

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری استخراج مواد معدنی

تحلیل ظرفیت عملیاتی ناوگان استخراجی معدن مبتنی بر قابلیت اعتماد و تأثیر شرایط محیطی (مطالعه موردی: معدن مس سونگون)

نگارنده

علی نوری قراحتلو

اساتید راهنما:

دکتر رضا خالوکاکی و دکتر محمد عطانی

مشاورین:

دکتر بهزاد قدرتی و دکتر حفر عبدالمی شریف

بهمن ۹۵

شماره: ۹۵/۱۹۹۳
تاریخ: ۹۵/۱۱/۲۵
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای علی قراحسنلو دانشجوی دکتری رشته مهندسی استخراج معدن به شماره دانشجویی ۹۱۲۵۱۴۵ ورودی مهر ماه سال ۹۱ در تاریخ ۱۳۹۵/۱۱/۱۷ از رساله خود با عنوان: تحلیل ظرفیت عملیاتی ناوگان استخراجی معدن میتنی بر قابلیت اعتماد و تأثیر شرایط محیطی (مطالعه موردی: معدن مس سونگون) دفاع و با اخذ نمره ۱۹/۲۵ به درجه عالی نائل گردید.

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد.
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد.	

ردیف	هیئت داوران	سمت	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر رضا خالوکاکانی	استاد راهنما	استاد	
۲	دکتر محمد عطائی	استاد راهنما	استاد	
۳	دکتر بهزاد قدرتی	مشاور	دانشیار	
۴	دکتر جعفر عبدالهی شریف	مشاور	دانشیار	
۵	دکتر فرهنگ سرشکی	داور داخلی	استاد	
۶	دکتر سید رحمان ترابی	داور داخلی	استاد	
۷	دکتر علی اصغر خداباری	داور خارجی	دانشیار	
۸	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دانشیار	

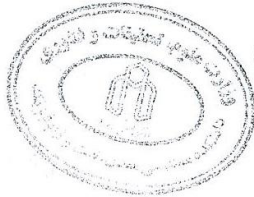
مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:

تاریخ و امضاء:

۹۵/۱۱/۲۵



تعهد نامه

اینجانب علی نوری قراحسنلو دانشجوی دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله تحلیل ظرفیت عملیاتی ناوگان استخراجی معدن مبتنی بر قابلیت اعتماد و تأثیر شرایط محیطی (مطالعه موردی: معدن مس سونگون) تحت راهنمایی پروفیسور رضا خالوکاکائی و پروفیسور محمد عطائی متعدد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام ((دانشگاه صنعتی شاهرود)) و یا ((Shahrood University of Technology)) به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل این رساله، در مواردی که موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷

امضای دانشجو: علی نوری قراحسنلو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، متاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب به نحو مقتضی در تولیدات مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیم اثر

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلاهای مشکلات و ناملایات گردن تا من به جایگاهی که اکنون در آن

ایستاده‌ام برسم.

و

همسر عزیزم

که سایه مهربانیش سایه ساز زندگی‌م می‌باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل کرد.

تشکر و قدردانی

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب دکتر رضا خالو کاکائی و محمد عطائی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کار ساز و سازنده بارور ساختند، تقدیر و تشکر نمایم و برای ایشان سلامتی و طول عمر آرزومندم. از جناب دکتر بهزاد قدرتی و دکتر جعفر عبدالهی شریف به دلیل یاری‌ها و راهنمایی‌های بی چشمداشت ایشان که بسیاری از سختیها را برایم آسانتر کردند و همچنین از استاد صبور و با تقوا، جناب آقای دکتر علی اصغر خدایاری روشن کننده نخستین شمع در این راه تاریک برای بنده بوده و الفبای اطمینان را به من آموختند، همچنین زحمت داوری این رساله را نیز متقبل شدند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از کلیه کارکنان، پرسنل و مسئولین محترم شرکت ملی مس در معدن مس سونگون به ویژه آقایان مهندس مجید خسروجردی (تحقیق توسعه شرکت ملی مس در معدن مس سرچشمه)، علی نصیرنژاد (رئیس تحقیق و توسعه معدن سونگون)، مهندس سعید فطورچی (مشاور صنعتی در معدن مس سونگون)، مهندس صالحی (سرپرست پیمانکار در معدن مس سونگون)، مهندس مسلم مرامی (سرپرست تعمیرگاه پیمانکار در معدن مس سونگون)، مهندس رسول جعفری (رئیس دفتر فنی پیمانکار در تعمیرگاه مس سونگون) که با محبت و بزرگواری خویش بنده را یاری کردند و مهمان دوستی و پاکی مردم کوهسار را در خاطر جاودانه کردند، سپاس گذارم.

نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استاد محترم جناب دکتر عباس برآبادی آشکار ننمایم، که هر چه گویم و سراپم، کم گفته‌ام. بدون شک جایگاه و منزلت ایشان، آجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگارم.

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار و برادری دوقولویی مهربان به اسم محمد را نسیم ساختم تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن‌ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدین و برادری که بودندشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که ایشان، پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده‌اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگاران که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند. سپاس از همسر عزیزم که طی دوره دکتری همه سختی‌های زندگی را با گشاده‌رویی تحمل کردند و بنده پیشرفت‌های تحصیلی‌ام را مدیون صبر ایشان هستم.

چکیده

برای تأمین نیازمندی‌های مشتری، تولیدکنندگان باید قادر به تحویل محصولات مطابق با مشخصات مورد نظر مشتری باشند. مقوله "تضمین تولید" برای چیرگی بر این خواسته ارائه شد. تضمین تولید با ادغام شاخص‌های عملکردی مختلف اعم از قابلیت دسترسی، اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی به تحلیل رفتار سیستم می‌پردازد و کارکرد آن را ارتقا می‌بخشد. شناسایی رفتار عملکردی این سیستم‌ها بر اساس خرابی‌ها و شرایط محیطی کارکرد و در نظرگیری سهم آن‌ها در به دوش کشیدن وظیفه تولید، نقش اساسی در کاهش کلی هزینه‌های تولید را به دنبال دارد و امکان رقابت در بازارهای جهانی را فراهم می‌کند. در این رساله بخش‌هایی از ناوگان استخراجی معدن مجتمع مس سونگون برای بهبود ظرفیت عملیاتی تولید با استفاده مقوله تضمین تولید انتخاب شد. تضمین تولید تابعی از عملکرد سیستم است که به وسیله خرابی‌ها کنترل می‌شود. خرابی‌ها تابع دو پارامتر ویژگی‌های کارکردی و شرایط محیطی‌اند. اطلاعات لازم برای پارامتر اول از داده‌های زمانی فعال و غیرفعال دستگاه‌ها حاصل شد. اطلاعات پارامتر دوم نیز از شرایط محیطی چون محیط اطراف، لرزش و فشارهای وارده و مهارت اپراتور به دست آمد و در قالب "فاکتورهای ریسک" در تحلیل‌ها وارد شد. در نخستین گام پس از جمع‌آوری داده‌های ارزیابی رفتار عملکردی زیرسیستم‌های بلدوزر، لودر و تراک با شاخص قابلیت دسترسی بدون تأثیر شرایط محیطی ارزیابی شد و نتایج نشان داد که وضعیت تعمیرات زیرسیستم لودر در وضعیت بحرانی قرار دارد. سپس قابلیت اطمینان زیرسیستم لودر با تأثیر شرایط مورد بررسی قرار گرفت که اختلاف سه برابری بهره‌وری در مقایسه با حالت پیشین، تأثیر انکارناپذیر شرایط محیطی بر این شاخص را نشان می‌داد. همچنین برای بررسی تأثیر فاکتورهای ریسک بر قابلیت تعمیرپذیری بخش دیگری از ناوگان در قالب یک سیستم شامل یک زیرسیستم لودر، یک زیرسیستم بلدوزر و دو زیرسیستم تراک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که احتمال انجام تعمیرات جزئی و اساسی برای زیرسیستم لودر به ترتیب ۲۵ و ۸۰ درصد است حال آنکه در صورت صرف نظر از تأثیر شرایط محیطی این احتمال ۳۰ درصد می‌رسد.

در مرحله بعد نیز از ایده سنجش اهمیت برای تعیین زیرسیستم‌های بحرانی برای دو حالت کلی با و بدون تأثیر شرایط محیطی استفاده شد. برای حالت بدون تأثیر شرایط محیطی بخش از ناوگان در قالب یک سیستم شامل یک زیرسیستم واگن دریل، یک زیرسیستم لودر، یک زیرسیستم بلدوزر و پنج زیرسیستم تراک انتخاب شد. طبق نتایج به دست آمده ارتقای قابلیت دسترسی سیستم مستلزم بهبود قابلیت دسترسی زیرسیستم حفاری است. همچنین برای زیرسیستم لودر ارتقای قابلیت اطمینان در مقایسه با قابلیت تعمیرپذیری در اولویت بالاتری قرار گرفت. برای حالت دوم یعنی سنجش اهمیت با وارد کردن تأثیر شرایط محیطی، قابلیت اطمینان یک سیستم از ناوگان استخراجی معدن شامل دو زیرسیستم لودر و هشت زیرسیستم تراک در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل حاکی از آن بود که بهترین گزینه برای ارتقای قابلیت اطمینان این سیستم بهبود قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های لودر است. در آخرین بخش از سنجش اهمیت نیز قابلیت دسترسی سیستمی شامل یک زیرسیستم واگن دریل، یک زیرسیستم لودر، یک زیرسیستم بلدوزر و پنج زیرسیستم تراک با تأثیر شرایط محیطی بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش قابلیت دسترسی سیستم درگرو افزایش قابلیت دسترسی دو زیرسیستم لودر و بلدوزر است.

سپس مفهوم تخمین قطعات یدکی به‌عنوان نخستین شاخه اصلی از قابلیت پشتیبانی برای لاستیک چرخ بررسی شد. بدین منظور الگوریتمی مرکب از وضعیت عملکردی سیستم در قالب قابلیت اطمینان و بدون تأثیر شرایط محیطی برای

پیش‌بینی لاستیک چرخ مورد نیاز برای تراک‌های صد تنی ارائه شد. محاسبات نشان داد که هر چه قابلیت اطمینان جزء بالاتر باشد، وضعیت کارکرد آن بهتر، تعداد خرابی کمتر و لذا تعداد لاستیک مورد نیاز کمتر است. این موضوع را می‌توان در مورد مقادیر ۳/۲، ۲ و ۱/۲ عدد لاستیک مورد نیاز در طول یک سال برای حد پائین، بهینه و بالای تخمین زده مشاهده کرد. با وارد کردن تأثیر شرایط محیطی فاکتورهای ریسک وابسته به زمان (مدل تراک و برند لاستیک) باعث شد تا داده‌های لاستیک تراک در ۱۲ لایه تقسیم شده و از مدل رگرسیون لایه‌بندی کاکس استفاده شود. در این مدل فاکتورهای ریسک محور، بارندگی و دما به ترتیب مؤثرترین عوامل در رفتار خرابی‌های لاستیک تراکانند و لذا تعداد قطعات یدکی مورد نیاز را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند.

نگهداری و تعمیرات (نت) به‌عنوان دومین شاخه از قابلیت پشتیبانی برای یک زیرسیستم تراک بررسی شد. نت پیشنهادی در این بخش از نوع نت پیشگیرانه محدود به قابلیت اطمینان بود و هدف حفظ قابلیت اطمینان در سطح ۸۰ درصد تعریف شد. بدین منظور تحلیل‌های قابلیت اطمینان برای این زیرسیستم طی چهار نوع تابع قابلیت اطمینان بسته به نحوه انجام نت از لحاظ کامل یا ناقص بودن و وجود یا عدم وجود تأثیر شرایط محیطی انجام گرفت و چهار نوع استراتژی نت پیشگیرانه پیشنهاد شد.

در آخرین مرحله نیز به تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی با به‌کارگیری نتایج حاصل از تحلیل داده‌های تاریخی عملکرد، تأثیر شرایط محیطی و ظرفیت تولید یک سیستم متشکل از یک دستگاه واگن دریل، یک دستگاه بلدوزر، یک دستگاه لودر و شش دستگاه تراک در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق در کلیه دستاوردهای رساله حکایت از تأثیر انکارناپذیر شرایط محیطی دارد و دستیابی به نتایج واقعی منوط به وارد کردن فاکتورهای ریسک در محاسبات است. در نتیجه تحلیل‌ها زیرسیستم‌های لودر و واگن دریل معدن به‌عنوان دستگاه‌های بحرانی تعیین شدند. لذا برای ارتقای قابلیت دسترسی سیستم، بهبود قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری این دو زیرسیستم در اولویت قرار دارد.

کلیدواژه: تضمین تولید، قابلیت پاسخ‌دهی، قابلیت اعتماد، نگهداری و تعمیرات، قطعات یدکی، فاکتورهای ریسک، ناوگان استخراجی معدن مجتمع مس سونگون

لیست مقالات مستخرج از رساله

مقالات چاپ یا پذیرفته شده در مجلات ISI، علمی و پژوهشی، بین‌المللی، ...				
وضعیت	نوع مقاله	مجله	مقاله	
چاپ شده	ISI	International Journal of Mining, Reclamation and Environment	Normalised availability importance measures for complex systems	۱
چاپ شده	ISI	Journal of Fundamental and Applied Sciences	Throughput Capacity Analysis (Case Study: Sungun Copper Mine)	۲
چاپ شده	ISI	Journal of Mining & Environment	Maintainability measure based on operating environment, a case study: Sungun copper mine	۳
چاپ شده	ISC	International Journal of Mining and Geo-Engineering	Tire Demand Planning Based on Reliability and Operating Environment (Case Study: Sungun Copper Mine)	۴
آنلاین شده	ISC	Journal of Aalytical and Numerical Methods in Mining Engineering	Operating Environment Based Reliability Analysis of Mining Equipment (Case Study: Sungun Copper Mine)	۵
آنلاین شده	ISC	Journal of Aalytical and Numerical Methods in Mining Engineering	Spare Parts Provision	۶
چاپ شده	Scopus	Journal of Failure Analysis and Prevention	Operating Environment Based Availability Importance Measures for Mining Equipment (Case Study: Sungun Copper Mine)	۷
مقالات ارائه شده در کنفرانس یا مجلات داخلی				
وضعیت	نوع مقاله	مجله	مقاله	
پذیرفته شده	فصلنامه	نشریه مهندسی منابع معدنی و هیدروکربنی	Availability Analysis in Mining Systems (Case Study: Sungun Copper Mine)	۸
مقالات تحت داوری				
وضعیت	نوع مقاله	مجله	مقاله	
تحت داوری	Scopus	International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering	Reliability Importance Measures Considering Operating Risk Factors	۹
تحت داوری	ISI	International Journal of Mining, Reclamation and Environment	Reliability Based Spare part Prediction Considering Mining Influence Factors (Case Study: Sungun Copper Mine)	۱۰
تحت داوری	ISI	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability	Production Assurance analysis in Dynamic Operational Conditions: A Case Study	۱۱

فهرست عناوین

۱- مقدمه..... ۱

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- ناوگان استخراجی معدن مس سونگون ۳
- ۳-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق ۴
- ۴-۱- بیان مسئله ۴
- ۵-۱- اهداف رساله ۵
- ۶-۱- فرضیات تحقیق ۵
- ۷-۱- ساختار رساله ۶

۲- مفاهیم اساسی و چارچوب تحقیق ۹

- ۱-۲- مقدمه ۱۰
- ۲-۲- مفاهیم اساسی ۱۰
- ۱-۲-۲- ظرفیت عملیاتی ۱۱
- ۲-۲-۲- قابلیت اعتماد ۱۲
- ۳-۲-۲- قابلیت دسترسی ۱۳
- ۴-۲-۲- قابلیت اطمینان ۱۳
- ۵-۲-۲- قابلیت تعمیرپذیری ۲۰
- ۶-۲-۲- قابلیت پشتیبانی ۲۳
- ۷-۲-۲- تحلیل عملکرد سیستم ۳۴
- ۸-۲-۲- سنجش اهمیت ۳۶
- ۹-۲-۲- جمع‌بندی ۳۸

۳- بررسی سابقه علمی موضوع ۳۹

- ۱-۳- مقدمه ۴۰
- ۲-۳- ظرفیت عملیاتی ۴۰
- ۳-۳- قابلیت دسترسی ۴۲
- ۴-۳- قابلیت اطمینان ۴۳
- ۵-۳- قابلیت تعمیرپذیری ۴۵
- ۶-۳- قابلیت پشتیبانی ۴۶

فهرست.....عناوین

۴۸.....۷-۳- تحلیل آماری پیشینه موضوع در زمینه‌های مختلف

۵۱.....۸-۳- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

۴- مطالعه موردی و چارچوب اجرا - مس سونگون.....۵۳

۵۴.....۱-۴- مقدمه

۵۴.....۲-۴- موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون

۵۵.....۳-۴- شرایط آب‌وهوایی منطقه

۵۶.....۴-۴- معدن مس سونگون

۵۶.....۵-۴- مرزبندی سیستم استخراجی معدن سونگون و تعیین محدودیت‌ها و فرضیات

۶۰.....۶-۴- چارچوب اجرا

۶۴.....۷-۴- جمع‌بندی

۵- جمع‌آوری داده از مجتمع مس سونگون.....۶۵

۶۶.....۱-۵- مقدمه

۶۶.....۲-۵- سطوح جمع‌آوری داده

۶۷.....۳-۵- بانک داده‌ها

۷۰.....۴-۵- رابطه فاکتورهای ریسک و استخراج داده‌های زمانی

۷۰.....۱-۴-۵- داده‌های سطح اول

۷۱.....۱-۴-۵- داده‌های زمانی - خرابی (TBF)

۷۲.....۲-۴-۵- فاکتورهای ریسک - تعمیرات (TTR)

۷۶.....۲-۴-۵- داده‌های سطح دوم

۷۶.....۱-۲-۴-۵- داده‌های زمانی - خرابی (TTF)

۷۶.....۲-۲-۴-۵- فاکتورهای ریسک - خرابی

۷۷.....۵-۵- جمع‌بندی

۶- تضمین تولید سیستم استخراجی معدن مس سونگون.....۷۹

۸۰.....۱-۶- مقدمه

۸۱.....۲-۶- تحلیل رفتار سیستم و زیرسیستم

۸۲.....۱-۲-۶- قابلیت دسترسی

۸۷.....۲-۲-۶- تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر شرایط محیطی

۹۳.....۳-۲-۶- تحلیل قابلیت تعمیرپذیری مبتنی بر شرایط محیطی

فهرست.....	عناوین.....
۳-۶- سنجش اهمیت سیستم	۹۹.....
۱-۳-۶- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بدون تأثیر شرایط محیطی	۹۹.....
۲-۳-۶- سنجش اهمیت قابلیت اطمینان مبتنی بر شرایط محیطی	۱۱۳.....
۳-۳-۶- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی بر شرایط محیطی	۱۲۰.....
۱-۳-۳-۶- تحلیل قابلیت دسترسی مبتنی بر شرایط محیطی	۱۲۲.....
۲-۳-۳-۶- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی بر شرایط محیطی در معدن سونگون	۱۲۶.....
۴-۶- قطعات یدکی	۱۲۸.....
۱-۴-۶- مدیریت قطعات یدکی بدون تأثیر شرایط محیطی - لاستیک‌های تراک	۱۲۹.....
۲-۴-۶- مدیریت قطعات یدکی با تأثیر شرایط محیطی	۱۳۳.....
۵-۶- تعمیر و نگهداری	۱۵۳.....
۱-۵-۶- قابلیت اطمینان تراک	۱۵۴.....
۲-۵-۶- برنامه نت پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان برای تراک	۱۵۷.....
۶-۶- تحلیل تضمین تولید در شرایط محیطی پویا	۱۶۱.....
۱-۶-۶- تخمین پارامترهای توابع اساسی RMS برای هر زیرسیستم	۱۶۶.....
۲-۶-۶- تحلیل قابلیت پشتیبانی با استفاده از مدل فرایند نقطه‌ای	۱۷۱.....
۳-۶-۶- تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری	۱۷۳.....
۴-۶-۶- به روزرسانی پارامترهای توابع اساسی RMSF بر اساس تأثیرات فاکتورهای ریسک	۱۷۶.....
۵-۶-۶- تشکیل پیکربندی سیستم، تخمین قابلیت پاسخ‌دهی و پایش سیستم	۱۷۷.....
۷-۶- جمع‌بندی	۱۸۰.....
۷- نتیجه‌گیری	۱۸۳
۱-۷- نتیجه‌گیری	۱۸۴.....
۲-۷- پیشنهادها	۱۹۱.....
منابع و مراجع	۱۹۳
منابع	۱۹۴.....
پیوست	۲۰۵
پیوست الف - داده‌های خرابی لودر	۲۰۶.....
پیوست ب - داده‌های تعمیرات لودر	۲۱۲.....

