نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره ۱۵، شماره ۴۷، تابستان ۹۹، صفحه ۴۳ تا ۵۵
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol 15, No 47, 2020, pp 43-55

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی در تعیین گلوگاه سیستم حمل و نقل در معدن گل‌گهر

علی حضرتی دستجرد[۱]، سیدشمس‌الدین وهابی[۲]، علی‌اصغر خدایاری[۳*]، علی نوری قراحسنلو[۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران Hazrati.ali@ut.ac.ir
۲ . استادیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران shvahabi@ut.ac.ir
۳ . استادیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران khodaiar@ut.ac.ir
۴ . دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران Alinoorimine@gmail.com

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۷- پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳)

چکیده

دامپتراک‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین ماشین‌آلات باربری در معادن روباز مطرح می‌باشند. هزینه‌ی سرمایه‌ای و عملیاتی بالای این ماشین‌آلات، مدیریت دقیق و بهره‌وری حداکثری را می‌طلبد که این موضوع نیز در گرو شناخت دقیق از سیستم و درک رفتار آن در شرایط عملیاتی مختلف است. رویکرد "سنجش اهمیت" از جمله روش‌های پرکاربرد در این زمینه است که با اولویت‌بندی سیستم یا اجرای آن از دیدگاه‌های مختلف مانند وضعیت سرپایی، خواب یا آماده‌به‌کاری مهندسین را در اتخاذ تصمیمات صحیح مدیریتی و تخصیص منابع یاری می‌دهد. سنجش اهمیت قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری یا دسترسی به‌عنوان تلفیقی از این دو با تحلیل زمان‌های سرپایی و خواب قادر به اولویت‌بندی و تعیین گلوگاه عملکردی سیستم می‌باشند. بنابراین در این مقاله رویکردی جامع بر اساس سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برای افزایش عملکرد یک دستگاه دامپتراک معدن گل‌گهر سیرجان پیشنهاد شد. در این دامپتراک، زیرسیستم انتقال‌قدرت و بدنه به‌ترتیب به‌عنوان پراهمیت‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین زیرسیستم از نظر قابلیت دسترسی شناخته شدند. همچنین افزایش قابلیت دسترسی دامپتراک در گرو افزایش قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم انتقال قدرت است.

کلمات کلیدی

قابلیت دسترسی، قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، سنجش اهمیت

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

توان تولید تجهیزات معدنی تابع سه پارامتر قابلیت‌دسترسی[۱]، بهره‌وری[۲] و عملکرد تولید[۳] است. قابلیت دسترسی وابسته به زمان فعال[۴] و غیر فعال[۵] بودن، بهره‌وری وابسته به زمان استفاده مفید از تجهیزات در دسترس، و عملکرد تولید وابسته به کارکرد تجهیزات با حداکثر ظرفیت است. از بین پارامترهای بیان‌شده، قابلیت دسترسی به‌عنوان اولین و مهم‌ترین پارامتر مؤثر در توان تولید تجهیزات معدنی است[۱].

زمان فعال و غیرفعال سیستم، توسط خرابی‌ها کنترل می‌شود. خرابی‌های تجهیزت را نمی‌توان به کلی حذف کرد ولی با مدیریت تجهیزات می‌توان از تعداد خرابی‌ها کاست. تأثیر زیان‌بار خرابی‌ها شامل کم شدن تولید و به دنبال آن از دست رفتن اعتبار شرکت در بازار رقابتی امروزه، مشکلات ایمنی و هزینه‌ی بالای نگهداری و تعمیرات است. در معادن، هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات برای این ماشین‌آلات برابر با ٪۶۰-۴۰ هزینه‌های عملیاتی است[۲].

قابلیت دسترسی همواره به‌عنوان شاخصی کارآمد برای سنجش عملکرد و مدیریت تجهیزات مورد توجه بوده است. قابلیت دسترسی ترکیبی از قابلیت اطمینان[۶]، قابلیت تعمیرپذیری[۷] و قابلیت پشتیبانی[۸] از تعمیرات است. قابلیت اطمینان زمان فعال سیستم و قابلیت تعمیرپذیری و پشتیبانی زمان غیرفعال شامل تعمیرات و خواب سیستم را کنترل می‌کند[۳]. مطالعه‌ی شاخص قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیرپذیری اطلاعات مفیدی درمورد طراحی سیستم، هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سیستم، برنامه‌ریزی‌های آینده، برنامه‌ریزی برای تعمیرات پیشگیرانه و تعیین گلوگاه سیستم به‌دست می‌دهد[۴].

تحلیل قابلیت اطمینان به‌صورت کیفی و کمی انجام می‌شود. روش‌های کیفی بیشتر در فاز طراحی و زمانی که اطلاعات کافی از سیستم موجود نباشد، انجام می‌شوند. روش‌های کمی مختلفی برای تحلیل قابلیت اطمینان وجود دارد که از بین این روش‌ها، روش فرآیند نقطه‌ای (مدل‌سازی آماری) جامع‌ترین روش برای تحلیل قابلیت اطمینان است. محدودیتی که برای این روش وجود دارد، نبود داده‌های کمّی از سیستم است[۵].

مطالعاتی که در بخش تجهیزات معدنی انجام گرفته بیشتر از روش مدل‌سازی آماری استفاده شده است. کومار[۹] قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیرپذیری ماشین LHD[۱۰] را بررسی کرد، و برای مدیریت بهتر تجهیزات معدنی با توجه به پیچیدگی آن‌ها، انجام مطالعات بیشتر را پیشنهاد کرد [۲،۴،۶،۷]. برآبادی با بررسی قابلیت اطمینان دپارتمان سنگ‌شکنی برای شناسایی رفتار خرابی و تعیین گلوگاه سیستم مطالعه‌ی شاخص قابلیت اطمینان را ضروری بیان کرد [۸]. با افزایش پیچیدگی تجهیزات معدنی در قرن ۲۱، مطالعه‌ی شاخص‌های رفتاری این سیستم‌ها در معادن روباز و زیرزمینی توجه زیادی به‌خود معطوف ساخت. از مطالعاتی که در بخش تجهیزات معادن زیرزمینی انجام شده می‌توان به تحلیل قابلیت اطمینان شیرر [۹]، تحلیل قابلیت دسترسی نوار نقاله [۱۰] و تحلیل قابلیت اطمینان نگهدارنده‌های قدرتی [۱۱] اشاره کرد.

در معادن روباز اغلب از سیستم گسسته برای تولید مواد معدنی استفاده می‌شود. ماشین‌آلات مورد استفاده در سیستم‌های گسسته شامل دریل واگن، بلدوزر، شاول (لودر، بیل مکانیکی) و دامپتراک‌ها هستند. برای این‌که تولید انجام گیرد باید تک‌تک زیرسیستم‌ها در حال کار باشند. به‌همین منظور تحقیقاتی در راستای شاخص‌های عملکردی این ماشین‌آلات انجام شده است. رحیم دل و همکاران، ماشین چالزنی دورانی را که رایج‌ترین نوع چالزن در معادن روباز است، مورد تحلیل قرار دادند. این محققین با در نظر گرفتن ناوگانی شامل چهار ماشین چالزنی و شکستن آن‌ها به زیرسیستم‌های هیدورلیک، الکتریک، هوای فشرده، چالزنی و انتقال قدرت قابلیت اطمینان ماشین‌های چالزنی را برای پیشنهاد استراتژی نت مناسب بررسی کردند[۱۲]. آنان در مطالعات بعدی برای شناسایی بهتر رفتار زیرسیستم‌ها، زیرسیستم الکتریک[۱۳]، هوای فشرده[۱۴] و چالزنی[۱۵] را به‌طور مجزا بررسی کردند. روی[۱۱] و همکاران، قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری ناوگان شاول را برای شناسایی زیرسیستم‌های ضعیف تحلیل کردند[۱۶]. در مطالعاتی که روی شاخص‌های رفتاری دامپتراک انجام شده می‌توان به تحلیل قابلیت اطمینان موتور دامپتراک به‌منظور ارائه‌ی نت مبتنی بر قابلیت اطمینان[۱۷] و تحلیل قابلیت دسترسی دامپتراک با شکستن آن به زیرسیستم موتور، انتقال‌قدرت، هیدرولیک، الکتریک، لاستیک و دیگر [۱۸] اشاره کرد. این مطالعات فقط بر تحلیل شاخص‌های رفتاری تجهیزات متمرکز بوده و گلوگاه را از نظر قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مشخص می‌کنند. قابلیت دسترسی سنجه‌ای مناسب‌تر از

