

مقاله پژوهشی

بررسی قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیرپذیری لوکوموتیوهای پشتیبان ماشین تونل‌زنی سپری (EPB-TBM) خط یک متروی تبریز

حمید چاکری^{۱*}، حمید آقابابائی^۲، محمد داربر^۳، حسین مصطفایی دانشمند^۴

۱. دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشیار، chakeri@sut.ac.ir
۲. دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشیار، babaei@sut.ac.ir
۳. دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، استادیار، darbor@sut.ac.ir
۴. دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹

چکیده

لوکوموتیوهای پشتیبان به لوکوموتیوهای اطلاق می‌شود که در حفاری مکانیزه تونل، انتقال قطعات پیش‌ساخته بتنی، دوغاب پشت قطعات بتنی پیش‌ساخته و فوم و نیز مواد حفر شده از تونل را برعهده دارند. در این مطالعه، قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و تعمیرپذیری لوکوموتیوهای پشتیبان ماشین‌های EPB-TBM خط یک متروی تبریز بررسی شده است. ابتدا، لوکوموتیوها به چهار سیستم اصلی، شامل سیستم پنوماتیکی، الکتریکی، هیدرولیکی و موتور تقسیم شد. هر یک از این سیستم‌ها نیز به نوبه خود از زیرسیستم‌هایی تشکیل شده‌اند. در ادامه، داده‌های خرابی ۵ لوکوموتیو، جمع‌آوری شد و بعد از ترکیب داده‌ها، حدود ۳۰۰۰۰ ساعت داده از خرابی‌ها به دست آمد. بررسی داده‌ها نشان داد، در ده زیرسیستم، خرابی وجود دارد و این زیرسیستم‌ها، بحرانی‌اند. سپس تحلیل‌های پارتو برای بررسی درصد خرابی‌ها، هزینه‌ها و زمان‌های تعمیراتی انجام شد. بعد از تحقیقات به عمل آمده مشخص شد، تمامی سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها به صورت سری با یکدیگر کار می‌کنند، یعنی خرابی در یک بخش به منزله توقف کل سیستم است. برای هر زیرسیستم، مناسب‌ترین تابع توزیع خرابی، برازش شد و قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و سیستم‌ها مشخص شد. با توجه به نبود روند در همه داده‌های خرابی و حاکم بودن شرایط مستقل و همسان برای داده‌ها، قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی بر هم منطبق شدند. همچنین با استفاده از متوسط زمان‌های تعمیرات، قابلیت تعمیرپذیری اجزا تعیین شد. نتایج حاکی از اهمیت قابلیت اطمینان به ترتیب برای سیستم‌های پنوماتیکی، الکتریکی، موتور و هیدرولیکی است. سیستم پنوماتیکی اختلاف زیادی با سه سیستم دیگر دارد و با گذر زمان، این اختلاف، بیشتر هم می‌شود. از نتایج بسیار مهم دیگر، افت قابلیت اطمینان تقریباً تمامی زیرسیستم‌ها به زیر ۵۰ درصد بعد از ۵۰۰ ساعت کارکرد است. در بخش تعمیر و نگهداری نیز نتایج نشان داد، تمامی زمان‌های خرابی به دست آمده بالاتر از ۴۰۰ ساعت است. از لحاظ زمان‌های تعمیراتی نیز، بخش قابل توجهی مربوط به سیستم هیدرولیکی است و بعد از آن، موتور و سیستم پنوماتیکی بیشترین زمان تعمیراتی را دارند.

کلمات کلیدی

حفاری مکانیزه، لوکوموتیو پشتیبان، قابلیت اطمینان، سیستم‌های پنوماتیکی، الکتریکی، موتور و هیدرولیکی.

۱- مقدمه

سیستم‌های مهندسی، اجزا و ساختارها، هیچ یک کامل نیستند. یک طراحی کامل، عبارت از طراحی است که فعال باقی بماند و وظیفه خود را بدون ایجاد خرابی در طول بازه عمر پیش‌بینی شده‌اش انجام دهد اما محدودیت‌های تجربی و اقتصادی، عامل کامل نبودن طراحی‌ها محسوب می‌شوند. طراحان و کاربران نهایی همواره سعی در کاهش وقوع و تکرار خرابی‌ها دارند. با هدف کاهش خرابی‌ها در طراحی‌های مهندسی، طراح باید بداند که خرابی‌ها چگونه، به چه علت و هر چند وقت یکبار اتفاق می‌افتند. هنگامی که مکانیزم‌های خرابی شناخته شدند و در طراحی، ساخت، تولید و عملکرد به درستی در نظر گرفته شدند، تاثیر یا نرخ رخداد آن‌ها می‌تواند کاهش یابد یا سیستم می‌تواند با تحلیل اقتصادی و مهندسی دقیق در مقابل آن‌ها محافظت شود. این امر یک جنبه مفهومی کلی از فرآیند تحلیل قابلیت اطمینان است. قابلیت اطمینان، توانایی یک آیتم (یک محصول یا یک سیستم) برای عملکرد تحت شرایط کارکردی مشخص برای یک دوره زمانی با تعداد چرخه‌های مشخص است. قابلیت اطمینان به توصیف ویژگی خرابی اجزا سیستم با استفاده از تحلیل داده‌های خرابی می‌پردازد.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مهندسی قابلیت اطمینان انجام شده است. مایرفلت^۱ (۲۰۰۴)، قابلیت اطمینان یک نوع سیستم تهویه که روش کار آن، سرد کردن یا گرم کردن و یا تزریق هوا به محیط با توجه به دمای محیط است را مطالعه کرد. طبق روش مرسوم تحلیل‌های قابلیت اطمینان، در این تحلیل هم زیرسیستم‌های این سیستم شامل بخش سردکننده، بخش گرم‌کننده و بخش دمنده هوای جدید به محیط بررسی شد. در ادامه با توجه به موجود بودن داده‌های مربوط به خرابی‌ها و تعمیرات (شامل TTF, TBF, MTTR)^۲ بهترین توزیع برای هر زیرسیستم مشخص شد. برای انتخاب بهترین توزیع، روند یا عدم روند داده‌های مربوط به خرابی با استفاده از فرآیند MLE^۳ مطالعه شد. با توجه به توزیع‌های خرابی، قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها، سیستم و همچنین با توجه به متوسط زمان‌های تعمیراتی (MTTR)، قابلیت تعمیرپذیری تعیین شد.

لیو^۴ و همکاران (۲۰۰۵)، قابلیت اطمینان محفظه لیتیومی-سربی مورد استفاده در TBM‌های خاص برای حرارت‌سنجی را بررسی کردند. آن‌ها پس از بررسی زیرسیستم‌های مختلف این

محفظه، حساس‌ترین زیرسیستم این محفظه که روکش اولیه^۵ نام دارد را مطالعه کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد، تنها در روکش جلویی در اثر طی شدن سیکل‌ها یا گذر زمان، احتمال خرابی زیاد می‌شود و روکش پشتی نسبت به طی شدن سیکل‌ها یا گذر زمان، هیچ نوع خرابی ندارد.

برآبادی^۶ و کومار^۷ (۲۰۰۷)، قابلیت اطمینان سنگ‌شکن‌های فکی و مخروطی معدن بوکسیت جاجرم در ایران را بررسی کردند. سنگ‌شکن‌های مطالعه شده، شامل شش زیرسیستم فیدر، نوار نقاله، سنگ‌شکن اولیه، سنگ‌شکن ثانویه، جداکننده اولیه و جداکننده ثانویه بود. سپس خرابی‌ها و یا تحلیل پارتو^۸ که در واقع یک آمار کلی از درصد خرابی‌ها است را پیکربندی (کمی‌سازی) کردند. بعد از تحلیل کمی، با توجه به در دسترس بودن داده‌های مربوط به خرابی‌ها (TTF, TBF) بهترین توزیع خرابی برای به دست آوردن قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌ها را تعیین و با توجه به مشخص شدن توزیع‌ها، قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌ها را مشخص کردند.

چولهو^۹ و تائون^{۱۰} (۲۰۰۹)، رابطه بین هزینه با قابلیت نگهداری و قابلیت اطمینان را در بخش کنترل‌کننده درب‌های راننده و راهرو واگن‌های مترو (DDC)^{۱۱} که شامل پنج زیرسیستم سیلندر، شیر مغناطیسی، تسمه، پانل درب و دستگاه کنترل درب است، بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند، هزینه‌ها با افزایش قابلیت اطمینان، افزایش و با افزایش قابلیت نگهداری، کاهش می‌یابد. همچنین، قابلیت اطمینان ۵ زیرسیستم که به صورت سری با یکدیگر کار می‌کنند را در فاصله ۴۵۰ ساعت بررسی کردند و نشان دادند بیشترین از کارافتادگی^{۱۲}، مربوط به کنترل درب واگن‌های مترو و کمترین کارافتادگی، مربوط به پانل درب واگن‌های مترو است.

جینگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۴)، قابلیت اطمینان تخت اکسل لوکوموتیو را بررسی کردند. این تحقیق، روی دو لوکوموتیو برقی قطار باربری راه‌آهن سوئد در بازه یکساله (نوامبر ۲۰۱۰ تا ژانویه ۲۰۱۲) انجام شد و میزان سایش در هر تخت اکسل در گذر زمان و همچنین نسبت به مسافت برداشت و در ادامه قابلیت اطمینان هر یک از تخت اکسل‌ها بررسی شد.

⁵ First Wall (FW)

⁶ Barabady

⁷ Kumar

⁸ Pareto

⁹ Chulho

¹⁰ Taeyoon

¹¹ Door-Door control

¹² Breakdown

¹³ Jing

¹ Myrefelt

² Time to Failures, Time Between Failures, Mean Time to Repair

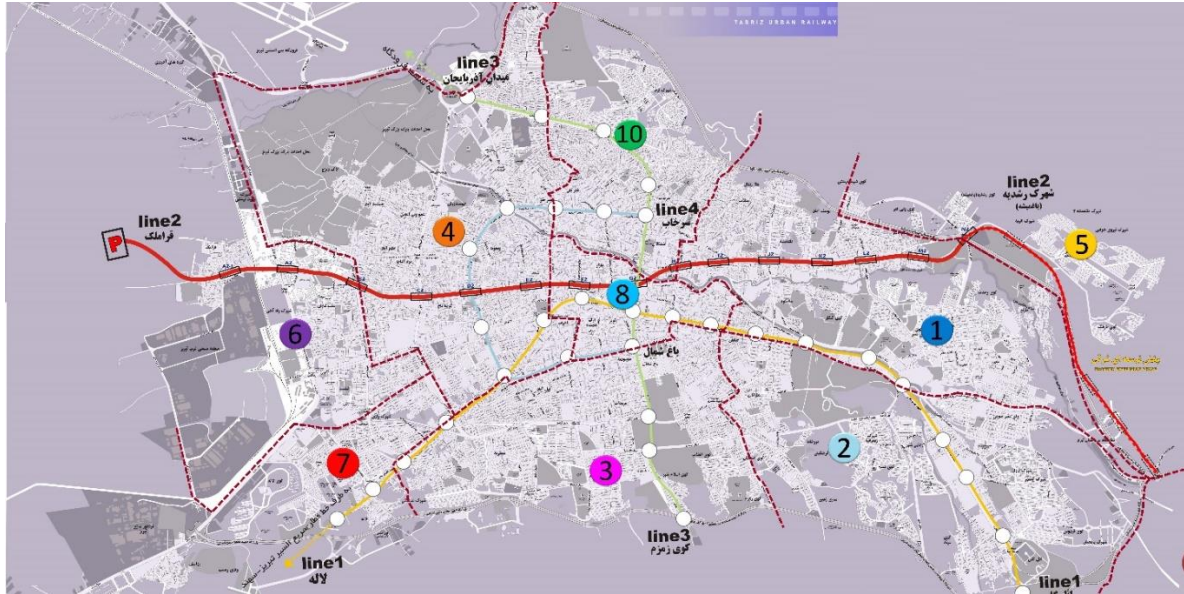
³ Maximum Likelihood Estimate (MLE)

⁴ Liu

با توجه به مطالعات گذشته ارائه شده در جدول ۱، مهم‌ترین بخش، قبل از تحلیل قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیرپذیری، مشخص کردن سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها است. مرحله مهم بعدی، بررسی روند داده‌ها و تعیین مناسب‌ترین توزیع، برای مشخص شدن قابلیت اطمینان است. همچنین، اجزای بحرانی با توجه به نرخ تغییرات نسبت به زمان، باید مشخص شوند.