فهرست.....عناوین

پیوست ج - داده‌های لاستیک لودر ۲۱۸

لغتنامه ۲۲۳

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- "الگوریتم تحلیل RMS با داده‌ها زمانی" برگرفته از (Barabady and Kumar, 2008; Garmabaki et al., 2016) ۱۷
- شکل ۲-۲- تأثیرات فاکتورهای ریسک بر نرخ مخاطره (Ghodrati and Kumar, 2005a) ۱۸
- شکل ۳-۲- شمای نموداری از لایه‌بندی برای داده‌ها (Barabadi et al., 2011a) ۲۰
- شکل ۴-۲- مقدار سفارش اقتصادی (Ghodrati, 2005b) ۲۶
- شکل ۱-۳- سناریوهای مختلف برای تحقیقات مروری ۴۹
- شکل ۲-۳- تقسیم‌بندی مرور ادبیات بر اساس موضوع ۴۹
- شکل ۳-۳- تحلیل پارتوی مرور ادبیات بر اساس سال ارائه پژوهش ۵۰
- شکل ۱-۴- نقشه جغرافیایی و موقعیت معدن مس سونگون ۵۵
- شکل ۲-۴- فرایند کلی تعیین مرزها و محدودیت‌ها ۵۸
- شکل ۳-۴- ایده تضمین تولید (Standard, 1998b) ۶۰
- شکل ۴-۴- ساختار روش اجرایی ۶۱
- شکل ۵-۴- فرایند تحلیل رفتار سیستم بر اساس شاخص‌های عملکرد و شرایط محیطی ۶۲
- شکل ۱-۶- نمودار بلوکی سیستم معدنی ۸۲
- شکل ۲-۶- آزمون ترسیمی روند لودر WA470-3 ۸۴
- شکل ۳-۶- نمودار خودهمبستگی نما برای دو لاگ یک و دو در لودر WA470-3 ۸۴
- شکل ۴-۶- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های معدنی ۸۶
- شکل ۵-۶- قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های معدنی ۸۶
- شکل ۶-۶- آزمون ترسیمی روند سیستم لودر کاترپیلار (الف) و نمودار خودهمبستگی برای لگ‌های ۱ و ۲ (ب) ۸۹
- شکل ۷-۶- قابلیت اطمینان لودر کوماتسو ۹۲
- شکل ۸-۶- نرخ مخاطره لودر کوماتسو ۹۳
- شکل ۹-۶- طرح شماتیک روش ارزیابی قابلیت تعمیرپذیری ۹۴
- شکل ۱۰-۶- تأثیر فاکتورهای ریسک بر نرخ تعمیرات زیرسیستم لودر ۱۰۰
- شکل ۱۱-۶- قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های لودر و بلدوزر با استفاده از SCRМ ۱۰۰
- شکل ۱۲-۶- تخمین سنجش اهمیت قابلیت دسترسی ۱۰۶
- شکل ۱۳-۶- بلوک دیاگرام سیستم استخراجی ۱۰۷
- شکل ۱۴-۶- سنجش اهمیت‌های مختلف قابلیت دسترسی و مقادیر نرمالیزه آن‌ها برای حالت اول ۱۱۰
- شکل ۱۵-۶- سنجش اهمیت نرمالیزه قابلیت دسترسی مبتنی بر نرخ مخاطره و تعمیر برای حالت اول ۱۱۱
- شکل ۱۶-۶- سنجش اهمیت‌های مختلف قابلیت دسترسی و مقادیر نرمالیزه آن‌ها برای حالت دوم ۱۱۲
- شکل ۱۷-۶- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی نرمالیزه زیرسیستم‌ها برای حالت دوم ۱۱۲
- شکل ۱۸-۶- اختلاف بین سنجش‌های اهمیت قابلیت دسترسی برای حالت اول و دوم ۱۱۳

فهرست.....	اشکال
شکل ۶-۱۹- بلوک دیاگرام سیستم استخراجی	۱۱۵
شکل ۶-۲۰- آزمون ترسیمی روند (الف) و خودهمبستگی (ب) برای خرابی‌های زیرسیستم DT.2.....	۱۱۵
شکل ۶-۲۱- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های معدنی.....	۱۱۸
شکل ۶-۲۲- قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری سیستم	۱۱۹
شکل ۶-۲۳- سنجش اهمیت قابلیت اطمینان در معدن سونگون	۱۱۹
شکل ۶-۲۴- سنجش اهمیت قابلیت اطمینان نرمالیزه در معدن سونگون	۱۲۰
شکل ۶-۲۵- بلوک دیاگرام ناوگان استخراجی معدن مس سونگون	۱۲۱
شکل ۶-۲۶- اهمیت قابلیت دسترسی	۱۲۸
شکل ۶-۲۷- تخمین قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان	۱۳۰
شکل ۶-۲۸: قابلیت اطمینان لاستیک تراک‌ها	۱۳۱
شکل ۶-۲۹- روش تخمین قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان و شرایط محیطی.....	۱۳۵
شکل ۶-۳۰- قابلیت اطمینان و نرخ مخاطره لاستیک‌های لودر کوماتسو ۴۷۰-۳ در مقایسه با سایر مدل‌ها.....	۱۴۳
شکل ۶-۳۱- مقایسه نرخ مخاطره و قابلیت اطمینان برای لاستیک‌ها در محور عقب و جلو از تراک	۱۴۴
شکل ۶-۳۲- تعداد لاستیک‌های مورد نیاز با و بدون فاکتورهای ریسک.....	۱۵۱
شکل ۶-۳۳- فرایند نت مبتنی بر قابلیت اطمینان (برگرفته از Barabady and Kumar, 2008; Hoseinie et al., 2009; Louit et al., 2012c).....	۱۵۴
شکل ۶-۳۴- آزمون ترسیمی روند (الف) و نمودار خودهمبستگی نما برای لگ‌های مختلف (ب) سیستم تراک	۱۵۵
شکل ۶-۳۵- بازه‌های نت پیشگیرانه برای استراتژی‌های مختلف به ازای مقادیر بحرانی قابلیت اطمینان.....	۱۵۹
شکل ۶-۳۶- زمان‌های اجرای نت پیشگیرانه در شرایط محیطی مختلف	۱۶۰
شکل ۶-۳۷- زمان‌های اجرای PM به ازای تأثیرات مختلف نت ناقص.....	۱۶۱
شکل ۶-۳۸- تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی سیستم در شرایط محیطی پویا.....	۱۶۳
شکل ۶-۳۹- بلوک دیاگرام ناوگان انتخابی از معدن سونگون	۱۶۵
شکل ۶-۴۰- الگوریتم تحلیل داده‌ها به روش کلاسیک	۱۷۱
شکل ۶-۴۱- قابلیت پشتیبانی زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی	۱۷۳
شکل ۶-۴۲- تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری با استفاده از PHM و بسط‌های آن	۱۷۳
شکل ۶-۴۳- نمودار قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرسیستم‌ها.....	۱۷۴
شکل ۶-۴۴- نرخ مخاطره و تعمیر اساسی به روزرسانی شده برای بلدوزر در فاز ۲ برای نوبت‌کاری مختلف	۱۷۸
شکل ۶-۴۵- دیاگرام فاز قابلیت اطمینان سیستم استخراجی.....	۱۷۸
شکل ۶-۴۶- متوسط قابلیت دسترسی سیستم استخراجی در طول نوبت‌کاری A برای سه فاز.....	۱۸۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- سایر مدل‌های مبتنی بر فاکتور ریسک ۲۱
- جدول ۲-۲- تأثیرات مختلف فعالیت PM (Liu et al., 2012) ۳۳
- جدول ۱-۴- زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی معدن مس سونگون ۵۹
- جدول ۱-۵- نمونه گزارش ماهیانه هواشناسی- فروردین ۱۳۹۲ ۶۹
- جدول ۲-۵- نمونه داده‌های ادغام شده برای همه دستگاه‌های حفاری ۷۱
- جدول ۳-۵- نمونه‌ای از TBF-های زیرسیستم حفاری به شماره کارگاهی ۷۶۷ ۷۱
- جدول ۴-۵- فاکتورهای ریسک خرابی زیرسیستم‌های حفاری و بارکننده ۷۲
- جدول ۵-۵- فاکتورهای ریسک خرابی زیرسیستم‌های باربری و بلدوزر ۷۴
- جدول ۶-۵- نمونه‌ای از TTR-های زیرسیستم بار کننده به همراه فاکتورهای ریسک ۷۵
- جدول ۷-۵- فاکتور ریسک "مدل" و "برند" ۷۷
- جدول ۸-۵- نمونه داده‌های خرابی لاستیک لودر به همراه فاکتورهای ریسک ۷۷
- جدول ۱-۶- فرایندی آماری برای برازش تابع یا مدل مناسب برای لودر WA470-3 ۸۳
- جدول ۲-۶- برازش توابع یا مدل آماری برای زیرسیستم‌های معدنی ۸۵
- جدول ۳-۶- قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های معدنی ۸۷
- جدول ۴-۶- نتایج آزمون تحلیلی روند ۸۸
- جدول ۵-۶- فاکتورهای ریسک، معناداری و تأثیرات آن‌ها ۹۰
- جدول ۶-۶- مقادیر p-value برای فاکتورهای ریسک ۹۲
- جدول ۷-۶- زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی و کدگذاری ۹۳
- جدول ۸-۶- اختصارات فاکتورهای ریسک شرایط محیطی تعمیرات برای زیرسیستم‌ها ۹۴
- جدول ۹-۶- p-value برای ارزیابی فرض متناسب بودن برای فاکتورهای ریسک مؤثر ۹۵
- جدول ۱۰-۶- تخمین ضرایب فاکتورهای ریسک در زیرسیستم‌ها ۹۶
- جدول ۱۱-۶- نتایج تحلیل‌های آماری فرض iid و برازش بهترین توزیع یا مدل ۹۷
- جدول ۱۲-۶- زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی معدن ۱۰۷
- جدول ۱۳-۶- برازش مناسب‌ترین مدل یا تابع برای TBF-ها و TTR-ها ۱۰۸
- جدول ۱۴-۶- سنجش اهمیت‌های مختلف قابلیت دسترسی و مقادیر نرمالیزه آن‌ها برای حالت اول ۱۱۰
- جدول ۱۵-۶- سنجش اهمیت‌های مختلف قابلیت دسترسی و مقادیر نرمالیزه آن‌ها برای حالت ۱۱۱
- جدول ۱۶-۶- زیرسیستم‌های ناوگان و کدگذاری مربوطه ۱۱۴
- جدول ۱۷-۶- آزمون‌های تحلیلی روند و خودهمبستگی برای خرابی‌های زیرسیستم DT.2 ۱۱۶
- جدول ۱۸-۶- بهترین برازش و تخمین ضرایب برای داده‌های خرابی ۱۱۷
- جدول ۱۹-۶- زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی از معدن مس سونگون ۱۲۱
- جدول ۲۰-۶- بهترین توابع برازش شده برای خرابی زیرسیستم‌ها و مقادیر MTTF ۱۲۲

فهرست.....جداول

- جدول ۶-۲۱- بهترین توابع برازش شده برای تعمیرات زیرسیستم‌ها و مقادیر MTTR ۱۲۴
- جدول ۶-۲۲- سناریوی سنجش اهمیت قابلیت دسترسی در معدن مس سونگون ۱۲۶
- جدول ۶-۲۳- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برای معدن مس سونگون ۱۲۷
- جدول ۶-۲۴- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی نرمالیزه برای معدن مس سونگون ۱۲۷
- جدول ۶-۲۵- نتایج آزمون روند برای داده‌های لاستیک‌های تراک‌ها ۱۳۰
- جدول ۶-۲۶- پارامترهای تخمینی برای لاستیک‌های تراک‌ها ۱۳۱
- جدول ۶-۲۷- تخمین لاستیک مورد نیاز برای حالت‌های مختلف ۱۳۲
- جدول ۶-۲۸- تخمین مقدار سفارش بهینه و زمان سفارش ۱۳۳
- جدول ۶-۲۹- تخمین مقادیر فاکتورهای ریسک لاستیک تراک با استفاده از SPSS ۱۳۶
- جدول ۶-۳۰- تخمین مقادیر فاکتورهای ریسک لاستیک لودر با استفاده از SPSS ۱۳۸
- جدول ۶-۳۱- نتایج آزمون تحلیلی ارزیابی فرض متناسب بودن برای داده‌های لودر ۱۳۹
- جدول ۶-۳۲- نتایج آزمون تحلیلی ارزیابی فرض متناسب بودن برای داده‌های تراک ۱۴۰
- جدول ۶-۳۳- کدگذاری لایه‌بندی انجام گرفته بر اساس Z11 و Z3 برای لاستیک تراک ۱۴۰
- جدول ۶-۳۴- تخمین ضرایب فاکتورهای ریسک مؤثر پس از لایه‌بندی داده‌های تراک ۱۴۱
- جدول ۶-۳۵- نتایج آزمون‌های تحلیلی روند برای داده‌های لودر ۱۴۲
- جدول ۶-۳۶- نتایج آزمون‌های تحلیلی روند برای داده‌های تراک ۱۴۲
- جدول ۶-۳۷- بهترین توزیع یا مدل برازش شده برای توابع اساسی هر لایه از داده‌های تراک ۱۴۴
- جدول ۶-۳۸- سناریوهای مختلف برای کارکرد لودر در طول سه سال ۱۴۹
- جدول ۶-۳۹- تعداد لاستیک مورد نیاز لودر در سناریوهای مختلف برای سه سال ۱۴۹
- جدول ۶-۴۰- تعداد لاستیک مورد نیاز برای تراک در دو سال آینده ۱۵۰
- جدول ۶-۴۱- مقدار سفارش اقتصادی و نقطه سفارش مجدد برای لودر ۱۵۲
- جدول ۶-۴۲- مقدار سفارش اقتصادی و نقطه سفارش مجدد با و بدون در نظرگیری فاکتورهای ریسک برای تراک ۱۵۲
- جدول ۶-۴۳- آزمون‌های آماری تراک ۱۵۵
- جدول ۶-۴۴- نتایج آزمون تحلیلی ارزیابی فرض متناسب بودن برای داده‌های تراک ۱۵۶
- جدول ۶-۴۵- تخمین مقادیر فاکتورهای ریسک لاستیک تراک با استفاده از SPSS ۱۵۷
- جدول ۶-۴۶- بازه‌های نت پیشگیرانه برای استراتژی‌های مختلف به ازای مقادیر بحرانی قابلیت اطمینان ۱۵۹
- جدول ۶-۴۷- بازه‌های اجرای نت پیشگیرانه برای حد بحرانی قابلیت اطمینان ۸۰ درصد ۱۶۰
- جدول ۶-۴۸- زمان‌های اجرای نت پیشگیرانه در شرایط محیطی مختلف ۱۶۰
- جدول ۶-۴۹- زمان‌های اجرای PM به ازای تأثیرات مختلف نت ناقص ۱۶۱
- جدول ۶-۵۰- مشخصات ناوگان استخراجی معدن ۱۶۵
- جدول ۶-۵۱- فاکتورهای ریسک قابلیت اطمینان لودر و تراک ۱۶۷
- جدول ۶-۵۲- فاکتورهای ریسک قابلیت اطمینان واگن دریل و بلدوزر ۱۶۸
- جدول ۶-۵۳- فاکتورهای ریسک قابلیت تعمیرپذیری همه زیرسیستم‌ها ۱۶۹