قابلیت اطمینان برای سیستم‌های تعمیرپذیر است، بنابراین شناسایی گلوگاه از نظر قابلیت دسترسی اهمیت بالایی در مدیریت تجهیزات و برنامه‌ریزی‌های آینده دارد. همچنین سوال اصلی که بعد از شناسایی گلوگاه سیستم از نظر قابلیت دسترسی مطرح می‌شود، چگونگی افزایش قابلیت دسترسی زیرسیستم گلوگاهی است. با توجه به این‌که قابلیت دسترسی تابعی از قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری است، شناسایی استراتژی مناسب برای افزایش قابلیت دسترسی اهمیت بالایی در تصمیم‌گیری درباره‌ی ارائه نت یا افزایش تعداد پرسنل تعمیرات برای کاهش زمان تعمیرات دارد.

در تحقیق حاضر، با تمرکز بر دامپتراک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تجهیزات معدنی، رویکردی مناسب برای تعیین زیرسیستم گلوگاهی از نظر قابلیت دسترسی درسطح ماشین با استفاده از مفهوم سنجش اهمیت ارائه شده است. در ادامه برای انتخاب استراتژی مناسب برای افزایش قابلیت دسترسی، سنجش اهمیت قابلیت دسترسی و قابلیت اطمینان بر روی زیرسیستم‌ها انجام شده است.

۲- روش کار

فرضیات و محدودیت‌هایی که در مقاله وجود دارند به قرار زیر می‌باشند:

- فاکتورهای ریسک مؤثر بر رفتار سیستم (شرایط محیطی، مهارت اپراتورها، وضعیت تعمیرات و غیره) در تحلیل بررسی نشده است.
- سیستم تعمیرپذیر در نظر گرفته‌شده است.
- به علت عدم وجود داده‌های پشتیبانی از تعمیرات، در تحلیل حاضر از این شاخص چشم پوشی شده است.
- زمان تا تعمیرات شامل زمان تعمیرات فعال و زمان پشتیبانی (زمان صرف شده برای تامین منابع، خدمات و مدیریت ضروری جهت انجام تعمیرات تحت شرایط مشخص) است.

در شکل ۱ مراحل اجرای تحقیق در چهار مرحله اصلی ارائه شده است:

- مرحله اول: مرزبندی و تشکیل سیستم مطالعه شده و مرزهای زیرسیستم و سیستم تعیین شده و داه‌های مورد نظر گردآوری می‌شود.
- مرحله دوم: بررسی فرض توزیع مستقل و یکسان داده و انتخاب مدل مناسب برای قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری
- مرحله سوم: محاسبه و تخمین شاخص‌های اطمینان، تعمیرپذیری و دسترسی زیرسیستم و سیستم
- مرحله چهارم: اولویت‌بندی و تعیین گلوگاه سیستم

در ادامه به شرح بیشتر در مورد مراحل پرداخته شده است.

۲-۱- جمع‌آوری داده

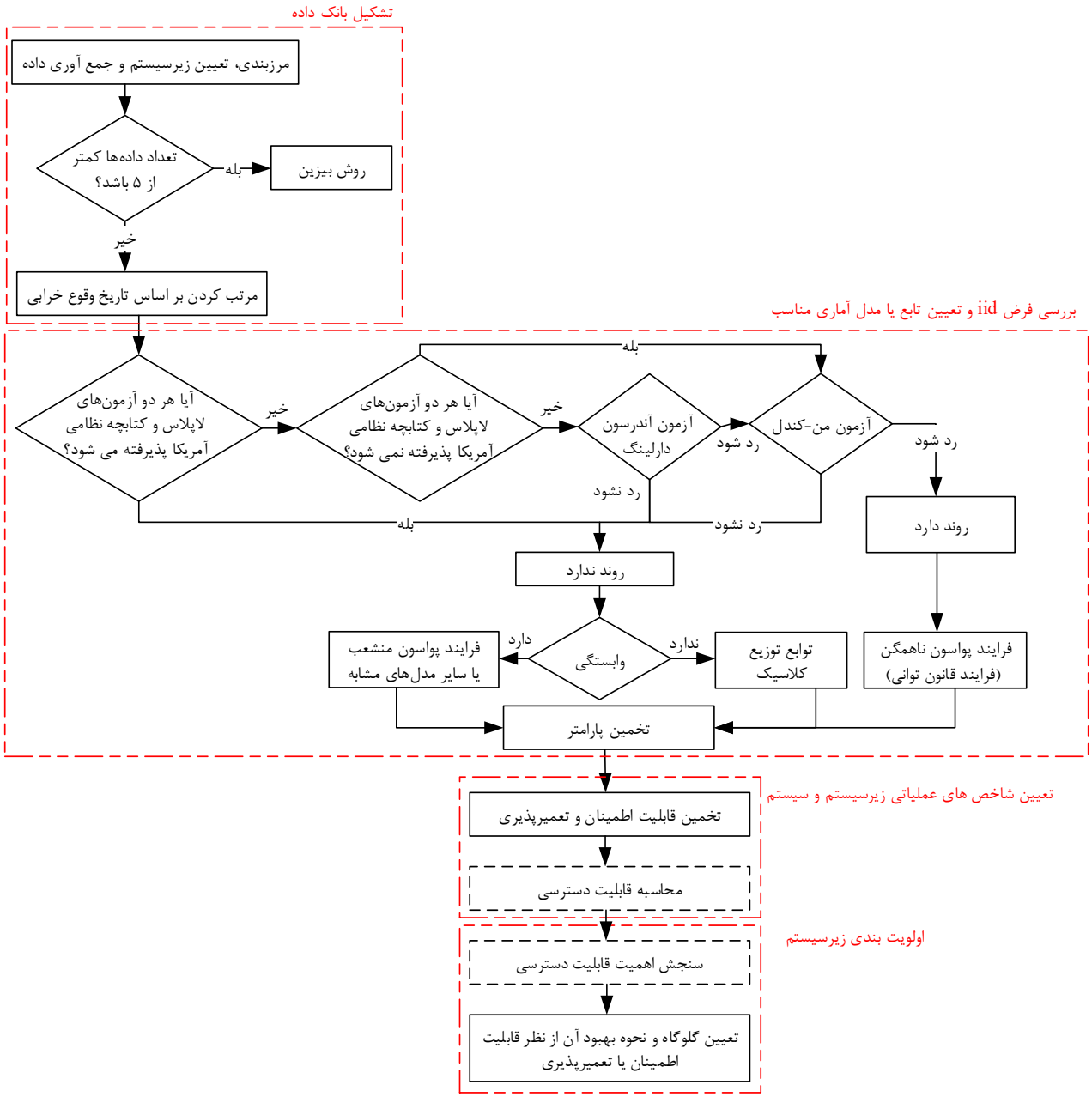
در ابتدا باید سیستم مورد مطالعه شناسایی و مرزبندی گردد. مرز یک سیستم با اجزای داخلی آن تعریف می‌شود و هدف از آن جلوگیری از همپوشانی با سیستم‌های مجاور و جمع‌آوری داده از سیستم شناسایی شده است [۱۹]. همچنین مرزبندی سیستم، زیرسیستم و اجزا به سطح مطالعه بستگی دارد. اگر مطالعه در سطح ناوگان انجام شود، بهتر است هر دستگاه به عنوان یک جزء در نظر گرفته شود. اگر مطالعه در سطح یک دستگاه باشد باید زیرسیستم‌بندی شده و داده‌ها در سطح زیرسیستم برداشت شوند [۲۰]. این داده‌ها به‌صورت زمان بین خرابی‌ها (TBF)[۱۲] و زمان تا تعمیرات (TTR)[۱۳] جمع‌آوری می‌شوند. برای جمع‌آوری داده‌ها می‌توان از اطلاعات اپراتورها، گزارشات نگهداری و تعمیرات، گزارشات عملیات، حس‌گرهای موجود روی ماشین، نظرات کارشناسان و غیره استفاده کرد [۲۱]. بازه‌ی زمانی جمع‌آوری داده‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که نتایج درستی از رفتار خرابی‌ها و تعمیرات ارائه دهد. بدین منظور بازه‌ی زمانی بیشتر از ۱۰ ماه برای جمع‌آوری داده‌ها باید در نظر گرفته شود، تا نتایج تحلیل قابل اعتماد باشد [۲۲]. داده‌های خرابی به دو صورت کامل[۱۴] و سانسورشده[۱۵] هستند. داده‌های کامل داده‌هایی هستند که هم زمان به‌کارگیری سیستم و هم زمان خراب شدن آن معلوم است. داده‌های سانسورشده داده‌هایی هستند که یکی از این زمان‌ها نامعلوم است. مثلا زمان خراب شدن سیستم معلوم است، ولی هیچ اطلاعاتی از زمان بکارگیری آن موجود نیست [۲۳].