جدول ۱- مطالعات مهم انجام شده در خصوص قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیرپذیری

محقق	عنوان مطالعه	بررسی انجام شده	(سیستم - زیرسیستم‌ها)
کومار و همکاران (۱۹۸۹)	بررسی قابلیت اطمینان برای ماشین‌های LHD در یک معدن سوئد	راندمان ماشین‌های LHD	ماشین‌های LHD- موتور، انتقال قدرت، سیستم هیدرولیکی و ترمز
واگناس و همکاران (۱۹۹۷)	روشی برای تحلیل تعمیرپذیری تجهیزات معدنی	روش‌های تعمیرپذیری	ماشین‌های LHD- سیستم‌های الکتریکی، هیدرولیکی، راندن، ترمز، باکت، سازه، موتور، چرخ‌ها و سیستم اطفاء حریق
کومار شارما و شارما (۲۰۱۲)	چارچوبی برای بهینه‌سازی RAM و تصمیمات هزینه‌ای یک کارخانه فرآوری کاغذ	بررسی راندمان تجهیزات یک کارخانه فرآوری کاغذ	کارخانه- سیستم‌های تغذیه، پالپ، شستشو، سفیدکننده، غربالگری، فرم‌دهی، فشرده‌سازی، خشک‌کردن
لشگری و سیدی (۲۰۱۳)	بررسی هزینه تعمیرپذیری تجهیزات بارگیری معادن سطحی	راندمان تجهیزات بارگیری معادن سطحی	تجهیزات بارگیری- لودر، شاول‌های الکتریکی، بکپو و هیدرولیکی
منیری مراد و همکاران (۲۰۱۴)	قابلیت تعمیرپذیری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای بهبود بهره‌وری تجهیزات معدنی یک معدن روباز، مطالعه موردی: معدن مس سونگون	راندمان تجهیزات معدنی یک معدن روباز	دامپ تراک- چرخ‌ها، سیستم‌های بدنه، الکتریکی، هیدرولیکی، انتقال قدرت و موتور
سینها و همکاران (۲۰۱۵)	قابلیت تعمیرپذیری یک سنگ‌شکن مخروطی، مطالعه موردی	راندمان سنگ‌شکن مخروطی	سنگ‌شکن مخروطی- دهانه، آستر، درزگیر گرد و غبار، منتل، آستر منتل، آستر تخلیه مخروطی، لوله روانکاری
لین و همکاران (۲۰۱۵)	تحلیل قابلیت اطمینان برای نگهداری پیشگیرانه در چرخ‌های لوکوموتیو قطار باربری، مطالعه موردی در سوئد	راندمان چرخ‌های لوکوموتیو قطار باربری	۲ لوکوموتیو- ۴ بوژی
محمدی و همکاران (۲۰۱۶)	افزایش میزان تولید دراگلاین به وسیله افزایش قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیرپذیری در معدن ذغال هند	راندمان دراگلاین	دراگلاین- باکت، کابل‌ها، سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی، سازه، بخش‌های الکتریکی دیگر، بخش‌های مکانیکی دیگر
نوری و همکاران (۲۰۱۶)	قابلیت دسترسی تجهیزات معدنی مبتنی بر محیط عملیاتی، مطالعه موردی: معدن مس سونگون	راندمان تجهیزات معدنی یک معدن روباز	تجهیزات معدن روباز- دریل واگن هلمن، لودر کاترپیلار، بولدوزر کاترپیلار، دامپ تراک کوماتسو
بالاراجو و همکاران (۲۰۱۸)	پیش‌بینی فواصل زمانی تعمیرپذیری مبتنی بر قابلیت اطمینان LHD در یک معدن ذغال زیرزمینی هند	راندمان ماشین‌های LHD	ماشین‌های LHD- موتور، ترمز، بدنه، چرخ‌ها، سیستم‌های هیدرولیکی، الکتریکی، انتقال قدرت و مکانیکی
بالاراجو و همکاران (۲۰۲۰)	پیش‌بینی راندمان LHD از طریق تحلیل قابلیت اطمینان در یک معدن سرب و روی زیرزمینی هند	راندمان ماشین‌های LHD	ماشین‌های LHD- موتور، چرخ‌ها، سیستم‌های هیدرولیکی، الکتریکی، انتقال قدرت و مکانیکی
آنجلس و کومرال (۲۰۲۰)	بازرسی بهینه و برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه تجهیزات معدنی	روشی برای مدیریت تعمیرپذیری صنایع معدنی	کامیون‌های معدنی کوماتسو ۹۳۰- سیستم‌های بدنه، ترمز، موتور، الکتریکی و هیدرولیکی
لیته و همکاران (۲۰۲۲)	ارزیابی قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی بوژی‌های لوکوموتیو راه آهن	تحلیل راندمان بوژی‌های لوکوموتیو	۲۵۴ لوکوموتیو- چرخ‌ها، تخت اکسل، چارچوب بوژی، سیستم ترمز، عناصر تعلیق، ماژول کشش الکتریکی



شکل ۱- نقشه خطوط متروی تبریز

داخلی آن‌ها پس از نصب قطعات بتنی پیش‌ساخته ۶ متر است. با توجه به حجم بزرگ و سنگین ماشین‌های حفار، این ماشین‌ها در قطعات مجزا به وسیله کارخانه ساخته شده و برای بهره‌برداری در محل پروژه مورد استفاده، مونتاژ می‌شوند. در واقع حفاری تونل‌های دوقلو خط یک متروی تبریز به وسیله EPB-TBM و حمل قطعات و وسایل مورد نیاز برای حفاری و همچنین بیرون کشاندن مواد حفاری شده از تونل به وسیله لوکوموتیوها انجام می‌شود. از این رو هماهنگی بین ماشین حفاری EPB-TBM و لوکوموتیوها در حفر تونل‌ها اهمیت زیادی دارد. مشخصات فنی ماشین‌های EPB-TBM خط یک متروی تبریز در جدول ۲ آمده است. ساختار زمین در مسیر تونل از رسوبات دوره چهارم و عمدتاً از دانه‌های شن، سیلت، رس (با خاصیت خمیری زیاد) و قلوه سنگ تشکیل شده است. همچنین، تراز سطح آب‌های زیرزمینی مسیر تونل بین ۱۰ تا ۱۸ متر است (زارع، ۱۳۹۴).

جدول ۲- مشخصات فنی ماشین‌های EPB-TBM خط یک متروی تبریز (زارع، ۱۳۹۴)

۶،۸۸	قطر حفاری (متر)
۶،۲۵	قطر خارجی تونل (متر)
۶	قطر داخلی تونل (متر)
۱۰۲	طول ماشین (سپر+ سیستم پشتیبان) (متر)
۶۲۰	وزن ماشین (سپر+ سیستم پشتیبان) (تن)
۸۰	ماکزیمم نرخ نفوذ (میلی‌متر در دقیقه)
۶(۱+۵)	تعداد قطعات بتنی پیش‌ساخته
۲۲	وزن کل یک حلقه بتنی (تن)
۱۸۵	تعداد ابزار برش روی کله‌حفار
۴۴۰۰۰	نیروی جلو بردگی (کیلو نیوتن)

در حفاری تونل به روش مکانیزه تمام مقطع، لوکوموتیوهای پشتیبان به دلیل خدمات‌رسانی به دستگاه از جمله رساندن دوغاب آماده، قطعات بتنی پیش‌ساخته و بنتونیت و انتقال مواد حفاری شده به بیرون از تونل اهمیت زیادی دارند. این موضوع در تونل‌های با قطر کمتر که مسیر خدمات‌رسانی در آن‌ها به صورت تک‌ریلی است، اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند، به طوری که خرابی و تاخیر در این قسمت، مستقیماً باعث تاخیر در عملیات حفاری تونل خواهد شد. در این تحقیق با بررسی سابقه خرابی‌های رخ داده در سیستم، قابلیت اطمینان لوکوموتیوهای پشتیبان خط یک مترو تبریز، مدلسازی شده و با استفاده از آن، یک برنامه تعمیر و نگهداری برای به حداقل رساندن تاخیرات ناشی از لوکوموتیوهای پشتیبان در فرآیند حفاری ارائه می‌شود. تعیین نت پیشگیرانه مناسب برای لوکوموتیوها و بازرسی‌های دوره‌ای متناسب با جداول PM می‌تواند تاثیر بسزایی را در جلوگیری از خرابی‌های لوکوموتیو و به طبع آن کاهش توقف‌های غیربرنامه‌ای عملیات حفاری داشته باشد.

۲- معرفی خط یک مترو تبریز

متروی تبریز، از ۵ خط، شامل ۴ خط اصلی و یک خط حومه به طول کلی ۱۰۰ کیلومتر تشکیل شده است و بعد از تهران و کرج، بیشترین خطوط را در بین کلانشهرهای کشور دارد (شکل ۱). خط یک مترو تبریز، به طول ۱۷ کیلومتر با ۱۸ ایستگاه از میدان ائل گلی آغاز و به کوی لاله ختم می‌شود. حدود ۸ کیلومتر از مسیر به صورت تونل طراحی و با دو ماشین حفاری تونل در عمق ۱۶ تا ۲۵ متری حفر شده است. حفاری در تونل به وسیله ماشین حفاری تمام مقطع تونل EPB-TBM، ساخت شرکت NFM فرانسه انجام شده است. قطر حفاری شده تونل‌ها ۶،۸۸ متر و قطر

جدول ۳- مشخصات عمومی لوکوموتیوها (زارع، ۱۳۹۴)

آیتم	کمیت
ارتفاع (میلی متر)	۲۱۵۰
طول (میلی متر)	۹۶۷۹
عرض (میلی متر)	۱۵۰۰
وزن (تن)	۳۶
سرعت لوکوموتیو در حالت خالی (کیلومتر بر ساعت)	۳۰
سرعت لوکوموتیو در حالت پر (کیلومتر بر ساعت)	۶
نیروی کششی (کیلونیوتن)	۲۵۵
نوع موتور	DEUTZ-۱۰۱۵
قدرت موتور (کیلو وات)	۲۸۶
فاصله محورها (میلی متر)	۹۰۰



شکل ۲- لوکوموتیو CHL-200G شوما

خارج شده بود، به وسیله جرثقیل‌ها در محل دپوی مصالح تخلیه می‌شود و کفی حمل قطعات بتنی پیش‌ساخته و مخزن حمل دوغاب خالی آن که در سیکل قبلی داخل تونل با EPB-TBM استفاده شده بود، دوباره پر می‌شود.

- با خارج شدن لوکوموتیوی که قبلاً وارد تونل شده بود، دوباره لوکوموتیوی که اخیراً شارژ شده است، وارد تونل و به نوعی وارد مدار حفاری می‌شود و همین سیکل به صورت دوره‌ای برای حفر تونل ادامه می‌یابد.