فهرست.....	جداول
جدول ۶-۵۴- بخشی از داده‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم دریل واگن	۱۷۰
جدول ۶-۵۵- بخشی از داده‌های قابلیت تعمیرپذیری و پشتیبانی زیرسیستم دریل واگن	۱۷۰
جدول ۶-۵۶- نتایج آزمون‌های تحلیلی روند و خودهمبستگی برای هر زیرسیستم.....	۱۷۲
جدول ۶-۵۷- بهترین توزیع برای هر زیرسیستم و پارامترهای آن‌ها	۱۷۲
جدول ۶-۵۸- نتایج آزمون پیرسون برای داده‌های خرابی بلدوزر	۱۷۴
جدول ۶-۵۹- پارامترهای توابع قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری	۱۷۴
جدول ۶-۶۰- فاکتورهای مؤثر بر قابلیت اطمینان هر زیرسیستم	۱۷۵
جدول ۶-۶۱- فاکتورهای مؤثر بر قابلیت تعمیرپذیری هر زیرسیستم	۱۷۶
جدول ۶-۶۲- فاکتورهای ریسک و مقادیر مورد نظر برای فازهای مختلف	۱۷۷
جدول ۶-۶۳- به روزرسانی پارامترهای قابلیت اطمینان در فازهای تعریف شده و در نوبت صبح	۱۷۸
جدول ۶-۶۴- تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی فاز برای سیستم استخراجی	۱۸۱

اختصارات رساله

علایم و اختصارات			
فرض مخاطرات متناسب	PH	تابع خود همبستگی نما	ACF
مدل نرخ مخاطرات متناسب	PHM	فاکتور کاهش عمر	ARF
فرایند قانون توانی	PLP	سیستم به بدی سیستم قدیم	BAO
سیاست PM کنترلی با محدودیتت قابلیت اطمینان	PLPM	درجه آزادی	D.f.
تعمیرات پیشگیرانه	PM	مدل بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان پویا	DRBD
مدل نرخ تعمیرات متناسب	PRM	زمان تحویل دهی	DT
مدل بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان	RBD	مقدار سفارش اقتصادی	EOQ
فرایند تجدیدپذیر	RP	مدل نرخ مخاطرات متناسب توسعه یافته	EPHM
نقطه سفارش مجدد	Rp	شاخص خرابی بحرانی	FCI
بلوک دیاگرام فاز قابلیت اطمینان	RPD & PMS	سیستم به خوبی سیستم نو	GAN
مدل رگرسیون لایه بندی شده کاکس	SCRM	مدل هیبریدی PM ناقص	HIPM
خطای استاندارد	SE	فرایند پواسون همگن	HPP
سطح معناداری	Sig	فاکتور افزایش نرخ مخاطره	HRIF
تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز	SPP	سنجش اهمیت	I
سولفور	SUF	توزیع یکسان و مستقل داده ها	iid
زمان بین خرابی	TBF	آماره ال-کانگ-باکس-کیو	LBQ
زمان بین تعمیرات	TBM	آماره کتابچه نظامی آمریکا	Mil-Hdbk-189
تحلیل ظرفیت عملیاتی	TCA	روش درستمایی بیشینه	MLE
تراکیت	TRT	متوسط زمان بین خرابی	MTBF
مقدار آماره t-استودنت	TSTA	متوسط زمان بین تعمیرات	MTTR
زمان تا تحویل	TTD	منزونیت	MZT
زمان تا وقوع خرابی	TTF	غیرقابل دسترسی	N/A
زمان انجام تعمیرات	TTR	سنجش اهمیت نرمالیزه	NI
زمان تجمعی تا وقوع خرابی	TTTF	ماده معدنی	ORE
آماره والد	Wald	اکسید	OXD
قابلیت اطمینان، دسترسی، تعمیرپذیری، پشتیبانی و ظرفیت عملیاتی			RAMSF

فصل اول

مقدمه



۱-۱- مقدمه

استخراج معادن مس هرساله سخت‌تر می‌شود، زیرا کانسارهای بهتر پیش از این کشف و استخراج شده‌اند. عیار استخراجی کنونی بهتر از عیار پروژه‌های آتی بوده که این به مفهوم بالا رفتن هزینه‌های تولید است. در دنیای نوین ماشین‌آلات و تجهیزات غول‌پیکر عهده‌دار تولید شده‌اند. در سال ۲۰۱۵ تجهیزات معادن روباز با داشتن سهم ۳۱ درصدی، بیشترین سهم را در بازار جهانی تجهیزات معدنی به خود اختصاص دادند. در ایران چون عمده ماشین‌آلات معدنی و صنعتی وارداتی‌اند، هزینه تولید (هزینه انرژی، لاستیک، قطعات یدکی و نگهداری و تعمیرات ...) حتی در شرایط عادی بالاتر از کشورهای صاحب این فناوری است (Asremes, 2016). طبق اظهارات دبیر کل اتحادیه تولیدکنندگان صادرکنندگان محصولات معدنی قیمت ماشین‌آلات معدنی در کشور به علت تحریم و مسائل سیاسی چهار برابر گران‌تر از قیمت جهانی است که این مسئله خود مانع از نوسازی آن‌ها شده و هزینه‌های را بیشتر افزایش داده است. همچنین جبران فرسودگی ماشین‌آلات معدنی و جلوگیری از افت کارکرد آن‌ها نیازمند تأمین قطعات یدکی و پشتیبان به موقع و مناسب است که این مسئله نیز با مشکل عدیده‌ای مواجه است و تبعات آن بر چرخه تولید و میزان هزینه‌های تولید سایه افکنده است. با این اوصاف بخش ماشین‌آلات معدنی معادن ایران دچار تنگناها و مشکلات متعددی است و این موضوع به شدت بر ظرفیت تولید و قیمت تمام‌شده مؤثر بوده و امکان رقابت در بازارهای جهانی را سلب کرده است. بنابراین باید به سراغ شاخص‌ها و رویکردهای مختلف مدیریتی مناسب برای افزایش کارایی و استفاده بهینه از منابع و تجهیزات موجود رفت که این رویکردها نیز نیازمند تحلیل داده‌های موجود است. در دنیای امروز حجم داده‌های در دسترس هرساله به‌طور نمایی فزونی می‌یابد و یکی از مهم‌ترین مهارت‌ها توانایی توصیف و ارزیابی داده‌های موجود با علم و ابزار مناسب چون علوم ریاضی و شاخه کاربردی‌تر آن یعنی علم آمار و احتمالات است. ایده تضمین تولید و زیر شاخه‌های آن برای بررسی رفتار سیستم‌های صنعتی و بهره‌گیری بیشینه از آن‌ها برگرفته از این علم می‌باشد. در واقع هدف

مدیریت استفاده بهینه از تجهیزات موجود است و خرابی‌ها در نقطه مقابل آن قرار دارند. خرابی‌ها با از دسترس خارج کردن تجهیزات، زمان کارکرد را کاهش می‌دهند و موجب افت عملکرد تجهیزات می‌شوند. از سوی دیگر هر خرابی فرایندی تحت عنوان نگهداری و تعمیرات (تعویض یا تعمیر) را به دنبال دارد. پس برآیند داده‌های مربوط به دو پارامتر کارکردی زمان تا وقوع خرابی و زمان انجام تعمیرات در مجموع تعیین کننده رفتار عملکردی تجهیزات است که این دو زمان عملکرد علاوه بر رفتار ماشین‌آلات تحت تأثیر از شرایط محیطی مانند آب‌وهوا، دما، مهارت اپراتور، جنس سنگ، وضعیت جاده، تجربه اکیپ تعمیرات و ... قرار دارند.

با توجه به آنچه بیان شد صنعت معدنکاری نیازمند رویکردی منسجم و قابل کاربرد در شرایط واقعی است. این رویکرد باید پایه ریاضی مناسب و درعین حال کاربردی داشته باشد تا هم بتواند وضعیت عملکرد تجهیزات را با کمترین خطا و انحراف نسبت به حالت واقعی تخمین بزند و هم به راحتی توسط متخصصین صنعتی که از فضای علمی دورترند، قابل استفاده باشد. روش پیشنهادی باید ویژگی‌های مختلف عملکردی تجهیزات مانند زمان کارکرد، زمان تعمیرات، زمان خدمات‌رسانی را پوشش دهد. درعین حال با وارد کردن تأثیرات شرایط محیطی به عنوان پارامتر انکارناپذیر در تحلیل‌ها، تخمین‌های واقعی ارائه دهد. در این رساله روشی برای پوشش این مولفه‌ها با بررسی مطالعه موردی از معدن مس سونگون انجام می‌گیرد.

۱-۲- ناوگان استخراجی معدن مس سونگون

مجتمع مس سونگون در استان آذربایجان شرقی در ۱۰۰ کیلومتری شمال شرق تبریز و ۲۵ کیلومتری شهرستان ورزقان در ناحیه‌ای کوهستانی واقع شده است. بر اساس آخرین محاسبات انجام شده، میزان ذخیره زمین‌شناسی این کانسار ۸۰۶ میلیون تن با عیار ۰/۶۱ درصد مس برآورد شده است. این مجتمع شامل بخش‌های معدن، تغلیظ، پش‌تیبانی، مالی، انبارها، سفارش و خدمات مدیریتی مهندسی است. معدن این مجتمع با توجه به مشخصات کانسار به روش روباز طراحی شده است. عملیات استخراجی معدن (حفاری، آتشباری، بارگیری و باربری) توسط شرکت‌های پیمانکار انجام می‌گیرد و تجهیزات استخراجی از چالزن‌ها، آنفو تراک، شاول‌ها، لودر، بیل مکانیکی، بلدوزر، گریدر و کامیون‌ها (تراک) تشکیل می‌شود. مواد معدنی استخراجی توسط ناوگان به سمت سنگ‌شکن یا دامپ‌های سولفور واقع در شمال و جنوب معدن حمل می‌شود و باطله پله‌های عملیاتی به طرف دامپ‌های باطله واقع در دره پخیر انتقال می‌یابد.

۱-۳- اهمیت و ضرورت تحقیق

در صنعت معدنکاری برای تأمین تقاضا، دستیابی به تولید سالیانه برنامه‌ریزی شده و پایبندی به قراردادهای منعقد شده، لازم است ظرفیت عملیاتی مورد توجه قرار گیرد. ظرفیت عملیاتی ناوگان باکیفیت و نحوه کارکرد ماشین‌آلات ارتباط مستقیم دارد و از این رو شناسایی رفتار زیرسیستم‌های موجود ضروری است. نتیجه مرور کارهای انجام گرفته حاکی از آن است که برخی شاخص‌های رفتاری سیستم مانند قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری پیش‌ازاین مورد توجه بوده و از روش‌های کلاسیک برای تحلیل این شاخص‌ها استفاده شده است. حال آنکه تحلیل ناوگان استخراجی معدن سونگون با تجهیزات تخصصی ویژه، عظیم‌الجثه و گران‌بها صرفاً با استفاده از این دو شاخص کافی نیست و نتایج آن ممکن است قابل قبول نباشد. لذا تحلیل ناوگان استخراجی معدن سونگون نیازمند مفهومی گسترده‌تر و تفصیلی‌تر برای پایش دقیق‌تر رفتار سیستم در طول عمر مفید آن است. ایده قابلیت اعتماد مفهوم جدیدی است که با شاخص‌های بیشتری رفتار سیستم را تحلیل می‌کند و نتایج واقعی‌تری را ارائه می‌دهد. در این مفهوم علاوه بر دو شاخص قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری، شاخص پشتیبانی نیز در تحلیل‌ها وارد می‌شود و مهندسان به تحلیل هم‌زمان این سه شاخص می‌پردازند، چرا که برنامه‌ریزی و مدیریت ظرفیت عملیاتی بدون پشتیبانی صحیح تدارکات قطعات یدکی و نگهداری و تعمیرات (نت) غیرممکن است. در پژوهش‌های انجام شده در حوزه‌های معدنکاری ترکیب این سه شاخص در قالب تحلیلی سامانمند کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر نادیده گرفتن محیط کاری سخت و خشن معدن در تحلیل‌ها، خلل بزرگی در کلیه نتایج حاصله به دنبال خواهد داشت. چرا که شرایط محیطی علاوه بر تأثیر در رفتار سیستم‌ها، در تصمیمات پشتیبانی نیز اختلال وارد می‌کند. در نهایت، اتخاذ تصمیمات مدیریتی صحیح از منظر تولیدی برای ناوگان استخراجی معدن سونگون نیازمند دانش کافی برای برقراری ارتباط بین ظرفیت عملیاتی با رفتار سیستم و شرایط محیطی است.

۱-۴- بیان مسئله

بر اساس بحث انجام گرفته اصلی‌ترین مشکل موجود در این پژوهش، نحوه لحاظ کردن تأثیرات شرایط محیطی (فاکتورهای ریسک) بر رفتار عملکردی ماشین‌آلات، سیاست پیشنهادی برای نت و تخمین قطعات یدکی و در نهایت تحلیل ظرفیت عملیاتی ناوگان است. لذا هدف اصلی تحقیق مطالعه تأثیر شرایط محیطی بر ظرفیت عملیاتی سیستم از طریق بررسی شاخص‌های رفتاری زیرسیستم‌ها و برنامه‌ریزی واقعی‌تر نت و پشتیبانی قطعات یدکی با در نظر گرفتن تأثیرات شرایط محیطی است.

۱-۵- اهداف رساله

هدف اصلی تحقیق، مطالعه تأثیر شرایط محیطی بر ظرفیت عملیاتی یک سیستم از طریق بررسی شاخص‌های رفتاری دستگاه‌های است. اهداف جنبی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- تحلیل قابلیت اطمینان اجزای و زیرسیستم‌های موجود در یک سیستم
- تحلیل قابلیت تعمیرپذیری اجزای و زیرسیستم‌های موجود در یک سیستم
- دستیابی به قابلیت دسترسی عملیاتی زیرسیستم و سیستم با در نظر گرفتن تاخیرات نت و تدارکاتی.
- تعیین روش آماری برای لحاظ کردن تأثیرات شرایط محیطی بر رفتار اجزای و زیرسیستم.
- شناسایی رفتار سیستم و مدل‌سازی تعامل بین اجزای.
- اولویت‌بندی زیرسیستم‌ها بر اساس رفتار عملکردی و پیکربندی سیستم
- تحلیل ظرفیت عملیاتی سیستم.
- پیشنهاد روش‌شناسی مناسب برای تعیین بازه‌های مناسب نت پیشگیرانه برای یک زیرسیستم با در نظر گرفتن تأثیرات شرایط محیطی و تأثیرات نت ناقص.
- تخمین مقدار کمی قطعات یدکی مورد نیاز با تحلیل شاخص قابلیت اطمینان مبتنی بر شرایط محیطی برای یک جزء.

۱-۶- فرضیات تحقیق

این پژوهش دارای محدودیت‌ها و مرزهایی به شرح زیر است:

- تنها فازهای عملیاتی و نگهداری مورد مطالعه قرار خواهد گرفت (به عنوان مثال فاز طراحی مورد نظر نخواهد بود).
- تنها محیط معدنی مورد توجه است و سایر محیط‌های عملیاتی مطالعه نخواهد شد.
- فاکتورهای ریسک بر اساس توانایی بانک داده موجود تعیین خواهد شد.
- برای پیش‌بینی شاخص‌های عملکردی سیستم از داده‌های تاریخی ثبت شده استفاده خواهد شد.
- ناوگان استخراجی معدن شامل: ماشین‌های حفاری، بارگیری، باربری و بلدوزرها است.
- ناوگان در سطوح: سیستم، زیرسیستم و اجزای بررسی می‌شود.

- تعدد شرکت‌های پیمانکاری موجود در معدن سونگون، گستردگی و تنوع فوق العاده ماشین‌آلات را به همراه دارد و تحلیل همزمان آن‌ها را بسیار دشوار می‌سازد. از سوی دیگر با توجه به رسالت پیشرو در تنظیم رساله دکتری، هدف ارائه رویکردهای نوین در راستای حل مشکلات و قدم نهادن در سطح بالاتر از کارهای قبلی است. به این دلیل تحلیل رفتار همه ماشین‌آلات موجود در ناوگان استخراجی با توجه به وقت‌گیر بودن آن از حوصله رساله دکتری خارج است و این کار باید با نیروی کار کافی و در زمان گسترده بر اساس رویکردهای مستخرج از رساله انجام پذیرد. از سوی دیگر صحت سنجی رویکردهای پیشنهادی و آزمون کاربردی بودن آن‌ها در مواجهه با اطلاعات واقعی و شرایط میدانی نیازمند تحلیل نمونه‌های موردی واقعی است. لذا برای حل این مشکلات و دستیابی به اهداف تعریف شده، هر مرحله تحلیل‌ها برای یک سیستم یا زیرسیستم یا جزء انتخابی از ناوگان استخراجی انجام می‌شود. قابل ذکر است که نتایج به‌دست آمده و رویکردهای ارائه شده در هر مرحله، به راحتی قابل بسط به کل ناوگان استخراجی و تحلیل همه ماشین‌آلات معدن است.
- سیستم به عنوان ترکیب‌های مختلف از ماشین‌آلات در شبکه‌های سری، موازی یا سری-موازی در نظر گرفته می‌شود.
- هر یک از ماشین‌آلات موجود مانند دریل واگن‌ها، لودرها، شاول‌ها، بیل مکانیکی‌ها، تراک‌ها و بلدوزرها به عنوان یک زیرسیستم در نظر گرفته می‌شود.
- جزء به‌عنوان پائین‌ترین سطح تحلیل تعریف می‌شود به طوری که داده‌های مورد نیاز برای تخمین یا محاسبه ویژگی‌های آن قابل‌دستیابی باشد.
- قابلیت پشتیبانی از محصول، بر تخمین تعداد قطعات یدکی و نت متمرکز خواهد بود.
- تخمین قطعات یدکی برای اجزای تعمیرناپذیر و دارای اولویت بالا انجام خواهد گرفت (نه برای همه اجزای موجود).
- در مورد نت فقط استراتژی نت پیشگیرانه مد نظر خواهد بود.