۲-۲- ارزیابی مستقل بودن و توزیع یکسان[۱۶]

بعد از این‌که داده‌ها جمع‌آوری و مرتب شدند، باید از نظر داشتن روند و خودهمبستگی تحت آزمون قرار گیرند. هدف این آزمون اعتبار سنجی داده‌ها از نظر فرض مستقل بودن و به‌طور مساوی توزیع شدن است. توزیع یکسان بدین معنی است که تمام داده‌ها از یک توزیع خاصی پیروی کنند. توزیع مستقل نیز بدین معنی است که هر خرابی (تعمیرات) مستقل از خرابی (تعمیرات) است که قبل یا بعد از آن اتفاق افتاده است. در مورد سیستم‌های تعمیر ناپذیر سیستم خراب شده با نمونه‌ی دیگری

جایگزین خواهد شد، در واقع داده‌های خرابی (تعمیرات) همیشه مستقل هستند، زیرا خراب شدن جزء i ام به جزء (i-۱) وابسته نخواهد بود. ولی در سیستم‌های تعمیر پذیر، احتمال وابسته بودن خرابی‌ها وجود دارد [۵].

بعد از آزمون روند و خودهمبستگی، اگر داده‌ها روند داشتند از فرآیند پواسون ناهمگن (قانون توانی)[۱۷] استفاده می‌شود.



شکل ۱- تعیین گلوگاه سیستم بر مبنای سنجش اهمیت قابلیت دسترسی [۲۴, ۲۳, ۸]

درصورت نداشتن روند و وجود همبستگی در داده‌ها از فرآیند منشعب[۱۸] و در نهایت درصورت مستقل و توزیع یکسان بودن از فرآینده تجدید شونده[۱۹] (توابع توزیع کلاسیک) استفاده می‌شود [۵]. اگر آزمون مستقل بودن و توزیع یکسان داشتن بر داده‌ها صورت نگیرد و با فرض مستقل بودن و توزیع یکسان داشتن از توزیع‌های کلاسیک برای تحلیل رفتار خرابی (تعمیرات) استفاده شود، نتایج نادرست خواهد بود [۲۵].

۲-۲-۱- آزمون روند

روش‌های مختلفی برای آزمون روند در داده‌ها وجود دارد. این روش‌ها در دو دسته‌ی کلی نموداری و تحلیلی تقسیم می‌شوند. در روش نمودرای زمان تجمعی در مقابل خرابی تجمعی رسم می‌شود. خط راست نشان‌دهنده‌ی عدم وجود روند و محدب یا مقعر بودن به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی کاهش و افزایش نرخ خرابی است. این روش قابل اعتماد نبوده و فقط دید کلی از روند ارائه می‌دهد [۲۶].

در روش‌های تحلیلی آزمون روند، فرضیه‌ی صفر عدم وجود روند و فرضیه‌ی جایگزین وجود روند است. این روش‌ها شامل کتابچه نظامی آمریکا[۲۰]، آزمون لاپلاس[۲۱]، اندرسون-دارلینگ[۲۲] و من-کندل[۲۳] هستند. در ادامه مختصری از آزمون کتابچه‌ی نظامی آمریکا و آزمون لاپلاس، به‌عنوان دو آزمون اولیه و مهم ارائه می‌شود. برای آشنایی بیشتر به مرجع [۲۱] و [۲۶] مراجعه شود.

الف) آزمون کتابچه نظامی آمریکا:

آزمون کتابچه نظامی آمریکا برای خرابی‌هایی که با فرآیند قانون توانی مدل می‌شوند جواب بهینه‌ای ارائه می‌دهد و رابطه‌ی آن به‌صورت رابطه ۱ است.

$$U = 2\sum_{i=1}^{n} ln\frac{T}{T_i} \qquad (۱)$$

در این رابطه n تعداد خرابی، T بازه‌ی زمانی برداشت داده از سیستم و T_i زمان تجمعی تا خرابی i ام است. اگر آماره‌ی U توزیع χ^2 (کای-دو) با درجه آزادی 2n داشته باشد، داده‌ها بدون روند و در غیر اینصورت روند دارند [۲۷, ۵].

ب) آزمون لاپلاس

آزمون لاپلاس برای خرابی‌هایی که با فرآیند لگاریتم خطی مدل می‌شوند جواب بهینه‌ای ارائه می‌دهد و به‌صورت رابطه ۲ ارائه شده است.

$$L = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Ti - [\frac{T}{2}]}{\frac{T}{\sqrt{12\,n}}} \qquad (۲)$$

برای نتیجه‌گیری از آزمون، باید آماره‌ی L را با توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی داری α مقایسه کرد. نتایج ممکن به‌صورت زیر است:

- $Z_{-\alpha/2} < L < Z_{\alpha/2}$ نشان‌دهنده‌ی عدم وجود روند است.
- $L < Z_{-\alpha/2}$ نشان‌دهنده‌ی شرایط بهبودی در سیستم که زمان بین خرابی‌ها (تعمیرات) در حال افزایش است.
- $Z_{\alpha/2} < L$ نشان‌دهنده‌ی شرایط تنزیل در سیستم که زمان بین خرابی‌ها (تعمیرات) در حال کاهش است [۲۷].

شرایط داده‌ها، مشخص‌کننده‌ی تعداد آزمون‌هایی است که باید بر داده‌ها انجام شود. اگر داده‌ها از فرآیند پواسون همگن باشند، آزمون لاپلاس و کتابچه‌ی نظامی آمریکا مناسب خواهند بود، ولی اگر از فرآیند تجدید شونده تبعیت کنند، دو آزمون بیان‌شده پاسخ نادرستی ارائه خواهند داد. با این‌حال در آزمون من-کندل فرض صفر تبعیت داده‌ها از فرآیند تجدیدشونده است [۲۳].

