر تجربه کارشناسان بوده و از مدل‌های هوشمند پشتیبان تصمیم استفاده نمی‌شود که باعث می‌شود تصمیم‌های نگهداری در شرایط عدم قطعیت، یکنواختی و دقت لازم را نداشته باشند. توسعه فناوری‌های هوش مصنوعی فرصت مناسبی برای بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت دارایی‌های فیزیکی فراهم کرده است. یکی از ابزارهای هوش مصنوعی، سامانه‌های خبره هستند که دانش متخصصان را در قالب مجموعه‌ای از قواعد قابل پردازش در اختیار کاربران قرار می‌دهند. با این حال، سامانه‌های خبره کلاسیک مبتنی بر منطق دودویی در مواجهه با شرایط واقعی صنعت با محدودیت مواجه‌اند؛ زیرا بسیاری از شاخص‌های نگهداری و تعمیرات ماهیتی زبانی و مبهم دارند. مفاهیمی نظیر

1. World Business Council for Sustainable Development

2. United States Tire Manufacturers Association

«وضعیت مناسب»، «فرسودگی متوسط»، «ارتعاش زیاد»، «ریسک بالا» یا «اولویت زیاد برای تعمیر» را نمی‌توان تنها با مقادیر صفر و یک توصیف کرد. پژوهش حاضر باهدف طراحی یک سیستم خبره فازی هوشمند برای ارزیابی وضعیت تجهیزات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری نگهداری و تعمیرات در سامانه‌های بازیافت لاستیک‌های فرسوده انجام شده است. این پژوهش با تلفیق دانش خبرگان، شاخص‌های قابلیت اطمینان تجهیزات و منطق فازی، چارچوبی برای اولویت‌بندی فعالیت‌های نگهداری ارائه کرده است که علاوه بر کاهش خرابی‌های ناگهانی، موجب افزایش قابلیت دسترس‌پذیری تجهیزات، کاهش هزینه‌های تعمیرات و ارتقای پایداری عملیاتی مراکز بازیافت شود.

۲. بیان مسئله

هر سال بر حجم لاستیک‌های فرسوده افزوده می‌شود. این موضوع، مدیریت این پسماندها را به یکی از دغدغه‌های جدی زیست‌محیطی و صنعتی تبدیل کرده است. خیلی از کشورها برای پاسخ به این چالش، به سراغ توسعه مراکز بازیافت رفته‌اند. اما نکته مهم اینجاست که صرف وجود این مراکز کافی نیست؛ آنچه تعیین‌کننده است، عملکرد پایدار تجهیزات و زیرساخت‌های آنهاست (WBCSD, 2019). بیشتر پژوهش‌هایی که در این زمینه انجام شده، به سیاست‌های مدیریت پسماند، مسئولیت تولیدکننده، ارزیابی چرخه عمر و فناوری‌های بازیافت پرداخته‌اند (Sebola et al., 2018; Schenck et al., 2023; WBCSD, 2019).

اما یک زاویه مهم کمتر دیده شده: عملکرد تجهیزات صنعتی و نحوه مدیریت نگهداری آنها. این در حالی است که خرابی یک دستگاه کلیدی می‌تواند کل خط تولید را مختل کند. واقعیت این است که تجهیزات مراکز بازیافت لاستیک، از خردکن‌ها و آسیاب‌ها گرفته تا نوارهای نقاله و سامانه‌های هیدرولیک، در شرایط بسیار سختی کار می‌کنند. سایش،

ضربه، ارتعاش و آلودگی مداوم، این تجهیزات را به شدت در معرض خرابی قرار می‌دهد. توقف ناگهانی هر یک از آنها نه تنها کل فرایند را مختل می‌کند، بلکه هزینه‌های تعمیرات را بالا می‌برد و بهره‌وری را کاهش می‌دهد. به بیان ساده‌تر، قابلیت اطمینان این تجهیزات، ستون فقرات هر واحد بازیافتی است. در بسیاری از رویکردهای متداول نگهداری، ارزیابی وضعیت تجهیزات همچنان به ترکیبی از داده‌های بازرسی، شاخص‌های عملکردی و قضاوت متخصصان متکی است. اگرچه تجربه خبرگان یکی از منابع مهم دانش در تصمیم‌گیری نگهداری محسوب می‌شود، وابستگی بیش از حد به قضاوت فردی می‌تواند موجب ناهمگونی تصمیم‌ها در شرایط مشابه شود. علاوه بر این، بسیاری از شاخص‌های وضعیت تجهیزات ماهیتی تدریجی و همراه با عدم قطعیت دارند؛ به گونه‌ای که مفاهیمی مانند «ارتعاش بالا»، «سایش متوسط» یا «وضعیت نامطلوب» را نمی‌توان به سادگی با مرزهای قطعی و دوارزشی نمایش داد. این ویژگی، استفاده از روش‌هایی را که قادر به مدل‌سازی متغیرهای زبانی و عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های کارشناسی هستند، توجیه می‌کند. منطق فازی با امکان نمایش متغیرهای زبانی و درجات مختلف عضویت، چارچوب مناسبی برای مدل‌سازی عدم قطعیت و ابهام موجود در ارزیابی وضعیت تجهیزات فراهم می‌کند. ازسوی دیگر، سامانه‌های خبره امکان تبدیل دانش تخصصی خبرگان به مجموعه‌ای از قواعد قابل تکرار و قابل تفسیر را فراهم می‌سازند. ترکیب این دو رویکرد می‌تواند چارچوبی تصمیم‌یار برای ارزیابی وضعیت تجهیزات و اولویت‌بندی اقدامات نگهداری ایجاد کند. باوجود همه این پژوهش‌ها، هنوز یک چارچوب عملیاتی که دانش خبرگان نگهداری را با منطق فازی ترکیب کند و بتواند وضعیت تجهیزات را ارزیابی کرده و اقدامات مناسب را پیشنهاد دهد، در این صنعت دیده نمی‌شود. این خلأ در کشورهایی که تازه دارند زیرساخت‌های بازیافت را

فرایندهای عملیاتی از عوامل اصلی موفقیت سامانه‌های بازیافت محسوب می‌شوند. صرف توسعه فناوری بازیافت بدون توجه به عملکرد تجهیزات، نمی‌تواند موجب افزایش پایداری سیستم شود. مطالعه (et al., 2023 Schenck) ابعاد اجتماعی و اقتصادی مدیریت لاستیک‌های فرسوده را بررسی کرده و نقش بازیگران رسمی و غیررسمی را در اقتصاد چرخشی تحلیل کرده است. بر اساس آن پژوهش، مدیریت موفق لاستیک‌های فرسوده نیازمند هماهنگی میان سیاست‌گذاری، زیرساخت‌های صنعتی و بهره‌برداری کارآمد از تجهیزات است.

طراحی یک سیستم خبره فازی هوشمند برای ارزیابی وضعیت تجهیزات و تصمیم‌گیری نگهداری در سامانه‌های بازیافت لاستیک‌های فرسوده، حوزه‌ای جدید است که در ادبیات موجود کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Dabić-Miletić & Simic, 2023; Boonkanit & Suthiluck, 2023). سه رویکرد اصلی در پژوهش‌های مرتبط قابل‌شناسایی است: سامانه‌های فازی برای ارزیابی وضعیت تجهیزات و تشخیص خرابی، سامانه‌های تصمیم‌یار چندمعیاره فازی برای مدیریت پسماند و بازیافت، و چارچوب‌های هوشمند نگهداری و تعمیرات مبتنی بر منطق فازی. منطق فازی امکان استفاده از توصیفات زبانی برای تحلیل ریسک و ارزیابی وضعیت سامانه‌ها را فراهم می‌کند و وضعیت سیستم از منظر ریسک‌ها و پیامدها بهتر توصیف می‌شود (Djenadic et al., 2022). یک سیستم تشخیص لاستیک مبتنی بر منطق فازی با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر ترکیدگی، شکستگی فلنج، خرابی ترد و وصله‌کاری، دقت ۱.۶٪ خطا در مقایسه با ۵.۶٪ خطای تجربه کارور انسانی به دست داد (Medina et al., 2022). در حوزه ارزیابی زیرساخت‌های عمرانی، یک طبقه‌بندی فازی استنتاجی برای تحلیل الگوهای تخریب در تصاویر هوایی توسعه یافت که مشاهدات بصری مبهم را به شاخص‌های وضعیت استاندارد تبدیل می‌کند (Pan et al., 2025). جدول ۱ خلاصه پژوهش‌های مرتبط با ارزیابی وضعیت و تشخیص نقص با رویکرد فازی را ارائه می‌کند.

توسعه می‌دهند، حساس‌تر است. سؤال اصلی پژوهش عبارت است از: آیا می‌توان با استفاده از یک سیستم خبره فازی، شاخص‌های وضعیت تجهیزات مراکز بازیافت لاستیک‌های فرسوده را در شرایط عدم قطعیت ترکیب کرده و چارچوبی قابل‌تفسیر برای ارزیابی وضعیت تجهیزات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری نگهداری و تعمیرات ارائه کرد؟

هدف اصلی این پژوهش، توسعه و ارزیابی یک سیستم خبره فازی برای ترکیب شاخص‌های مؤثر بر وضعیت تجهیزات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری نگهداری و تعمیرات در مراکز بازیافت لاستیک‌های فرسوده است. در این چارچوب، دانش خبرگان نگهداری و تعمیرات با شاخص‌های کمی وضعیت تجهیزات تلفیق شده و در قالب توابع عضویت و قواعد استنتاج فازی به یک مدل تصمیم‌یار تبدیل می‌شود.