۱-۷- ساختار رساله

گزارش رساله در هفت فصل تنظیم شده است. فصل اول به کلیات موضوع رساله اختصاص دارد. در فصل دوم مفاهیم فنی و آماری مرتبط با تضمین تولید و زیر شاخه‌های اصلی شامل ظرفیت عملیاتی، قابلیت دسترسی، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی ارائه شده است. در این فصل با توجه به تقارب مفاهیم اساسی، روابط قابلیت اطمینان تشریح شده و برای سایر موارد صرفاً به روابط اصلی

بسنده شده است. در آخرین بخش از این فصل نیز ایده سنجش اهمیت برای تحلیل سیستم ارائه شده است. در فصل سوم با توجه به متون علمی موجود و تحقیقات گذشته، شماری از کاربردهای فنی شاخه‌های اصلی تضمین تولید در معدنکاری مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج این تحقیقات به طور خلاصه بیان شده است. در فصل چهارم مطالعه موردی معرفی شده و مرزبندی سیستم ناوگان استخراجی انجام گرفته است. در بخش آخر این فصل چارچوب اجرائی تحقیق مشخص شده است. در فصل پنجم، نخست انواع داده‌های مورد نیاز، نحوه جمع‌آوری و منابع گردآوری تشریح شده است. سپس در مورد صورت‌بندی فاکتورهای ریسک در دو سطح زیرسیستم و قطعه بحث شده است. در انتهای این فصل قالب داده‌های مورد استفاده در رساله نیز تنظیم شده است. فصل ششم شامل همه تحلیل‌های آماری و مطالعات علمی رساله است. در این فصل نخست شاخص‌های عملکردی زیرسیستم و سیستم‌ها در دو حالت نادیده گرفتن شرایط محیطی و لحاظ کردن این شرایط تحلیل شده است. سپس زیرسیستم‌های بحرانی با استفاده از ایده سنجش اهمیت مجدداً برای دو حالت یاد شده مورد بررسی قرار گرفت. در بخش بعدی از این فصل به تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز پرداخته شده است. سپس استراتژی نت پیشگیرانه کامل و ناقص برای حالت‌های مختلف در سطح زیرسیستم تحلیل شده است. در آخرین بخش نیز ایده تضمین تولید برای سیستم ناوگان استخراجی پیاده شده و میزان تولید سیستم برای شرایط محیطی مختلف و به صورت پویا تحلیل شده است. فصل هفتم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای مطالعات آینده اختصاص دارد..

فصل دوم

مفاهیم اساسی و چارچوب تحقیق



۲-۱- مقدمه

مقوله تضمین تولید برای تعیین قابلیت پاسخ‌دهی سیستم به تقاضای موجود، به مطالعه عملکرد سیستم می‌پردازد. شاخص‌ها و راه‌های مختلفی برای بیان عملکرد سیستم وجود دارد که قابلیت اعتماد با زیرشاخه‌های اصلی آن قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت دسترسی و قابلیت پشتیبانی از جمله موارد پرکاربرد در این زمینه هستند. این شاخص‌ها به علت مبتنی بودن بر ریاضی و آماری، امروزه به عنوان ابزاری قدرتمند و نسبتاً دقیق در مهندسی برای مدیریت بهینه، اتخاذ تصمیمات معقول و بهره‌وری هر چه بیشتر از ماشین‌آلات صنعتی، سیستم‌های الکتریکی، صنعت نفت، ... به کار گرفته می‌شوند.

در این فصل مفاهیم اساسی و روابط ریاضی در زمینه‌های قابلیت اعتماد، اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی تشریح شده است و موضوع قابلیت اطمینان برای دو حالت با لحاظ کردن تأثیرات شرایط محیطی و نادیده گرفتن این تأثیرات با جزئیات بیشتر بررسی شده است. همچنین در مبحث پشتیبانی، دو شاخه اصلی تخمین قطعات یدکی مورد نیاز در سطح قطعه، و نگهداری و تعمیرات در سطح زیرسیستم مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه نحوه تحلیل عملکرد سیستم با توجه به پیکربندی و تراکنش زیرسیستم‌ها با روش‌های مختلف ارزیابی شده است. در آخرین بخش نیز ایده سنجش اهمیت با استفاده از قابلیت اطمینان و دسترسی برای دو حالت با و بدون لحاظ کردن تأثیر شرایط محیطی بیان شده است.

۲-۲- مفاهیم اساسی

توسعه کمیّت و کیفیت محصولات، نیازمند مدیریت کارآمد تولید برای کنترل ورودی‌های عملیات (مواد خام، انرژی، نیروی کار، تجهیزات و ماشین‌آلات، اطلاعات، فن‌آوری و ...)، کنترل فرآیند تبدیل ورودی‌ها به محصول و پایش عناصر تأثیرگذار بر عملکرد عملیات تولید است. از سوی دیگر با توجه به پیشرفت‌های عظیم در فن‌آوری و رشد روزافزون پیچیدگی سیستم‌ها، اهمیت بررسی رفتار آن‌ها آشکارتر شده است.

سیستم‌های صنعتی، تأمین و توزیع نیرو، بهداشت و درمان، ارتباطات، حمل‌ونقل، آتش‌نشانی و سیستم‌های خدماتی و امور رفاهی از جمله سیستم‌هایی‌اند که عملکرد آن‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر جامعه دارد و موفقیت آن‌ها در انجام رضایت‌بخش وظیفه درگرو شاخص‌های عملکردی بالا و محیط کارکرد آن‌ها است. در این فصل طی چارچوبی منظم ارتباط بین شاخص‌های رفتاری و ظرفیت عملیاتی با توجه به ملاحظات شرایط محیطی تشریح می‌شود. موضوع از بالاترین سطح یعنی مفهوم ظرفیت عملیاتی (TC) شروع می‌شود و سپس شاخه قابلیت اعتماد (De) که در واقع در برگیرنده شاخص قابلیت دسترسی (A) است و زیرشاخه‌های آن یعنی قابلیت اطمینان (R)، قابلیت تعمیرپذیری (M) و قابلیت پشتیبانی (S) مورد بحث قرار می‌گیرد. آخرین بخش این فصل نیز به نگهداری و تعمیرات (نت) و تخمین قطعات یدکی که یکی از زیرشاخه‌های پشتیبانی سیستم است، می‌پردازد.

۲-۱-۲- ظرفیت عملیاتی

ایده تحلیل ظرفیت عملیاتی (TCA) از جمله رویکردهای سامانمند مهندسی است که نخستین بار در سال ۱۹۹۸ در صنایع نفت و گاز نروژ مطرح شد (Barabady et al., 2010; Barabady and Aven, 2008). TCA در پشتیبانی از فرآیند تصمیم‌گیری برای رؤیاری با تأمین تقاضا نقش کلیدی دارد و به همان میزان در کنترل تولید، بهینه‌سازی عملیات و استراتژی نت مؤثر است (Barabadi and Markeset, 2011). در این مفهوم منظور از ظرفیت عملیاتی، ظرفیت یا توانایی سیستم در پاسخگویی به تقاضای تولید یا عملکرد است و برای آن از عبارات مختلف دیگری چون: قابلیت دسترسی تولید، قابلیت پاسخ‌دهی و عملکرد تولید نیز می‌توان استفاده کرد (Barabadi, 2011). برای کارخانه یا سیستم تولیدی، ظرفیت عملیاتی را می‌توان به‌عنوان ظرفیت فیزیکی در واحد زمان یا درصدی از یک تولید مشخص بیان کرد. به‌عنوان مثال، ظرفیت عملیاتی در معدنکاری به‌صورت تخمین تناژ سنگ استخراجی از معدن در طول بازه زمانی معین ($m^3/year$ یا $t/year$) و برای صنایع نفت و گاز نیز به‌صورت تعداد بشکه نفت در بازه زمان تعریف می‌شود (Barabadi et al., 2011a). همان‌طور که اشاره شد، TCA فرآیندی سامانمند است که تحلیل‌ها در آن از سطح جزء یا زیرسیستم شروع می‌شود و پس از تعیین شاخص‌های رفتاری اجزای، تعامل و پیکربندی آن‌ها در قالب یک سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت ظرفیت عملیاتی کل سیستم محاسبه می‌شود (Barabadi and Markeset, 2011). معیارهای اصلی ظرفیت عملیاتی قابلیت اعتماد و کارکرد وظیفه‌ای (ظرفیت) است. با توجه به تمرکز تحقیق بر قابلیت اعتماد از بسط شاخه کارکرد صرف نظر می‌شود. کارکرد وظیفه‌ای را می‌توان به‌عنوان توانایی یک وسیله برای تحویل خدمات یا کالا مطابق ظرفیت طراحی شده و/یا مطالبات (نیازمندی‌ها/ الزامات)

فعلی تعریف کرد. کارکرد وظیفه‌ای عمدتاً متأثر از شرایط بیرونی سیستم است، به عنوان مثال در فرآیند تولید نفت و گاز میزان ترکیبات مایع (مثلاً نسبت نفت به آب، نسبت نفت به گاز) در یک مخزن نفتی در طول زمان متغیر است یا فشار مخزن در زمان‌های مختلف تغییر می‌کند، در فازهای اولیه، سهم تولید نفت بیشتر است و مقدار کمی آب وجود دارد، درحالی‌که در فازهای نهایی مقدار نفت کم و سهم تولید آب بالا است (Barabady et al., 2010). در این مثال در واقع مخزن (عدم قطعیت محیط) است که وضعیت را به سیستم دیکته می‌کند.

شاخه دیگر یعنی قابلیت اعتماد در واقع تحلیل قابلیت دسترسی و عناصر اصلی آن شامل قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی است. این عناصر اصلی تحت تاثیر قابلیت اطمینان اساسی، قابلیت تعمیرپذیری اساسی و شرایط عملیاتی قرار دارند (Barabadi and Markeset, 2011). شاخص‌های اساسی، صرفاً وابسته به زمان و برای شرایط کاملاً معین تعریف می‌شوند که معمولاً داده‌های زمان وقوع خرابی یا شاخص‌های ذاتی مبتنی‌اند. منظور از شاخص اساسی بیشینه قابلیت اطمینان یا تعمیرپذیری قابل دستیابی توسط ماشین است که در طول مرحله طراحی (در شرایط معین) و فرآیند ساخت تعیین می‌شود (Rahadiyan Wijaya, 2012). منظور از شرایط عملیاتی نیز شرایط محیطی (جنس سنگ، مهارت اپراتور، وضعیت آب‌وهوایی، ...) است که سیستم در آن مشغول به کار است و قادر به تأثیرگذاری بر هر سه شاخص: قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی است. قابلیت پشتیبانی متأثر از قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت اطمینان است. لذا تحلیل و برنامه‌ریزی پشتیبانی مبتنی بر این شاخص‌ها است. در ادامه قابلیت اعتماد و عناصر آن به‌اختصار توضیح داده می‌شود.

۲-۲-۲- قابلیت اعتماد

قابلیت اعتماد نخستین بار در سال ۱۹۹۰ توسط کمیسیون بین‌المللی الکترونیک (IEC) به‌عنوان معیاری برای توصیف عملکرد قابلیت دسترسی و عوامل مؤثر بر آن: قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و عملکرد پشتیبانی نت تعریف شده است (IEC 60050, 2014). اهداف مدیریت قابلیت اعتماد را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد (Barabadi and Markeset, 2011):

- حفظ توجیه اقتصادی سیستم تولیدی و بهینه بودن آن در طول فازهای چرخه عمر
- کاهش ریسک در زمینه: سلامتی، ایمنی، محیط و غیره
- بهبود کیفیت
- در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به عوامل انسانی و دستیابی به رضایتمندی مشتریان

۲-۲-۳- قابلیت دسترسی

قابلیت دسترسی را می‌توان در این پرسش خلاصه کرد: "برای اطمینان از این که سیستم به هنگام نیاز برای بازه زمانی مشخص در وضعیت در حال کار قرار داشته باشد، چه ملاحظاتی باید در نظر گرفته شود؟" (Stapelberg, 2009). تعریف علمی قابلیت دسترسی عبارت است از: توانایی یک وسیله برای قرار گرفتن در حالتی که با فرض تأمین منابع خارجی مورد نیاز قادر به انجام فعالیت مورد نظر، تحت شرایط معین، در لحظه یا بازه زمانی مشخص باشد. توجه شود که سایر منابع به جزء منابع خارجی مورد نیاز برای اجرای نت یک وسیله، تأثیری بر قابلیت دسترسی وسیله ندارد (IEC 60050, 2014). قابلیت دسترسی بسته به اینکه عناصر مختلف زمانی در نظر گرفته شود یا نشود، تعاریف مختلفی پیدا می‌کند (Kumar and Akersten, 2008). رابطه اساسی قابلیت دسترسی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (Stapelberg, 2009):

$$A = \frac{\text{زمان کارکرد}}{\text{زمان کل}} = \frac{\text{زمان کارکرد}}{\text{زمان توقف} + \text{زمان کارکرد}} \quad (1-2)$$

۲-۲-۴- قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان به عنوان "توانایی یک وسیله در انجام فعالیت مورد نیاز، در یک بازه زمانی مشخص و شرایط محیطی مشخص" تعریف می‌شود (IEC 60050, 2014). با توجه به همپوشانی بین داده‌های مورد نیاز برای بررسی قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و پشتیبانی، کلیات مباحث آماری مورد نیاز برای پژوهش در این زیر بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. این زیر بخش با بیان توابع اصلی آغاز می‌شود، در ادامه داده‌های مورد نیاز در قالب دو دسته داده‌های زمانی و فاکتور ریسک تشریح می‌شود. سپس روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان در دو دسته کلی روش کلاسیک (فقط با داده‌های زمانی) و روش‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک (با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی) بیان می‌شود. در نهایت نیز شرح مختصری در مورد روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان در سطح سیستم، به طور خلاصه شرح داده می‌شود:

توابع آماری اصلی:

برای توصیف خرابی‌ها به شکل آماری، چهار تابع مختلف اما هم‌ارز و مرتبط باهم تعریف می‌شود این توابع عبارت‌اند از (Dhillon, 2008):

- تابع چگالی احتمال توزیع خرابی با نماد $f(t)$
- تابع توزیع تجمعی (CDF) خرابی با نماد $F(t)$

- متمم $F(t)$ با عنوان تابع قابلیت اطمینان با نماد $R(t)$
- تابع نرخ خرابی یا تابع مخاطره با نماد $\lambda(t)$ یا $h(t)$ وجود دارد.

نرخ مخاطره به عنوان نرخ وقوع خرابی‌ها در بازه زمانی مشخص در نظر گرفته می‌شود. این نرخ به عنوان میزان وقوع خرابی در هر واحد زمانی از بازه $[t_1, t_2]$ تعریف می‌شود، به طوری که خرابی تا پیش از t_1 (ابتدای بازه) رخ نداده باشد (Barlow and Proschan, 1996; Pham, 2006).

داده‌ها:

داده‌های مورد نیاز در قابلیت اطمینان به طور کلی متمرکز بر خرابی‌ها است. لذا در وهله نخست شناسایی خرابی و انواع آن ضروری است. علاوه بر این همان‌طور پیش‌تر گفته شد، شرایط محیطی نیز در تحلیل‌ها نقش بسزایی دارد و برای دستیابی به تحلیل‌های دقیق‌تر و نزدیک به شرایط واقعی لحاظ کردن آن‌ها الزامی است. لذا داده‌های مورد نیاز به طور کلی در دو دسته خرابی و فاکتور ریسک تقسیم‌بندی شده‌اند. این داده‌ها را می‌توان از منابع مختلف نظیر: اسناد ثبت شده (گزارش‌های گروه نت، مکانیک، روزانه ...)، مدارک آرشیو شده (گزارش‌های قبلی، دفترچه ماشین‌آلات ...)، ملاقات و مصاحبه‌ها و مشاهدات مستقیم گردآوری کرد (Yin, 2008).

الف - خرابی

خرابی را عدم توانایی یک وسیله در انجام فعالیت مورد انتظار تعریف کرده‌اند (IEC 60050, 2014). در رابطه با قطعات و دستگاه‌های مکانیکی انواع مختلفی از خرابی‌های مکانیکی مانند خرابی خستگی، خرابی خزش یا گسیختگی، خرابی خمشی، خرابی متالوژیکی، خرابی ناپایداری، خرابی بارگذاری برشی، خرابی ترک خوردگی مواد تشکیل‌دهنده، خرابی فشاری، خرابی لهیدگی، خرابی تمرکز تنش، خرابی مقاومت کششی نهایی و خرابی مقاومت کششی تسلیم را می‌توان در نظر گرفت (Misra, 2008). منظور از داده‌های خرابی در این پژوهش داده‌هایی از جنس زمان است. در مباحث قابلیت اطمینان این داده‌ها به شکل زمان بین خرابی‌ها (TBF)، زمان تا وقوع خرابی (TTF)، زمان بین تعمیرات (TBM) و برای مباحث تعمیرپذیری به شکل زمان انجام تعمیرات (TTR)، زمان پاسخ‌دهی (DT) جمع‌آوری خواهد شد. خود این داده‌ها نیز در دو دسته کلی داده خرابی کامل و داده تعلیقی (داده سانسور شده و داده بریده شده) تقسیم‌بندی می‌شوند (Ma, 2008).

ب - فاکتورهای ریسک

عمر مفید تجهیزات از عوامل گوناگون خطر و خرابی‌ها تاثیر می‌پذیرد، بنابر این شاخص‌های رفتاری آن‌ها نیز تابعی از زمان و/یا عملکرد سیستم و شرایط محیطی کارکرد است (Gorjian Jolfaei, 2012). شرایط محیطی عواملی مانند محیط اطراف (نظیر دما، رطوبت و گردوغبار)، پارامترهای تعیین وضعیت

نظیر لرزش و فشار و ویژگی‌های انسانی نظیر مهارت اپراتور را شامل می‌شود. در تحلیل‌های آماری با این عوامل به‌عنوان فاکتور ریسک (Z) رفتار می‌شود. داده‌های فاکتور ریسک بر داده‌های "زمان وقوع خرابی" افزوده می‌شود (Ghodrati and Kumar, 2005a).