۲-۲-۲- آزمون خودهمبستگی

در آزمون خودهمبستگی خرابی‌ها (تعمیرات) به‌ترتیب زمان وقوع و به شکل زمان بین خرابی‌ها (زمان تا تعمیرات) مرتب می‌شوند. سپس همبستگی خرابی‌ها (تعمیرات) با یک تأخیر نسبت به خود مورد سنجش قرار می‌گیرند، به‌عبارتی خرابی (تعمیر) i ام در مقابل خرابی (تعمیر) (i-۱) ام در یک نمودار رسم می‌شود. اگر داده‌ها به‌صورت یک خوشه بودند همبستگی وجود ندارد، درصورتی که تعداد خوشه‌ها دو یا بیشتر بود یا یک روند تقریبا خطی داشتند، نشان دهنده‌ی وجود خودهمبستگی در داده‌هاست [۲۶].

۲-۳- سنجش اهمیت[۲۴]

در یک سیستم پیچیده، تمام اجزا اهمیتی یکسانی برای سیستم ندارند. برخی از این اجزا برای سیستم پراهمیت و برخی دیگر کم‌اهمیت هستند [۲۸]. شناسایی این اجزا برای مدیران و مهندسان اهمیت زیادی دارد زیرا بهبود قابلیت دسترسی، قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری نیازمند صرف هزینه و منابع است. بنابرین شناسایی جزئی که با کمترین هزینه بیشترین بهبود را در سیستم ایجاد کند، مفید است. سنجش اهمیت به‌صورت "احتمال اینکه قطعه‌ی i برای سیستم بحرانی باشد" تعریف شده است. اهمیت یک جزء در سیستم به شاخص‌های رفتاری جزء و نوع قرارگیری آن در سیستم وابسته است [۲۹].

برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ بیرینبام[۲۵] مفهوم سنجش اهمیت مبتنی بر قابلیت اطمینان را معرفی کرد. اگر افزایش قابلیت اطمینان سیستم نیاز باشد، تمرکز در بخشی که بیشترین اهمیت قابلیت اطمینان را دارد، انجام خواهد گرفت.

رابطه‌ی سنجش اهمیت قابلیت اطمینان بیرینبام به‌صورت رابطه ۳ ارائه شده است [۲۸].

$$I(i) = \frac{\partial R_s(t)}{\partial R_i(t)} \quad (۳)$$

I(i) اهمیت زیرسیستم i، R_s قابلیت اطمینان سیستم و R_i قابلیت اطمینان زیرسیستم i است. سنجش اهمیت قابلیت دسترسی نیز برمبنای سنجش اهمیت قابلیت اطمینان بیرینبام ارائه شده است. این معیار تجهیزات را از نظر اهمیت دسترسی بررسی می‌کند. سنجش اهمیت قابلیت دسترسی نشان‌دهنده‌ی سهم قابلیت دسترسی هر کدام از قطعات در کل سیستم می‌باشد(رابطه ۴) [۲۹, ۳۰].

$$I(i) = \frac{\partial A_s(t)}{\partial A_i(t)} \quad (۴)$$

A_s قابلیت دسترسی سیستم، A_i قابلیت دسترسی زیرسیستم i است. برای این‌که رابطه‌ی ارائه شده بتواند سهم هرکدام از زیرسیستم‌ها را بصورت درصدی از کل سیستم بیان کند باید نرمالیزه شود. رابطه‌ی سنجش اهمیت نرمالیزه شده به‌صورت زیر است (رابطه ۵) [۲۴].

$$NI_A^i = \frac{I_A^i}{\sum_{j=1}^{n} I_A^j} \quad (۵)$$

همان‌طور که در رابطه‌ی ۴ مشاهده می‌شود، برای محاسبه سنجش اهمیت قابلیت دسترسی، باید قابلیت دسترسی اجزاء و قابلیت دسترسی سیستم محاسبه شود. علاوه بر این، شناسایی ساختار سیستم در محاسبه‌ی قابلیت دسترسی ضروری است. ساختارهای ممکن برای یک سیستم معدنی به‌صورت سری، موازی و سری-موازی است [۲۴]. برای محاسبه‌ی قابلیت دسترسی سیستم از روی قابلیت دسترسی اجزاء، از دو روش شبیه‌سازی و تحلیلی استفاده می‌شود. با توجه به این‌که در قابلیت اطمینان عدم قطعیت‌هایی وجود دارد، روش شبیه سازی با منطق عدم قطعیت، پاسخ مناسبی برای سیستم‌های پیچیده ارائه می‌دهد. برای سیستم‌های با پیچیدگی کمتر روش تحلیلی مناسب است [۲۰]. در این مقاله با توجه به پیچیدگی کم سیستم مورد مطالعه، از روش تحلیلی استفاده شده است. سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برای ساختارهای ذکر شده روابط جداگانه‌ای دارد. در این مقاله ساختار سری بحث خواهد شد. برای اطلاعات بیشتر به [۲۴] و [۲۹] مراجعه شود.

۱-۲-۳- سنجش اهمیت سیستم با ساختار سری

در سیستم سری با خراب شدن یک جزء یا زیرسیستم، برای زیرسیستم‌های دیگر دو حالت وجود خواهد داشت. حالت اول: با خراب شدن یک جزء اجزای دیگر درمعرض خرابی (احتمال وقوع خرابی برای اجزای سالم وجود دارد) باشند. حالت دوم: با خراب شدن یک جزء اجزای دیگر درمعرض خرابی (احتمال وقوع خرابی برای اجزای سالم وجود ندارد) نباشند. در ادامه به توضیح حالت‌های ذکر شده پرداخته شده است [۲۴].

اجزای خراب نشده در معرض خرابی باشند: در چنین مواردی زمان تعمیرات کم بوده و جزء خراب شده به‌سرعت تعمیر می‌شود. به‌علاوه اجزای سالم در معرض خرابی قرار دارند. در این شرایط قابلیت دسترسی شرایط پایدار سیستم به‌صورت رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود.

$$A_s = \prod_{i=1}^{n} A_i = \prod_{i=1}^{n} \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i} \quad (۶)$$

MTBF[۲۶] میانگین زمان بین خرابی‌ها و MTTR[۲۷] میانگین زمان تا تعمیرات است. با محاسبه‌ی قابلیت دسترسی سیستم می‌توان اهمیت قابلیت دسترسی زیرسیستم‌ها، اهمیت قابلیت دسترسی برمبنای قابلیت اطمینان ($I^i_{A.MTBF}$)، اهمیت قابلیت دسترسی بر مبنای قابلیت تعمیرپذیری ($I^i_{A.MTTR}$)، زیرسیستم‌ها را به‌دست آورد. این روابط به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} (A_k) \quad (۷)$$

$$I^i_{A.MTTR} = A_s \times \frac{1}{(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (۸)$$

$$I^i_{A.MTBF} = A_s \times \frac{MTTR_i}{MTBF_i (MTBF_i + MTTR_i)} \quad (۹)$$

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی بر قابلیت اطمینان مقدار بحرانی بودن قابلیت اطمینان جزء i را در قابلیت دسترسی کل سیستم نشان می‌دهد. سنجش اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی بر قابلیت تعمیرپذیری اهمیت قابلیت تعمیرپذیری جزء i را در قابلیت دسترسی کل سیستم به‌دست می‌دهد. این روابط را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۵ نرمالیزه کرد.