این لوکوموتیوها از چهار سیستم اصلی پنوماتیکی (شلنگ باد، شیر یک‌طرفه^۳، رگلاتور، شیر برقی پنوماتیکی و ریل ایولو)، موتور (سیلندرهای موتور)، الکتریکی (سیستم تامین انرژی الکتریکی، سنسور الکتریکی و شیر برقی) و هیدرولیکی (پمپ هیدرولیکی) تشکیل شده‌اند. در واقع کارکرد هماهنگ این چهار سیستم، عملکرد لوکوموتیو را تعیین می‌کند. در جدول‌های ۴ تا ۷، سیستم‌ها، زیرسیستم‌ها و وظایف آن‌ها تشریح شده است.

۴- آنالیز RAMS

آنالیز RAMS^۴ به بررسی و تحلیل داده‌ها می‌پردازد و در نهایت منجر به تعیین قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیرپذیری هر بخش می‌شود. مراحل تحلیل RAMS از الگوریتم شکل ۳ پیروی می‌کند.

۳- لوکوموتیوهای پشتیبان خط یک متروی تبریز

لوکوموتیوهای پشتیبان خط یک متروی تبریز از نوع کوچک مقیاس^۱ (لوکوموتیو تونلی) دیزلی CHL-200G ساخت شوما^۲ آلمان است (شکل ۲). مشخصات عمومی این نوع لوکوموتیوها در جدول ۳ تشریح شده است. لوکوموتیوها به دنبال خود سه نوع تجهیزات، شامل واگن حمل مواد کنده‌شده (استخراجی)، کفی حمل قطعات بتنی پیش‌ساخته و مخزن حمل دوغاب را می‌کشند. کفی حمل مواد کنده‌شده، واگن‌های خالی‌اند که در جبهه‌کار با حفر تونل از مواد حفر شده پر می‌شوند. تجهیزات بعدی شامل کفی حمل قطعات بتنی پیش‌ساخته است که قطعات بتنی روی آن‌ها سوار می‌شوند. در نهایت مخزن حمل دوغاب، شامل یک همزن است که دوغاب داخل آن به تونل حمل می‌شود. در حالت کلی، سیکل کاری یک لوکوموتیو، به ترتیب زیر است:

- لوکوموتیو با شش واگن حمل مواد کنده شده خالی و دو کفی حمل قطعات بتنی پیش‌ساخته حاوی قطعات بتنی برای یک رینگ حفاری و یک مخزن حمل دوغاب پر وارد تونل می‌شود.
- لوکوموتیو برای انتقال قطعات بتنی و پر کردن شش واگن حمل مواد کنده شده بر روی دستگاه توقف می‌کند.
- لوکوموتیو داخل تونل با شش واگن حمل مواد کنده‌شده پر شده (هر کدام به ظرفیت ۲۵ تن) از تونل خارج می‌شود.
- واگن حمل مواد کنده شده پر لوکوموتیو که اخیراً از تونل

³ Check Valve

⁴ Reliability, Availability, Maintainability

¹ Narrow - Gauge

² SCHOMA

جدول ۴- زیرسیستم‌های پنوماتیکی

سیستم	زیرسیستم	وظیفه
پنوماتیکی	کمپرسور باد	تولید باد در سیستم
	سردکن هوا	سرد کردن باد تولید شده با کمپرسور
	تله آب‌گیر	گرفتن رطوبت باد
	مخزن اصلی هوا	ذخیره هوای تولید شده با کمپرسور
	بلوک شیر برقی	تقسیم باد در سیستم
	شیر برقی پنوماتیکی	محرك سیستم
	رگلاتور	تنظیم باد با فشار مورد نظر
	ریل ایولو	تنظیم باد در کل سیستم
	آکوموتور	انباره باد برای استفاده در مواقع مورد نیاز
	سنسور پنوماتیک	نشانگر میزان فشار باد
	شیر یک‌طرفه	هدایت‌کننده یک طرفه باد در مسیرش
	شیر چهار حالتی	برای عملکرد سیستم ترمز و سپس آزاد کردن ترمز
شلنگ باد	هدایت باد در کل مسیر پنوماتیکی	

جدول ۵- زیرسیستم‌های موتور

سیستم	زیرسیستم	وظیفه
موتور	سیلندرهای موتور	احتراق و تولید انرژی
	سیستم سوخت‌رسانی	رساندن سوخت به سیلندرها
	سیستم خنک‌کاری	سرد کردن آب موتور و عبور و مرور آب
	سیستم ورودی و خروجی هوا	هدایت دود موتور به سمت آگزوز و هدایت هوا به داخل موتور برای احتراق

جدول ۶- زیرسیستم‌های الکتریکی

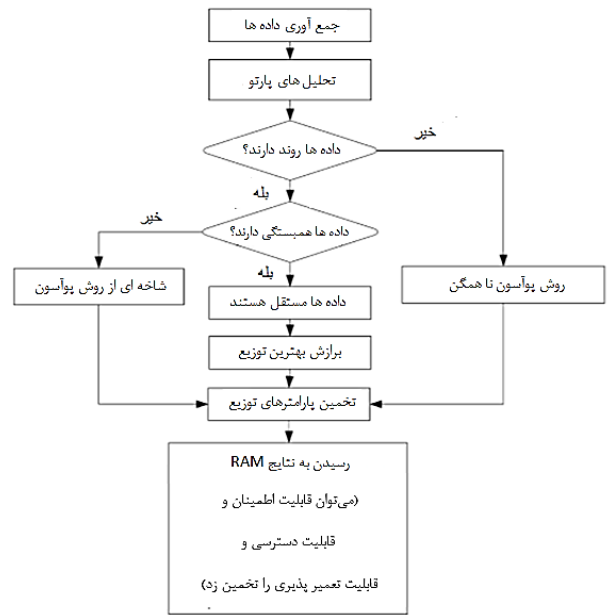
سیستم	زیرسیستم	وظیفه
الکتریکی	شیر برقی	محرك پمپ‌ها
	سنسور الکتریکی	نشان‌دهنده میزان فشار روغن در هیدروموتور
	سیستم تامین انرژی الکتریکی	انتقال حرکت موتور به دینام و سپس به باطری جهت تامین انرژی الکتریکی
	لامپ‌های موجود در بدنه	جهت روشنایی و دید در تونل
	ددمن	هشدار دهنده جهت جلوگیری از عدم هوشیاری اپراتور
	استارت	راه اندازی موتور دیزلی

جدول ۷- زیرسیستم‌های هیدرولیکی (انتقال قدرت)

سیستم	زیرسیستم	وظیفه
هیدرولیکی (انتقال قدرت)	فیلتر هیدرولیکی	تصفیه روغن‌های هیدرولیک
	شلنگ هیدرولیکی	جریان روغن
	میل‌گاردان	انتقال نیرو از موتور به distributor
	Distributor	انتقال نیرو از موتور به پمپ‌های هیدرولیک
	پمپ هیدرولیکی	انتقال نیرو به هیدروموتور
	هیدروموتور	انتقال نیرو به اکسل
	اکسل	انتقال نیرو به چرخ‌ها
	بلبرینگ و چرخ‌ها	به حرکت در آوردن لوکوموتیو

جدول ۸- خرابی‌های مشاهده شده در لوکوموتیوهای پشتیبان خط یک متروی تبریز

سیستم	زیرسیستم با سابقه خرابی (در این قسمت، فقط زیرسیستم‌هایی که در طول دوره ثبت داده‌ها، خرابی در آن‌ها اتفاق داده، آورده شده است)
پنوماتیکی	شلنگ باد
	شیر یک طرفه
	رگلاتور
	شیربرقی پنوماتیکی
	ریل ایولو
الکتریکی	سیستم تامین انرژی الکتریکی
	سنسور الکتریکی
	شیربرقی
هیدرولیکی	پمپ هیدرولیکی
موتور	سیلندرهای موتور

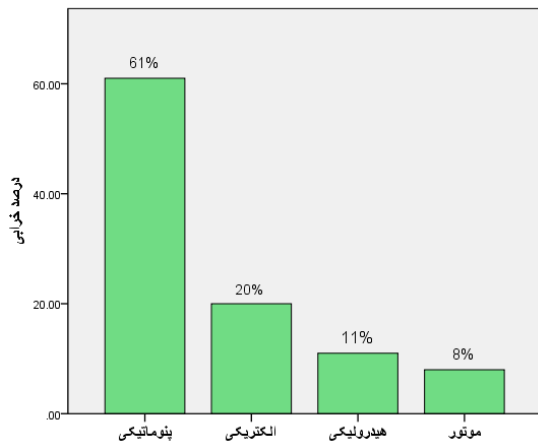


شکل ۳- الگوریتم آنالیز RAMS

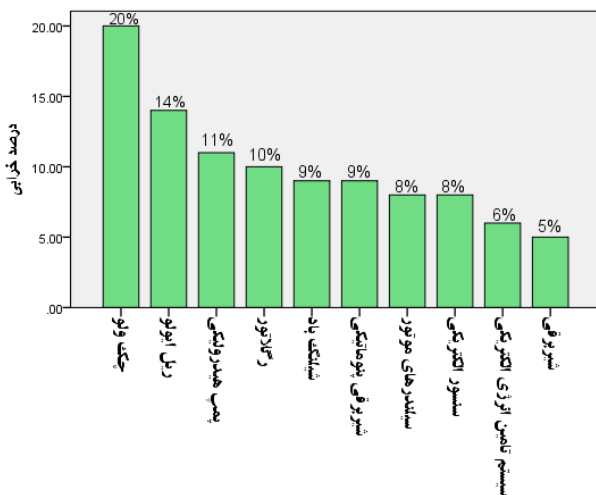
۴-۱- تحلیل‌های پارتو

اولین مرحله در بررسی RAMS، جمع‌آوری داده است. در این مرحله، داده‌های ۴ ساله تعمیرات و نگهداری پنج لوکوموتیو بررسی شده است (۳۰۰۰ ساعت کارکرد برای پنج لوکوموتیو). اصل پارتو در سال ۱۹۰۶ توسط اقتصاددان ایتالیایی ویلفردو پارتو^۱ برای توصیف توزیع نابرابر ثروت در کشورها ارائه شد. این اصل بیان می‌کند، حدود ۸۰ درصد اثرات و مشکلات ایجاد شده در سازمان‌ها (و حتی سیستم‌ها) به واسطه ۲۰ درصد عوامل و علل است و اگر بتوان این ۲۰ درصد را شناسایی و کنترل کرد، می‌توان از میزان قابل توجهی از خطاها جلوگیری کرد. با کمک نمودار پارتو می‌توان علل مختلف نقص‌ها را بررسی و علی که بیشترین تکرار را داشته‌اند، شناسایی کرد و آن‌ها را در اولویت اقدام‌ها قرار داد. خرابی‌های مشاهده شده در لوکوموتیوهای پشتیبان خط یک متروی تبریز در جدول ۸ بیان شده‌اند. در شکل‌های ۴ تا ۹ تحلیل‌های پارتو برای درصد خرابی‌ها، هزینه‌ها و همچنین زمان‌های تعمیراتی ارائه شده‌اند.

برای محاسبه درصد خرابی، ابتدا خرابی‌های کل لوکوموتیو که در ۴ سال مورد بررسی، اتفاق افتاده است، جمع‌آوری شد. سپس با مشخص کردن تعداد هر کدام از خرابی‌های زیرسیستم و یا سیستم و درصدگیری از آن‌ها نسبت به تعداد کل خرابی‌ها، درصد خرابی برای هر سیستم و یا زیرسیستم مشخص شده است. در مورد هزینه‌ها نیز به همین روش و با تجمیع هزینه‌های انجام شده برای هر سیستم و درصد آن نسبت به کل هزینه‌ها، درصد هزینه‌ها تعیین شد.