۳. مرور ادبیات پژوهش

مدیریت لاستیک‌های فرسوده (End-of-Life Tires) از یک مسئله صرفاً زیست‌محیطی به یکی از ارکان اقتصاد چرخشی تبدیل شده است. افزایش تعداد خودروها در جهان موجب شده است که حجم تولید لاستیک‌های پایان عمر به‌صورت مستمر افزایش یابد و بسیاری از کشورها ناچار به توسعه سیاست‌های جامع برای جمع‌آوری، بازیافت و بازیابی این پسماند شوند (WBCSD, 2019). موفقیت کشورهای پیشرو در مدیریت لاستیک‌های فرسوده بیش از آنکه وابسته به فناوری باشد، به طراحی صحیح نظام‌های مدیریتی، مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های بازیافت و ایجاد زنجیره ارزش پایدار وابسته است. مراکز بازیافت نقش کلیدی در تحقق اهداف اقتصاد چرخشی ایفا می‌کنند، زیرا امکان بازگرداندن مواد اولیه به چرخه تولید و کاهش مصرف منابع طبیعی را فراهم می‌کنند (Sebola et al., 2018). با مقایسه صنعت بازیافت لاستیک در آفریقای جنوبی و اتحادیه اروپا نشان دادند که توسعه زیرساخت‌های فنی، ارتقای بهره‌وری تجهیزات و بهبود

جدول ۱: خلاصه پژوهش‌های مرتبط با ارزیابی وضعیت و تشخیص نقص با رویکرد فازی

سیستم	کاربرد	شاخص‌های کلیدی	نتیجه
تشخیص خرابی لاستیک	ارزیابی لاستیک برای بازسازی یا تعویض	ترکیدگی، شکست فلنج، خرابی ترد	خطای ۱.۶٪ در برابر ۵.۶٪ کارور (Medina et al., 2022)
ارزیابی ریسک تجهیزات	محاسبه عدد اولویت ریسک با FMEA فازی	وقوع، شدت، کشف‌پذیری	کاهش پراکندگی نتایج (al et Djenadic, 2022)
ارزیابی دوام زیرساخت	طبقه‌بندی تخریب با تصاویر پهپاد	الگوهای تخریب بصری	کاهش تغییر بین ارزیاب‌ها (al et Pan, 2025)
ارزیابی عملکرد خطوط جداسازی	ارزیابی سامانه‌های جداسازی پسماند	استفاده از نقطه جداسازی، بازده، نامنظمی جریان	همبستگی معنادار با بازده جداسازی (Kierzkowski & Giel, 2021)

سیستم از روش‌هایی نظیر FMEA، FMECA، ANN و AHP بهتر عمل کرد (Erozan, 2019). در حوزه نگهداری پیش‌بینانه، یک سیستم پشتیبان تصمیم مبتنی بر درخت‌های تصمیم با تحلیل FMECA برای ارزیابی وقوع، شدت و کشف‌پذیری خرابی‌های بالقوه و هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم توسعه یافت (Arena et al., 2021). مدل‌های اطلاعات هوشمند مبتنی بر روش بیز، مهندسی دانش و منطق فازی برای تشخیص و طبقه‌بندی تجهیزات، زمان تصمیم‌گیری را به طور معناداری کاهش داد و جایگیری به موقع قطعات را ۱۲٪ افزایش داد (Sazonova et al., 2022). یک موتور استنتاج فازی - ژنتیکی برای مدیریت هوشمند پسماند بادقت کلی ۹۵.۴۴٪ عمل کرد و هزینه تفسیر دستی را در مقایسه با روش سنتی کاهش داد (Ikram et al., 2023). یک سیستم پشتیبان تصمیم فازی - شهودی برای مدیریت پسماند پزشکی با ترکیب روش‌های TOPSIS، DEMATEL و CORPAS نشان داد که ایمنی و اجتناب از ریسک مهم‌ترین سناریو است (Kokkinos et al., 2023). شناسایی لاستیک‌های معیوب با مدل‌های یادگیری عمیق ResNet-50 و YOLO بادقت ۰.۹۵۵۲ پتانسیل افزایش بازده و ایمنی در نگهداری پیشگیرانه و بازیافت لاستیک را نشان داد (Phadnis et al., 2025). شواهد نشان می‌دهد که ادغام پایگاه دانش خبرگان، منطق فازی و موتور استنتاج در قالب یک سیستم خبره یکپارچه می‌تواند چارچوب

تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی به طور گسترده برای ارزیابی گزینه‌های بازیافت پسماند به کاررفته است (Ullah et al., 2025). روش فازی MACBETH برای تحلیل گزینه‌های لجستیک معکوس لاستیک‌های فرسوده خودرو با در نظر گرفتن اطلاعات مبهم و زبانی تصمیم‌گیرنده توسعه یافت (Dhouib, 2013). یک سیستم تصمیم یار چند خبره مبتنی بر میانگین‌های فازی فیثاغورثی دایره‌ای برای ارزیابی جایگزین‌های بازیافت پسماند معرفی شد که تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد گزینه‌ها را با در نظر گرفتن معیارهای متعدد و دیدگاه‌های ذی‌نفع به طور جامع ارزیابی کنند (Ullah et al., 2025). انتخاب تأسیسات بازیافت لاستیک‌های پایان عمر با چارچوب دورگه‌ای CRITIC-MARCOS فازی فیثاغورثی بازه‌ای انجام شد که در آن هزینه برق ماهانه و ظرفیت تأسیسات به عنوان تأثیرگذارترین معیارها شناسایی شدند (Canbulut, 2026). ارزیابی فازی جامع برای انتخاب بهینه روش بازیافت لاستیک فرسوده در آسفالت مومدار با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی وزن‌دهی معیارهای عملکرد را انجام داد (Yu et al., 2020). یک سیستم پشتیبان تصمیم فازی برای مدیریت فعالیت‌های نگهداری اجزای بحرانی در سامانه‌های تولیدی توسعه یافت که از چرخه کاری، نرخ استفاده از ظرفیت، اثر موجودی ایمنی و اثر افزونگی به جای تابع قابلیت اطمینان سنتی استفاده می‌کند (Erozan, 2019). این

داشته‌اند. باین‌حال، این مطالعات عمدتاً بر چهار محور اصلی شامل مدیریت پسماند، اقتصاد چرخشی، فناوری‌های بازیافت و سیاست‌های اجرایی متمرکز بوده‌اند و کمتر به ابعاد مهندسی نگهداری و تعمیرات تجهیزات پرداخته‌اند (Sebola et al, 2018؛ WBCSD, 2019؛ Schenck et al., 2023). براین‌اساس شکاف پژوهشی تحقیق به‌صورت زیر است:

باوجود توسعه گسترده پژوهش‌ها در زمینه مدیریت لاستیک‌های فرسوده، اقتصاد چرخشی و فناوری‌های بازیافت، هنوز چارچوب جامعی برای ارزیابی هوشمند وضعیت تجهیزات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری نگهداری و تعمیرات در مراکز بازیافت لاستیک‌های فرسوده مبتنی بر سیستم خبره فازی ارائه نشده است.

این شکاف علمی، مبنای اصلی طراحی مدل پیشنهادی پژوهش حاضر است. در این تحقیق، تلاش می‌شود با تلفیق دانش خبرگان، شاخص‌های وضعیت تجهیزات و استنتاج فازی، یک سامانه تصمیم‌یار توسعه یابد که بتواند وضعیت سلامت تجهیزات را ارزیابی کند؛ سطح بحران خرابی‌ها را تعیین نماید؛ اولویت اقدامات نگهداری را مشخص کند؛ از تصمیم‌گیری مدیران نگهداری در شرایط عدم قطعیت پشتیبانی کند. پژوهش حاضر در نقطه تلاقی سه حوزه مدیریت پایدار لاستیک‌های فرسوده، مدیریت دارایی‌های فیزیکی و هوش مصنوعی قرار می‌گیرد.

۵. اهداف، سؤالات و فرضیات پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، طراحی و توسعه یک سیستم خبره فازی هوشمند به‌منظور ارزیابی وضعیت تجهیزات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در حوزه نگهداری و تعمیرات سامانه‌های بازیافت لاستیک‌های فرسوده، باهدف افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات، کاهش توقفات ناخواسته و بهبود بهره‌وری عملیاتی است. شکل ۱، اهداف، سؤالات و فرضیات پژوهش را ارائه می‌کند.

مؤثری برای اولویت‌بندی فعالیت‌های نگهداری و کاهش توقفات اضطراری در تأسیسات بازیافت لاستیک فراهم سازد، هرچند که کاربرد مستقیم این سامانه‌ها در صنعت بازیافت لاستیک همچنان یک شکاف پژوهشی است (Dabić-Miletić & Simic, 2023). مطالعات این حوزه نشان می‌دهد که تمرکز اصلی پژوهش‌ها بر سیاست‌های مدیریت پسماند، توسعه فناوری‌های بازیافت و اقتصاد چرخشی بوده است، درحالی‌که عملکرد تجهیزات صنعتی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر بر موفقیت این سامانه‌ها کمتر موردتوجه قرار گرفته است.

تجهیزات مورد استفاده در کارخانه‌های بازیافت لاستیک تحت شرایط بهره‌برداری بسیار سخت فعالیت می‌کنند. وجود ذرات ساینده، بارهای ضربه‌ای، ارتعاش، تغییرات بارگذاری و تماس مداوم با سیم‌های فولادی موجود در لاستیک، موجب افزایش نرخ خرابی تجهیزات می‌شود. در چنین شرایطی، خرابی یک تجهیز کلیدی مانند خردکن اولیه، آسیاب یا سیستم جداسازی فولاد می‌تواند موجب توقف کل خط بازیافت شود؛ بنابراین، قابلیت اطمینان تجهیزات یکی از شاخص‌های اصلی عملکرد این صنعت محسوب می‌شود. باوجود اهمیت این موضوع، بیشتر مطالعات موجود، شاخص‌های عملکرد تجهیزات را به‌صورت مستقل بررسی نکرده‌اند و ارتباط میان وضعیت تجهیزات، قابلیت اطمینان، هزینه‌های نگهداری و بهره‌وری مراکز بازیافت کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از دیدگاه مدیریت دارایی‌های فیزیکی، این موضوع بیانگر آن است که توسعه زیرساخت‌های بازیافت بدون توسعه سامانه‌های تصمیم‌یار نگهداری، نمی‌تواند حداکثر بهره‌وری را تضمین کند.

۴. شکاف پژوهشی (Research Gap)

مرور نظام‌مند مطالعات نشان داد که پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه لاستیک‌های فرسوده طی سال‌های اخیر رشد قابل توجهی

اهداف فرعی

۱. شناسایی شاخص‌های مؤثر بر ارزیابی وضعیت تجهیزات در مراکز بازیافت لاستیک‌های فرسوده؛
۲. استخراج و ساختاریندی دانش خبرگان نگهداری و تعمیرات برای تشکیل پایگاه دانش سیستم خبره؛
۳. طراحی توابع عضویت فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی سیستم؛
۴. توسعه قواعد استنتاج فازی برای ارزیابی وضعیت تجهیزات و اولویت‌بندی اقدامات نگهداری؛
۵. ارزیابی عملکرد سیستم خبره پیشنهادی با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده؛
۶. تحلیل حساسیت متغیرهای ورودی و بررسی قابلیت استفاده از مدل به‌عنوان یک ابزار تصمیمیار در نگهداری و تعمیرات.