اجزای خراب نشده در معرض خرابی نباشند: در چنین مواردی وقتی یک جزء از سیستم خراب می‌شود، کل سیستم در حالت خاموش قرار می‌گیرند. در نتیجه اجزای سالم در

معرض خرابی نیستند. رابطه‌ی قابلیت دسترسی برای این سیستم‌ها بصورت زیر ارائه شده است:

$$A_s = \left[1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{MTTR_i}{MTBF_i}\right]^{-1} \quad (۱۰)$$

همچنین اهمیت قابلیت دسترسی زیرسیستم‌ها، اهمیت قابلیت دسترسی بر مبنای قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری در روابط ۱۱ تا ۱۳ ارائه شده است:

$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = \left(\frac{A_s}{A_i}\right)^2 \quad (۱۱)$$

$$I_{A.MTTR}^i = \frac{A_s^2}{A_i} \times \frac{1}{(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (۱۲)$$

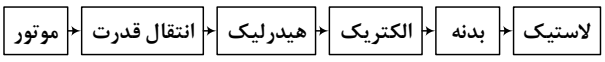
$$I_{A.MTBF}^i = \frac{A_s^2}{A_i} \times \frac{MTTR_i}{MTBF_i(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (۱۳)$$

۳- مطالعه‌ی موردی

مجموعه معادن گل‌گهر که از جمله ذخایر عظیم، ارزشمند و استراتژیک ایران است، در استان کرمان قرار دارد. نزدیک‌ترین شهر به این معادن، شهرستان سیرجان است که در ۵۵ کیلومتری شمال شرقی آن قرار دارد. این مجموعه معادن، دارای ۶ ذخیره است که با اعداد ۱ تا ۶ مشخص می‌شوند. در تحقیق حاضر از داده‌های دامپتراک مورد استفاده در معدن ۱ استفاده شده است.

۳-۱- جمع‌آوری داده

پس از شناسایی سیستم، مرور کارهای پیشین و انجام مصاحبات با متخصصین تعمیرگاه و ماشین‌آلات، دامپتراک مورد مطالعه مطابق شکل ۲ به شش زیرسیستم موتور، انتقال قدرت، هیدرولیک، الکتریک، بدنه و لاستیک تقسیم شد که این زیرسیستم‌ها به‌صورت سری باهم در ارتباط هستند.



شکل ۲ - زیرسیستم‌های دامپتراک

داده‌های مورد نیاز در این مقاله در بازه‌ی زمانی یازده ماهه در قالب زمان بین خرابی‌ها (TBF) و زمان انجام تعمیرات (TTR) جمع‌آوری شدند. در این تحقیق از دو منبع گزارشات تعمیرات و گزارشات روزانه ثبت شده در سیستم Smart-mine[۲۸] استفاده شده است. تعداد داده‌های خرابی و تعمیرات در زیرسیستم‌ها بیشتر از ۵ است، بنابراین می‌توان از مدل‌های آماری برای تحلیل شاخص‌های رفتاری استفاده کرد. در جدول ۱ کد زیرسیستم‌ها، تعداد داده‌های خرابی و تعمیرات مشاهده می‌شود.

۳-۱- ارزیابی مستقل بودن و توزیع یکسان

بعد از زیرسیستم‌بندی و مرتب کردن داده‌ها، برای هر زیرسیستم باید آزمون روند و خودهمبستگی انجام شود. آزمون روند در این تحقیق طبق فلوچارت ارائه شده در شکل ۱ انجام شد و برای آزمون خودهمبستگی از تابع خودهمبستگی‌نما[۲۹] و روش نموداری استفاده شد. آزمون‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شده است. تحلیل‌ها به کمک نرم افزار Minitab ۱۸ انجام گرفته و نتایج آزمون روند خرابی و تعمیرات به‌ترتیب بصورت جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۱ - داده‌های خرابی و تعمیرات زیرسیستم‌ها

زیرسیستم	کد	تعداد داده	
		تعمیرات	خرابی
موتور	ENG	۸	۹
انتقال قدرت	TR	۱۰	۱۱
هیدرولیک	HYD	۱۳	۱۴
الکتریک	EL	۱۲	۱۳
بدنه	BO	۹	۱۰
لاستیک	TY	۱۵	۱۶

جدول ۲ - آزمون روند برای داده‌های خرابی

زیرسیستم	آماره	MIL-Hdbk-189*	Laplace	نتایج
BO	Test Statistic	۱۸/۰۱	-۰/۲	روند ندارد
	P-Value	۰/۹۱	۰/۸۴	
TR	Test Statistic	۲۶/۰۹	-۰/۲۵	روند ندارد
	P-Value	۰/۳۳	۰/۸	
ENG	Test Statistic	۱۴/۱۴	۰/۰۱	روند ندارد
	P-Value	۰/۸۲۳	۰/۹	
EL	Test Statistic	۲۷/۳۵	-۱/۰۳	روند ندارد
	P-Value	۰/۵۸	۰/۳۰۳	
HYD	Test Statistic	۲۷/۹۴	-۰/۴	روند ندارد

	P-Value	۰/۷۲	۰/۷	
TY	Test Statistic	۱۳/۶۱	۲/۴۸	Mann test
	P-Value	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	

*Military Handbook 189

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این جداول آماره‌ی آزمون و p-value ارائه شده است. با توجه به سطح اطمینان آزمون (۹۵٪)، اگر p-value کمتر از ۵٪ باشد فرض صفر آزمون رد و درغیر اینصورت (p-value> ۵٪) رد نمی‌شود. درصورت رد نشدن آزمون کتابچه‌ی نظامی و لاپلاس عدم وجود روند نتیجه می‌شود. یکی از دو آزمون رد شود، آندرسون دارلینگ و هر دو آزمون رد شود من-کندال در ادامه باید بر داده‌ها انجام شود.

جدول ۳ - آزمون روند برای داده‌های تعمیرات

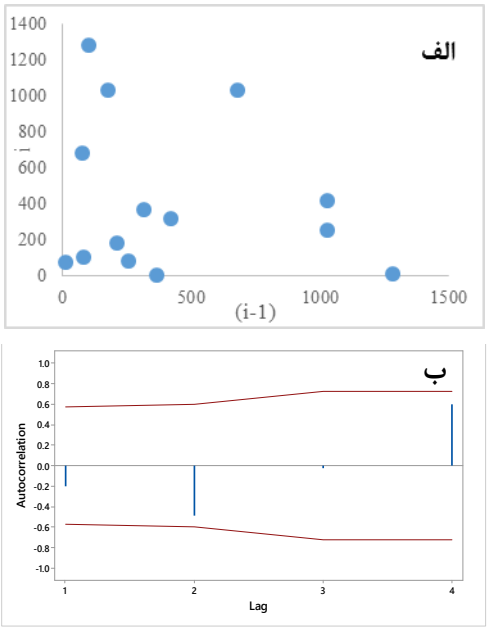
زیرسیستم	آماره	MIL-Hdbk-189	Laplace	نتایج
ENG	Test Statistic	۱۳/۷۵	۰/۳۷	روند ندارد
	P-Value	۰/۹۴	۰/۷۱	
TR	Test Statistic	۲۰/۷۷	-۰/۳	روند ندارد
	P-Value	۰/۵۸	۰/۷۶	
EL	Test Statistic	۱۳/۴۹	۲/۳۶	روند ندارد
	P-Value	۰/۱۶	۰/۱۸	
HYD	Test Statistic	۲۰/۲۵	۰/۲۳	روند ندارد
	P-Value	۰/۶۴	۰/۸۲	
TY	Test Statistic	۳۷/۵۷	-۱/۶۷	روند ندارد
	P-Value	۰/۲۱	۰/۱	
BO	Test Statistic	۱۱/۱	۰/۹۹	روند ندارد
	P-Value	۰/۳۹	۰/۳۲	

طبق جدول ۲ بجز زیرسیستم لاستیک، در بقیه‌ی زیرسیستم‌ها p-value برای دو آزمون کتابچه نظامی و لاپلاس بزرگتر از ۰/۰۵ است. بنابراین فرض صفر در همه‌ی داده‌ها به‌جز داده‌های خرابی لاستیک رد نمی‌شود. با توجه به الگوریتم شکل ۱، برای این زیرسیستم باید آزمون من-کندل انجام شود. همچنین طبق جدول ۳ فرض عدم وجود روند برای تمام داده‌های زمان تا تعمیرات صادق است.