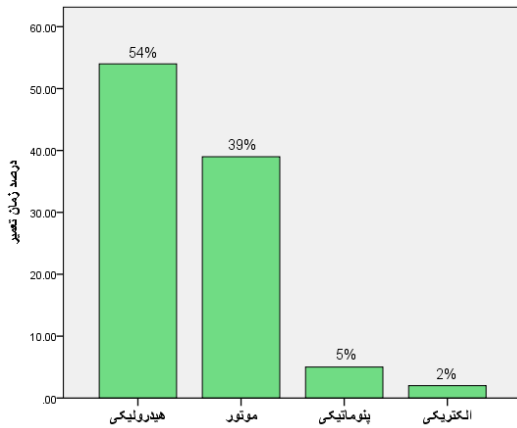


شکل ۴- درصد خرابی مشاهده شده در هر یک از سیستم‌ها

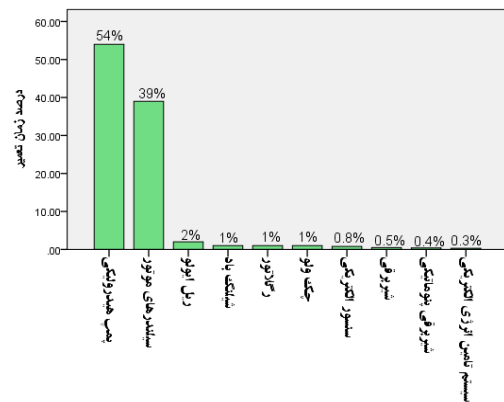


شکل ۵- درصد خرابی مشاهده شده در هر یک از زیرسیستم‌ها

¹ Vilfredo Pareto



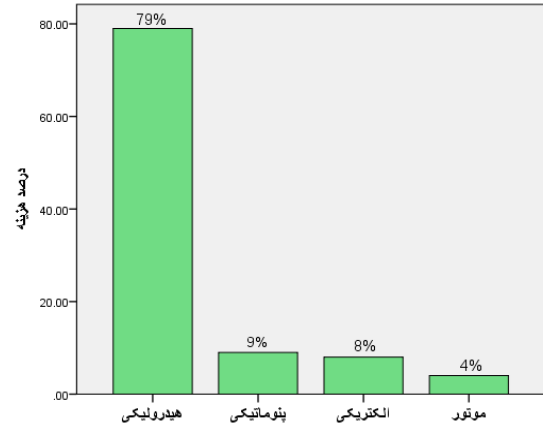
شکل ۸- درصد زمان صرف شده برای تعمیر هر یک از سیستم‌ها



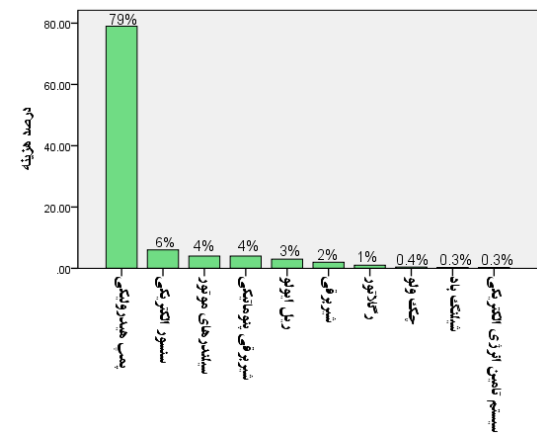
شکل ۹- درصد زمان صرف شده برای تعمیر هر یک از زیرسیستم‌ها

۴-۲- بررسی روند داده‌ها

هدف از تحلیل روند، دستیابی به یک نتیجه برای تصمیم‌گیری در مورد روش برازش کردن مناسب‌ترین تابع توزیع است. با توجه به الگوریتم شکل ۳، در صورتی که داده‌ها، روند داشته باشند برای برازش توزیع از روش پوآسون ناهمگن و اگر روند نداشته باشند، الگوریتم وارد مرحله دیگر می‌شود. برای بررسی روند داده‌ها، از روش اندرسون دارلینگ استفاده شد. اگر مقدار $P - value$ حاصل از آزمون اندرسون دارلینگ در سطح اطمینان ۹۵ درصد از ۰٫۰۵ بیشتر باشد، نشان‌دهنده عدم روند و در غیر این صورت حاکی از وجود روند در داده‌ها است. جدول ۹، نتایج آزمون اندرسون دارلینگ را برای زیرسیستم‌ها نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد، داده‌ها بدون روندند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، تحلیل گرافیکی روند برای شیر یک‌طرفه و شلنگ باد بیان شده است. به دلیل اختصار، تحلیل گرافیکی سایر زیرسیستم‌ها بیان نشده است. همانطوری که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، تجمع داده‌ها، نزدیک به یک خط راست بوده و این امر حاکی از عدم روند داده‌ها است.



شکل ۶- درصد هزینه انجام یافته برای هر یک از سیستم‌ها



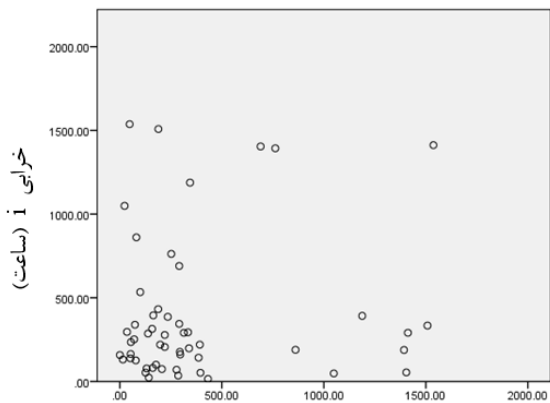
شکل ۷- درصد هزینه انجام شده برای هر کدام از زیرسیستم‌ها

با توجه به شکل‌های ۴ تا ۶، بالا بودن درصد خرابی یک سیستم، موجب افزایش هزینه (هزینه‌های تعمیر) آن سیستم شده است. از طرف دیگر، به علت نبود تعمیرکار متخصص در زمینه تعمیر خرابی پمپ سیستم هیدرولیکی در داخل کارگاه و ارسال این قطعه به تعمیرکار حرفه‌ای، هزینه تعمیرات هیدرولیک لوکوموتیو نسبت به بقیه سیستم‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است.

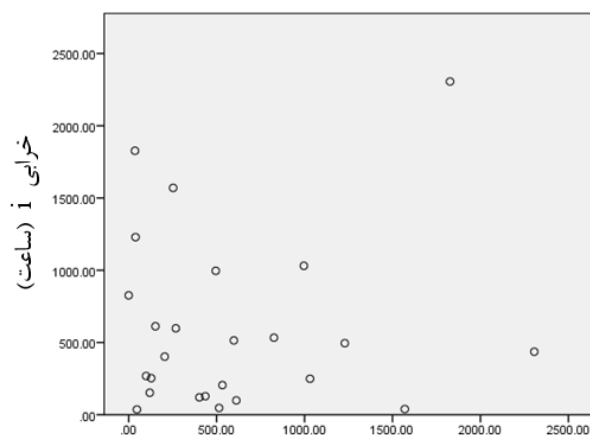
زمان صرف شده برای تعمیرات هر یک از زیرسیستم‌ها، مجموع زمان لازم برای بازکردن قطعه خراب از روی دستگاه، زمان مفید لازم برای تعمیر و بازرسی آن و همچنین زمان لازم برای نصب مجدد قطعه بر روی دستگاه، تشکیل شده است.

داده‌های خرابی مورد استفاده از ۵ لوکوموتیو فعال در تونل‌های دوقلوی خط یک متروی تبریز جمع‌آوری شد و بعد از ترکیب داده‌ها، حدود ۳۰۰۰ ساعت داده از خرابی‌ها به دست آمد. دوره زمانی برداشت داده‌ها به صورت سیستماتیک نبوده و وابسته به خرابی یا عدم خرابی یک سیستم است. به عبارت دیگر، تا زمانی که زیرسیستمی، خراب و معیوب نشود، ثبت نمی‌شود.

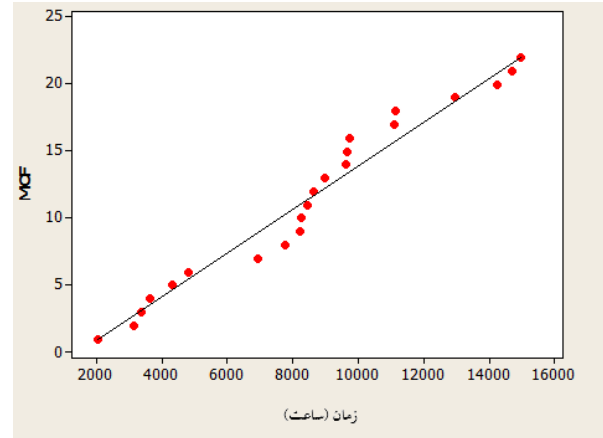
در واقع در این حالت، داده‌ها هیچ ارتباطی با یکدیگر ندارند. در صورتی که داده‌ها دارای همبستگی باشند بار دیگر وارد شاخه‌ای از روش پوآسون می‌شود. شرایط سنجش مستقل یا مستقل نبودن داده‌ها به این شکل است که هر یک از داده‌های خرابی، به صورت متوالی برای یک جزو به صورت دو به دو نسبت به همدیگر سنجیده می‌شوند و اگر پراکندگی داده‌ها بالا باشد و نتوان به آن‌ها یک خط همبستگی برازش کرد، داده‌ها بدون همبستگی، همسان و مستقل نامیده می‌شوند. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، این تحلیل، برای دو زیرسیستم شیر یک‌طرفه و شلنگ باد، نشان داده شده است. همانطور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، با توجه به پراکندگی بالای داده‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که داده‌ها شرایط مستقل دارند و نمی‌توان برای آن‌ها خط همبستگی برازش کرد. به دلیل اختصار، تحلیل همبستگی سایر زیرسیستم‌ها بیان نشده است.

خرابی $i-1$ (ساعت)

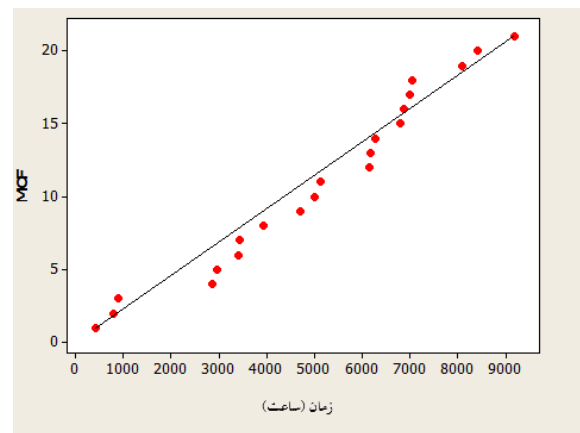
شکل ۱۲- بررسی همبستگی زیرسیستم شیر یک‌طرفه

خرابی $i-1$ (ساعت)

شکل ۱۳- بررسی همبستگی زیرسیستم شلنگ باد



شکل ۱۰- تحلیل روند در داده‌های خرابی زیرسیستم شیر یک‌طرفه



شکل ۱۱- تحلیل روند در داده‌های خرابی زیرسیستم شلنگ باد

جدول ۹- نتایج کمی روند داده‌ها

P - value	زیرسیستم
۰٫۴۷	شلنگ باد
۰٫۷۱	رگلاتور
۰٫۳۸	شیر یک‌طرفه
۰٫۲	شیربرقی پنوماتیکی
۰٫۰۹	ریل ایولو
۰٫۱۵	سیستم تامین انرژی الکتریکی
۰٫۱۸	سنسور الکتریکی
۰٫۹۳	شیربرقی
۰٫۵۴	پمپ هیدرولیکی
۰٫۵۸	سیلندرهای موتور

۳-۴- بررسی همبستگی داده‌ها

در صورتی که داده‌ها دارای همبستگی نباشند، اصطلاحاً گفته می‌شود داده‌ها دارای توزیع همسان و مستقل (iid)^۱ اند،

^۱ Identical and independent distribution (iid)

۴-۴- تعیین توزیع و پارامترهای توزیع

اندرسون دارلینگ، بهترین توزیع برای زیرسیستم ریل ایولو و در شکل ۱۵ بهترین توزیع برای سیلندرهای موتور که به ترتیب لاگ نرمال و نمایی است، نشان داده شده‌اند. توزیع لاگ نرمال یکی از بهترین توابع توزیع برای نمایش قابلیت اطمینان در زمان‌های طولانی است. توزیع نمایی نیز یکی از متداول‌ترین توزیع‌های مورد استفاده در تحلیل قابلیت اطمینان است. به دلیل اختصار، ترسیم توزیع سایر زیرسیستم‌ها بیان نشده است. همچنین در جدول ۱۱، روند، نوع همبستگی و انتخاب بهترین توزیع و پارامترهای توزیع به صورت کامل بعد از پایان تمامی تحلیل‌ها برای تمامی زیرسیستم‌ها مشخص شده است.