روش‌های کلاسیک تحلیل قابلیت اطمینان:

در این روش‌ها برای تحلیل فقط از داده‌های زمانی استفاده می‌شود و نقش فاکتورهای ریسک در تحلیل نادیده گرفته می‌شود (Hall and Daneshmend, 2003a). از جمله مدل‌های مورد استفاده در تحلیل قابلیت اطمینان به روش کلاسیک می‌توان: فرآیند پواسون همگن (HPP)، فرآیند تجدیدپذیر (RP)، پواسون ناهمگن (NHPP)، فرآیند تجدیدپذیر مازاد (SRP)، فرآیند تجدیدپذیر منشعب (BRP)، فرآیند پواسون منشعب (BPP)، فرآیند مارکوف (MP) و فرآیند نیمه مارکوف (SMP) اشاره کرد (Pijnenburg, 1991). مدل فرآیند تجدیدپذیر بر این فرض استوار است که داده‌های زمانی از فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها (iid) پیروی می‌کنند. در فرآیند پواسون همگن، علاوه بر فرضیات فرآیند تجدیدپذیر، فرض پیروی بازه‌های زمانی از توزیع نمایی نیز افزوده می‌شود. مدل پواسون همگن از لحاظ ریاضی ساده‌تر است ولی به علت بی‌حافظه بودن توزیع نمایی در توصیف شرایط واقعی دچار ضعف است، بنابراین در تحلیل داده‌های سیستم‌های تعمیرپذیر که به علت تنزل یا بهبود سیستم دارای روند هستند، کاربرد این روش‌ها نامناسب است و از مدل‌های فرآیند پواسون ناهمگن (مدل فرآیند قانون توان) استفاده می‌شود. فرآیند تجدیدپذیر مازاد برای تحلیل سیستم n جزئی، سری، مستقل از هم که با فرآیند تجدیدپذیر مدل‌سازی شده است، به کار گرفته می‌شود. فرآیند تجدیدپذیر منشعب نیز برای حالتی به کار می‌رود که هر مجموعه از رویدادهای (خرابی) اولیه، به مجموعه‌ای از رویدادهای تابعه منجر می‌شود. در واقع این فرآیند انطباقی از دو مجموعه رویداد اولیه و تابعه است. در این فرآیند رویدادهای اولیه و تابعه باید قابل تمیز باشند. فرآیند پواسون منشعب نیز مشابه فرآیند تجدیدپذیر منشعب است، با این تفاوت که سری رویدادهای اولیه در آن توزیع پواسون همگن دارند. در فرآیند مارکوف فرض بر این است که سیستم امکان قرارگیری در n وضعیت را دارد و چرخه مارکوف برای آن ایجاد می‌شود. این وضعیت‌ها به‌عنوان: خرابی، عدم خرابی، یک فرآیند n مرحله‌ای تنزل و غیره در نظر گرفته می‌شوند. در این مدل مدت زمان توقف در وضعیت i توزیع نمایی با پارامتر میانگین λ_i دارد و احتمال‌های انتقال (P_{ij}) ، برای یک جهش از وضعیت i به j ، در ماتریس احتمال P قرار می‌گیرد که p_{ij} مستقل از تاریخچه فرآیند است. این دو ویژگی یعنی توزیع نمایی برای زمان‌های توقف و بی‌حافظه بودن به‌عنوان ویژگی‌های مارکوف شناخته می‌شوند. فرآیند نیمه مارکوف نیز ترکیبی از نظریه مدل فرآیند تجدیدپذیر و زنجیره مارکوف است (Pijnenburg, 1991). الگوریتم شکل ۱-۲ رویکرد آماری محاسبه قابلیت اطمینان با

استفاده از داده‌های زمانی را نشان می‌دهد که در این رساله با عنوان "الگوریتم تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS) با داده‌ها زمانی" مورد استفاده قرار خواهد گرفت. این روش برگرفته از روش کلاسیک محاسبه قابلیت اطمینان است که با استفاده از آزمون‌های جدید بهبود یافته تا صحیح‌ترین مدل یا تابع آماری پیشنهاد شود (Barabady and Kumar, 2008). الگوریتم تحلیل RMS با داده‌ها زمانی در سه بخش کلی به شرح زیر بیان می‌شود:

أ. تشکیل بانک داده

ب. تعیین تابع یا مدل آماری مناسب

ت. تعیین شاخص‌های عملکردی سیستم یا زیرسیستم

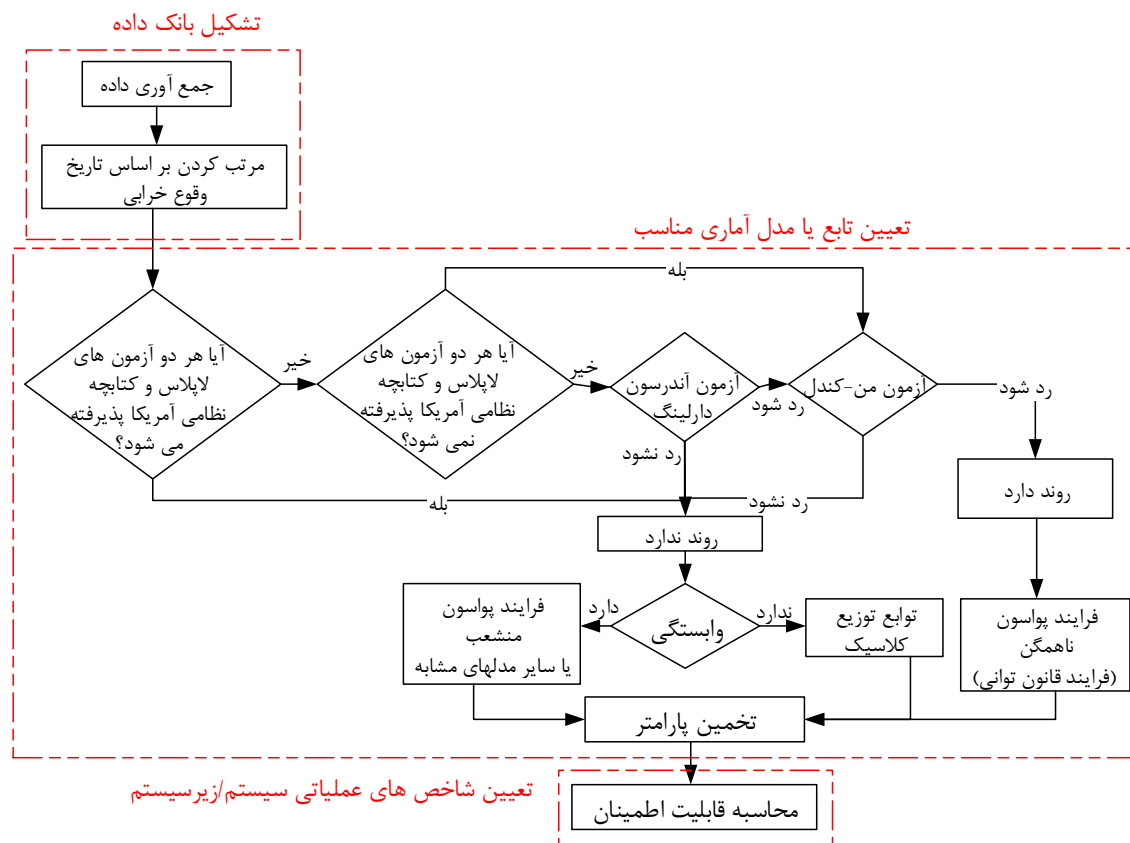
در نخستین گام بعد از جمع‌آوری داده‌ها باید اساس فرض‌های مستقل بودن و داشتن توزیع یکسان (iid) داده‌های خرابی، مورد بررسی قرار گیرد. در آمار و احتمالات دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی، مستقل با توزیع یکسان (iid) نامیده می‌شوند که همه آن‌ها دارای توزیع یکسان بوده و دو به دو مستقل باشند. مستقل بودن و داشتن توزیع یکسان به این مفهوم است که یک عنصر در یک دنباله مستقل از متغیرهای تصادفی است که قبل از آن ظاهر شده‌اند (Clauset, 2011). برای ارزیابی این فرض از دو آزمون معمول یعنی آزمون روند و آزمون خودهمبستگی استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۱-۲ حالت‌های مختلف برای توصیف رفتار خرابی‌های زیرسیستم/جزء و برازش تابع قابلیت اطمینان از مدل‌های مختلف استفاده می‌شود:

- در صورت وجود روند، مدل‌های نامانا مانند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توانی (PLP))
- در صورت عدم وجود روند و وجود خودهمبستگی، فرآیند پواسون منشعب
- در صورت عدم وجود روند و عدم وجود خودهمبستگی، توابع توزیع کلاسیک مانند توزیع نرمال، لاگ نرمال، ویبول، ...

آزمون روند تعیین می‌کند که آیا نحوه پراکنش داده‌های خرابی به‌طور معنی‌داری (تنزل یا بهبود) در طول بازه زمانی تغییر کرده است یا خیر. برای توصیف وجود یا عدم وجود روند روش‌های مختلفی وجود دارد که رویکردی مطابق شکل ۱-۲ پیشنهاد شده است که با دو آزمون تحلیلی روند Laplace (T1) و کتابچه نظامی (T2) آغاز می‌شود (Garmabaki et al., 2015, 2016).

در خروجی آزمون‌های تحلیل‌های روند در صورت وجود روند در داده‌ها از فرآیند قانون توانی برای توصیف رفتار داده‌ها استفاده می‌شود و در صورت عدم وجود روند، آزمون فرض وابستگی (خودهمبستگی) انجام می‌گیرد. خودهمبستگی به‌صورت همبستگی بین اعضای سری‌های مشاهداتی

که در زمان (مانند داده‌های سری زمان) یا مکان (مانند داده‌های مقطعی) ردیف شده‌اند، تعریف می‌شود. برای تعیین خودهمبستگی نمودار i امین $TBF(TTR)$ در برابر $(i-1)$ امین $TBF(TTR)$ ترسیم می‌شود که در صورت نامستقل و همبسته بودن داده‌ها نقاط در امتداد یک خط واقع خواهند شد. نکته مهمی که در رابطه با آزمون باید تست شود، ترسیم داده‌ها به ترتیب وقوع است، چرا که مرتب‌سازی داده‌ها سبب همگرایی می‌شود (Hoseinie et al., 2012a; Kumar, 1990)

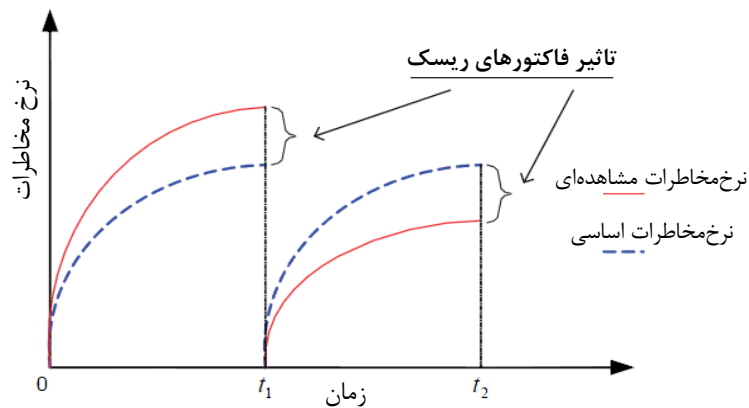


شکل ۱-۲- "الگوریتم تحلیل RMS با داده‌ها زمانی" برگرفته از (Barabady and Kumar, 2008;)
(Garmabaki et al., 2016)

مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک:

همان‌طور که اشاره شد، قابلیت اطمینان سیستم تابعی از زمان و شرایط محیطی عملیاتی سیستم است، بنابراین مطالعه قابلیت اطمینان محصول نیازمند چارچوبی است که در برگیرنده مسائل فنی، عملیاتی، بازرگانی، مدیریتی و به طور کلی فاکتورهای ریسک باشد (Ghodrati and Kumar, 2005b). برای ارائه تخمین‌های بهتر از ویژگی‌های قابلیت اطمینان، در دهه ۱۹۷۰ استفاده از مدل‌های رگرسیون با توجه به توانایی آن‌ها در وارد کردن فاکتورهای ریسک در محاسبات، پیشنهاد شد (Gorjian Jolfaei, 2012; Kumar and Klefsjö, 1994a). این فاکتورهای ریسک به‌طور تصادفی تغییر می‌کنند و ممکن است

زمان وقوع خرابی را نیز تغییر دهند (Gorjian, Ma, et al., 2010). در شکل ۲-۲ چگونگی تأثیرات فاکتور ریسک بر "نرخ مخاطره پایه" ترسیم شده است. در نرخ مخاطره پایه فاکتورهای ریسک تأثیری بر الگوی خرابی ندارد و این الگو فقط مبتنی بر زمان است. در ادامه به شرح دو مدل پرکاربرد از این دسته پرداخته شده است.



شکل ۲-۲- تأثیرات فاکتورهای ریسک بر نرخ مخاطره (Ghodrati and Kumar, 2005a)

الف- مدل نرخ مخاطرات متناسب (PHM)

مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک در تحلیل قابلیت اطمینان عمدتاً بر اساس مدل نرخ مخاطرات متناسب هستند. مدل PHM رویکردی ناپارامتری یا نیمه پارامتری است که نخستین بار توسط کاکس (۱۹۷۲) برای داده‌های بقا در زمینه پزشکی توسعه یافت (Cox, 1972). این مدل، فرآیند آماری ارزشمندی است که برای تخمین ریسک وقوع خرابی با توجه به ملاحظه شرایط و محیط سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل مبتنی بر این فرض است که تابع مخاطره جزء یا زیرسیستم، ترکیبی از تابع نرخ مخاطره پایه آن و یک عبارت در برگیرنده تأثیرات فاکتورهای ریسک است (Ghodrati et al., 2003). تابع نرخ مخاطره این مدل به صورت رابطه (۲-۲) بیان می‌شود:

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t)\psi(z, \alpha) \quad (2-2)$$

در این رابطه:

- $\lambda(t, z)$: تابع نرخ مخاطره (متغیر پاسخ) است. z : فاکتور ریسک (بردار سطری شامل پارامترهای فاکتور ریسک) است که دربرگیرنده درجه تأثیر هر فاکتور ریسک بر نرخ مخاطره است و t بیانگر زمان تا وقوع خرابی در یک وسیله یا زمان سالم بودن آن است.
- $\lambda_0(t)$: نرخ مخاطره پایه

$\psi(z, \alpha)$: تابع پیوند (Martorell et al., 1999)، تابعی است که برای آن حالات مختلفی را می‌توان در نظر گرفت. حالت نمایی $\exp(z\alpha)$ ، حالت لجستیک $\log(1+\exp(z\alpha))$ ، خطی معکوس $\frac{1}{1+(z\alpha)}$ ، خطی $1 + (z\alpha)$ برخی از این حالت‌ها هستند که حالت نمایی پرکاربردترین آن‌ها است (Kumar and Klefsjö, 1994a).

با فرض حالت تابع نمایی برای تابع $\psi(z, \alpha)$ ، نرخ مخاطره به صورت (۳-۲) در می‌آید:

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t) \exp(z\alpha) = \lambda_0(t) \exp\left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \quad (3-2)$$

عامل ضرب $\exp(z\alpha)$ ، می‌تواند نشان دهنده ریسک خرابی ناشی از حضور فاکتور ریسک باشد. در رابطه عامل ضرب $\exp(z\alpha)$ ، بردار ستونی از پارامترهای مجهول مدل یا ضرایب رگرسیون مربوط به فاکتور ریسک است (Kumar and Klefsjö, 1994a). تابع قابلیت اطمینان $(R(t, z))$ برای PHM نیز به صورت رابطه (۴-۲) است (Ghodrati, 2005):

$$R(t, z) = (R_0(t))^{\exp(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i)} \quad (4-2)$$

در این رابطه $R_0(t)$ قابلیت اطمینان پایه است که تنها مبتنی بر زمان است. این مدل مبتنی بر مستقل از زمان بودن فاکتورهای ریسک، یعنی ثابت بودن نسبت بین دو نرخ مخاطره در طول زمان است که این فرض به عنوان فرض متناسب بودن (PH) شناخته می‌شود. این فرض از لحاظ آماری نیز به صورت رابطه (۵-۲) بیان می‌شود (Kleinbaum, 2011):

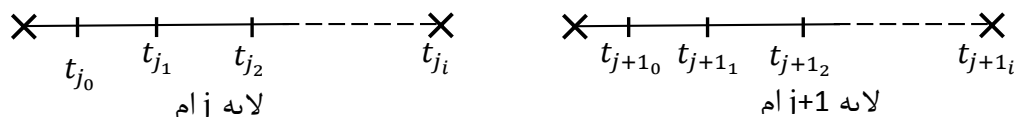
$$\frac{\mu_i(t, z_1)}{\mu_j(t, z_2)} = \theta, \quad \text{constan over } t \quad (5-2)$$

این فرض در صورت تقاطع بودن نمودارهای نرخ مخاطره برای دو فاکتور ریسک z_1 و z_2 رد می‌شود. البته روش‌های مختلفی برای ارزیابی این فرض وجود دارد که از جمله می‌توان به روش‌های نموداری، فرایند آزمون نیکویی برازش و روشی مبتنی بر متغیرهای وابسته به زمان اشاره کرد (Kleinbaum, 2011).

ب- مدل رگرسیون لایه‌بندی شده کاکس (SCRM) برای خرابی

در این مدل لایه‌بندی بر اساس فاکتورهای ریسک وابسته به زمان انجام می‌گیرد. لایه‌های مختلف فاکتورهای ریسک وابسته به زمان بر اساس تجربه یا رویکردهای آماری سطح‌بندی شده و هر سطح از آن به عنوان یک لایه در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال تأثیر جنس سنگ بر تجهیزات معدنی را در نظر بگیرید می‌توان با لایه‌بندی سنگ در دو سطح ماده معدنی و باطله لایه‌بندی شده و قابلیت اطمینان

تجهیزات را برای هر لایه به‌طور جداگانه با استفاده از PHM، یا سایر روش‌های کلاسیک محاسبه کرد (Barabadi et al., 2011a). ایده لایه‌بندی به‌صورت نموداری در شکل ۲-۳ توضیح داده شده است.



شکل ۲-۳ - شمای نموداری از لایه‌بندی برای داده‌ها (Barabadi et al., 2011a)

در این شکل ۲-۳ ز نشان دهنده تعداد لایه‌ها و i تعداد خرابی‌های حادث شده در هر لایه هستند. عیب عمده SCRM، در نظر گرفتن تأثیرات فاکتورهای ریسک لایه‌بندی شده به‌طور مستقیم در محاسبات است. این روش فاکتورهای ریسک را لایه‌بندی می‌کند و تأثیرات آن‌ها را در توابع پایه که برای هر لایه برازش می‌شوند ارایه می‌کند.