با انجام آزمون من-کندل برای زیرسیستم لاستیک، مشاهده می‌شود که p-value آن کمتر از ۰/۰۵ است. درنتیجه مدل فرآیند قانون توانی برای داده‌های خرابی زیرسیستم لاستیک مناسب است. زیر سیستم‌هایی که روند ندارند، آزمون خودهمبستگی برای آن‌ها اعمال می‌شود. با توجه به محدود بودن فضا، آزمون خودهمبستگی فقط برای داده‌ی خرابی زیرسیستم هیدرولیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۴ - آزمون من-کندال برای زیرسیستم لاستیک

زیرسیستم	آزمون	آماره		نتایج
TY	Mann-Kendall	Test Statistic	۵/۳۶	روند دارد
		P-Value	۰/۰۰۱	



شکل ۲ - الف) نمودار پراکندگی برای داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک، ب)نمودار خودهمبستگی نما برای داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هیچ همبستگی در نمودار (الف) دیده نمی‌شود. همچنین در نمودار (ب) لاگ ۳۰ یک در داخل باند اعتماد می‌باشد. بنابرین فرض توزیع مساوی و مستقل بجز در یک مورد برای تمام داده‌ها صادق است.

بنابراین برای این زیرسیستم‌ها از توابع توزیع کلاسیک استفاده شده است.

برای انتخاب بهترین توزیع از بین توزیع‌های موجود، آزمون نیکویی برازش آندرسون-دارلینگ استفاده شده است. بدین صورت که توزیع با آندرسون-دارلینگ کمتر، بهترین برازش را بر داده‌ها دارد. بعد از انتخاب توزیع مناسب از بین توزیع‌ها، تخمین پارامتر توزیع با استفاده از روش درست‌نمایی بیشینه[۳۱] انجام شد. نتایج برای زمان بین خرابی‌ها و زمان تا تعمیرات در جدول(۵) و (۶) ارائه شده است.

جدول ۵ - توابع توزیع داده‌های خرابی برای زیرسیستم‌ها

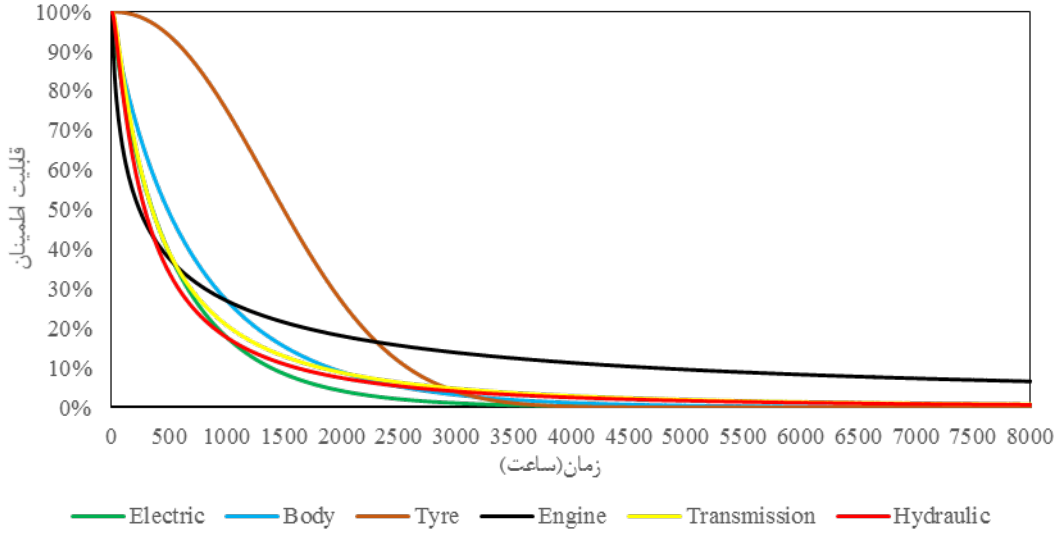
زیرسیستم	تابع توزیع	پارامتر
ENG	Log-normal	Log-mean = ۵/۴۸
		Log-stdv = ۲/۳۲
TR	Log-normal	Log-mean = ۵/۸۶
		Log-stdv= ۱/۲۹
EL	Weibull	Shape = ۰/۸۸
		Scale = ۵۳۵/۳
HYD	Log-normal	Log-mean= ۵/۶۶
		Log-stdv = ۱/۳۵
BO	Weibull	Shape = ۰/۸۸
		Scale = ۷۳۷/۹۶
TY	PLP	Shape = ۲/۲۱
		Scale = ۱۷۶۶/۱۷

توزیع ویبول به خاطر انعطاف پذیری بالا، در مهندسی قابلیت اطمینان کاربرد زیادی دارد [۶]. همچنین توزیع لاگ نرمال منطق خوبی برای تعمیرات تجهیزات مکانیکی دارد. چون احتمال اینکه قطعه در زمان خیلی کم تعمیر شود تقریبا صفر است، همچنین تجهیزات مکانیکی بیشتر در یک بازه‌ی متوسط (۴-۳ ساعته) تعمیر می‌شوند و احتمال اینکه تعمیرات زمان خیلی زیادی نیاز داشته باشند کم است [۳۱].

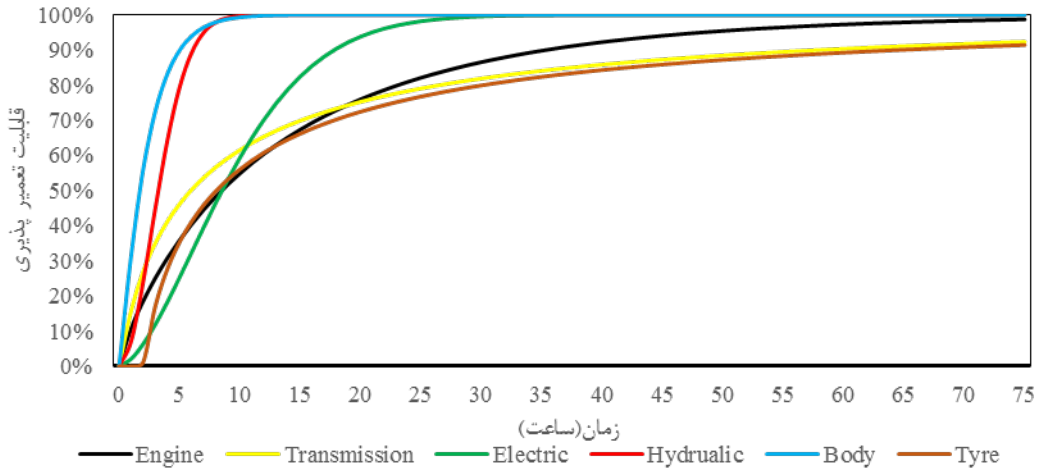
جدول ۶ - توابع توزیع داده‌های تعمیرات برای زیرسیستم‌ها

زیرسیستم	تابع توزیع	پارامتر
ENG	Weibull	Shape =۰/۸۴
		Scale = ۱۳/۱۳
TR	Log-normal	Log-mean = ۱/۷۸
		Log-stdv = ۱/۷۸
EL	PLP	Shape = ۱/۶۳
		Scale = ۱۰/۶۸
HYD	Weibull	Shape = ۱/۹
		Scale = ۳/۹۴
BO	Weibull	Shape = ۱/۱۶
		Scale = ۲/۳۸
TY	3-parameter Log-normal	Log-mean = ۱/۸۸
		Log-stdv = ۱/۸۱
		Location = ۱/۹

نمودار قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم ها به‌ترتیب در شکل ۳ و ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمودار قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها



شکل ۴ - نمودار قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌ها

۲-۳- بحث و بررسی

بعد از محاسبه قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری و شناسایی ساختار سیستم در یک مدل منطقی، برای افزایش قابلیت دسترسی سیستم سنجش اهمیت قابلیت دسترسی انجام شد. سیستم مورد مطالعه سری است و در صورت خرابی یکی از زیرسیستم‌ها، زیرسیستم‌های سالم از حالت عملیاتی خارج شده و به‌عبارتی در معرض خرابی قرار نمی‌گیرند. بنابراین سیستم مورد مطالعه باید با استفاده از روابط ۱۰ تا ۱۳ مدل‌سازی شود. برای این سیستم، قابلیت دسترسی زیرسیستم‌ها و قابلیت دسترسی کل سیستم براساس مقادیر متوسط زمان خرابی (MTBF) و متوسط زمان انجام تعمیرات (MTTR) با استفاده از رابطه‌ی ۱۰، مطابق جدول ۷ محاسبه شده است.