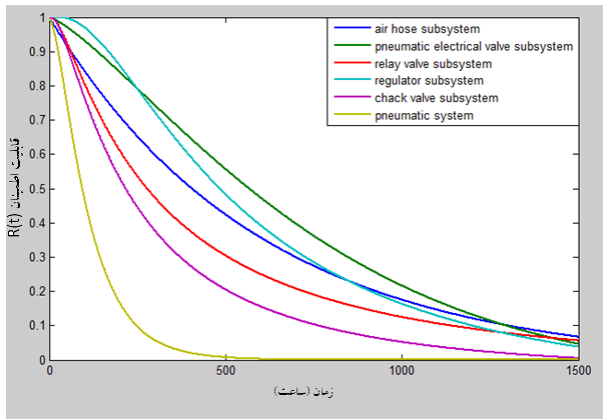
در ابتدا با استفاده از آزمون اندرسون دارلینگ، مقدار P-value توزیع‌ها، مشخص می‌شود. با توجه به درجه آزادی $1 - \alpha$ با $\alpha = 0.05$ بهترین توزیع، توزیعی است که مقدار P-value آن بیشتر از 0.05 باشد. در صورتی که چند توزیع P-value بیشتر از 0.05 داشته باشند، توزیعی مورد قبول است که بیشترین مقدار P-value را داشته باشد. نتایج این تحلیل برای زیرسیستم‌ها در جدول ۱۰ تشریح شده است. بعد از تعیین مقادیر P-value و شناسایی بهترین توزیع، باید توابع توزیع مشخص شوند. در شکل ۱۴، با استفاده از آزمون

جدول ۱۰- نتایج آزمون اندرسون دارلینگ برای زیرسیستم‌ها

مقادیر P-value با ضریب خطای ۰.۰۵					زیرسیستم
برای توابع توزیع					
Gamma	Exponential	Weibull	Log-Normal	Normal	
۰/۲۵	۰/۹۸	۰/۲۵	۰/۶۲	۰/۰۰۵	شلنگ باد
۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۲۵	۰/۴۶	۰/۰۱	رگلاتور
۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۳۴	۰/۰۰۵	شیر یک‌طرفه
۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۰۰۵	۰/۰۲	شیربرقی پنوماتیکی
۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۷۸	۰/۰۰۵	ریل ایولو
۰/۲۵	۰/۹۰	۰/۲۵	۰/۴۷	۰/۰۰۵	سیستم تامین انرژی الکتریکی
۰/۲۵	۰/۷۲	۰/۲۵	۰/۵۱	۰/۰۰۵	سنسور الکتریکی
۰/۲۵	۰/۴۵	۰/۲۱	۰/۰۴	۰/۲۲	شیربرقی
۰/۰۵	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۶۴	۰/۰۰۵	پمپ هیدرولیکی
۰/۲۵	۰/۵۹	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۰۰۵	سیلندرهای موتور

جدول ۱۱- مشخصات جامع زیرسیستم‌ها

تعیین پارامترها	بهترین توزیع	شرایط همبستگی	نوع روند	زیرسیستم
Mean = ۵۹۸,۸۴	Exponential-1P	دارای iid	بدون روند	شلنگ باد
Mean = ۶,۲۶ , SD = ۰,۸۵	Log-Normal-2P	دارای iid	بدون روند	رگلاتور
Mean = ۵,۴۳ , SD = ۱,۰۸	Log-Normal-2P	دارای iid	بدون روند	شیر یک‌طرفه
$\beta = ۱,۳۱$, $\eta = ۸۰۴,۷۴$	Weibull-2P	دارای iid	بدون روند	شیربرقی پنوماتیکی
Mean = ۵,۶۷ , SD = ۱,۲۰	Log-Normal-2P	دارای iid	بدون روند	ریل ایولو
Mean = ۱۵۰۲,۲۹	Exponential-1P	دارای iid	بدون روند	سیستم تامین انرژی الکتریکی
Mean = ۶۸۱,۰۴	Exponential-1P	دارای iid	بدون روند	سنسور الکتریکی
Mean = ۶۶۶	Exponential-1P	دارای iid	بدون روند	شیربرقی
Mean = ۵,۸۵ , SD = ۱,۰۱	Log-Normal-2P	دارای iid	بدون روند	پمپ هیدرولیکی
Mean = ۴۳۷,۳۳	Exponential-1P	دارای iid	بدون روند	سیلندرهای موتور

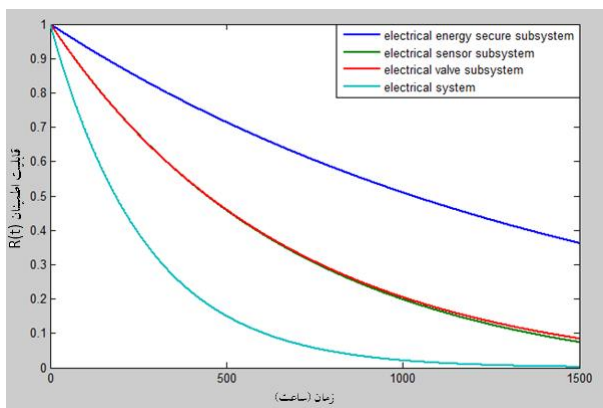


شکل ۱۶- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و سیستم پنوماتیکی

ب- قابلیت اطمینان سیستم الکتریکی

قابلیت اطمینان سیستم الکتریکی از حاصل ضرب قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های سنسور الکتریکی، شیربرقی و سیستم تامین انرژی الکتریکی به صورت رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$(۲) \quad R_{\text{سنسور الکتریکی}} \cdot R_{\text{شیر برقی}} \cdot R_{\text{سیستم تامین انرژی الکتریکی}} = R_{\text{الکتریکی}}$$



شکل ۱۷- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و سیستم الکتریکی

ب- قابلیت اطمینان سیستم موتور و سیستم هیدرولیکی

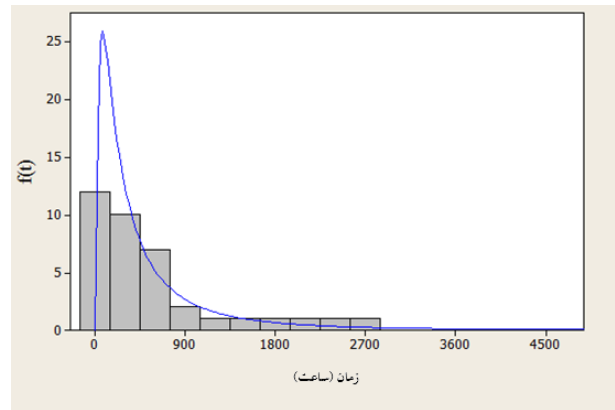
با توجه به این که در سیستم موتور و سیستم هیدرولیکی، خرابی‌های مشاهده شده به ترتیب فقط در سیلندرهای موتور و پمپ هیدرولیکی بوده، بنابراین، قابلیت اطمینان سیستم موتور و سیستم هیدرولیکی به ترتیب برابر با قابلیت اطمینان زیرسیستم سیلندرهای موتور و پمپ هیدرولیکی است (روابط ۳ و ۴).

$$(۳) \quad R_{\text{سیلندرهای موتور}} = R_{\text{موتور}}$$

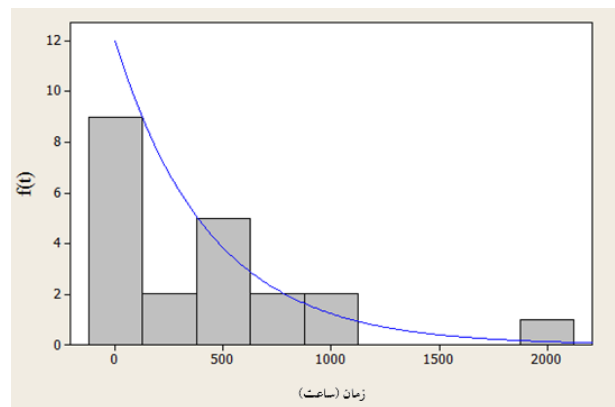
$$(۴) \quad R_{\text{پمپ هیدرولیکی}} = R_{\text{هیدرولیکی}}$$

ت- قابلیت اطمینان کل سیستم (لوکوموتیو)

با مشخص شدن قابلیت اطمینان تک تک زیرسیستم‌ها و به طبع آن قابلیت اطمینان سیستم‌ها، می‌توان قابلیت اطمینان



شکل ۱۴- توزیع لاگ نرمال برای داده‌های زیرسیستم ریل ایولو



شکل ۱۵- توزیع نمایی برای سیلندرهای موتور

۴-۵- تعیین قابلیت اطمینان سیستم

بعد از مشخص شدن توابع توزیع و پارامترهای توزیع، قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌ها، سیستم‌ها و لوکوموتیو به دست می‌آید. زیرسیستم‌ها به صورت سری نسبت به هم (در صورت خرابی یک زیرسیستم، کل سیستم و به طبع آن کل دستگاه از کار خواهد افتاد)، باعث کارکرد کل سیستم، یعنی لوکوموتیو می‌شوند.

الف- قابلیت اطمینان سیستم پنوماتیکی

قابلیت اطمینان سیستم پنوماتیکی از حاصل ضرب قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ریل ایولو، شیربرقی پنوماتیکی، شیر یک‌طرفه، رگلاتور و شیلنگ باد به صورت رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$(۱) \quad R_{\text{پنوماتیکی}}$$

$$= R_{\text{ریل ایولو}} \cdot R_{\text{شیربرقی پنوماتیکی}} \cdot R_{\text{چک ولو}} \cdot R_{\text{رگلاتور}} \cdot R_{\text{شیلنگ باد}}$$

لوکوموتیو را محاسبه کرد (رابطه ۵):

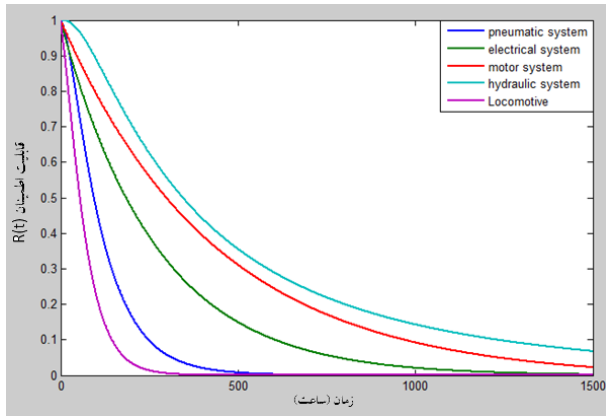
$$R_{\text{لوکوموتیو}} = R_{\text{هیدرولیکی}} \cdot R_{\text{موتور}} \cdot R_{\text{الکتریکی}} \cdot R_{\text{پنوماتیکی}} \cdot R_{\text{لوکوموتیو}} \quad (5)$$

شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و سیستم‌ها را با گذر زمان نشان می‌دهد.