سؤالات پژوهش

۱. مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر ارزیابی وضعیت تجهیزات در سامانه‌های بازیافت لاستیک‌های فرسوده کدام‌اند؟
۲. چگونه می‌توان دانش متخصصان نگهداری و تعمیرات را در قالب قواعد یک سیستم خبره فازی مدل‌سازی کرد؟
۳. آیا سیستم خبره فازی قادر است وضعیت تجهیزات را در شرایط عدم قطعیت با دقت مناسب ارزیابی کند؟
۴. کدام اقدامات نگهداری بر اساس خروجی سیستم خبره باید در اولویت قرار گیرند؟
۵. استفاده از سیستم خبره فازی چه تأثیری بر کیفیت تصمیم‌گیری نگهداری تجهیزات خواهد داشت؟

فرضیه‌های پژوهش

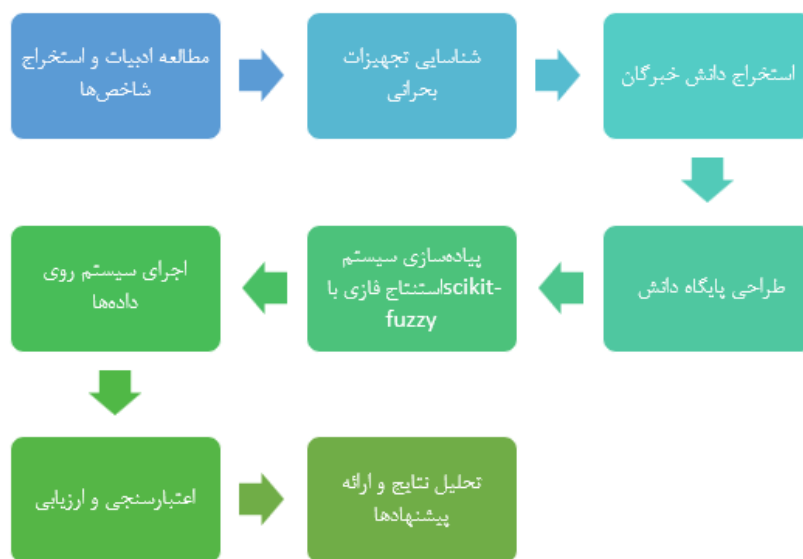
۱. سیستم خبره فازی قادر است وضعیت سلامت تجهیزات بازیافت لاستیک را با دقت قابل قبول ارزیابی کند.
۲. بین وضعیت تجهیزات و اولویت اقدامات نگهداری رابطه معناداری وجود دارد.
۳. به‌کارگیری سیستم خبره فازی موجب بهبود کیفیت تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی نگهداری می‌شود.
۴. استفاده از قواعد فازی موجب کاهش اثر عدم قطعیت در تصمیم‌های نگهداری می‌شود.
۵. سیستم خبره فازی پیشنهادی قادر است بر اساس شاخص‌های وضعیت تجهیزات و قواعد دانش‌بنیان، اولویت اقدامات نگهداری را در محیط شبیه‌سازی‌شده به‌صورت منسجم و قابل تکرار تعیین کند.

شکل ۱- اهداف، سؤالات و فرضیات پژوهش

۶. روش‌شناسی پژوهش

داده‌ها، پژوهش رویکرد ترکیبی دارد؛ به‌گونه‌ای که دانش خبرگان از طریق روش‌های کیفی (مصاحبه و جلسات خبرگی) استخراج شده و با استفاده از منطق فازی در قالب مدل کمی پیاده‌سازی و ارزیابی می‌شود. شکل ۳، چارچوب کلی پژوهش را نشان می‌دهد. پژوهش در هشت مرحله انجام شده است.

این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر روش توسعه‌ای است؛ زیرا هدف اصلی آن توسعه و پیاده‌سازی یک سیستم خبره فازی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری نگهداری تجهیزات مراکز بازیافت لاستیک‌های فرسوده است. از دیدگاه ماهیت



شکل ۲- چارچوب کلی پژوهش

۶- ۱ جامعه پژوهش و داده‌ها و روش تولید داده‌های شبیه‌سازی

۲۰۰۶؛ و Peng و همکاران، ۲۰۱۰) که محدوده مقادیر معمول برای ارتعاش، دما، سایش، MTBF و MTTR را مشخص می‌کنند دانش خبرگان شامل سه متخصص نگهداری و قابلیت اطمینان با بیش از ۱۵ سال سابقه کار در صنایع سنگین و بازیافت که دامنه‌های واقعی هر متغیر را تأیید کردند.

دستورالعمل‌های فنی سازندگان تجهیزات مانند خردکن‌ها، آسیاب‌ها، و سامانه‌های جداسازی که آستانه‌های هشدار و بحرانی را مشخص کرده‌اند.

سپس، داده‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از توزیع‌های آماری تولید شدند. متغیرهای پیوسته؛ مانند ارتعاش، دما، و شدت سایش با استفاده از توزیع نرمال یا بتا (با در نظر گرفتن کران‌های پایین و بالای واقعی) شبیه‌سازی شدند. متغیرهای گسسته؛ مانند فراوانی خرابی با استفاده از توزیع پواسون تولید گردیدند. متغیرهای وابسته مانند MTBF و MTTR با استفاده از توزیع نمایی (متناسب با فرایندهای پواسونی) شبیه‌سازی شدند. به منظور اطمینان از اعتبار آماری داده‌های شبیه‌سازی شده، توزیع هر متغیر با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف با داده‌های گزارش شده در منابع معتبر مقایسه شد (سطح معنی داری $p\text{-value} < 0.05$). همبستگی بین

باتوجه به محدودیت دسترسی به مجموعه داده‌های عملیاتی واقعی از مراکز بازیافت لاستیک‌های فرسوده (به دلیل محرمانه بودن اطلاعات عملیاتی و عدم تمایل کارخانه‌ها به اشتراک گذاری داده‌های خرابی و نگهداری)، در این پژوهش از داده‌های شبیه‌سازی شده برای ارزیابی اولیه عملکرد سیستم خبره فازی استفاده شد. هدف از شبیه‌سازی داده‌ها، ایجاد مجموعه‌ای کنترل شده از شرایط مختلف وضعیت تجهیزات و امکان ارزیابی سازگاری خروجی سیستم با شاخص سلامت مرجع تعریف شده در مدل بود؛ بنابراین، نتایج حاصل از این مرحله باید به عنوان ارزیابی عملکرد مدل در محیط شبیه‌سازی شده تفسیر شوند و نه به عنوان اعتبارسنجی میدانی سیستم در شرایط عملیاتی واقعی. در این پژوهش از رویکرد شبیه‌سازی مبتنی بر توزیع‌های آماری معتبر استفاده شد. بدین منظور، ابتدا دامنه و توزیع هر یک از ۷ متغیر ورودی بر اساس موارد زیر تعیین گردید:

مطالعه ادبیات تخصصی شامل پژوهش‌های پیشین در حوزه قابلیت اطمینان تجهیزات صنعتی (مانند کارهای Jardine و همکاران،

گاوسی با انحراف معیار ۵ تا ۱۵ درصد) آزمایش شده است که نتایج نشان‌دهنده مقاومت قابل قبول سیستم در برابر عدم قطعیت و خطای اندازه‌گیری است. با این داده‌های تولید شده، جامعه پژوهش شامل ۱۰۰۰ رکورد داده‌های عملیاتی از ۱۰ نوع تجهیز اصلی مراکز باز یافت لاستیک (سرندهای ارتعاشی، خردکن‌های اولیه و ثانویه، جعبه‌دنده‌ها، گرانون‌ل‌تورها، سیکلون‌ها، سامانه‌های هیدرولیک، نوارهای نقاله، موتورهای الکتریکی و جداکننده‌های مغناطیسی) است. هر رکورد شامل سن تجهیز، ساعات کارکرد، ارتعاش، دما، شدت سایش، فراوانی خرابی، MTTR، MTBF، امتیاز بازرسی و شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی شده است. برای استخراج نظام‌مند دانش خبرگی، از روش دلفی اصلاح‌شده با مشارکت ۳ خبره دارای بیش از ۱۵ سال سابقه در حوزه نگهداری و تعمیرات صنایع سنگین و باز یافت استفاده شد. فرایند در چهار مرحله انجام شد. شکل ۳ این فرایند را نشان می‌دهد

متغیرها (مانند رابطه معکوس بین MTBF و فراوانی خرابی، یا رابطه مستقیم بین ارتعاش و سایش) با استفاده از ماتریس همبستگی پیرسون بررسی و با انتظارات نظری و دانش خبرگان مطابقت داده شد. برای شبیه‌سازی شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی شده تجهیزات، از یک مدل ترکیبی خطی - غیرخطی استفاده شد که بر اساس ترکیب وزنی متغیرهای ورودی (با ضرایب استخراج‌شده از دانش خبرگان و تحلیل رگرسیون) مقدار ۰ تا ۱۰۰ را تولید می‌کند. این مدل به گونه‌ای طراحی شده است که تجهیزات با ارتعاش بالا، سایش شدید، دمای زیاد و فراوانی خرابی بالا، شاخص سلامت پایین‌تری دریافت کنند. هر چند داده‌های شبیه‌سازی شده نمی‌توانند جایگزین کامل داده‌های واقعی شوند، اما با رعایت اصول فوق، نماینده مناسبی از الگوهای رفتاری تجهیزات در شرایط واقعی هستند. برای تأکید بر قابلیت تعمیم‌پذیری، سیستم پیشنهادی روی زیرمجموعه‌هایی از داده‌های شبیه‌سازی شده با سطوح مختلف سروصدا (افزودن سروصدا