جدول ۷ - قابلیت دسترسی زیرسیستم‌ها

زیرسیستم	MTBF	MTTR	قابلیت دسترسی (%)
ENG	/۸۴	۱۴/۳۷	۹۹/۶
TR	۸۰۲/۱۳	۲۸/۸۷	۹۶/۵۳
EL	۵۷۲	۹/۵۵	۹۸/۳۶
HYD	۷۱۰/۵۶	۳/۵	۹۹/۵۱
TY	۱۵۶۴	۳۳/۶۵۷	۹۷/۸۹
BO	۷۸۵/۲	۲/۲۸۸	۹۹/۷۱
قابلیت دسترسی کل سیستم			۹۲/۰۸

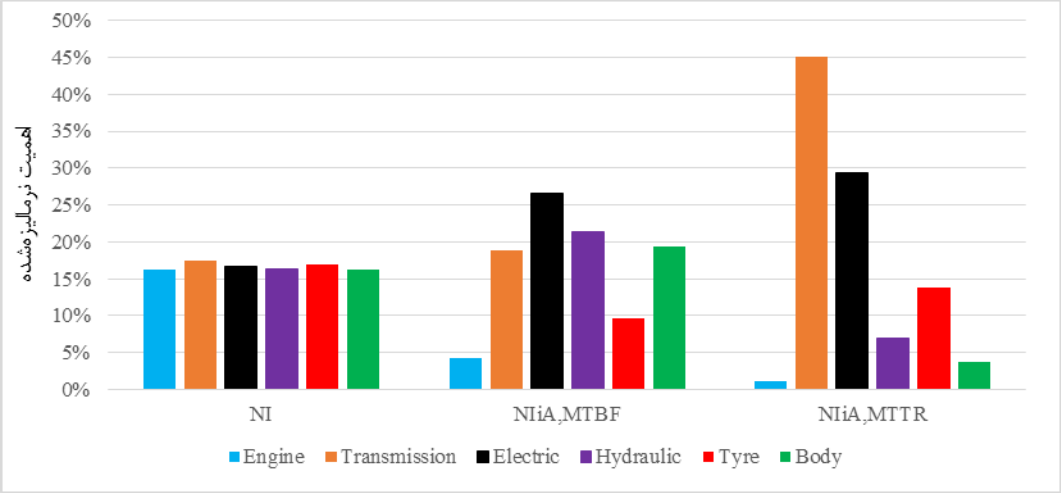
سنجش اهمیت قابلیت دسترسی، سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برمبنای قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری با استفاده از روابط ۱۱ تا ۱۳ انجام شد. نتایج در جدول ۸ و شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، برای هر زیرسیستم به‌ترتیب اهمیت دسترسی (I_A)، اهمیت قابلیت دسترسی بر مبنای قابلیت اطمینان ($I_{A,MTBF}$)، اهمیت قابلیت دسترسی بر مبنای قابلیت تعمیرپذیری ($I_{A,MTTR}$)، اهمیت قابلیت دسترسی نرمالیزه (NI_A)، اهمیت قابلیت دسترسی بر مبنای قابلیت اطمینان نرمالیزه ($NI_{A,MTBF}$) و اهمیت قابلیت دسترسی بر مبنای قابلیت تعمیرپذیری نرمالیزه ($NI_{A,MTTR}$) در سیستم با مقادیر عددی بین (۰،۱) محاسبه شده‌اند.

طبق جدول ۸ و شکل ۵، زیرسیستم انتقال‌قدرت و زیرسیستم بدنه به‌ترتیب پراهمیت‌ترین و کم اهمیت‌ترین زیرسیستم برای دامپتراک مورد مطالعه است. بنابراین منابع و هزینه برای زیرسیستم انتقال‌قدرت بیشترین بهبود را در دسترسی کل ماشین ایجاد می‌نماید.

بنابراین برای افزایش قابلیت دسترسی دامپتراک، با توجه به سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برمبنای قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مشاهده می‌شود که، افزایش قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم انتقال‌قدرت، تاثیر بیشتری از افزایش قابلیت اطمینان آن، بر روی دسترسی کل سیستم خواهد داشت. بنابرین مدیریت در اولویت اول باید به‌دنبال روشی مناسب برای افزایش قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم انتقال قدرت باشد.

جدول ۸- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی، سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برمبنای قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

زیرسیستم	I_A	$I_{A,MTBF}$	$I_{A,MTTR}$	NI_A%	$NI_{A,MTBF}$%	$NI_{A,MTTR}$%
ENG	۰/۸۵۴۷	۰/۰۰۰۲۳۷	۰/۰۰۰۰۰۰۹۶	۱۶/۳۳	۴/۲۵	۱/۱۳
TR	۰/۹۰۹۹	۰/۰۰۱۰۵۷	۰/۰۰۰۰۳۸۰۴	۱۷/۳۸	۱۸/۹	۴۵/۶.
EL	۰/۸۷۶۴	۰/۰۰۱۴۸۲	۰/۰۰۰۰۲۴۷۴	۱۶/۷۴	۲۶/۵۱	۲۹/۳۱
HYD	۰/۸۵۶۲	۰/۰۰۱۱۹۳	۰/۰۰۰۰۰۵۸۸	۱۶/۳۶	۲۱/۳۴	۶/۹۶
TY	۸۸۴۸	۰/۰۰۰۵۴۲	۰/۰۰۰۰۱۱۶۷	۱۶/۹۰	۹/۶۹	۱۳/۸۲
BO	۰/۸۵۲۷	۰/۰۰۱۰۸	۰/۰۰۰۰۰۳۱۵	۱۶/۲۹	۱۹/۳۱	۳/۷۳



شکل ۳ - اهمیت قابلیت دسترسی، اهمیت قابلیت دسترسی برمبنای قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

بدین منظور افزایش تعداد پرسنل تعمیرات، کاهش زمان‌های لجستیک و کاهش زمان انتظار سیستم برای قطعات یدکی با مدیریت مناسب انبارداری، پیشنهاد می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

نیاز به کنترل و مدیریت تجهیزات معدنی با توجه به افزایش پیچیدگی روز افزون آن‌ها روز به روز محسوس‌تر می‌شود. اولین قدم در مدیریت تجهیزات شناسایی رفتار آن‌ها است. با توجه به رفتار اجزای سیستم برخی اجزا مهم و برخی اهمیت پایینی دارند. شناسایی اجزای مهم‌تر و اولویت‌بندی آن‌ها در برنامه‌ریزی‌های آینده و امر تصمیم‌گیری ضروری است. در این پژوهش چارچوبی مناسب برای شناسایی اجزای مهم در سطح تجهیزات ارائه شد. در ادامه برای نشان‌دادن تئوری ارائه شده دامپتراک معدنی به شش زیرسیستم موتور، انتقال قدرت، هیدرولیک، الکتریک، بدنه و لاستیک که به‌صورت سری باهم در ارتباط هستند، تقسیم شد. سپس با استفاده از داده‌های زمان بین خرابی‌ها و زمان تا تعمیرات، قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌ها محاسبه شد. در ادامه با اعمال ایده‌ی سنجش اهمیت، اهمیت قابلیت دسترسی هرکدام از زیرسیستم‌ها در سیستم کلی محاسبه شد. به‌منظور افزایش قابلیت دسترسی دامپتراک، افزایش قابلیت دسترسی زیرسیستم انتقال‌قدرت پیشنهاد شد. با اعمال سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برمبنای قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری به‌عنوان دو شاخص اصلی قابلیت دسترسی، افزایش قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم انتقال‌قدرت پیشنهاد شد. افزایش قابلیت تعمیرپذیری می‌تواند با افزایش پشتیبانی از تعمیرات، افزایش پرسنل تعمیرات، افزایش مهارت پرسنل و غیره انجام شود.