چنانچه از شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ملاحظه می‌شود، قابلیت اطمینان زیرسیستم و سیستم موتور بعد از گذشت ۲۰۰۰ ساعت و زیرسیستم و سیستم هیدرولیکی بعد از گذشت ۳۵۰۰ ساعت به صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان از تفاضل مساحت تجمع‌ی از مساحت بخشی از زیرمنحنی در زمان خاص بدست می‌آید و با گذر زمان، این قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد و در نهایت به صفر می‌رسد. این دقیقاً، نقطه به نتیجه رسیدن و همان زمان پیشنهادی برای PM یا انجام تعمیرات پیشگیرانه است.

تمامی زیرسیستم‌ها باشد.

در جدول‌های ۱۲ تا ۱۴، قابلیت اطمینان به ترتیب برای زیرسیستم‌های پنوماتیکی، الکتریکی و برای سیستم‌ها و لوکوموتیو طی کارکرد صفر تا ۵۰۰ ساعت به نمایش درآمده است.



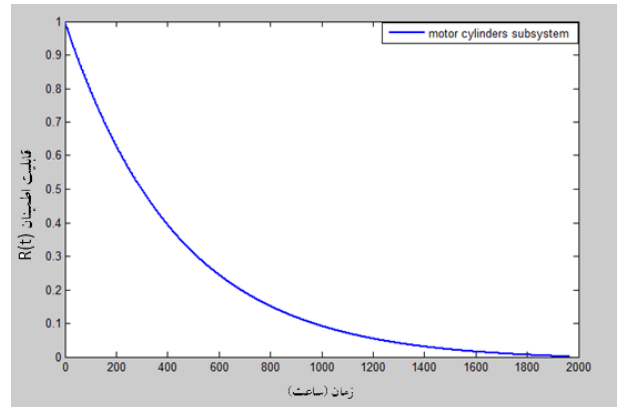
شکل ۲۰- قابلیت اطمینان سیستم‌ها و لوکوموتیو

جدول ۱۲- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های پنوماتیکی

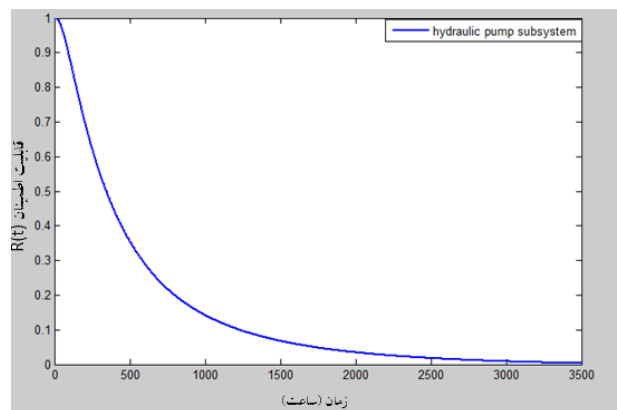
ریل ایولو	قابلیت اطمینان				زمان (ساعت)
	شیربرقی پنوماتیکی	شیر یک‌طرفه	رگلاتور	شلنگ باد	
۱	۱	۱	۱	۱	۰
۰٫۸۱	۰٫۹۳	۰٫۷۶	۰٫۹۶	۰٫۸۳	۱۰۰
۰٫۶۱	۰٫۸۳	۰٫۵۳	۰٫۸۵	۰٫۷۰	۲۰۰
۰٫۴۶	۰٫۷۳	۰٫۳۷	۰٫۷۲	۰٫۵۹	۳۰۰
۰٫۳۷	۰٫۶۴	۰٫۲۷	۰٫۵۹	۰٫۵۰	۴۰۰
۰٫۳۰	۰٫۵۵	۰٫۲۰	۰٫۴۸	۰٫۴۲	۵۰۰

جدول ۱۳- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های الکتریکی

سیستم تامین انرژی الکتریکی	قابلیت اطمینان		زمان (ساعت)
	شیربرقی	سنسور الکتریکی	
۱	۱	۱	۰
۰٫۹۴	۰٫۸۵	۰٫۸۵	۱۰۰
۰٫۸۷	۰٫۷۲	۰٫۷۲	۲۰۰
۰٫۸۱	۰٫۶۲	۰٫۶۲	۳۰۰
۰٫۷۶	۰٫۵۴	۰٫۵۴	۴۰۰
۰٫۷۱	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۵۰۰



شکل ۱۸- قابلیت اطمینان زیرسیستم و سیستم موتور



شکل ۱۹- قابلیت اطمینان زیرسیستم و سیستم هیدرولیکی

همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، با گذشت زمان، قابلیت اطمینان کل دستگاه (لوکوموتیو) بیشتر از سیستم‌ها کاهش پیدا می‌کند. این موضوع، می‌تواند به علت سری بودن تمامی زیرسیستم‌ها و متاثر شدن کل دستگاه (لوکوموتیو) از

جدول ۱۴- قابلیت اطمینان سیستم‌ها و لوکوموتیو

زمان (ساعت)	قابلیت اطمینان				
	پنوماتیکی	الکتریکی	هیدرولیکی	موتور	لوکوموتیو
۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۰۰	۰/۴۶	۰/۶۸	۰/۸۸	۰/۷۹	۰/۲۲
۲۰۰	۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۶۹	۰/۶۲	۰/۰۳۲
۳۰۰	۰/۰۵	۰/۳۲	۰/۵۵	۰/۴۹	۰/۰۰۴
۴۰۰	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۰۰۰۳
۵۰۰	۰/۰۰۷	۰/۱۴	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۰۰۰۱

۴-۶- تعیین قابلیت دسترسی سیستم

با توجه به جدول ۸ و مقادیر P-value ارائه شده در این جدول، تمامی داده‌ها بدون روندند. در صورت عدم روند در داده‌ها، آن‌ها جزو اقلام غیرقابل تعمیر و قابل تعویض‌اند و در این صورت، قابلیت اطمینان برابر با قابلیت دسترسی خواهد شد. در این حالت می‌توان از جداول ۱۲ تا ۱۴، برای بیان قابلیت دسترسی لحظه‌ای زیرسیستم‌ها و لوکوموتیو در زمان‌های متفاوت استفاده کرد. با توجه به کارکرد سری زیرسیستم‌ها، قابلیت دسترسی سیستم‌ها به صورت روابط ۶ تا ۱۰ قابل محاسبه‌اند:

$$A_{\text{لوکوموتیو}} = A_{\text{هیدرولیکی}} \cdot A_{\text{موتور}} \cdot A_{\text{الکتریکی}} \cdot A_{\text{پنوماتیکی}} \cdot A_{\text{لوکوموتیو}} \quad (۶)$$

$$\quad (۷)$$

$$A_{\text{پنوماتیکی}} = A_{\text{ریل ایولو}} \cdot A_{\text{شیر برقی پنوماتیکی}} \cdot A_{\text{چک ولو}} \cdot A_{\text{رگلاتور}} \cdot A_{\text{شیلنگ باد}} \quad (۸)$$

$$A_{\text{سنسور الکتریکی}} = A_{\text{شیر برقی}} \cdot A_{\text{سیستم تامین انرژی الکتریکی}} \cdot A_{\text{الکتریکی}} \quad (۹)$$

$$A_{\text{موتور}} = A_{\text{سیلندرهای موتور}} \quad (۱۰)$$

$$A_{\text{پمپ هیدرولیکی}} = A_{\text{هیدرولیکی}} \quad (۱۰)$$

قابلیت دسترسی ذاتی زیرسیستم‌ها نیز در جدول ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به کارکرد سری زیرسیستم‌ها، قابلیت دسترسی کل سیستم (لوکوموتیو) ۸۴ درصد است که از حاصل ضرب قابلیت دسترسی تمامی زیرسیستم‌ها به دست آمده است.

۴-۷- تعیین قابلیت تعمیرپذیری سیستم

با توجه به کارکرد سری اجزا با یکدیگر، قابلیت تعمیرپذیری سیستم‌ها و همچنین لوکوموتیو نیز به صورت سری خواهد بود.

تفاوت در قابلیت تعمیرپذیری مربوط به اجزا خراب شده در زمان خاص است. به عنوان مثال اگر در یک زمان خاص، لوکوموتیو به دلیل خرابی پمپ هیدرولیکی خراب شده باشد، قابلیت تعمیرپذیری لوکوموتیو برابر با قابلیت تعمیرپذیری پمپ هیدرولیکی خواهد بود و یا اگر در یک زمان خاص به دلیل خرابی دو جز، لوکوموتیو از دسترس خارج شده باشد، در این صورت قابلیت تعمیرپذیری لوکوموتیو برابر با قابلیت تعمیرپذیری جزیی که بیشترین زمان را برای تعمیر شدن می‌طلبد، خواهد بود. در شکل‌های ۲۱ تا ۲۴، قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های مربوط به هر سیستم مشخص شده است. قابلیت تعمیرپذیری اجزا با در دست بودن متوسط زمان‌های تعمیراتی (جدول ۱۶) با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه شده است.

$$M(t) = \int_0^T \exp\left(-\frac{t}{MTTR}\right) \quad (۱۱)$$

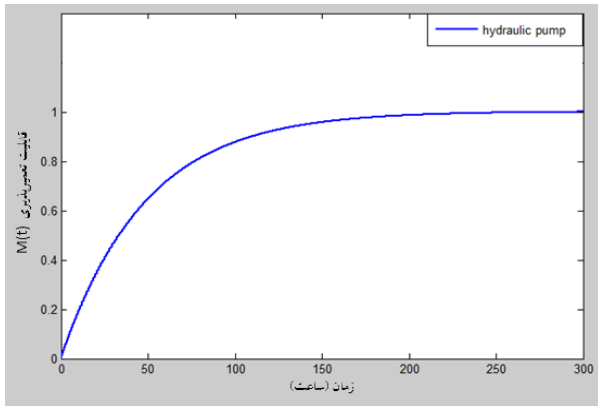
جدول ۱۵- قابلیت دسترسی ذاتی زیرسیستم‌ها

زیرسیستم	قابلیت دسترسی (درصد)
شلنگ باد	۹۹/۸
رگلاتور	۹۹/۸
شیر یک‌طرفه	۹۹/۸
شیربرقی پنوماتیکی	۹۹/۹
ریل ایولو	۹۹/۸
سیستم تامین انرژی الکتریکی	۹۹/۹
سنسور الکتریکی	۹۹/۸
شیربرقی	۹۹/۸
پمپ هیدرولیکی	۹۴
سیلندرهای موتور	۹۱

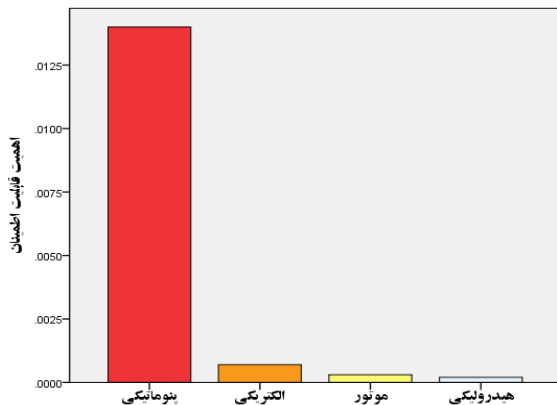
جدول ۱۶- متوسط زمان‌های تعمیراتی زیرسیستم‌ها

زیرسیستم	متوسط زمان‌های تعمیراتی (ساعت)
سیلندرهای موتور	۴۸
پمپ هیدرولیکی	۴۸
شیر برقی	۱
سنسور الکتریکی	۱
سیستم تامین انرژی الکتریکی	۰/۵
ریل ایولو	۱
شیر برقی پنوماتیکی	۰/۵
شیر یک‌طرفه	۰/۵
رگلاتور	۱
شلنگ باد	۱

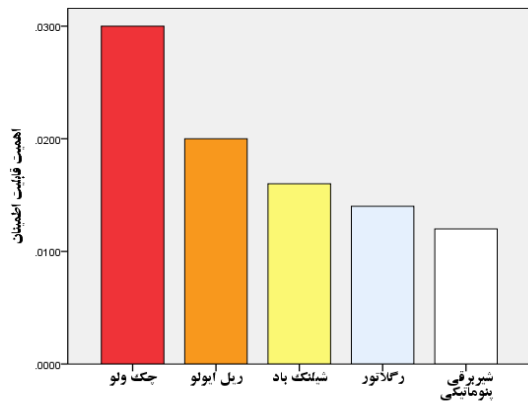
داخل یک سیستم در زمان مورد نظر است. در این بخش به بررسی اهمیت قابلیت اطمینان در ۵۰۰ ساعت برای سیستم‌های لوکوموتیو وکل لوکوموتیو پرداخته شده است. برای سیستم‌های موتور و هیدرولیکی با توجه به تک بودن زیرسیستم آن‌ها، اهمیت قابلیت اطمینان فقط در کل سیستم بررسی می‌شود. در شکل‌های ۲۵ تا ۲۷، اهمیت قابلیت اطمینان سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها مشخص شده است.