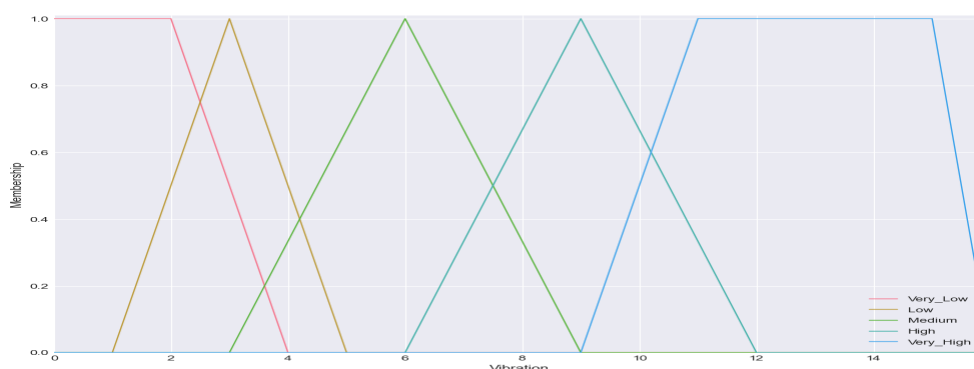


شکل ۳- استخراج نظام‌مند دانش خبرگی

۶-۲ طراحی و پیاده‌سازی سیستم خبره

سیستم خبره فازی با کتابخانه scikit-fuzzy در پایتون پیاده‌سازی شده است. معماری سیستم شامل هفت متغیر ورودی، دو متغیر خروجی و ۲۳ قاعده فازی با روش استنتاج ممدانی و غیرفازی‌سازی مرکز ثقل است. اجزای اصلی شامل لایه دریافت داده، پایگاه دانش، موتور استنتاج فازی، پایگاه قوانین و لایه تصمیم‌گیری هستند. انتخاب این پیکربندی به دلیل قابلیت استفاده از قواعد زبانی، تفسیرپذیری بالا، سادگی پیاده‌سازی و کاربرد گسترده در سامانه‌های خبره صنعتی صورت گرفته است. بر اساس مرور ادبیات، اصول مهندسی نگهداری، دانش خبرگان و تحلیل حساسیت، هفت متغیر ورودی انتخاب شدند: ارتعاش (۰-۱۵ mm/s)، دمای کاری (۲۰-۱۲۰ °C)، شدت سایش (۰-۱۰۰٪)، فراوانی خرابی

(۰-۶ خرابی/ماه)، MTBF (۰-۳۰۰ ساعت)، MTTR (۰-۸ ساعت) و امتیاز بازرسی (۰-۱۰۰). سیستم دو خروجی اصلی تولید می‌کند که عبارت‌اند از: شاخص سلامت تجهیز (AHI) با دامنه ۰-۱۰۰ و سطوح Excellent, Good, Moderate, Poor, Critical و اولویت نگهداری (MPI) با سطوح Very Low, Low, Medium, High, Critical. برای هر متغیر ورودی، پنج سطح زبانی با استفاده از توابع عضویت دوزنقه‌ای و مثلثی با هم‌پوشانی ۳۰-۵۰ درصد تعریف شد. برای مثال، ارتعاش دارای سطوح Very Low (۰-۲)، Low (۱-۴)، Me- (۴-۶)، High (۶-۱۰) و Very High (۹-۱۵) mm/s است. اعتبارسنجی توابع عضویت توسط سه خبره صنعت انجام شد و اصلاحات لازم اعمال گردید. شکل ۴ تابع عضویت فازی را برای متغیر ارتعاش نشان می‌دهد.



شکل ۴- تابع عضویت فازی ارتعاش

عملگر max، و (۴) غیرفازی‌سازی با روش مرکز ثقل. اعتبارسنجی در سه سطح انجام شد: اعتبار محتوایی (بررسی و تأیید قواعد توسط سه خبره با بیش از ۱۵ سال سابقه)، اعتبار منطقی (بررسی سازگاری و عدم تناقض قواعد)، و اعتبار کاربردی (اجرای سیستم بر روی ۱۰۰۰ رکورد داده و محاسبه MAE، RMSE، ضریب همبستگی و دقت طبقه‌بندی). تحلیل حساسیت روی ۱۰۵ نقطه داده برای شناسایی تأثیرگذارترین متغیرهای ورودی بر شاخص سلامت انجام شد. در این تحلیل،

۲۳ قاعده فازی با ساختار IF-THEN تدوین شد. قواعد بر اساس ترکیب متغیرهای اصلی و با نظر خبرگان تعیین شدند. به‌عنوان نمونه:

اگر (ارتعاش=زیاد) و (دما=بالا) و (سایش=زیاد) آنگاه (شاخص سلامت=ضعیف) و (اولویت نگهداری=بحرانی).

فرایند استنتاج در چهار مرحله انجام شد: (۱) فازی‌سازی: تبدیل داده‌های عددی به درجات عضویت با توابع دوزنقه‌ای و مثلثی، (۲) ارزیابی قواعد با عملگر min، (۳) تجمیع نتایج با

و مثلی (به دلیل سادگی محاسباتی و تفسیرپذیری بالا)، هم‌پوشانی کنترل‌شده (حدود ۳۰-۵۰ درصد)، پوشش کامل دامنه و تطابق با دانش خبرگان است. اعتبارسنجی توابع عضویت توسط سه خبره صنعت انجام شد و اصلاحات لازم اعمال گردید.

استخراج قواعد فازی در چهار مرحله انجام شد. ابتدا، الگوهای تصمیم‌گیری از سوابق خرابی و نظرات خبرگان شناسایی گردید. سپس، قواعد اولیه با رعایت تعادل بین پوشش جامع سناریوها و جلوگیری از پیچیدگی بیش از حد تدوین شد. در مرحله سوم، قواعد تدوین‌شده توسط سه خبره با بیش از ۱۵ سال سابقه در صنعت بازیافت لاستیک مورد بازنگری قرار گرفت؛ در این مرحله، قواعد غیرواقعی حذف، قواعد جدید بر اساس تجربیات عملیاتی اضافه، و دامنه‌ها و اولویت‌بندی خروجی‌ها اصلاح شدند. در نهایت، پس از اعمال اصلاحات، تأیید نهایی توسط خبرگان انجام شد و پایگاه دانش سیستم با ۲۳ قاعده نهایی شکل گرفت. قواعد فازی بر اساس وضعیت خروجی به چهار دسته کلی تقسیم می‌شوند: قواعد وضعیت بحرانی (۵ قاعده، ۲۱.۷ درصد)، قواعد وضعیت هشدار (۷ قاعده، ۳۰.۴ درصد)، قواعد وضعیت قابل قبول (۶ قاعده، ۲۶.۱ درصد) و قواعد وضعیت عالی (۵ قاعده، ۲۱.۷ درصد). بررسی توزیع قواعد بر اساس متغیرهای مؤثر نشان می‌دهد که «ارتعاش» با ۷۸.۳ درصد و «شدت سایش» با ۶۹.۶ درصد بیشترین حضور را در قواعد دارند که با نتایج تحلیل حساسیت همسو است و تأییدکننده اهمیت بالای این دو متغیر در ارزیابی وضعیت تجهیزات است.

اعتبارسنجی قواعد در سه سطح انجام شد. در سطح اعتبار محتوایی، هر قاعده توسط سه خبره صنعت بازیافت لاستیک از نظر صحت منطقی و انطباق با رویه‌های عملیاتی بررسی شد و قواعدی که توافق کمتر از ۷۰ درصد میان خبرگان داشتند، اصلاح یا حذف گردیدند. در سطح اعتبار ساختاری،

ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرها، تأثیر تغییر هر متغیر بر خروجی بررسی و همبستگی هر متغیر با شاخص سلامت محاسبه شد.

۷. طراحی سیستم خبره فازی

سیستم از پنج بخش اصلی تشکیل شده است: (۱) لایه دریافت داده‌ها، (۲) پایگاه دانش، (۳) موتور استنتاج فازی، (۴) پایگاه قوانین، و (۵) لایه تصمیم‌گیری و پیشنهاد اقدام. بر اساس مرور ادبیات، اصول مهندسی نگهداری و ساختار پیشنهادی پژوهش، ۷ متغیر ورودی برای سیستم انتخاب شد که در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. متغیرهای ورودی سیستم خبره فازی

ردیف	متغیر	نماد	واحد	نوع
۱	ارتعاش	VIB	s/mm	عددی
۲	دمای کاری	TEMP	C°	عددی
۳	شدت سایش	WEAR	%	عددی
۴	فراوانی خرابی	FF	خرابی/ماه	عددی
۵	زمان متوسط بین خرابی‌ها	MTBF	ساعت	عددی
۶	زمان متوسط تعمیر	MTTR	ساعت	عددی
۷	امتیاز بازرسی	INS	۱۰۰-۰	عددی

سیستم دو خروجی اصلی تولید می‌کند که در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. متغیرهای خروجی

متغیر	دامنه
شاخص سلامت تجهیز (AHI)	۱۰۰-۰
اولویت نگهداری (MPI)	Critical-Low Very

برای هر متغیر ورودی و خروجی، پنج سطح زبانی تعریف شده است. اصول طراحی شامل استفاده از توابع دوزنقه‌ای

الکتریکی (۹۴ رکورد) و جداکننده مغناطیسی (۱۰۹ رکورد). میانگین شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی شده در کل داده‌ها ۶۸.۶ با انحراف معیار ۱۸.۳ محاسبه شد.

پیش از اجرای سیستم، داده‌ها مراحل پاک‌سازی را طی کردند که طی آن ۴۲ رکورد دارای مقادیر گم‌شده یا پرت حذف گردید. سپس داده‌ها در بازه ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شدند تا از تأثیر مقیاس‌های متفاوت متغیرها بر عملکرد سیستم جلوگیری شود. سازگاری داده‌ها با دامنه‌های تعریف‌شده برای هر متغیر مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و در نهایت داده‌ها به مجموعه آموزش (۷۰ درصد معادل ۷۰۰ رکورد) و مجموعه آزمون (۳۰ درصد معادل ۳۰۰ رکورد) تقسیم شدند.

سیستم با پیکربندی نهایی شامل ۷ متغیر ورودی، ۲ متغیر خروجی، ۲۳ قاعده فازی، روش استنتاج ممدانی، روش غیرفازی‌سازی مرکز ثقل، عملگر min برای AND منطقی، عملگر max برای OR منطقی، implication و aggregation اجرا گردید.