مزیت عمده این روش نیز مبرا بودن از هر نوع فرضی درباره حالت تراکنش بین فاکتورهای ریسک لایه‌بندی و زمان در تحلیل‌ها است. رابطه ریاضی رویکرد SCRM برای تخمین نرخ مخاطره به‌صورت زیر بیان می‌شود (Barabadi et al., 2011b; Ghodrati and Kumar, 2005b):

$$\lambda_s(t, z) = \lambda_{0s}(t) \exp\left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \quad s = 1, 2, \dots, r \quad (6-2)$$

در این رابطه $\lambda_s(t, z)$ و λ_{0s} نرخ مخاطره و نرخ مخاطره پایه در لایه s ام است. تابع قابلیت اطمینان $(R_s(t, z))$ متأثر از فاکتورهای ریسک برای لایه s ام نیز به‌صورت زیر بیان می‌شود (Ghodrati et al., 2003):

$$R_s(t, z) = (R_{0s}(t))^{exp(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i)} \quad s = 1, 2, \dots, r \quad (7-2)$$

در این رابطه $(R_{0s}(t))$ قابلیت اطمینان پایه برای لایه s ام است. از این رویکرد در مطالعات قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری تجهیزات صنعتی به هنگام حضور فاکتورهای ریسک وابسته به زمان استفاده می‌شود. برای هر لایه بهترین توزیع را می‌توان با استفاده از آزمون‌های نیکویی برازش کرد (Barabadi et al., 2011a). در جدول ۲-۱ سایر مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک ذکر شده‌اند.

۲-۲-۵- قابلیت تعمیرپذیری

شاخه بعدی از قابلیت دسترسی، قابلیت تعمیرپذیری است که نشان دهنده توانایی بازگشت سیستم به وضعیت در حال کار است. به عنوان مثال وقتی گفته می‌شود که قابلیت تعمیرپذیری جزئی در طول

یک ساعت ۹۰ درصد است، به معنای وجود احتمال ۹۰ درصدی برای تعمیر شدن آن جزء در طول یک ساعت است (Barabady, Javad, 2005).

جدول ۱-۲- سایر مدل‌های مبتنی بر فاکتور ریسک

رابطه	نام مدل
$\lambda(t, z) = \left(\frac{\beta}{\theta}\right) \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp(z\alpha)$	مدل مخاطرات متناسب نیمه-پارامتریک (مدل WPHM ، LPHM و EPHM حالت نیمه پارامتریک از PHM) (Lakshmi and Sundari, 2012)
$\lambda(t, z(t)) = \lambda_0 \left(t \cdot \exp(az(t)) \right) \cdot \exp(az(t))$	مدل زمان خرابی شتاب یافته (AFTM) (Barabadi et al., 2010)
$\lambda(t, z(t)) = \lambda_0 \left(t \cdot \exp(\beta z(t)) \right) \exp(az(t))$	مدل رگرسیون مخاطرات گسترش یافته (EHRM) (Gorjian Jolfaei, 2012)
$\frac{\lambda(t, z(t))}{1 - \lambda(t, z(t))} = \frac{\lambda_0(t)}{1 - \lambda_0(t)} \exp(az(t))$	مدل بخت‌های متناسب (POM) (Gorjian Jolfaei, 2012)
$\lambda(t, z(t)) = \lambda_0(t) + \exp(az(t))$	مدل مخاطرات افزودنی (AHM) (Pijenburg, 1991)
$\lambda(t, z(t)) = Y(t)\alpha(t)$	مدل رگرسیون خطی آلن (ALRM) (Kumar and Westberg, 1996)
$\lambda(t, z(t)) = \exp(\beta w(t)) + \lambda_0(t)\exp(av(t))$	مدل مرکب (Gorjian Jolfaei, 2012)
$z(t) = c(t)\lambda(t)$	مدل فاکتورهای ریسک متناسب (PCM) (Ghodrati, 2005)
$\lambda(t, z(t)) = \lambda_{0j}(t)\exp(z\alpha_j)$	مدل شدت متناسب (PIM) (Prasad and Rao, 2002)
$\lambda(t, z) = \lambda_0(t)\exp(az(t))$	مدل رگرسیون کاکس گسترش یافته (ECRM) (Barabadi et al., 2011b)
برخی نمادهای تعریف نشده در PHM	
$r \times (n + 1)$ یک ماتریس	$(w(t), v(t))$ بردار فاکتورهای ریسک
$c(t)$ تابع فاکتور ریسک پایه	$\theta = (\beta, \alpha)$ بردار ضرایب رگرسیون

تعریف علمی این شاخص عبارت است از: توانایی یک وسیله برای ادامه حیات یا بازگشت به حالت توانمندی برای انجام فعالیت مورد انتظار تحت شرایط معین، در صورت انجام نت تحت این شرایط با استفاده از روش و منابع مشخص (Ahmadi, 2010; Ahmadi et al., 2010). از آنجایی که به دلیل ملاحظات فنی، هزینه‌ای و تکنولوژیکی طراحی سیستم بدون وقوع خرابی غیرممکن است، لذا هدف مهندسی قابلیت تعمیرپذیری، کمینه‌سازی زمان توقف ناشی از تعمیرات است. این شاخص به طور کلی تابعی از نیروی انسانی (گروه اجرای نت)، طراحی، پشتیبانی و شرایط محیطی است. سهولت و زمان

اجرای تعمیرات عامل تعیین کننده‌ای است که می‌تواند، نقش اساسی در کاهش هزینه‌های نت داشته باشد.

کلیات روش‌های تحلیل قابلیت تعمیرپذیری مشابه روش‌های قابلیت اطمینان است. از این رو در ادامه فقط برخی از روابط اصلی این شاخص (تابع چگالی، میانگین، نرخ تعمیرات) بیان می‌شود: در صورتی که T متغیر تصادفی و نشان دهنده زمان انجام تعمیرات (TTR) با تابع چگالی احتمال $m(t)$ باشد، در این صورت تابع تجمعی $M(t)$ را می‌توان به صورت رابطه (۸-۲) تعریف کرد (Barabadi et al., 2011b):

$$M(t) = \Pr(T \leq t) = \int_0^t m(t') dt' \quad (8-2)$$

این رابطه نشان دهنده احتمال اجرای تعمیرات در زمان t است. متوسط زمان تا انجام تعمیرات (MTTR) و نرخ تعمیرات $\mu(t)$ را نیز می‌توان از روابط (۹-۲) و (۱۰-۲) به دست آورد (Barabadi et al., 2011b):

$$MTTR = \int_0^{\infty} tm(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - M(t)) dt \quad (9-2)$$

$$\mu(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\delta t} \Pr\{t < T < t + \delta t | t < T\} = -\frac{m(t)}{1 - M(t)} \quad (10-2)$$

الف- مدل نرخ تعمیرات متناسب (PRM):

برای وارد کردن تأثیرات شرایط محیطی در تخمین نرخ تعمیرات از مدل نرخ تعمیرات متناسب و مدل رگرسیون لایه‌بندی شده کاکس (SCRM) استفاده می‌شود. در رابطه پایین به تابع نرخ تعمیرات مدل PRM اشاره شده است:

$$\mu(t, w) = \mu_0(t) \phi(w\epsilon) = \mu_0(t) \exp\left(\sum_{j=1}^m w_j \epsilon_j\right) \quad (11-2)$$

در این رابطه بردار ردیفی w شامل فاکتورهای ریسک و ϵ بردار ستونی نیز شامل ضرایب رگرسیون است، که فاکتور ریسک w مرتبط با شرایط محیطی سیستم و ϵ پارامتر مجهول مدل است که نشان دهنده تأثیرات فاکتورهای ریسک است. در این مدل نیز مشابه PHM از تابع نمایی $\left(\exp\left(\sum_{j=1}^m w_j \epsilon_j\right)\right)$ برای توصیف تابع پیوند $\phi(w\epsilon)$ استفاده شده است. تابع قابلیت تعمیرپذیری نیز برای PRM به صورت رابطه (۱۲-۲) بیان می‌شود:

$$M(t, w) = 1 - (1 - M_0(t))^{\exp\left(\sum_{j=1}^m w_j \epsilon_j\right)} \quad (12-2)$$

که در این رابطه $M_0(t)$ تابع قابلیت تعمیرپذیری اساسی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M_0(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \mu(t') dt'\right) \quad (13-2)$$

مدل PRM را می‌توان به‌عنوان روش رگرسیون ناپارامتریک در نظر گرفت ولی در اصل یک مدل نیمه‌پارامتریک است، زیرا به تابع $\mu_0(t)$ می‌توان انواع توابع پرکاربرد آماری مانند ویبول، لاگ‌نرمال، ... برآزش کرد. مهم‌ترین فرض این مدل نیز مانند PHM، فرض نرخ تعمیرات متناسب برای دو مشاهده با مقادیر متفاوت w است که به‌صورت رابطه (۱۴-۲) ارائه می‌شود:

$$\frac{\mu(t, w_1)}{\mu(t, w_2)} = \theta, \quad \text{constant over } t \quad (14-2)$$

فرض PH برای مدل PRM نیز مشابه PHM قابل ارزیابی با روش‌های نموداری، فرایند آزمون نیکویی برآزش و روشی مبتنی بر متغیرهای وابسته به زمان است.

ب- مدل تعمیرات رگرسیون لایه‌بندی شده کاکس (SCRM) برای تعمیرات

این مدل حالت تغییر یافته مدل RPM است که امکان لایه‌بندی فاکتورهای ریسکی را که از فرض PH پیروی نمی‌کنند فراهم می‌آورد. در این مدل فاکتورهای ریسک مؤثر بر قابلیت تعمیرپذیری که از فرض PH پیروی می‌کنند مستقیماً در مدل وارد می‌شوند در حالی که فاکتورهای ریسک لایه‌بندی شده (وابسته به زمان) در مدل وارد نمی‌شوند (Kleinbaum, 2011). از این رو در SCRM برای هر لایه نرخ تعمیرات پایه $(\mu_{0g}(t))$ مجزایی برآزش می‌شود در حالی ضرایب رگرسیون در تابع پیوند $(\exp(\sum_{j=1}^m w_j \epsilon_j))$ در همه لایه‌ها یکسان است. رابطه (۱۵-۲) نرخ تعمیرات مبتنی بر فاکتورهای ریسک مؤثر بر تعمیرات را نشان می‌دهد (Barabadi et al., 2011b; Ghodrati and Kumar, 2005b):

$$\mu_g(t, w) = \mu_{0g}(t) \exp\left(\sum_{j=1}^m w_j \epsilon_j\right) \quad g = 1, 2, \dots, u \quad (15-2)$$

در این رابطه ϵ_j ضرایب رگرسیون تخمینی برای همه لایه‌ها است. تابع قابلیت تعمیرپذیری در مدل SCRM نیز به‌صورت رابطه زیر است (Gao et al., 2010a):

$$M_g(t, w) = 1 - \left(1 - M_{0g}(t)\right)^{\exp(\sum_{j=1}^m w_j \epsilon_j)} \quad g = 1, 2, \dots, u \quad (16-2)$$

$M_{0g}(t)$ تابع قابلیت تعمیرپذیری پایه در لایه g ام است

۲-۲-۶- قابلیت پشتیبانی

پشتیبانی از نگهداری و تعمیرات، به‌عنوان توانایی گروه نت برای تأمین تقاضای منابع مورد نیاز برای نگهداری از یک وسیله تحت شرایط مشخص و استراتژی نت معین تعریف می‌شود (IEC 60050)

(2014). تعیین و توسعه فرآیند نگهداری، تدارکات قطعات یدکی، خرید ابزارآلات و تسهیلات نت، تدارکات و مدیریت، ثبت اسناد، توسعه و آموزش برنامه‌های نت به کارکنان برخی از موارد ضروری برای پشتیبانی نت است. علاوه بر این، برای سیستم‌های پیچیده، پیشرفته و سیستم‌های پیوسته تولید، پشتیبانی خارجی مانند پشتیبانی از طرف کارخانه تولیدکننده نیز ضروری است. نحوه محاسبه قابلیت پشتیبانی و تحلیل‌های آماری آن مشابه روابط (۲-۸) تا (۲-۱۰) در قابلیت تعمیرپذیری است، با این تفاوت که داده‌های به کار رفته در این بخش زمان پاسخ‌دهی (TTD) در هر خرابی است. از سوی دیگر پشتیبانی از نت را می‌توان به‌عنوان شاخه‌ای از موضوع پشتیبانی از محصول در نظر گرفت (Ghodrati, 2003; Markeset and Kumar, 2007; et al.). پشتیبانی از محصول را می‌توان به‌عنوان همه فعالیت‌ها در راستای اطمینان از دسترسی به عملیات بدون مشکل در طول عمر مفید محصول تعریف کرد (Kumar, 2003). نصب، خدمات نت و دسترسی به قطعات یدکی از جمله موارد خدمات فنی ارائه شده در پشتیبانی است (Ghodrati and Kumar, 2005a). در ادامه به دو مورد از زیرشاخه‌های اصلی پشتیبانی یعنی قطعات یدکی و نت اشاره می‌شود:

الف - قطعات یدکی:

مدیریت قطعات یدکی و تدارکات وجهی از مدیریت پشتیبانی محصولات است که در هزینه چرخه عمر محصول مؤثر است. دسترسی به قطعات یدکی به‌محض تقاضا، زمان توقف سیستم/ ماشین را کاهش و کارایی آن را افزایش می‌دهد و که نتیجه آن افزایش سود حاصل از کل پروژه است. موجودی بهینه قطعات یدکی، هزینه‌های چرخه عمر محصول را کمینه می‌کند. تعداد بهینه قطعات یدکی با ملاحظه عوامل مختلف مانند حساسیت قطعه، هزینه‌های خرید قطعه، فاصله زمانی بین سفارش تا دریافت قطعه قابل تخمین است (Ghodrati, 2005).

مدیریت قطعات یدکی:

برنامه‌ریزی قطعات یدکی، عنصر اصلی مدیریت قطعات یدکی است. این برنامه امکان دسترسی به موقع به قطعات یدکی مورد نیاز را به مقدار کافی فراهم می‌کند و از هزینه‌های سنگین ناشی از تأخیر تأمین قطعات یدکی به هنگام اجرای تعمیرات جلوگیری می‌کند. موجودی قطعات بیش از حد نیاز نیز می‌تواند هزینه‌های اضافی قابل توجهی را تحمیل کند (Ghodrati, 2005).

شناسایی قطعات یدکی:

در غیاب داده و اطلاعات لازم برای ارزیابی فرسودگی اجزای و تخمین احتمال وقوع خرابی آن‌ها در طول چرخه عمر اقتصادی سیستم، کاربران عموماً به پیشنهادها تولیدکنندگان اعتماد می‌کنند. در

صورت عدم دستیابی به اطلاعات لازم یا دسترسی ناقص به آن‌ها، تصمیم‌گیری بر مبنای پیشنهادهای تولیدکنندگان یا اطلاعات مالکین تجهیزات مشابه انجام می‌گیرد. در صورت در دسترس بودن اطلاعات کامل تصمیم‌گیرندگان باید معیار و روشی مناسب را برای ارزیابی اجزای انتخاب کنند. در مرحله بعد هر جزء از تجهیزات با توجه به مجموع امتیازی که در ارزیابی کسب کرده است در فهرست سفارش اولیه اولویت‌بندی می‌شود و سپس با توجه به راهبردهای تولید فهرست سفارش قطعات یدکی مرتب شده و در ۲ یا سه ارائه شود (Diallo et al., 2012).

انبارداری قطعات یدکی:

پس از تصمیم‌گیری درباره خرید یک قطعه از تجهیزات، مسئله بعدی میزان قطعات یدکی نگهداری شده در انبار است. تجدید موجودی انبار، بر اساس نرخ مصرف مورد انتظار و ریسک اقتصادی ناشی از تهی بودن انبار در دوره تجدید، انجام می‌شود. عواملی که نرخ مصرف و تجدید انبار را تحت تأثیر قرار می‌دهد، عبارت از (Ghodrati, 2005):

- ✓ نرخ مخاطره و نرخ مصرف هر جزء
- ✓ تعداد اجزای مشابه

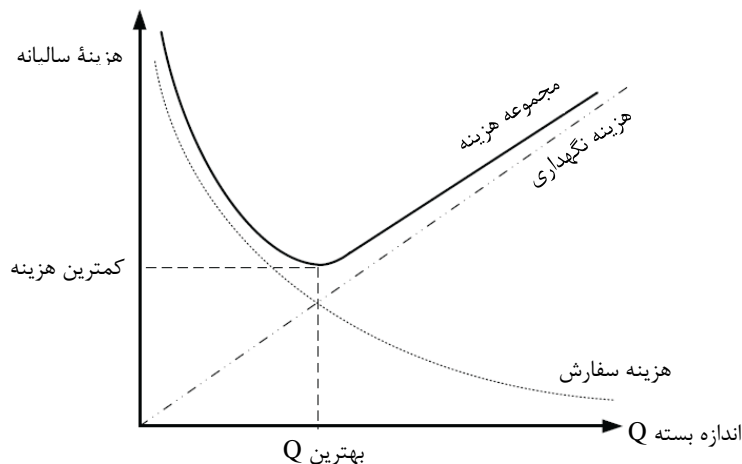
اگر چه برای کنترل هزینه‌های حمل‌ونقل و بهره‌مندی از تخفیف‌های ویژه، پیشنهاد خریدهای انبوه آرایه می‌شود، ولی برای مدیریت قطعات یدکی بسیاری از قطعات کوچک دارای اندازه سفارش اقتصادی هستند. دو عامل یاد شده در تعیین زمان تجدید قطعات یدکی نیز در نظر گرفته می‌شوند. بدین منظور محاسبات احتمال وقوع خرابی‌های بیشتر در طول چرخه سفارش مجدد یا چرخه تجدید تدارکات انجام می‌گیرد. احتمال عدم دسترسی به قطعات یدکی در هنگام نیاز تابعی از: تعداد قطعات نگهداری شده در انبار به طور معمول (تجدید قطعات یدکی)، تعداد قطعات مشابه و قابلیت اطمینان آن‌ها، محیط کارکرد سیستم (نرخ مصرف قطعات) و زمان بازگشت قطعات یدکی به انبار پس از خروج از انبار (چرخه تجدید تدارکات قطعات یدکی) است (Ghodrati, 2005).

ایده اصلی هر سیستم مدیریت انبارداری دستیابی به سطح خدمات‌رسانی کافی با کمینه سرمایه‌گذاری برای انبارکردن و کمینه هزینه‌های مدیریتی است. ، به عنوان مثال از سفارش‌دهی بیش از حد بهینه انبارداری سبب صرفه‌جویی در هزینه‌ها نمی‌شود چرا که سبب مسدود گشتن سرمایه می‌شود. به منظور حل این مسئله از "مقدار سفارش اقتصادی (EOQ)" که توسط هاریس^۱ (۱۹۱۳) آرایه و توسط ویلسون^۲

۱ - Harris

۲ - Wilson

(۱۹۳۴) ترویج شده است، می‌توان میزان ذخیره انبار با کمینه مجموع هزینه‌های انبارداری را تعیین کرد. این مفهوم در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود (Ghodrati, 2005).