شکل ۲۴- قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم هیدرولیکی



شکل ۲۵- اهمیت قابلیت اطمینان سیستم‌ها در ۵۰۰ ساعت

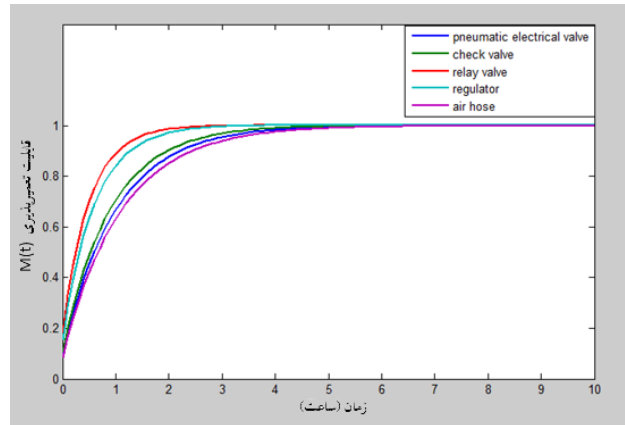


شکل ۲۶- اهمیت قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های پنوماتیکی در ۵۰۰ ساعت

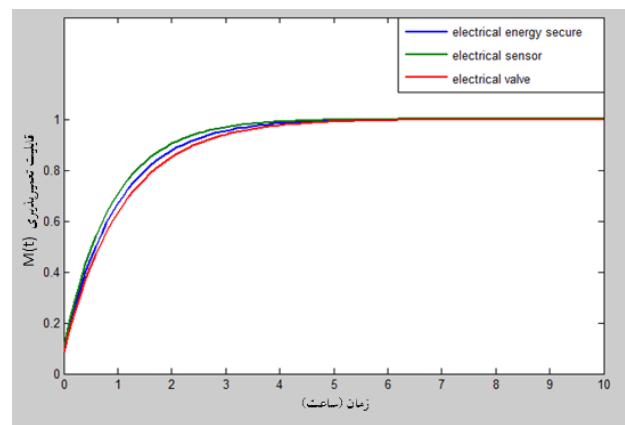
همانطور که در شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ مشاهده می‌شود، قابلیت تعمیرپذیری هر یک از زیرسیستم‌ها بعد از چندین ساعت به یک نزدیک می‌شود. در این میان، زمان لازم برای تعمیر زیرسیستم‌های پنوماتیکی و الکتریکی نسبت به زیرسیستم‌های موتور و هیدرولیکی کمتر است.

۸-۴- بررسی اهمیت قابلیت اطمینان

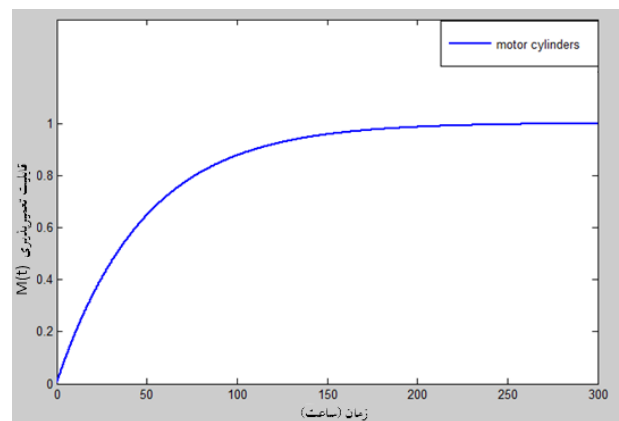
اهمیت قابلیت اطمینان در واقع اهمیت یک زیرسیستم در



شکل ۲۱- قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های پنوماتیکی

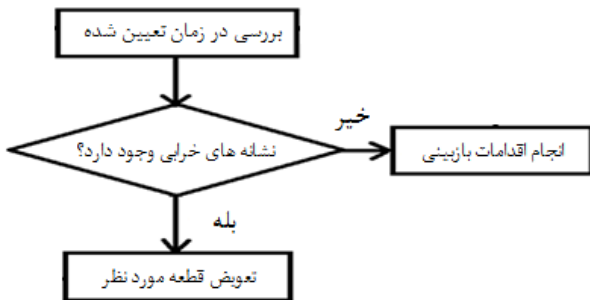


شکل ۲۲- قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های الکتریکی



شکل ۲۳- قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم موتور

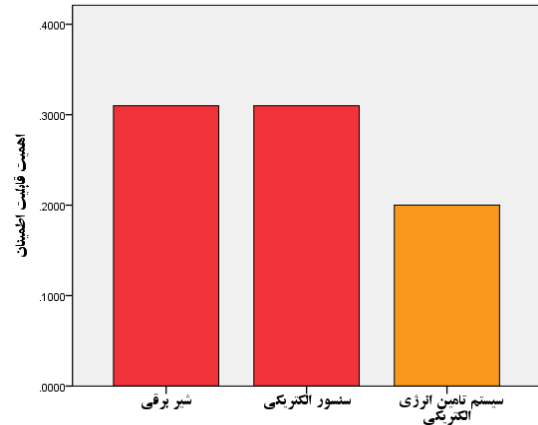
با توجه به این که برنامه تعمیر و نگهداری، یک رویکرد مناسب هزینه‌ای را برای توجیه اقتصادی می‌طلبد، با توجه به جدول ۲۰ که شامل هزینه‌های تعمیراتی است و با توجه به درآمد پیمانکار حفاری از حفر هر متر تونل که از قرار ۱۲۵ میلیون تومان است و از طرفی با توجه به برداشت‌هایی که از حدود ۳ کیلومتر از داده‌های حفاری تونل‌ها با ماشین EPB-TBM به دست آمده است، مشخص شد که پیشروی تونل‌ها به طور متوسط حدود ۴۰ میلی‌متر در دقیقه است که در واقع هر ساعت، حدود ۲/۵ متر تونل حفر می‌شود. همچنین با در نظر داشتن توقف‌های ناگهانی لوکوموتیو داخل تونل که به طور متوسط موجب یک ساعت تاخیر در روند عملیات می‌شود، بنابراین، برنامه تعمیر و نگهداری ارایه شده، توجیه اقتصادی دارد.



شکل ۲۸- مراحل نت پیشگیرانه

جدول ۱۷- متوسط زمان‌های خرابی زیر سیستم‌ها

متوسط زمان‌های خرابی (ساعت)	زیرسیستم
۶۴۰	شلنگ باد
۷۷۶	رگلاتور
۴۲۱	شیر یک‌طرفه
۸۰۵	شیر برقی پنوماتیکی
۶۲۷	ریل ایولو
۱۷۳۷	سیستم تامین انرژی الکتریکی
۷۰۸	سنسور الکتریکی
۶۹۲	شیر برقی
۷۶۲	پمپ هیدرولیکی
۴۸۶	سیلندرهای موتور



شکل ۲۷- اهمیت قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های الکتریکی در ۵۰۰ ساعت

۹-۴- تعیین برنامه تعمیر و نگهداری (نت)

برنامه تعمیر و نگهداری به وسیله الگوریتم ارایه شده در شکل ۲۸ برای سیستم معرفی شده است. زمان بررسی اجزا با استفاده از متوسط زمان‌های خرابی (MTTF) که با در نظر گرفتن تاثیر چگالی تابع توزیع، زمان متوسط را برای خرابی‌ها ارایه می‌کند (جدول ۱۷) و به کمک رابطه ۱۲ برای زیرسیستم‌ها تعیین شده است:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (12)$$

با استفاده از تکنیک FMEA، به ریشه‌یابی علل و همچنین نشانه‌های خرابی پرداخته شده است. از نکات قابل ذکر برنامه تعمیر و نگهداری، پیشگیرانه بودن آن است. همچنین با توجه به این که مقدار متوسط زمان خرابی برای هر یک از زیرسیستم‌ها طبق جدول ۱۷، بیشتر از ۴۰۰ ساعت است، بنابراین، نقطه ۴۰۰ ساعت به عنوان نقطه نت پیشگیرانه دوره‌ای برای تمامی زیرسیستم‌ها ارایه شده است. در جداول ۱۸ و ۱۹، یک چک لیست نهایی با PM بهینه که شامل اقدامات پیشگیرانه نیز است برای کل سیستم تعریف شده است. با توجه به این که برنامه تعمیر و نگهداری به کمک روش FMEA و همچنین با در نظر گرفتن زمان دوره‌ای ۴۰۰ ساعت برای بازبینی قطعات است که در این ساعت، تمامی زیرسیستم‌ها از لحاظ قابلیت اطمینان طبق جداول ۱۲، ۱۳ و ۱۴، افت قابل ملاحظه‌ای را کرده‌اند، می‌توان گفت نت ایجاد شده برای سیستم، مبتنی بر پایش وضعیت و قابلیت اطمینان است.