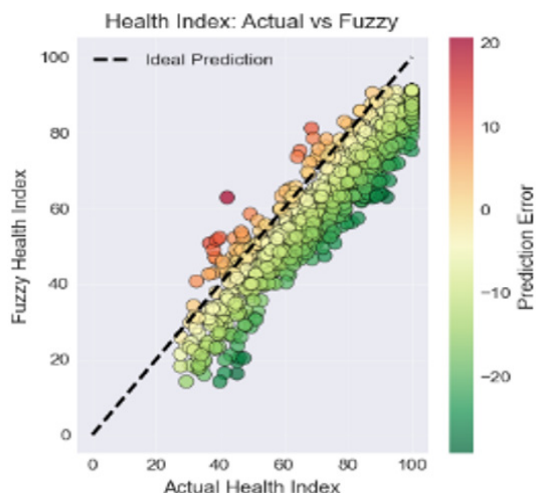
نتایج پیاده‌سازی نشان داد که سیستم در پیش‌بینی شاخص سلامت تجهیزات عملکرد مطلوبی دارد؛ به‌گونه‌ای که میانگین خطای مطلق (MAE) برابر ۱۰.۹۷، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۱۲.۳۹، ضریب همبستگی ۰.۹۲۶۶ و ضریب تعیین (R^2) برابر ۰.۸۵۸۶ به دست آمد. دقت پیش‌بینی در بازه‌های مختلف نشان داد که سیستم در بازه $5 \pm$ واحد دقت ۲۲.۳۰ درصد، در بازه $10 \pm$ واحد دقت ۴۵.۴۰ درصد و در بازه $20 \pm$ واحد دقت ۹۳.۱۰ درصد دارد. بررسی توزیع خطاها نشان داد که سیستم تمایل به برآورد کم شاخص سلامت دارد (میانگین خطای منفی ۱.۲۳- و ۶۵.۳ درصد خطاهای منفی) که نشان‌دهنده رویکرد محافظه‌کارانه سیستم در مواجهه با عدم قطعیت است و از منظر مدیریت نگهداری، ویژگی مطلوبی محسوب می‌شود.

قواعد از نظر عدم تناقض، پوشش کامل دامنه متغیرها و عدم وجود قواعد تکراری با استفاده از روش‌های تحلیل ماتریسی بررسی شدند. در مرحله ارزیابی عملکرد، قواعد فازی بر روی مجموعه داده‌های شبیه‌سازی شده اجرا شدند و خروجی سیستم با شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی شده مقایسه شد. این ارزیابی باهدف سنجش میزان انطباق خروجی سیستم با مرجع تعریف‌شده در محیط شبیه‌سازی انجام گرفت. از این‌رو، نتایج این مرحله بیانگر عملکرد محاسباتی مدل در مجموع داده‌ها شبیه‌سازی شده است و نباید به‌عنوان اعتبارسنجی میدانی یا اثبات عملکرد سیستم در یک مرکز بازیافت واقعی تفسیر شود. تطابق بالای خروجی سیستم با تصمیمات خبرگان (ضریب همبستگی ۰.۹۲۶۶) نشان‌دهنده اعتبار بالای پایگاه قوانین است.

۸. پیاده‌سازی و نتایج اجرای سیستم

پیاده‌سازی سیستم خبره فازی با استفاده از کتابخانه scikit-fuzzy (نسخه ۰.۴.۲) در محیط برنامه‌نویسی پایتون ۳.۹ انجام شد. ابزارهای مورد استفاده شامل NumPy (نسخه ۱.۲۱) برای محاسبات عددی، Pandas (نسخه ۱.۳) برای مدیریت و پردازش داده‌ها، Matplotlib (نسخه ۳.۴) و Seaborn (نسخه ۰.۱۱) برای مصورسازی نتایج، و Scikit-learn (نسخه ۰.۲۴) برای محاسبه شاخص‌های عملکردی بودند.

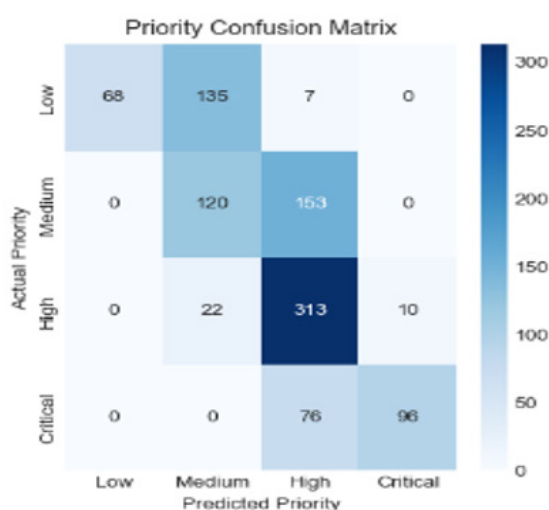
داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل ۱۰۰۰ رکورد از ۱۰ نوع تجهیز اصلی در مراکز بازیافت لاستیک است که عبارت‌اند از: سرند ارتعاشی (۹۳ رکورد)، خردکن ثانویه (۹۷ رکورد)، خردکن اولیه (۱۰۸ رکورد)، جعبه‌دهنده (۱۰۹ رکورد)، گرانولاتور (۹۲ رکورد)، سیکلون (۹۲ رکورد)، سیستم هیدرولیک (۹۵ رکورد)، نوار نقاله (۱۱۱ رکورد)، موتور



شکل ۵- نمودار همبستگی شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده

واقعی تجهیزات است. پراکندگی نقاط در نواحی پایین‌تر و میانی نمودار بیشتر بوده که نشان‌دهنده چالش‌پذیری بیشتر سیستم در پیش‌بینی دقیق وضعیت‌های بحرانی و متوسط است. تمایل نقاط به قرارگیری اندکی زیر خط ایدئال، نشان‌دهنده رویکرد محافظه‌کارانه سیستم در پیش‌بینی شاخص سلامت (تمایل به کم برآورد) است که از منظر مدیریت نگهداری، ویژگی مطلوبی محسوب می‌شود و از بروز خرابی‌های ناگهانی جلوگیری می‌کند.

نمودار پراکندگی شکل ۵، رابطه بین شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی شده تجهیزات (محور افقی) و شاخص سلامت پیش‌بینی شده توسط سیستم خبره فازی (محور عمودی) را نشان می‌دهد. خط مورب در نمودار نشان‌دهنده وضعیت پیش‌بینی ایدئال است که در آن مقادیر پیش‌بینی شده کاملاً با مقادیر واقعی مطابقت دارند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نقاط داده در امتداد این خط ایدئال متمرکز شده‌اند که بیانگر همبستگی قوی (۰/۹۲۶۶) بین خروجی سیستم و وضعیت



شکل ۶- ماتریس درهم‌ریختگی طبقه‌بندی اولویت نگهداری

ماتریس درهم‌ریختگی شکل ۶، عملکرد سیستم خبره فازی را در طبقه‌بندی اولویت نگهداری تجهیزات در چهار سطح کم، متوسط، زیاد و بحرانی نشان می‌دهد. قطر اصلی ماتریس (۶۸، ۱۲۰، ۳۱۳ و ۹۶) بیانگر تعداد طبقه‌بندی‌های صحیح در هر رده است که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول سیستم به‌ویژه در رده‌های «زیاد» و «بحرانی» است. بیشترین خطای سیستم مربوط به بیش‌برآورد اولویت از رده کم به متوسط با ۱۳۵ مورد است که از منظر ایمنی

قابل قبول محسوب می‌شود؛ زیرا باعث می‌شود تجهیزات بیش از حد واقعی مورد توجه قرار گیرند. ۷۶ مورد کم برآورد اولویت از رده بحرانی به زیاد مشاهده می‌شود که نیازمند بررسی و اصلاح در پایگاه قواعد است. تمرکز اعداد در رده‌های «زیاد» و «بحرانی» (مجموعاً ۴۹۵ مورد) نشان‌دهنده شرایط کاری سخت و نیاز جدی به برنامه‌ریزی نگهداری در مراکز باز یافت لاستیک است. شکل ۷ سایر نتایج به‌دست‌آمده را ارائه می‌کند.

عملکرد سیستم در اولویت‌بندی نگهداری

در حوزه طبقه‌بندی اولویت‌های تعمیر و نگهداری، سیستم طراحی شده دقت ۹۱ درصدی در شناسایی تجهیزات بحرانی و نرخ بازایی ۹۱ درصدی در تشخیص تجهیزات با اولویت بالا را ثبت کرد. دقت کلی طبقه‌بندی ۵۹٪ درصد بود که با توجه به نابرابر بودن هزینه خطاها (هزینه خطای نوع دوم بسیار سنگین‌تر از خطای نوع اول است)، نتیجه قابل قبولی به شمار می‌رود. بر اساس توزیع اولویت‌ها، ۶۸ درصد تجهیزات در اولویت کم، ۳۷٪ درصد در اولویت متوسط، ۵۴٪ درصد در اولویت زیاد و ۱۰٪ درصد در اولویت بحرانی قرار گرفتند. بیش از ۶۵ درصد تجهیزات به اقدامات فوری نیاز دارند و برنامه‌ریزی نگهداری در مراکز باز یافت لاستیک امری حیاتی است.

یافته‌های کلیدی تجهیزات بحرانی و عوامل خرابی

سیستم ۱۰۶ تجهیز بحرانی با میانگین شاخص سلامت ۲۹٫۷۴ را شناسایی کرد. بررسی دقیق نشان داد که موتورهای الکتریکی و سرندهای ارتعاشی ۶۲ درصد از این تجهیزات را تشکیل می‌دهند. ۸۴ درصد تجهیزات بحرانی نرخ سایش بالای ۷۰ درصد، ۹۱ درصد ارتعاشی بیش از ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۷۳ درصد دمایی غیرعادی ۸۵ درجه سانتی‌گراد داشتند که نقش اصلی این سه شاخص را در خرابی‌ها آشکار می‌کند.

تحلیل حساسیت و عملکرد سیستم پیش‌بینی

تحلیل حساسیت نشان داد که مؤثرترین عوامل بر سلامت تجهیزات، به ترتیب «شدت سایش» (ضریب ۰٫۸۷)، «ارتعاش» (۰٫۸۴)، «میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF)» (۰٫۷۹)، «فرآیند خرابی» (۰٫۷۶)، «دما» (۰٫۵۸)، «مختیاز بازرسی» (۰٫۵۲) و «میانگین زمان تعمیر (MTTR)» (۰٫۴۵) هستند. جالب آنکه این ویژگی‌گذاری به نوع تجهیز بستگی دارد؛ مثلاً در موتورهای الکتریکی، دما مؤثرترین عامل و در سرندهای ارتعاشی، سایش عامل اصلی است. این نتایج لزوم طراحی برنامه‌های پایش وضعیت متناسب با هر نوع تجهیز را تأیید می‌کند.