پی نوشت

[۱] Availability

[۲] Utilization

[۳] Production performance

[۴] Up time

[۵] Down time

[۶] Reliability

[۷] Maintainability

[۸] Supportability

[۹] Kumar

[۱۰] Load-Haul-Dump

[۱۱] Roy

[۱۲] Time between failures

[۱۳] Time to repair

[۱۴] Complete data

[۱۵] Censored data

[۱۶] Identical and independent analysis

[۱۷] Power low process

[۱۸] Branching process

[۱۹] Renewal process

[۲۰] US military handbook

[۲۱] Laplace

[۲۲] Anderson-Darling

[۲۳] Mann-Kendall

[۲۴] Importance measure

[۲۵] Birnbaum

[۲۶] Mean time between failures

[۲۷] Mean time to repair

[۲۸] سیستمی برای کنترل ماشین آلات ساخت شرکت (Devex SA)

[۲۹] Autocorrelation function

[۳۰] Lag

[۳۱] Maximum likelihood

منابع

[1] Lanke, A., H. Hoseinie, and B. Ghodrati, 2014. "*Mine production index (MPI): new method to evaluate effectiveness of mining machinery"*. in International conference on mining and mineral engineering (ICMME 2014) Google Scholar.

[2] Kumar, U., 1990, "*Reliability analysis of load-haul-dump machines"*, Luleå tekniska universitet.

[3] Barabady, J., T. Markeset, and U. Kumar, 2010. "*Review and discussion of production assurance program"*. International Journal of Quality & Reliability Management, 27(6), pp. 702-720.

[4] Kumar, U., 1989. "*Availability studies of load-haul-dump machines"*. in Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry: 27/02/1989-02/03/1989. Society for Mining, Metalurgy and Exploration.

[5] Rausand, M. and A. Høyland, 2004, "*System reliability theory: models, statistical methods, and applications"*. Vol. 396. John Wiley & Sons.

[6] Kumar, U. and S. Granholm, 1988. "*Reliability technique: A powerful tool for mine operators"*. Mineral resources engineering, 1(1), pp. 13-28.

[7] Kumar, U. and S. Granholm, 1990. "*Reliability centred maintenance: a tool for higher profitability"*. Maintenance, 5(3), pp. 23-26.

[8] Barabady, J. and U. Kumar, 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), pp. 647-653.

[9] Hadi Hoseinie, S., M. Ataei, R. Khalokakaie, B. Ghodrati, and U. Kumar, 2012. "*Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines"*. Journal of quality in maintenance engineering, 18(1), pp. 98-119.

[10] Simon, F., B. Javad, and B. Abbas, 2014. "*Availability analysis of the main conveyor in the Svea Coal Mine in Norway"*. International Journal of Mining Science and Technology, 24(5), pp. 587-591.

[11] Morshedlou, A., H. Dehghani, and S.H. Hoseinie, 2014. "*Reliability-based maintenance scheduling of powered supports in Tabas mechanized coal mine"*. Journal of Mining and Environment, 5(2), pp. 113-120.

[12] Rahimdel, M.J., M. Ataei, R. Khalokakaei, and S.H. Hoseinie, 2014. "*Maintenance Plan for a Fleet of Rotary Drill Rigs/Harmonogram Utrzymania I Konserwacji Floty Obrotowych Urządzeń Wiertniczych"*. Archives of Mining Sciences, 59(2), pp. 441-453.

[13] Rahimdel, M.J., M. Ataei, and R. Khalokakaei, 2016, "*Reliability Analysis and Maintenance Scheduling of the Electrical System of Rotary Drilling Machines"*, in Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety, Springer. 623-632.

[14] Rahimdel, M.J., S.H. Hosienie, M. Ataei, and R. Khalokakaei, 2013. "*The reliability and maintainability analysis of pneumatic system of rotary drilling machines"*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, 94(2), pp. 105-111.

[15] Rahimdel, M.J., M. Ataei, and B. Ghodrati, 2019. "*Modeling and Simulation Approaches for Reliability Analysis of Drilling Machines"*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, pp. 1-9.

[16] Roy, S., M. Bhattacharyya, and V. Naikan, 2001. "*Maintainability and reliability analysis of a fleet of shovels"*. Mining Technology, 110(3), pp. 163-171.

[17] Allahkarami, Z., A.R. Sayadi, and A. Lanke, 2016, "*Reliability analysis of motor system of dump truck for maintenance management"*, in Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety, Springer. 681-688.

[18] Morad, A.M., M. Pourgol-Mohammad, and J. Sattarvand, 2013. "*Reliability-centered maintenance for off-highway truck: case study of sungun copper mine operation equipment"*. in Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition.

[19] Barabadi, A., J. Barabady, and T. Markeset, 2011. "*A methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment condition"*. Reliability Engineering & System Safety, 96(12), pp. 1637-1646.

[20] Hoseinie, S.H., H. Al-Chalabi, and B. Ghodrati, 2018. "*Comparison between Simulation and Analytical Methods in Reliability Data Analysis: A Case Study on Face Drilling Rigs"*. Data, 3(2), pp. 12.

[21] Barabadi, A., A. Garmabaki, F. Yuan, and J. Lu, 2015. "*Maintainability analysis of equipment using point process models"*. in 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE.

[22] Vagenas, N., N. Runciman, and S.R. Clément, 1997. "*A methodology for maintenance analysis of mining equipment"*. International Journal o/Surface Mining, Reclamation and Environment, 11(1), pp. 33-40.

[23] Garmabaki, A.H.S., A. Ahmadi, Y.A. Mahmood, and A. Barabadi, 2016. "*Reliability modelling of multiple repairable units"*. Quality and Reliability Engineering International, 32(7), pp. 2329-2343.

[24] Nouri Gharahasanlou, A., M. Ataei, R. Khalokakaie, and A. Barabadi, 2018. "*Normalised availability importance measures for complex systems"*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 32(2), pp. 109-122.

[25] Kumar, U. and B. Klefsjö, 1992. "*Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model"*. Reliability Engineering & System Safety, 35(3), pp. 217-224.

[26] Louit, D.M., R. Pascual, and A.K. Jardine, 2009. "*A practical procedure for the selection of time-to-failure models based on the assessment of trends in maintenance data"*. Reliability Engineering & System Safety, 94(10), pp. 1618-1628.

[27] Garmabaki, A., A. Ahmadi, J. Block, H. Pham, and U. Kumar, 2016. "*A reliability decision framework for multiple repairable units"*. Reliability Engineering & System Safety, 150(pp. 78-88.

[28] Birnbaum, Z.W., 1968, "*On the importance of different components in a multicomponent system"*, Washington Univ Seattle Lab of Statistical Research.

[29] Barabady, J. and U. Kumar, 2007. "*Availability allocation through importance measures"*. International journal of quality & reliability management, 24(6), pp. 643-657.

[30] Cassady, C.R., E.A. Pohl, and S. Jin, 2004. "*Managing availability improvement efforts with importance measures and optimization"*. IMA Journal of Management Mathematics, 15(2), pp. 161-174.

[31] Kline, M., 1984. "*Suitability of the lognormal distribution for corrective maintenance repair times"*. Reliability engineering, 9(2), pp. 65-80.