شکل ۲-۴- مقدار سفارش اقتصادی (Ghodrati, 2005)

مقدار سفارش اقتصادی با استفاده از رابطه (۲-۱۷)، قابل محاسبه است (Ghodrati et al., 2003):

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \quad (۲-۱۷)$$

در این رابطه: D: میزان تقاضای سالیانه، S: هزینه هر بار سفارش، H: هزینه نگهداری یک واحد در انبار برای یک سال (اغلب به صورت درصدی از ارزش قطعات تعریف می‌شود). در مدیریت انبارداری دو سیستم مشهور وجود دارد که عبارتند از:

أ. سیستم بازبینی ادواری (P سیستم)

سیستم P (سفارش در بازه‌های زمان ثابت یا سیستم سفارش ادواری) یک سیستم کنترل انبارداری است که موجودی انبار به صورت ادواری بازبینی (TBO ثابت) و سفارش‌های جدید در انتهای هر بازه داده می‌شود (Ghodrati, 2005). این مدل ب دو پارامتر زیر نیازمند است و مدل مدیریت انبارداری بالا این دو عنصر را تعیین می‌کند (Ghodrati, 2005):

- زمان بین بازبینی‌های انبار و سفارش‌های قطعات مورد نیاز
- سطح مورد نیاز قطعات در انبار برای حفظ دسترسی به آن‌ها در هنگام نیاز و پیشگیری از کمبود آن‌ها.

ب. سیستم بازبینی پیوسته (Q سیستم)

سیستم Q که از آن با عنوان سیستم نقطه سفارش مجدد (ROP) یا سیستم کمی سفارش‌های ثابت نیز یاد می‌شود، نوع دوم از سیستم مدیریت انبارداری می‌باشد. در این سیستم موجودی انبار معادل توانایی دستگاه‌های موجود در برآورد تقاضای آینده خواهد بود. لذا موجودی انبار معادل کمینه مقدار نقطه سفارش مجدد (Rp) بوده و یک مقدار مشخص است. زمانی که تقاضا قطعی و مشخص است، زمان یا نقطه سفارش معادل مقدار تقاضایی می‌باشد که در طول زمان تاخیر وجود دارد (قسمت اول تساوی (۱۹-۲))، ولی زمانی که تقاضا قطعی نیست، یک مقدار به عنوان ضریب ایمنی به متوسط میزان تقاضا در طول زمان تاخیر افزوده می‌شود (قسمت دوم تساوی (۱۹-۲)) (Ghodrati, 2005). نقطه سفارش مجدد (Rp) از حاصل جمع متوسط تقاضا (d) در طول زمان تاخیر (تصمیم تا اجرا) (L) (قسمت اول تساوی (۱۹-۲)) و مقدار موجودی/ایمن (قسمت دوم تساوی (۱۹-۲)) حاصل می‌شود. موجودی ایمن بر اساس سطح معناداری چرخه خدمات‌رسانی و انحراف معیار استاندارد از مقدار متوسط $\sigma_{D(1year)}$ بدست می‌آید. در روابط (۱۸-۲) و (۱۹-۲) فرم ریاضی نقطه سفارش مجدد مشاهده می‌شود (Ghodrati et al., 2003, 2012):

$$\sigma_{D(1year)} = \sqrt{\frac{t}{\bar{T}}} \quad (18-2)$$

$$Rp = d \times L + \sigma_D \times \sqrt{L} \Phi\left(\frac{p}{2}\right) \quad (19-2)$$

در این روابط، t کارکرد سیستم در طول سال، \bar{T} متوسط زمان تا وقوع خرابی، $\Phi\left(\frac{p}{2}\right)$ مقدار توزیع نرمال استاندارد در سطح اطمینان p/2. نقطه Rp یعنی زمانی که موقعیت موجودی انبار به Rp-value رسید، باید به میزان EOQ سفارش داده شود.

تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز:

فرایند پواسون همگن و نظریه تجدید دو مدل ریاضی پرکاربرد در تخمین اندازه موجودی قطعات تعمیرناپذیر هستند. فرایند پواسون همگن به‌عنوان حالتی خاص از فرایند تجدید است. از این فرایند در شرایطی که نرخ مخاطره ثابت استفاده می‌شود. نظریه تجدید نیز در تخمین تعداد قطعات یدکی (SPP) برای قطعات با نرخ مخاطره متغیر به‌کار می‌رود (Ghodrati and Kumar, 2005a).

نظریه تجدید در اصل برای تحلیل تعویض تجهیزات به‌مجرد خرابی و برای تعیین تابع توزیع تعداد تعویض‌ها، همچنین متوسط تعداد تعویض‌ها توسعه یافته است. این روش ابزاری بسیار مناسب در پیش‌بینی تقاضا برای دستگاه‌های مصرفی است. همچنین در انجام تحلیل‌ها، ارزیابی تابع خیلی سریع‌تر بوده و بهینه‌سازی آن امکان‌پذیر است. خرابی اجزای (قطعات تعمیرناپذیر) به‌طور طبیعی از فرایندهای تجدیدپذیر پیروی می‌کند. یک فرایند تجدیدپذیر (به‌طور معمول) توسط تابع توزیع تجمعی $F(t)$ از

زمان‌های بین تجدیدها مشخص می‌شود. اگر $N(t)$ نشان دهنده تعداد تجدیدها (خرابی) در زمان t باشد و زمان تا وقوع خرابی‌ها (TTFs) مستقل از هم و دارای توزیع $F(t)$ باشد. تابع توزیع احتمال تعداد وقوع خرابی‌ها (n) به صورت زیر ارائه می‌شود (Ghodrati, 2005; Ghodrati et al., 2010):

$$P[N(t) = n] = F^n(t) - F^{n+1}(t) \quad (20-2)$$

در این رابطه $F^n(t)$ ، n امین پیچش کونولوشن از تابع $F(t)$ بوده و به صورت (21-2) ارائه می‌شود:

$$F^n(t) = \int_0^t F^{n-1}(t-x) dF(x) \quad (21-2)$$

در این حالت $F^n(t)$ نشان دهنده احتمال وقوع n امین خرابی در زمان t است. تعداد خرابی‌های مورد انتظار در طول زمان t که با $M(t)$ نشان داده می‌شود، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$M(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F^n(t) \quad (22-2)$$

تساوی بالا به عنوان تابع تجدید شناخته شده و تعداد تجدیدها را در طول $[0, t]$ نشان می‌دهد و به صورت (23-2) قابل بازنویسی است:

$$M(t) = F(t) + \int_0^t M(t-x) f(x) dx \quad (23-2)$$

فرض کنید تعویض‌ها متوسط زمان تا وقوع خرابی جزء (\bar{T}) و انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌ها آن‌ها ($\sigma(T)$) باشد. در این صورت ضریب تغییرات (ξ) زمان تا وقوع خرابی‌ها به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\xi = \sigma(T) / \bar{T} \quad (24-2)$$

در صورتی که زمان عملیات (t) سیستم یا ماشین که قطعه مورد نظر برای آن نصب شده است خیلی طولانی باشد و چندین تعویض انجام شود، متوسط تعداد خرابی‌ها $E[N(t)] = M(t)$ با مقدار تقریبی تابع تجدید پذیری به صورت رابطه (25-2) تثبیت خواهد شد:

$$M(t) = E[N(t)] = \frac{t}{\bar{T}} + \frac{\xi^2 - 1}{2} \quad (25-2)$$

و به تناسب آن شدت خرابی یا تابع نرخ تجدید پذیری به صورت رابطه (26-2) ارائه می‌شود:

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} = \frac{dE[N(t)]}{dt} = \frac{1}{\bar{T}} \quad (26-2)$$

انحراف معیار تعداد خرابی‌ها در زمان t به صورت رابطه (27-2) است:

$$\sigma[N(t)] = \zeta \sqrt{\frac{t}{\bar{T}}} \quad (27-2)$$

در صورتی که زمان t در تساوی بالا بیانگر یک افق برنامه‌ریزی بزرگ باشد، $N(t)$ تقریباً دارای توزیع نرمال با متوسط $\overline{N(t)}$ خواهد بود (بر اساس نظریه حد مرکزی). در این حالت تعداد قطعات یدکی مورد نیاز (N_t) در طول این بازه با احتمال کمبود $(1-p)$ به صورت رابطه (28-2) ارائه خواهد شد:

$$N_t = \frac{t}{\bar{T}} + \frac{\zeta^2 - 1}{2} + \zeta \sqrt{\frac{t}{\bar{T}}} \Phi^{-1}(p) \quad (28-2)$$

در این رابطه $\Phi^{-1}(p)$ تابع معکوس توزیع نرمال بوده و مقادیر آن در کتب آماری در دسترس است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این رابطه به منظور تخمین تعداد قطعات یدکی در طول بازه عملکرد t نیازمند دو پارامتر ζ و \bar{T} است.

ب- نگهداری و تعمیرات (نت)

نت را می‌توان به‌عنوان ترکیبی از تمام اقدامات فنی و فعالیت‌های مدیریتی و نظارتی، برای اطمینان از انجام فعالیت مورد انتظار توسط یک جزء، قطعه، تجهیزات یا سیستم به هنگام نیاز تعریف کرد (IEC 60050, 2014). مهم‌ترین عناصر مهندسی نت را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد (You et al., 2011):

- ا. هدف: مواردی از قبیل پیشینه‌سازی قابلیت دسترسی متوسط سیستم در افق زمانی نامحدود، کمینه‌سازی اتلاف تولید ناشی از نت در بازه زمانی محدود، کمینه‌سازی نرخ متوسط هزینه‌های نت در هر بازه زمانی از عملیات در افق زمانی نامحدود.
- ب. سیاست نت: از قبیل سیاست ادواری، سیاست کنترل شده، سیاست پیوسته.
- ج. کیفیت یا میزان تأثیر نت: از قبیل انجام نت پیشگیرانه کامل که سیستم را به حالت به‌خوبی سیستم جدید (GAN) باز می‌گرداند و نت پیشگیرانه کمینه که سیستم را به حالت به‌بدی سیستم قدیم (BAO) باز می‌گرداند.
- د. بررسی ویژگی‌های تنزل: مانند توزیع‌های عمر، مدل‌های آماری، مارکوف
- ه. محدودیت‌های نت: مانند منابع نت، قطعات یدکی.

برای اثربخشی نت، لازم است فعالیت‌های آن در چارچوب مشخصی انجام گیرد. استراتژی‌های اصلی نت به شرح زیر است:

- نت اصلاحی: اجرای نت بعد از وقوع خرابی برای بازگرداندن یک وسیله به حالت کاری برای انجام فعالیت مورد نیاز (IEC 60050, 2014).

- نت پیشگیرانه: اجرای نت در بازه‌های تعیین شده بر اساس معیار مشخص، برای کاهش احتمال وقوع خرابی یا پیشگیری از وقوع تنزل در کارکرد یک وسیله (IEC 60050, 2014). این نوع نت به دو دسته مبتنی بر شرایط و مبتنی بر زمان تقسیم می‌شود که در منابع (Cui, 2008; Hoseinie et al., 2011a) به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

- طراحی بدون نت: سیستم و قطعات طراحی شده با این استراتژی نیازی به فعالیت‌های نت ندارد مانند یاتاقان و بلبرینگ‌های بی‌نیاز از روغن کاری (Hoseinie et al., 2012a).

معمولاً تأثیر فعالیت‌های نت و حیات‌بخشی در وضعیت اجزای بر اساس دو حالت حدی تعریف می‌شود. در نخستین حالت فرض بر این است که جزء پس از نت به حالت GAN باز می‌گردد، یعنی عمر سپری شده آن پس از اعمال نت صفر می‌شود (Martorell et al., 1999). این نوع تعمیرات به‌عنوان نت یا تعمیرات کامل شناخته می‌شود. تعمیرات اساسی در کارخانه‌ها یا تعویض کل سیستم مثالی از این نت است (El-Ferik and Ben-Daya, 2006; Pham and Wang, 1996).

در دومین حالت فرض می‌شود که نت، سیستم را در حالت BAO رها می‌کند، یعنی وضعیت جزء پس از نت تقریباً برابر با وضعیت آن پیش از اعمال نت می‌شود (Martorell et al., 1999)، به عبارت دیگر با این نت نرخ خرابی سیستم به حالت قبل از وقوع خرابی باز می‌گردد. این نوع تعمیرات به‌عنوان تعمیرات یا نت کمینه شناخته می‌شود. پنجرگیری لاستیک یا تعویض تسمه پروانه مثال‌هایی از این حالت‌اند، چرا که نرخ مخاطره کلی ماشین ضرورتاً تغییری نمی‌کند (El-Ferik and Ben-Daya, 2006; Pham and Wang, 1996).

حالت دیگر تعمیرات، تعمیرات بد یا نت بد است که فعالیت نت سبب افزایش نرخ مخاطره یا کاهش عمر سیستم می‌شود ولی خرابی در سیستم رخ نمی‌دهد، بنابراین، در این حالت وضعیت سیستم پس از نت بدتر از حالت اولیه می‌شود. نوع بعدی تعمیرات را می‌توان به‌صورت بدترین تعمیرات یا نت در نظر گرفت که در این حالت فعالیت نت سبب بروز خرابی در سیستم می‌شود. تعمیر اشتباهی جزئی که خرابی نیست، تعمیر ناقص جزء خراب، تعمیر جزء خراب به همراه برهم زدن تنظیمات سیستم، تشخیص نادرست محل خرابی و اجرای فعالیت نت در زمان نامناسب مثال‌هایی از نت بد و بدترین نت هستند (El-Ferik and Ben-Daya, 2006; Pham and Wang, 1996).

آخرین نوع نت که عمده بحث رساله در زمینه نت را نیز شامل می‌شود نت یا تعمیرات ناقص است. دو نوع نت کامل و نت کمینه برای توصیف چگونگی تأثیرات واقعی فعالیت‌های نت و میزان بازگشت عمر جزء یا سیستم تعمیری کفایت نمی‌کند. در حقیقت پس از هر فعالیت نت، وضعیت جزء تحت تعمیر بسته به تأثیر نت صورت گرفته تا حدودی بهبود می‌یابد (سیستم جوان‌تر می‌شود). این تأثیر نه

به اندازه‌ای ایده‌آل است که جزء به حالت GAO بازگردد و نه در آن حد ناچیز است که جزء به حالت BAO باشد از این رو از این نوع نت با عنوان "نت یا تعمیرات ناقص" نام برده می‌شود. این مدل در واقع حالت عام مدل‌های BAO و GAN است (Martorell et al., 1999) و سیستم را به حالتی بین GAN و BAO انتقال می‌دهد. تنظیم موتور ماشین مثالی برای این نوع نت است. یکی از مهم‌ترین و عام‌ترین نوع استراتژی نت در رابطه با نت ناقص در صنعت امروزی نت پیشگیرانه ناقص است که مطالعات گسترده برای وارد کردن تأثیرات آن در سیاست‌های نت انجام گرفته است. یکی از چالش‌های بهینه‌سازی سیاست نت در نظریه شرایط محیطی متغیر با استفاده از مدل‌های آماری به‌ویژه مدل‌های رگرسیونی همچون PHM، SCRM و ... است، زیرا سیستم تحت شرایط مختلف محیطی نرخ‌های خرابی متفاوتی دارد که هر حالت باید به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. در چنین شرایطی سیاست PM کنترلی با محدودیت قابلیت اطمینان (RLPM) در سطح زیرسیستم پیشنهاد می‌شود که قادر به پوشش تأثیر نقطه‌ای فعالیت‌های PM ناقص و شرایط متغیر محیطی است. بدین منظور "مدل نرخ مخاطرات متناسب توسعه یافته (EPHM)" مورد استفاده قرار خواهد گرفت. این مدل ترکیبی دوگانه از PMH و مدل هیبریدی PM ناقص (HIPM) است (You et al., 2011). مدل PHM طبق رابطه (۲-۲) به صورت زیر بیان شد:

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t) \exp(\alpha z(t)) \quad (2-29)$$

در این مدل استفاده از شرایط محیطی عملکرد سیستم به‌عنوان فاکتور ریسک (z)، PHM را قادر می‌کند. تأثیرات شرایط محیطی را بر احتمال وقوع خرابی‌ها ارزیابی کند. تابع نرخ مخاطره مدل HIPM نیز به صورت رابطه (۲-۳۰) بیان می‌شود (Liu et al., 2012; Khatab, 2013):

$$\lambda_n \left(t + \sum_{j=1}^n T_j \right) = A_n(t) \lambda(t + b_n y_n) \quad (2-30)$$

در این رابطه λ_n تابع نرخ مخاطره سیستم بعد از n امین فعالیت PM و پیش از (n+1) امین فعالیت PM است. t زمان تصادفی پس از زامین فعالیت PM و پیش از (j+1) امین فعالیت PM است. A_n ضریب افزایش نرخ مخاطره (HRIF) ناشی از زامین فعالیت PM از رابطه زیر بدست می‌آید که در آن $a_j > 0$ و $a_0 = 1$ است (Liu et al., 2012; Nakagawa, 1988):

$$A_n = a_0 \times a_1 \times \dots \times a_n = \prod_{j=0}^n a_j \quad (2-31)$$

b_n ضریب کاهش عمر (ARF) ناشی از n امین فعالیت PM است. y_n عمر مؤثر سیستم اندکی پیش از n امین فعالیت PM به صورت رابطه (۲-۳۲) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned}
y_n &= T_n + b_{n-1}y_{n-1} \\
&= T_n + b_{n-1}(T_{n-1} + b_{n-2}y_{n-2}) \\
&= T_n + b_{n-1}T_{n-1} + \dots + \left(\prod_{j=1}^{n-1} b_j\right)T_1
\end{aligned} \tag{۳۲-۲}$$

در این رابطه $0 \leq b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_n \leq 1$ و $y_1=T_1$ است (Nakagawa, 1988). در واقع ARF سنجهای برای سنجش تأثیرات آنی PM ناقص است که سیستم را به حالت جوان تر ولی نه به عمر صفر باز می گرداند، این حالت در شروع به کار سیستم پس از یک فعالیت PM ناقص مشاهده می شود. از سوی دیگر، HRIF سنجهای است برای سنجش تأثیرات ماندگار فعالیت PM ناقص که سبب تعدیل نرخ افزایشی احتمال وقوع خرابی می شود. این تأثیرات خاصیت انباشتگی دارند و با انجام تعداد بیشتری فعالیت نت PM تشدید می شود. بنابر این مدل EPHM ترکیبی از PHM و HIPM است. شکل کلی این مدل به صورت رابطه (۳۳-۲) است (You et al., 2011):

$$\lambda_n \left(\dot{t} + \sum_{j=1}^n T_j, z \left(\dot{t} + \sum_{j=1}^n T_j \right) \right) = A_n(t) \lambda_0 (\dot{t} + b_n y_n) \exp(\alpha z (\dot{t} + \sum_{j=1}^n T_j)) \tag{۳۳-۲}$$

در این رابطه λ_n تابع نرخ مخاطره سیستم پس از n امین PM و پیش از $n+1$ امین PM است. مدل EPHM توانایی های PHM و HIPM در ارزیابی تأثیرات فعالیت PM را دارد و امکان ارزیابی مشترک تأثیرات هر دو پارامتر را در یک چارچوب فراهم می کند.