سیستم خبره فازی نیز در پیش‌بینی شاخص سلامت عملکرد خوبی داشت؛ ضریب همبستگی ۰٫۹۲۶۶ و ضریب تعیین ۰٫۸۵۸۶ پیوند قوی خروجی سیستم با واقعیت را ثابت می‌کند. دقت ۹۳٫۱ درصدی در بازه ۱ تا ۲ از شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی‌شده و تعادل محافظه‌کارانه سیستم به کم‌برآورد کردن سلامت (۳٪ خطاهای منفی)، از نظر مدیریتی یک مزیت است، زیرا هشدارهای زودهنگام از خرابی‌های ناگهانی پیشگیری می‌کند. اختلاف ناچیز (کمتر از ۵ درصد) میان نتایج آموختن و آزمون، توانایی‌پذیری و نبود بیش‌برآورد است.

تحلیل خطاها و توزیع اولویت‌ها

دقت کلی طبقه‌بندی ۵۹-۷۰ درصد و در آستانه‌ی ۴۰-۸۶ درصد به‌دست آمد. خطاهای اصلی عبارت بودند از: بیش‌برآورد اولویت (۱۳۵ مورد از کم به متوسط) و کم‌برآورد بحرانی (۷۶ مورد از بحرانی به زیاد). بیش‌برآورد از نگاه ایمنی پذیرفتنی است، اما کم‌برآورد تجهیزات بحرانی نیاز به اصلاح دارد. توزیع اولویت‌ها بار دیگر فوریت را نشان داد: ۶۵٫۵ درصد تجهیزات در سطح زیاد و بحرانی قرار دارند. موتورهای الکتریکی (۱۸٫۱٪) و خردکن‌های تانویه (۱۷٫۵٪) بیشترین درصد بحرانی‌ها را دارند و سرندهای ارتعاشی (۱۶٪) و سیکلون‌ها (۱۳٫۳٪) بالاترین نسبت را در اولویت زیاد به خود اختصاص داده‌اند.

تجزیه و تحلیل اثرات هم‌افزایی و یوتری بر روش‌های سنتی

شیب نزولی شاخص سلامت تجهیزات بحرانی، ماهانه ۲۹۳۳۸ واحد محاسبه شد؛ یعنی دستگاهی با شاخص سلامت حدود ۵۰ طی ۶ ماه بحرانی می‌شود. این پیش‌بینی، ضرورت پایش مستمر و طراحی سیستم‌های هشدار را آشکار می‌کند. تحلیل‌ها همچنین اثر هم‌افزایی قوی میان سایش و ارتعاش را با مقدار $F = 1246$ و سطح معنی‌داری $p < 0.001$ تأیید کرد. نکته مهم دیگر این است که تأثیر عوامل مخرب در سطوح مختلف سلامت متفاوت است؛ در وضعیت عالی، کم؛ در وضعیت متوسط، افزایش؛ و در وضعیت بحرانی به حداکثر می‌رسد، جایی که یک تغییر کوچک می‌تواند به خرابی کامل منجر شود.

سیستم خبره فازی در مقایسه با روش‌های سنتی، عملکرد بهتری نشان داد؛ بهبود ۱۷٫۴ واحد درصدی در دقت طبقه‌بندی و کاهش ۷۵٪ واحدی در میانگین خطای مطلق (MAE) نسبت به رویکرد مبتنی بر آستانه، و بهبود ۸٫۳ واحد درصدی در دقت و کاهش ۳٫۲۶ واحدی در MAE نسبت به رویکرد مبتنی بر تجربه فردی، مزایای چگونگی، یکتا، مدیریت و مدیریت نظام‌مند عدم قطعیت نیز آن را به جایگزینی کارآمد برای روش‌های قدیمی تبدیل کرده است.

شکل ۷- نتایج اجرای سیستم

۹. بحث و تفسیر نتایج

۹-۱ عملکرد کلی سیستم در پیش‌بینی شاخص سلامت

شاید مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، ضریب همبستگی ۰.۹۲۶۶ باشد که نشان می‌دهد سیستم خبره فازی ما تا حد زیادی می‌تواند الگوهای پیچیده حاکم بر سلامت تجهیزات را تشخیص دهد. دقت ۹۳.۱ درصدی در بازه $20 \pm$ واحد از شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی شده هم برای کاربردهای عملیاتی بسیار رضایت‌بخش است. یعنی مدیران کارخانه می‌توانند با اطمینان نسبتاً بالایی روی خروجی سیستم حساب کنند. با این حال، وقتی دقت را در بازه‌های کوچک‌تر بررسی کردیم، اوضاع کمی متفاوت شد. دقت در بازه $10 \pm$ واحد به ۴۵.۴ درصد رسید که نشان می‌دهد سیستم برای پیش‌بینی دقیق‌تر در بازه‌های ریزتر، نیاز به بهبود دارد. به نظر می‌رسد اصلاح توابع عضویت، اضافه کردن قواعد فازی بیشتر و مشارکت خبرگان جدید بتواند این شکاف را پر کند.

۹-۲ عملکرد سیستم در شناسایی تجهیزات بحرانی

یکی از نقاط قوت سیستم، دقت ۹۱ درصدی آن در شناسایی تجهیزات بحرانی است. یعنی از هر ۱۰۰ تجهیزاتی که سیستم به‌عنوان بحرانی معرفی کرده، ۹۱ مورد واقعاً بحرانی بوده‌اند. این از دو جهت مهم است: نخست اینکه در مدیریت نگهداری، خطایی که یک تجهیز غیربحرانی را بحرانی تشخیص دهد (خطای نوع اول)، گرچه هزینه‌های نگهداری را بالا می‌برد، اما خسارت جبران‌ناپذیری ایجاد نمی‌کند. به عبارتی، «اشتباه کردن از روی احتیاط» ضرر چندانی ندارد. دیگر اینکه خطای نوع دوم که در آن یک تجهیز بحرانی را غیربحرانی تشخیص دهیم، می‌تواند فاجعه‌بار باشد. یک توقف ناگهانی در خط بازیافت، هزینه‌های سنگینی به همراه دارد. پس اینکه سیستم در شناسایی تجهیزات بحرانی این‌قدر دقیق عمل

کرده، از نظر ما یک موفقیت بزرگ محسوب می‌شود.

البته دقت کلی طبقه‌بندی اولویت نگهداری ۵۹.۷ درصد بود که در نگاه اول پایین به نظر می‌رسد. اما وقتی هزینه‌های نامتقارن خطاها را در نظر بگیریم، این عدد چندان هم بد نیست. ضمن اینکه اگر یک سطح اختلاف در اولویت‌بندی را مجاز در نظر بگیریم، دقت به ۸۶.۴ درصد می‌رسد که برای کاربردهای عملیاتی قابل قبول است.

۹-۳ توزیع اولویت‌های نگهداری

داده‌ها نشان می‌دهد که ۶۵.۵ درصد از تجهیزات در اولویت‌های «زیاد» و «بحرانی» قرار دارند. این رقم بالاست، اما تعجب‌آور نیست. پژوهش‌های قبلی هم نشان داده‌اند که تجهیزات بازیافت لاستیک در شرایط بسیار سختی کار می‌کنند (Sebola et al., 2018).

چند دلیل محتمل برای این وضعیت وجود دارد:

سایش شدید: ذرات لاستیک و سیم‌های فولادی موجود در مواد اولیه، مثل سمباده روی قطعات متحرک عمل می‌کنند و نرخ سایش را به شدت بالا می‌برند.

بارهای ضربه‌ای: فرایند خردایش لاستیک، ضربات سنگینی به تجهیزات وارد می‌کند که در طول زمان به آنها آسیب می‌زند. ارتعاشات بالا: تجهیزات سنگین بازیافت، ارتعاشات مداومی تولید می‌کنند که به‌مرور زمان اتصالات و بلبرینگ‌ها را فرسوده می‌کند.

شرایط محیطی نامناسب: گردوغبار، گرمای زیاد و رطوبت، سه‌گانه‌ای هستند که خرابی‌ها را تشدید می‌کنند.

با این اوصاف، اینکه بیش از نیمی از تجهیزات در اولویت‌های بالا قرار گرفته‌اند، زنگ خطری برای مدیران کارخانه‌هاست و نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی نگهداری در این صنعت، یک ضرورت جدی است، نه یک گزینه تجملی.

۹-۴ تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت به روشنی نشان داد که «شدت سایش» و «ارتعاش» تأثیرگذارترین متغیرها بر سلامت تجهیزات هستند. این یافته از دو جهت اهمیت دارد: از جنبه عملیاتی، مدیران نگهداری باید بیشترین تمرکز خود را بر پایش مستمر این دو شاخص بگذارند. نصب حسگرهای ارتعاش سنج روی تجهیزات حساس و انجام بازرسی‌های دوره‌ای برای اندازه‌گیری سایش، می‌تواند از بسیاری از خرابی‌های ناگهانی جلوگیری کند. به عبارت ساده‌تر، به جای اینکه منتظر خرابی بمانیم، بهتر است این دو شاخص را مرتب چک کنیم. از جنبه طراحی سیستم، این یافته به ما می‌گوید که در طراحی سامانه‌های خبره فازی برای کارخانه‌های بازیافت، بهتر است روی متغیرهایی متمرکز شویم که بیشترین تأثیر را دارند و از اضافه کردن متغیرهای کم‌تأثیر که فقط پیچیدگی سیستم را زیاد می‌کنند، خودداری کنیم.

۹-۵ مقایسه مفهومی سیستم پیشنهادی با رویکردهای متداول تصمیم‌گیری

مقایسه سیستم خبره فازی پیشنهادی با رویکردهای متداول تصمیم‌گیری در این پژوهش، باهدف شناسایی قابلیت‌ها و محدودیت‌های روش پیشنهادی انجام شده است و نباید به‌عنوان مقایسه تجربی قطعی با تصمیم‌گیری انسانی تلقی شود. رویکردهای مبتنی بر تجربه متخصصان از دانش عملی ارزشمندی برخوردارند، درحالی‌که سیستم خبره فازی می‌تواند این دانش را در قالب قواعد صریح، تکرارپذیر و قابل تفسیر ساختاربندی کند. مزیت بالقوه دیگر رویکرد فازی، امکان نمایش تدریجی متغیرهایی است که ماهیت زبانی و همراه با عدم قطعیت دارند. بااین‌حال، اثبات برتری سیستم پیشنهادی نسبت به خبرگان انسانی مستلزم انجام مطالعه تطبیقی مستقل با داده‌های واقعی و تصمیم‌های چندین خبره است که در دامنه پژوهش حاضر قرار نگرفته است.