جدول ۱۸- تحلیل FMEA زیرسیستم‌ها

دلایل	نشانه‌ها	مودخرابی	زیرسیستم
خرابی فنر به دلیل باز و بسته شدن‌های متعدد و متوالی	کم کردن باد و عدم حرکت لوکوموتیو	خرابی فنر شیر یک‌طرفه	شیر یک‌طرفه
فرسودگی شلنگ در اثر فشار	افت فشار باد	سوراخ شدن شلنگ	شلنگ باد
فرسوده شدن لاستیک	کم کردن باد و عدم حرکت لوکوموتیو	خرابی لاستیک	ریل ایولو
فرسودگی در اثر فشارهای متناوب و زیاد	نشان ندادن فشار	خرابی داخلی رگلاتور	رگلاتور
خرابی فنر به دلیل باز و بسته شدن‌های متعدد و متوالی	کم کردن باد و عدم حرکت لوکوموتیو	خرابی فنر اسپول	شیربرقی پنوماتیکی
فرسوده شدن خود شیر برقی	نشان ندادن فشار هیدرولیک	از کار افتادن داخلی شیر برقی	شیربرقی
وارد شدن بار اضافی و نامتقارن الکتریکی به سنسور	سیاه شدن مدارهای سنسور	خرابی داخلی سنسور	سنسور الکتریکی
فرسودگی تسمه دینام	هنگام استارت لوکوموتیو روشن نمی‌شود، چراغ‌های لوکوموتیو خاموش می‌شود.	پارگی تسمه دینام	سیستم تامین انرژی الکتریکی
پوسیدگی اورینگ بوش و واشر سرسیلندر در اثر فشار بار زیاد در شیب‌ها و فواصل طولانی	مشاهده آب داخل روغن موتور و یا روغن موتور در آب رادیاتور، داغ کردن موتور، بیرون زدن آب از رادیاتور	قاطی کردن آب و روغن	سیلندرهای موتور
کثیفی محیط و آلوده بودن روغن	افت فشار روغن هیدرولیک	از کار افتادگی داخلی پمپ	پمپ هیدرولیکی

جدول ۱۹- نت پیشگیرانه زیرسیستم‌ها

PM= 400h		زیرسیستم
اقدامات هنگام مشاهده نشانه‌های خرابی	اقدامات هنگام مشاهده نشانه‌های خرابی	
فنر بازرسی شود تا از عدم ترک یا شکستگی در آن اطمینان حاصل شود.	فنر شیر یک‌طرفه سریعاً تعویض و با یک فنر نو جایگزین شود.	شیر یک‌طرفه
شلنگ بررسی شده تا از عدم باد دهی به بیرون از شلنگ اطمینان حاصل شود.	شلنگ جدید جایگزین شلنگ کهنه شود.	شلنگ باد
لاستیک ریل ایولو بازرسی شود تا از عدم پارگی در آن اطمینان حاصل شود.	لاستیک ریل ایولو با یک لاستیک جدید جایگزین شود.	ریل ایولو
از نبود ترک‌های کوچک در بدنه رگلاتور اطمینان حاصل شود.	رگلاتور جدید جایگزین شود.	رگلاتور
فنر بازرسی شود تا از عدم ترک یا شکستگی در آن اطمینان حاصل شود.	فنر اسپول سریعاً تعویض و با یک فنر نو جایگزین شود.	شیربرقی پنوماتیکی
شیربرقی با یک هواگیری تمیز شود.	شیر برقی نو جایگزین شود.	شیربرقی
—	سنسور جدید جایگزین شود.	سنسور الکتریکی
—	تسمه دینام تعویض شود.	سیستم تامین انرژی الکتریکی
—	واشر سر سیلندر تعویض شود.	سیلندرهای موتور
فیلتر روغن تعویض شود.	پمپ و روغن تعویض شود.	پمپ هیدرولیکی

جدول ۲۰- هزینه‌های تعمیراتی زیرسیستم‌ها

زیرسیستم	قطعه مورد نظر برای تعمیر	هزینه (میلیون تومان)
سیلندرهای موتور	واشر سرسیلندرها	۳/۵
پمپ هیدرولیکی	پمپ	۲۰
شیر برقی	شیر برقی	۲
سنسور الکتریکی	سنسور	۳
سیستم تامین انرژی الکتریکی	تسمه دینام	۰/۳
ریل ایولو	لاستیک ریل ایولو	۰/۱
شیر برقی پنوماتیکی	فنر اسپول	۰/۳
شیر یک طرفه	فنر شیر یک طرفه	۰/۱۵
رگلاتور	رگلاتور	۰/۷۵
شلنگ باد	شلنگ نو	۰/۲۵

۵- نتیجه‌گیری

حفاری تونل‌های دوقلوی خط یک متروی تبریز با ماشین حفاری EPB-TBM و حمل قطعات و وسایل مورد نیاز برای حفاری و همچنین بیرون کشاندن مواد حفاری شده از تونل، به وسیله لوکوموتیوها انجام می‌شود. بنابراین، هماهنگی بین ماشین حفار EPB-TBM و لوکوموتیوها، حین عملیات حفاری اهمیت زیادی دارد. با توجه به اهمیت رفتارسنجی لوکوموتیوها در گذر زمان با ترکیب داده‌های خرابی مربوط به پنج لوکوموتیو با حدود ۳۰۰۰۰ ساعت کارکرد، تحلیل خرابی‌ها برای لوکوموتیوها که در اواسط عمر سرویس‌دهی خود قرار گرفته‌اند، انجام شد. سپس، قابلیت اطمینان لوکوموتیو، مدلسازی شده و با استفاده از آن، یک برنامه تعمیر و نگهداری، برای به حداقل رساندن تاخیرات ناشی از لوکوموتیو در فرآیند حفاری ارائه شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این مطالعه عبارتند از:

- در این تحقیق با بررسی سابقه خرابی‌های رخ داده در سیستم، قابلیت اطمینان لوکوموتیوهای پشتیبان خط یک مترو تبریز، مدلسازی شده و با استفاده از آن، یک برنامه تعمیر و نگهداری برای به حداقل رساندن تاخیرات ناشی از لوکوموتیوهای پشتیبان در فرآیند حفاری ارائه شد. تعیین نت پیشگیرانه مناسب برای لوکوموتیوها و بازرسی‌های دوره‌ای متناسب با جداول PM، می‌تواند تاثیر بسزایی، در جلوگیری از خرابی‌های لوکوموتیو و به طبع آن کاهش توقف‌های غیربرنامه‌ای عملیات حفاری داشته باشد.
- اجزای بحرانی در لوکوموتیوهای پشتیبان خط یک مترو تبریز، شامل ده زیرسیستم می‌شود. تحلیل‌های پارتو نشان

می‌دهد، بیشترین درصد خرابی به ترتیب برای سیستم‌های پنوماتیکی، الکتریکی، هیدرولیکی و موتور است. از لحاظ هزینه‌ها نیز بخش قابل توجهی از هزینه‌ها را بخش هیدرولیکی که تنها شامل زیرسیستم پمپ هیدرولیکی می‌شود، به خود اختصاص می‌دهد و بعد از این بخش، سیستم‌های پنوماتیکی، الکتریکی و موتور به ترتیب شامل بیشترین هزینه‌ها است. از لحاظ زمان‌های تعمیراتی نیز، بخش قابل توجهی مربوط به سیستم هیدرولیکی است و بعد از آن موتور و سیستم پنوماتیکی، بیشترین زمان تعمیراتی را دارند.

- ثابت بودن و همسان و مستقل بودن داده‌ها، باعث قرارگیری زیرسیستم‌ها در رده اقلام غیرقابل تعمیر (تعویض‌پذیر) و همچنین منطبق شدن قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی شده است.

- اهمیت قابلیت اطمینان برای سیستم‌ها در ۲۰۰ و ۵۰۰ ساعت است که حاکی از اهمیت قابلیت اطمینان به ترتیب برای سیستم‌های پنوماتیکی، الکتریکی، موتور و هیدرولیکی است. در واقع اهمیت قابلیت اطمینان نشانه‌ای از واکنش سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها به گذر زمان است. در بررسی اهمیت قابلیت اطمینان در هر دو دسته بررسی شده، سیستم پنوماتیکی اختلاف زیادی با سه سیستم دیگر دارد و با گذر زمان، این اختلاف بیشتر هم می‌شود. از نتایج بسیار مهم دیگر، افت قابلیت اطمینان تقریباً تمامی زیرسیستم‌ها به زیر ۵۰ درصد بعد از ۵۰۰ ساعت کارکرد است.

- در بخش تعمیر و نگهداری با توجه به توابع توزیع برازش شده برای تمامی زیرسیستم‌ها، متوسط زمان خرابی برای زیرسیستم‌ها تعیین شده است. نتایج نشان داد، تمامی زمان‌های خرابی به دست آمده، بالاتر از ۴۰۰ ساعت است.

منابع

۱. مصطفایی دانشمند، ح؛ ۱۳۹۹؛ «بررسی قابلیت اطمینان لوکوموتیو پشتیبان در دستگاه حفاری تمام مقطع تونل (TBM)، مطالعه موردی: خط یک متروی تبریز»؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن؛ دانشگاه صنعتی سهند تبریز.
2. Ascher, H; Feingold, H; 1984; "Repairable system reliability", New York, Dekker.
3. Barabady, J; Kumar, U; 2008; "Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran", Reliability Engineering & System Safety, 93(4), 647-653.

- Sattarvand, J; 2014; "Application of reliability-centered maintenance for productivity improvement of open pit mining equipment: case study of Sungun copper mine", Journal of Central South University, 21, 2372-2382.
15. Sinha, R.S; Mukhopadhyay, A.K; 2015; "Reliability centered maintenance of cone crusher-a case study", Int J Syst Assurance Eng Manag, 6(1), 32-35.
 16. Lin, J; Pulido, J; Asplund, M; 2015; "Reliability analysis for preventive maintenance based on classical and Bayesian semi-parametric degradation approaches using locomotive wheel-sets as a case study" Reliability Engineering & System Safety, 134, 143-156.
 17. Mohammadi, M; Rai, P; Gupta, S; 2016; "Improving productivity of dragline through enhancement of reliability inherent availability and maintainability", Acta Montanistica Slovaca, 21(1), 1-8.
 18. Nouri Qarahasanlou, A; Khalokakaie, R; Ataei, M; Ghodrati, B; 2016; "Operating environment-based availability importance measures for mining equipment (case study: Sungun copper mine)", Journal of Failure Analysis and Prevention, 17, 56-67.
 19. Balaraju, J; Govinda, R.M; Murthy, C.S.N; 2018; "Estimation of Reliability-based maintenance time intervals of Load Haul Dumper in an underground coal mine", Int J Min Environ, 9(3), 761-770.
 20. Balaraju, J; Govinda Raj, M; Murthy, Ch.S.N; 2020; "Performance evaluation of underground mining machinery: a case study", Journal of Failure Analysis and Prevention, 20, 1726-1737.
 21. Angeles, E; Kumral, M; 2020; "Optimal Inspection and Preventive Maintenance Scheduling of Mining Equipment", Journal of Failure Analysis and Prevention, 20, 1408-1416.
 22. Leite, M; Costa, M.A; Alves, T; Infante, V; Andrade, A.R; 2022; "Reliability and availability assessment of railway locomotive bogies under correlated failures", Engineering Failure Analysis, 135.
 4. Chulho, B; Taeyoon, K; Youngtak, S; Kyjun, P; Jongdeok, J; 2009; "A study on reliability centered maintenance planning of a standard electric motor unit subsystem using computational techniques", Journal of Mechanical Science and Technology, 23, 1157-1168.
 5. Jing, L; Julio, P; Matthias, A; 2015; "Reliability analysis for preventive maintenance based on classical and Bayesian semi-parametric degradation approaches using locomotive wheel-sets as a case study", Reliability Engineering, 134, 143-156.
 6. Kumar, U; Klefsjo, B; 1992; "Reliability analysis of hydraulic system of LHD machine using the power law process model", Reliability Engineering & System Safety.
 7. Liu, P; Wu, Y; Huang, Q; 2005; "Preliminary leakage reliability analysis of DFLL-TBM based on a combinational approach", Fusion Engineering and Design, 75, 1127-1133.
 8. Myrefelt, S; 2004; "The reliability and availability of heating, ventilation and air conditioning systems", 36(10), 1035-1048.
 9. Nachlas, J; 2005; "Reliability engineering", Taylor & Francis.
 10. Kumar, U; Klefsjo, B; Granholm, S; 1989; "Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a Swedish mine", Reliab Eng Syst Saf, 26(4), 341-361.
 11. Vagenas, N; Runciman, N; Clement, S.R; 1997; "A methodology for maintenance analysis of mining equipment", Int J Surface Min Reclamat Environ, 11, 33-40.
 12. Sharma, R.K; Sharma, P; 2012; "Integrated framework to optimize RAM and cost decisions in a process plant", Industries, 25(6), 883-904.
 13. Lashgari, A; Sayadi, A.R; 2013; "Statistical approach to determination of overhaul and maintenance cost of loading equipment in surface mining", International Journal of Mining Science and Technology, 23(3), 441-446.
 14. Moniri Morad, A; Pourgol-Mohammad, M;