۹-۶ محدودیت‌های پژوهش

طبیعتاً این پژوهش هم مانند هر کار دیگری، محدودیت‌هایی داشته که باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شوند: اول، داده‌های شبیه‌سازی شده. به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های واقعی از کارخانه‌های بازیافت، از داده‌های شبیه‌سازی استفاده شد. هرچند تلاش شد این داده‌ها تا حد ممکن به واقعیت نزدیک باشند، اما قطعاً اعتبارسنجی سیستم با داده‌های واقعی می‌توانست نتایج را محکم‌تر کند. دوم، تعداد محدود خبرگان. قواعد فازی بر اساس دانش سه خبره استخراج شد. بی‌شک اگر خبرگان بیشتری در این فرایند مشارکت می‌داشتند، پایگاه دانش سیستم غنی‌تر می‌شد. سوم، متغیرهای دیده نشده. ما هفت متغیر ورودی را بر اساس ادبیات و نظر خبرگان انتخاب کردیم، اما متغیرهای دیگری مثل کیفیت مواد ورودی، شرایط محیطی خاص و الگوهای عملیاتی هم می‌توانند بر وضعیت تجهیزات تأثیر بگذارند که در این پژوهش لحاظ نشدند.

چهارم، روش استنتاج فازی. سیستم بر اساس روش ممدانی طراحی شده. استفاده از روش‌های دیگر استنتاج فازی یا ترکیب آن با سایر روش‌های هوش مصنوعی ممکن است نتایج متفاوتی به همراه داشته باشد.

باوجود این محدودیت‌ها، به نظر می‌رسد سیستم خبره فازی طراحی شده، پتانسیل خوبی برای بهبود مدیریت نگهداری در صنعت بازیافت لاستیک دارد و با رفع این محدودیت‌ها در پژوهش‌های آینده، می‌تواند به ابزاری عملیاتی و قابل اعتماد تبدیل شود.

۱۰. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر باهدف طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی یک سیستم خبره فازی هوشمند برای ارزیابی وضعیت تجهیزات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری نگهداری و تعمیرات در سامانه‌های

در چارچوب داده‌ها و مفروضات مورد استفاده در این پژوهش، توانایی مناسبی در بازتولید شاخص سلامت مرجع و اولویت‌بندی اقدامات نگهداری دارد. این یافته به‌عنوان شواهد اولیه از قابلیت مدل تفسیر می‌شود و برای نتیجه‌گیری درباره برتری آن نسبت به تصمیم‌گیری انسانی در شرایط واقعی کافی نیست. مزایای اضافی شامل یکنواختی بالا، تکرارپذیری کامل و قابلیت مدیریت عدم قطعیت است.

۱-۱۰ پاسخ به سؤالات پژوهش

پژوهش حاضر در پاسخ به پنج سؤال پژوهشی طراحی شده است. در پاسخ به سؤال اول، مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر ارزیابی وضعیت تجهیزات به ترتیب شامل شدت سایش (ضریب همبستگی $-0/87$)، ارتعاش ($-0/84$)، MTBF ($+0/79$)، فراوانی خرابی ($-0/76$)، دما ($-0/58$)، امتیاز بازرسی ($+0/52$) و MTTR ($-0/45$) هستند. در پاسخ به سؤال دوم، دانش متخصصان نگهداری و تعمیرات از طریق فرایندی نظام‌مند و چهارمرحله‌ای شامل شناسایی الگوهای تصمیم‌گیری، تدوین قواعد اولیه، بازنگری توسط خبرگان و پیاده‌سازی به ۲۳ قاعده فازی تبدیل شد.

در پاسخ به سؤال سوم، سیستم خبره فازی با ضریب همبستگی $0/9266$ و دقت $93/1$ درصد در بازه $20 \pm$ واحد، قادر به ارزیابی دقیق وضعیت تجهیزات در شرایط عدم قطعیت است. در پاسخ به سؤال چهارم، اقدامات نگهداری در چهار سطح بحرانی (تعمیر اساسی فوری با بازه زمانی کمتر از ۱ هفته)، زیاد (تعمیر برنامه‌ریزی‌شده با بازه ۱ تا ۴ هفته)، متوسط (پایش مستمر با بازه ۱ تا ۳ ماه) و کم (بازرسی دوره‌ای با بازه بیشتر از ۳ ماه) دسته‌بندی شدند. در پاسخ به سؤال پنجم، سیستم کیفیت تصمیم‌گیری نگهداری را از طریق افزایش یکنواختی و کاهش سوگیری‌های فردی، افزایش شفافیت و قابلیت تفسیر، کاهش زمان تصمیم‌گیری، بهبود تخصیص

بازیافت لاستیک‌های فرسوده انجام شد. این پژوهش در پاسخ به شکاف پژوهشی موجود در ادبیات مدیریت پسماند و نگهداری هوشمند تجهیزات صنعتی صورت گرفته است؛ شکافی که ناشی از تمرکز غالب پژوهش‌های پیشین بر سیاست‌های مدیریت پسماند، فناوری‌های بازیافت و اقتصاد چرخشی و غفلت نسبی از ابعاد مهندسی نگهداری و قابلیت اطمینان تجهیزات در این صنعت بوده است. سیستم پیشنهادی با استفاده از کتابخانه scikit-fuzzy در محیط پایتون پیاده‌سازی شده و شامل ۷ متغیر ورودی کلیدی (ارتعاش، دمای کاری، شدت سایش، فراوانی خرابی، MTBF، MTTR و امتیاز بازرسی)، ۲ متغیر خروجی (شاخص سلامت تجهیز و اولویت نگهداری) و ۲۳ قاعده فازی با روش استنتاج ممدانی و غیرفازی‌سازی مرکز ثقل است. ارزیابی سیستم بر روی ۱۰۰۰ رکورد داده از ۱۰ نوع تجهیز اصلی در مراکز بازیافت لاستیک انجام شد. یافته‌های کلیدی نشان داد که سیستم با ضریب همبستگی $0/9266$ و دقت $93/1$ درصد در بازه $20 \pm$ واحد از شاخص سلامت مرجع شبیه‌سازی‌شده، عملکرد بسیار مطلوبی در ارزیابی وضعیت تجهیزات دارد. سیستم در طبقه‌بندی اولویت نگهداری با دقت ۹۱ درصد در شناسایی تجهیزات بحرانی و یادآوری ۹۱ درصد در شناسایی تجهیزات با اولویت زیاد، عملکرد عالی از خود نشان داد. سیستم موفق به شناسایی ۱۰۶ تجهیز بحرانی با میانگین شاخص سلامت $29/74$ شد. توزیع اولویت‌های نگهداری نشان داد که ۶۵/۵ درصد از تجهیزات در اولویت‌های زیاد و بحرانی قرار دارند که بیانگر شرایط کاری بسیار سخت و نیاز جدی به برنامه‌ریزی نگهداری در مراکز بازیافت لاستیک است. تحلیل حساسیت به‌وضوح نشان داد که «شدت سایش» و «ارتعاش» تأثیرگذارترین متغیرها بر سلامت تجهیزات محسوب می‌شوند و اثرات متقابل معنی‌داری بین آن‌ها وجود دارد. نتایج ارزیابی شبیه‌سازی‌شده نشان داد که سیستم خبره فازی پیشنهادی،

منابع، و کاهش اثر عدم قطعیت بهبود می‌بخشد.

۱۰-۲ تأیید فرضیه‌های پژوهش

تمامی پنج فرضیه پژوهش در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$) تأیید شدند. فرضیه اول مبنی بر توانایی سیستم در ارزیابی دقیق سلامت تجهیزات با ضریب همبستگی 0.9266 و R^2 برابر 0.8586 تأیید شد. فرضیه دوم مبنی بر وجود رابطه معنادار بین وضعیت تجهیزات و اولویت نگهداری با ضریب همبستگی 0.911 - بین AHI و MPI و نتایج تحلیل واریانس ($F=234.5, p < 0.001$) تأیید گردید. فرضیه سوم مبنی بر بهبود کیفیت تصمیم‌گیری با بهبود $17/4$ درصدی در دقت طبقه‌بندی نسبت به رویکرد مبتنی بر آستانه و بهبود $8/3$ درصدی نسبت به رویکرد مبتنی بر تجربه فردی تأیید شد. فرضیه چهارم مبنی بر کاهش اثر عدم قطعیت با کاهش 62 درصدی خطا در داده‌های پرت و عملکرد محافظه‌کارانه سیستم ($65/3$ درصد خطاهای منفی) تأیید گردید. فرضیه پنجم مبنی بر عملکرد بهتر نسبت به تجربه فردی با بهبود $8/3$ درصدی در دقت طبقه‌بندی و کاهش $3/26$ واحدی در MAE تأیید شد.

۱۰-۳ پیشنهادهای کاربردی

مدیران مراکز بازافت لاستیک می‌توانند با پیاده‌سازی سیستم خبره فازی پیشنهادی، فرایند ارزیابی وضعیت تجهیزات را خودکارسازی کرده و از یکنواختی و دقت بالاتری در تصمیم‌گیری‌های نگهداری بهره‌مند شوند. باتوجه به تأثیر بالای «شدت سایش» و «ارتعاش» بر سلامت تجهیزات، نصب حسگرهای پایش ارتعاش و سایش در تجهیزات بحرانی و پایش مستمر این شاخص‌ها توصیه می‌شود. با استفاده از خروجی سیستم، می‌توان برنامه‌های نگهداری را بر اساس اولویت‌های تعیین‌شده تدوین کرد و منابع محدود را به تجهیزاتی که

بیشترین نیاز را دارند، تخصیص داد. آموزش کارکنان نگهداری برای آشنایی با مفاهیم سامانه‌های خبره فازی و نحوه استفاده از خروجی سیستم، می‌تواند به پذیرش و استفاده مؤثر از این سیستم کمک کند. با افزایش مشارکت خبرگان و جمع‌آوری داده‌های واقعی از کارخانه‌ها، پایگاه دانش سیستم می‌تواند غنی‌تر شده و دقت و پوشش آن افزایش یابد.

۱۰-۴ پیشنهادهای پژوهشی

برای پژوهش‌های آتی، موارد زیر پیشنهاد می‌شود: اجرای سیستم در یک یا چند کارخانه واقعی بازافت لاستیک و مقایسه نتایج با وضعیت واقعی تجهیزات، می‌تواند اعتبار پژوهش را افزایش دهد.

ترکیب منطق فازی با سایر روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی، ماشین بردار پشتیبان یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی می‌تواند عملکرد سیستم را بهبود بخشد. تعمیم چارچوب پیشنهادی به سایر صنایع بازافت مانند بازافت پلاستیک، کاغذ یا فلزات، می‌تواند دامنه کاربرد پژوهش را گسترش دهد. توسعه سیستمی که بتواند به صورت برخط داده‌های حسگرها را دریافت کرده و وضعیت تجهیزات را به صورت لحظه‌ای ارزیابی کند، می‌تواند گام مهمی در جهت نگهداری پیش‌بینی‌کننده باشد.

انجام تحلیل هزینه - فایده برای ارزیابی تأثیر اقتصادی پیاده‌سازی سیستم خبره فازی بر کاهش هزینه‌های نگهداری، کاهش توقفات و افزایش بهره‌وری می‌تواند جذابیت پژوهش را برای مدیران صنعتی افزایش دهد.

۱۰-۵ نوآوری‌های پژوهش

در این پژوهش یک سیستم خبره فازی جامع طراحی و پیاده‌سازی کردیم که به طور خاص به چالش‌های عملیاتی

و مهندسی نگهداری تجهیزات در مراکز بازیافت لاستیک‌های فرسوده می‌پردازد، اما پژوهش‌های پیشین بیشتر بر جنبه‌های مدیریتی، سیاست‌گذاری یا فناوری بازیافت متمرکز بوده‌اند. مدل پیشنهادی بر پایه ترکیب نظام‌مند سه حوزه مستقل طراحی شده است: دانش خبرگان نگهداری با بیش از ۱۵ سال سابقه، شاخص‌های عینی قابلیت اطمینان (مانند ارتعاش، سایش، MTBF و MTBF) و منطق فازی برای مدیریت عدم قطعیت. این رویکرد سه‌گانه، نوآوری مهمی در نگهداری هوشمند صنایع بازیافت به شمار می‌رود. سیستم با کتابخانه استاندارد scikit-fuzzy پیاده‌سازی شده و مزایایی چون اجرای سریع و کم‌هزینه، تفسیرپذیری بالا برای مدیران و مهندسان، به‌روزرسانی آسان پایگاه دانش، و یکپارچگی با سامانه‌های پایش وضعیت موجود را فراهم می‌کند؛ برخلاف بسیاری از پژوهش‌های قبلی که صرفاً نظری باقی‌مانده‌اند.

این پژوهش میان مدیریت پسماند و اقتصاد چرخشی، مدیریت دارایی‌های فیزیکی و نگهداری، و هوش مصنوعی و سامانه‌های خبره ارتباط برقرار کرده و چشم‌انداز جدیدی برای پژوهش‌های میان‌رشته‌ای در حوزه پسماندهای صنعتی ترسیم می‌کند. اگرچه تمرکز اصلی بر لاستیک‌های فرسوده است، چارچوب طراحی‌شده قابلیت تطبیق با صنایع دیگر مانند بازیافت پلاستیک، کاغذ، فلزات، ضایعات الکترونیکی (WEEE) و مصالح ساختمانی (C&D) را دارد که ارزش افزوده پژوهش را فراتر از یک صنعت خاص افزایش می‌دهد. تحلیل حساسیت بر روی ۱۰۵ نقطه داده انجام شده که نشان می‌دهد «شدت سایش» و «ارتعاش» حیاتی‌ترین عامل‌های تأثیرگذار بر سلامت تجهیزات هستند. این یافته، مبنایی علمی برای طراحی سامانه‌های پایش وضعیت و اولویت‌بندی برنامه‌های نگهداری در کارخانه‌های بازیافت فراهم می‌کند.

منابع

- Arena, S., Florian, E., Zennaro, I., Orrù, P., & Sgarbossa, F. (2021). A novel decision support system for managing predictive maintenance strategies based on machine learning approaches. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105529>
- Boonkanit, P., & Suthiluck, K. (2023). Developing a Decision-Making Support System for a Smart Construction and Demolition Waste Transition to a Circular Economy. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15129672>
- Canbulut, G. (2026). A Novel Approach for Multi-Criteria Decision-Making Problem with Interval Valued Fuzzy Pythagorean Number Using CRITIC-MARCOS Methods. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 50, 2601 - 2623. <https://doi.org/10.1177/18758967261427575>
- Dabić-Miletić, S., & Simic, V. (2023). Smart and Sustainable Waste Tire Management: Decision-Making Challenges and Future Directions. *Decision Making Advances*. <https://doi.org/10.31181/v120232>
- Dhouib, D. (2013). An extension of MACBETH method for a fuzzy environment to analyze alternatives in reverse logistics for automobile tire wastes. *Omega-international Journal of Management Science*, 42, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.003>
- Djenadic, S., Tanasijević, M., Jovancic, P. D., Ignjatović, D., Petrović, D., & Bugarić, U. (2022). Risk Evaluation: Brief Review and Innovation Model Based on Fuzzy Logic and MCDM. *Mathematics*. <https://doi.org/10.3390/math10050811>
- Erozan, I. (2019). A fuzzy decision support system for managing maintenance activities of critical components in manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.06.002>
- Giel, R., & Kierzkowski, A. (2021). A Fuzzy Multi-Criteria Model for Municipal Waste Treatment Systems Evaluation including Energy Recovery. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15010031>
- Ikram, S. T., Mohanraj, V., Ramachandran, S., & Balakrishnan, A. (2023). An Intelligent Waste Management Application Using IoT and a Genetic Algorithm–Fuzzy Inference System. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app13063943>
- Kokkinos, K., Lakioti, E., Moustakas, K., Tsanaktisidis, C., & Karayannis, V. (2023). Sustainable Medical Waste Management Using an Intuitionistic Fuzzy-Based Decision Support System. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16010298>
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller.

International Journal of Man-Machine Studies, 7(1), 1-13.

Medina, G. C. A., Rosas Paredes, K., Zúñiga Carnero, M., & Sulla-Torres, J. (2022). Diagnostics in Tire Retreading Based on Classification with Fuzzy Inference System. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app12199955>

Pan, N.-H., Chang, H.-C., & Chen, K.-Y. (2025). A Hybrid AI-Fuzzy Decision Support Framework for UAV-Based Durability Assessment of Civil Infrastructure. *IEEE Access*, 13, 186408-186423. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3626054>

Phadnis, A., Satish, D. A., Dharane, V., Hudnurka, M., & Ambekar, S. (2025). A Sustainable Approach to Waste Management of Tyres: Using Artificial Intelligence for Enhanced Accuracy. *Australasian Accounting, Business and Finance Journal*. <https://doi.org/10.14453/aabfj.v19i1.02>

Sazonova, E., Сметанина, О., & Yusupova, N. (2022). Models and methods of information support in the management of the maintenance and repair of equipment based on artificial intelligence technologies. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3996236>

Schenck, C. J., Blaauw, P. F., & Viljoen, J. M. (2023). The role of informal actors in the circular economy of waste tires. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135889.

Sebola, M., Mativenga, P. T., & Pretorius, J. H. C. (2018). A comparative study of the South African and European tire recycling industries. *Waste Management & Research*, 36(10), 938-947.

Ullah, K., Ahmad, Z., Rak, E., & Jafari, S. (2025). Multi-experts decision support system for recycling of waste material using some circular pythagorean fuzzy Muirhead means. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18521-w>

United States Tire Manufacturers Association (USTMA). (2020). 2020 Scrap Tire Management Report. Washington, DC: USTMA.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2019). Tire Industry Project: Recycling and Recovery. Geneva: WBCSD.

Yu, H., Chen, Y., Wu, Q., Zhang, L., Zhang, Z., Zhang, J.-H., Miljković, M., & Oeser, M. (2020). Decision support for selecting optimal method of recycling waste tire rubber into wax-based warm mix asphalt based on fuzzy comprehensive evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121781. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121781>

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

IRM



Development and Evaluation of an Intelligent Fuzzy Expert System for Equipment Condition Assessment and Maintenance Decision Support in the Waste Tire Recycling Industry

Mostafa Yousofi Tazarjan*¹

1- Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, University of Applied Science and Technology (UAST),

Tehran, Iran

*Corresponding author Email: yousofi@uast.ac.ir

Abstract

Background and Problem: The global increase in end-of-life tire generation has underscored the necessity of developing intelligent approaches to enhance equipment reliability and operational efficiency in recycling facilities. These facilities face significant challenges, including sudden equipment failures, unscheduled downtime, escalating maintenance costs, and reduced operational productivity. Despite extensive research on waste management policies, recycling technologies, and circular economy principles, no integrated artificial intelligence-based framework has yet been proposed to support maintenance decision-making in this industry.

Objective: The present study aims to design, implement, and evaluate an intelligent fuzzy expert system that improves equipment condition assessment and prioritization of maintenance activities in end-of-life tire recycling systems.

Methodology: The proposed framework is based on the systematic integration of maintenance expert knowledge (with over 15 years of experience), objective equipment reliability indicators, and fuzzy logic to manage uncertainty. The system comprises 7 input variables (vibration, operating temperature, wear intensity, failure frequency, MTBF, MTTR, and inspection score), 2 output variables (equipment health index and maintenance priority), and 23 IF-THEN fuzzy rules. Implementation was carried out using the scikit-fuzzy library in Python, employing the Mamdani inference method and center-of-gravity defuzzification. The research dataset includes 1000 simulated records from 10 main equipment types in recycling centers, and system evaluation was performed using statistical metrics including correlation coefficient, mean absolute error, and classification accuracy.

Findings: The developed fuzzy expert system achieved a correlation coefficient of 0.9266, a mean absolute error of 10.97, and an accuracy of 93.1% within a ± 20 -unit range of the actual health index in predicting equipment health. The system's accuracy in identifying critical equipment was 91%, and the overall classification accuracy for maintenance priority was 59.7%. Sensitivity analysis revealed that "wear intensity" (correlation -0.87) and "vibration" (correlation -0.84) had the greatest impact on reducing equipment health. The system successfully identified 106 critical equipment items with an average health index of 29.74, and it was determined that 65.5% of equipment fell into "high" and "critical" priority categories, highlighting the necessity of structured maintenance planning in recycling facilities.

Conclusion: The proposed fuzzy expert system, demonstrating satisfactory performance under uncertainty conditions, can serve as an effective tool for automating equipment condition assessment, enhancing decision-making uniformity and transparency, and optimizing maintenance resource allocation in the end-of-life tire recycling industry. Beyond its adaptability to other recycling sectors, this framework establishes a bridge between waste management, physical asset management, and artificial intelligence domains.

Keywords: Equipment Condition Assessment, End-of-Life Tire Recycling, Fuzzy Expert System, Intelligent Maintenance.