اگر (R_{jk}) نشان دهنده تابع قابلیت اطمینان نمونه z پس از k امین و پیش از $(k+1)$ امین فعالیت PM، R_{j0} تابع قابلیت اطمینان پیش از هرگونه فعالیت PM باشد. R_{jk} به صورت زیر بیان می شود:

$$R_{jk} \left(\dot{t} + \sum_{j=1}^n T_j, z \left(\dot{t} + \sum_{j=1}^n T_j \right) \right) = - \int_0^{\dot{t}} \lambda_{jk} \left(v + \sum_{j=1}^k T_k, z_j \left(v + \sum_{j=1}^k T_j \right) \right) dv \tag{۳۴-۲}$$

در کارهای معدنی و صنعتی تابع توزیع ویبول یکی از پرکاربردترین توابع عمر در تحلیل قابلیت اطمینان و نرخ مخاطره سیستم است. این توزیع بسیار منعطف است و توانایی به مدل سازی داده های خرابی با نرخ مخاطره افزایشی یا کاهش می را دارد. در رابطه (۳۵-۲) شکل این توزیع برای مدل EPHM مشاهده می شود:

$$\lambda_n \left(\dot{t} + \sum_{j=1}^n T_j, z \left(\dot{t} + \sum_{j=1}^n T_j \right) \right) = A_n(t) \frac{\gamma}{\eta} \left(\frac{\dot{t} + b_n y_n}{\eta} \right)^{\gamma-1} \exp(\alpha z (\dot{t} + \sum_{j=1}^n T_j)) \tag{۳۵-۲}$$

در این رابطه η و γ پارامترهای شکل و مقیاس توزیع ویبول اند. برای تخمین پارامترهای رابطه (۳۵-۲) از روش درستنمایی بیشینه به صورت بازگشتی استفاده می شود. فرایند تخمین به این صورت است که نخست پارامترهای (η, γ, α) بر اساس نخستین رویداد (قبل از اولین PM) و بدون در نظرگیری a_j و b_j

تخمین زده می‌شود، سپس پارامترهای (b_1, a_1) با جایگذاری پارامترهای تخمینی در مرحله قبل در تابع احتمالی برای دومین رویداد، تخمین زده می‌شود و همین روند برای (b_j, a_j) بر اساس $(j+1)$ امین ادامه می‌یابد. از طرف دیگر، برای تعیین مقادیر ARF و HRIF می‌توان در صورت دستیابی از سیستم‌های خبره استفاده کرد یا از برخی روابط پیشنهادی در جدول ۲-۲ استفاده کرد. این مدل زمانی کامل خواهد بود که تمام پارامترهای آن تخمین زده شود.

جدول ۲-۲- تأثیرات مختلف فعالیت PM (Liu et al., 2012)

مقادیر ARF و HRIF	تأثیر فعالیت‌های PM ناقص انجام گرفته
$a_j = \frac{3j+1}{2j+1}, b_j = \frac{2j}{3j+2}$	بدتر از شرایط پایه
$a_j = \frac{6j+1}{5j+1}, b_j = \frac{j}{2j+1}$	شرایط پایه
$a_j = \frac{10j+1}{9j+1}, b_j = \frac{j}{3j+1}$	ناقص ولی بهتر از شرایط پایه

همان‌طور که اشاره شد استراتژی نت PM معمولاً مبتنی بر محدودیت قابلیت اطمینان (RLPM) است. در این استراتژی زمان اجرای فعالیت‌های نت طوری پیشنهاد می‌شود که قابلیت اطمینان سیستم در هر بار اجرای فعالیت نت تا تعویض آن در حد بحرانی r حفظ شود. در این حالت سیستم تحت کمینه تعمیرات (بازگردانی سیستم به حالت کارگر به صورتی که نرخ مخاطره آن با نرخ مخاطره قبل از تعمیرات یکسان باشد) تا وقوع خرابی قرار دارد. مثال کمینه تعمیرات را می‌توان به‌عنوان تعویض اجزای جزئی (کم یا بی‌اهمیت) خراب از یک سیستم بزرگ که اجزای زیادی دارد، در نظر گرفت. در پیاده کردن استراتژی RLPM برای توصیف توزیع عمر مفید سیستم از مدل EPHM استفاده می‌شود که بیان ریاضی این سیاست به صورت رابطه (۳۶-۲) است:

$$R_{j0}(T_1) = R_{j1}(T_1 + T_2) = \dots = R_{jN-1} \left(\sum_{j=1}^L T_j \right) = r \quad (36-2)$$

در این رابطه r مقدار بحرانی قابلیت اطمینان است که در صورت تنزل قابلیت اطمینان سیستم به این مقدار فعالیت‌های PM پیشنهاد می‌شود. L نیز مقدار عدد تصادفی پیوسته و نشان دهنده تعداد فعالیت‌های PM قبل از تعویض است. مقدار r بر اساس مدل EPHM از رابطه زیر بدست می‌آید (Martorell et al., 1999; You et al., 2011):

$$\begin{aligned}
r &= \exp\left(-\int_0^{T_1} \lambda_{j0}(v; z_j(v)) dv\right) \\
&= \exp\left(-\int_0^{T_2} \lambda_{j1}(v + T_1; z_j(v + T_1)) dv\right) \\
&= \exp\left(-\int_0^{T_L} \lambda_{j(L-1)}(v + \sum_{j=1}^{L-1} T_j; z_j(v + \sum_{j=1}^{L-1} T_j)) dv\right)
\end{aligned} \tag{۳۷-۲}$$

اگر $r=1$ فرض شود، رابطه EPHM تأثیرات نت PM ناقص نشان دهنده مدل PM کامل را بازنمایی می‌کند. بسط رابطه (۳۷-۲) برای توزیع ویبول به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned}
-\ln(r) &= \int_0^{T_1} \left(\frac{\gamma}{\eta} \left(\frac{v}{\eta}\right)^{\gamma-1}\right) \exp(\alpha z(v)) dv \\
&= \int_0^{T_2} \left(A_1 \frac{\gamma}{\eta} \left(\frac{v + b_1 \gamma_1}{\eta}\right)^{\gamma-1}\right) \exp(\alpha z(v + T_1)) dv \\
&= \int_0^{T_L} \left(A_{L-1} \frac{\gamma}{\eta} \left(\frac{v + b_{(L-1)} \gamma_{(L-1)}}{\eta}\right)^{\gamma-1}\right) \exp(\alpha z(v + \sum_{j=1}^{L-1} T_j)) dv
\end{aligned} \tag{۳۸-۲}$$

در رابطه بالا آخرین تساوی به عنوان نرخ مخاطره تجمعی سیستم (Q_k) در ژامین بازه PM است:

$$Q_k = \int_0^{T_L} \left(A_{L-1} \frac{\gamma}{\eta} \left(\frac{v + b_{(L-1)} \gamma_{(L-1)}}{\eta}\right)^{\gamma-1}\right) \exp\left(\alpha z\left(v + \sum_{j=1}^{L-1} T_j\right)\right) dv \tag{۳۹-۲}$$

مقدار $k=1,2,\dots,L$ بوده و نشان دهنده تعداد خرابی‌های مورد انتظار در K امین بازه PM است.

۲-۲-۷- تحلیل عملکرد سیستم

برای دستیابی به قابلیت اطمینان کل سیستم باید رفتار و رابطه بین اجزای آن تحت شرایط مختلف در طول عمر مفید مورد مطالعه قرار گیرد (Barabadi et al., 2011a). در مهندسی تحلیل سیستم، رابطه یک جزء با کل سیستم به وسیله روش موسوم به "ساختار شکست سیستم" شناسایی می‌شود (Stapelberg, 2009). در مدل‌های تحلیل سیستم برای مناسب‌ترین گزینش، باید رفتار سیستم و رابطه بین اجزای آن تحت شرایط مختلف در طول کل عمر مفید سیستم در مطالعات لحاظ شود. از آن جایی که رفتار سیستم ممکن است پویا یا ایستا باشد، برای توصیف رفتار آن باید مدل مناسب انتخاب شود (Barabadi et al., 2011a).

قابلیت اطمینان یک سیستم ترکیبی از قابلیت اطمینان اجزای آن است که با استفاده از معادلات ریاضی می‌توان روابط بین آن‌ها را بیان کرد. با وجود اینکه مدل‌های مبتنی بر حالت، قدرتمندتر از مدل‌های

ترکیبی‌اند. ولی مدل‌های ترکیبی کاربر پسندتر، انعطاف‌پذیرتر و از ساختاری ساده‌تر برای مدیریت برخوردارند. از جمله مدل‌های ترکیبی پرکاربرد می‌توان به بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD)، تحلیل درخت خرابی (FTA) و روش دیاگرام فازی قابلیت اطمینان (RPD یا PMS) اشاره کرد (Distefano and Puliafito, 2009).

روش RBDs این روش به‌طور گسترده‌ای در تحلیل قابلیت اطمینان و دسترسی سیستم‌های پیچیده به کار گرفته می‌شود. این روش، شبکه‌ی موفقیت‌گرا برای توصیف فعالیت‌های سیستم است. ساختار RBD شامل یک نقطه ورود (شروع)، یک نقطه خروج (پایان) و مجموعه‌ای از بلوک‌ها است. هر بلوک نشان دهنده جزئی فیزیکی از سیستم است که به‌درستی فعالیت می‌کند. معمولاً بین دو یا چند جزء می‌توان سه ارتباط اصلی: سری، موازی و ساختارهای سری-موازی را تعریف کرد (Distefano, 2005). مزیت عمده مدل RBD سهولت خواندن و ادراک آن برای مهندسين طراح و بازرس و مدیران تصمیم‌گیرنده است، که این مزیت تشکیل مجدد، بازبینی و اعمال تغییرات در ساختار RBD را تسهیل می‌کند (Barabadi et al., 2011b; Distefano and Puliafito, 2009). منطق دیاگرام RBD قادر است ترکیبات خرابی اجزا را که به خرابی سیستم منجر می‌شود، شناسایی می‌کند. این دیاگرام همچنین توانایی تشخیص ترکیباتی از اجزاء را که با کارکرد مناسب می‌توانند سیستم را در حالت فعال ابقاء کنند، دارد (Distefano, 2005; Distefano et al., 2006; Distefano and Puliafito, 2007; Distefano and Xing, 2006). روش FTA نیز شباهت زیادی به RBD دارد.

روش RPD یا PMS در این روش توالی‌های مختلف (فازهای) عملیات تجربه شده یا انجام گرفته توسط سیستم، به‌صورت نموداری توصیف می‌شود. به عنوان مثال فازهای حرکتی یک هواپیما را می‌توان "حرکت روی چرخ"، "برخاستن"، "گشت زدن" و "فرود آمدن" در نظر گرفت و کلیت آن را به‌عنوان یک سیستم توصیف کرد که چیدمان RBD آن در زمان‌های مختلف مأموریت تغییر می‌کند (Andrews et al., 2013; Barabadi et al., 2011a). از منظر قابلیت اطمینان سیستمی که نسبت عملیاتی بین اجزای طبق مراحل عملیاتی تغییر می‌کند، باید به‌عنوان PMS در نظر گرفته شود (Kohda et al., 2008). وجود بیش از یک فاز در سیستم فازبندی مأموریت، منجر به برخی پیچیدگی‌ها می‌شود که در سیستم تک فازی وجود ندارد. این مشکل از وابستگی فازهای مختلف ناشی می‌شود (Ma and Trivedi, 1999). برای تحلیل این سیستم‌ها، هر مرحله در طول انجام مأموریت مشخص به‌عنوان یک فاز تعریف می‌شود (Barabadi et al., 2011a). در واقع یک مأموریت فازبندی شده توصیف‌کننده تغییر مفهوم موفقیت در طول اجرای عملیات مشخص است که متناسب با آن دلایل خرابی نیز در طول مأموریت تغییر می‌کند. موفقیت هر مأموریت منوط به تکمیل موفق فازهای آن است و خرابی مأموریت به‌عنوان

وقوع خرابی در حداقل یک فاز تعریف می‌شود. با توجه به نکات ذکر شده، برای تحلیل سیستم با PMS نخست احتمال وقوع خرابی در سطح فاز پیش‌بینی و سپس احتمال خرابی در کل مأموریت محاسبه می‌شود (Remenyte-Prescott et al., 2010). در واقع PMS به صورت ساختاری زنجیره‌ای از فازهای عملیاتی را بر اساس ترتیب وقوع یا انجام ارائه می‌کند. مشکل عمده این روش انتقال ویژگی‌های تجهیزات از یک فاز به فاز بعدی و حفظ تمام پیشینه تاریخی هر جزء در فاز نهایی است که این مشکل با ایده مخاطرات تجمعی (انتقال عمر) قابل کنترل است (Barabadi et al., 2011a). از سوی دیگر پیکربندی سیستم معمولاً از فازی به فاز دیگر تغییر می‌کند، لذا ترسیم فازهای متوالی نیازمند دقت بالایی است. این رویکرد از لحاظ مفهومی ساده است، اما حجم تحلیل و نحوه ترسیم آن با افزایش تعداد فازها بزرگ‌تر و پیچیده‌تر می‌شود (Ma and Trivedi, 1999). برای تحلیل رفتار سیستم با این روش دو رویکرد کلاسیک مدل‌سازی تحلیلی و شبیه‌سازی را می‌توان پیشنهاد کرد. شبیه‌سازی معمولاً به طور گسترده برای به تصویر کشیدن سیستم ساده پیشنهاد می‌شود، ولی غالباً نیازمند محاسباتی گسترده است. فنون مدل‌سازی تحلیلی را می‌توان با هر ترکیب دلخواه و انعطاف‌پذیری کافی برای به تصویر کشیدن و حل سیستم به کار بست (Xing and Amari, 2008).

۲-۲-۸- سنجش اهمیت

سنجش اهمیت میزانی از چگونگی تأثیرگذاری هر کدام از زیرسیستم‌ها بر عملکرد (قابلیت اطمینان یا دسترسی) کلی سیستم است. به عنوان مثال، یک سیستم سری را در نظر بگیرید. در این نوع سیستم جزء، وسیله یا زیرسیستمی که کوتاه‌ترین عمر را دارد، دارای بیش‌ترین تأثیر بر عملکرد سیستم است، یعنی جزئی با پایین‌ترین عملکرد در یک دوره‌ی زمانی مشخص، بیش‌ترین تأثیر را بر عملکرد کلی سیستم دارد (BlockSim 8 Online Help, 2012). با وجود اینکه در سیستم‌های ساده مانند سیستم‌های سری تعیین زیرسیستم بحرانی کاری نسبتاً ساده است، ولی در سیستم‌های پیچیده این امر چندان راحت نیست و استفاده از ایده سنجش اهمیت با یک منطق ریاضی قدرتمند امری ضروری است. در این راستا نخستین گام تعیین شاخصی برای تحلیل رفتار سیستم است. این شاخص بسته به بینش محقق می‌تواند انواع گوناگونی داشته باشد مانند نحوه سنجش عملکرد سیستم که با شاخص‌های چون قابلیت اطمینان و دسترسی سنجیده می‌شود یا میزان مقرون به صرفه بودن هر زیرسیستم بر حسب هزینه‌های تعمیرات بررسی می‌شود (Rausand and Høyland, 2003). گام دوم به کارگیری روشی برای ترکیب این شاخص با پیکربندی، ساختار، توپولوژی و نحوه قرارگیری زیرسیستم‌ها در یک سیستم برای

تعیین گلوگاه‌ها و زیرسیستم بحرانی است. در این رساله از قابلیت اطمینان و دسترسی به‌عنوان معیارهایی برای تحلیل اهمیت سیستم استفاده شده است.

Birnbaum نخستین بار در سال ۱۹۶۹ یکی از پرکاربردترین معیارهای سنجش اهمیت بر اساس قابلیت اطمینان را پیشنهاد کرد. شاخص بیرن بايوم از جزء i در زمان t یا ضریب اهمیت قابلیت اطمینان $(I_R^i(t))$ به‌صورت رابطه (۲-۴۰) است (Wang et al., 2004):

$$I_R^i(t) = h(1_i, R_S(t)) - h(0_i, R_S(t)) = \frac{\partial R_S(t)}{\partial R_i(t)} \quad (۲-۴۰)$$

در این رابطه $h(1_i, R_S(t))$ نشان دهنده احتمال مشروط کارکرد سیستم در حالی است که جزء/زیرسیستم i در زمان t در حال کار است. $h(0_i, R_S(t))$ نشان دهنده احتمال مشروط کارکرد سیستم در حالی است که جزء/زیرسیستم i در زمان t خراب است. $R_S(t)$ قابلیت اطمینان سیستم و $R_i(t)$ نیز قابلیت اطمینان جزء/زیرسیستم است (Wang et al., 2004). $I_R^i(t)$ از لحاظ ریاضی نیز برابر مشتق جزئی قابلیت اطمینان سیستم نسبت به قابلیت اطمینان همان زیرسیستم است. پس $I_R^i(t)$ مستقل از قابلیت اطمینان آن جزء/زیرسیستم است. مقدار اهمیت قابلیت اطمینان در واقع نشان دهنده احتمال وقوع خرابی برای سیستم در زمان t ناشی از جزء یا زیرسیستم i است (Gao et al., 2010b). این شاخص دربرگیرنده دو رکن اصلی یک معیار سنجش اهمیت را دربر می‌گیرد که معیاری بودن برای سنجش عملکرد سیستم (قابلیت اطمینان) و دیگری دربرداشتن محل زیرسیستم‌ها در پیکربندی سیستم است (Kuo and Zhu, 2012a). در کاربرد این شاخص رتبه‌بندی ارائه شده براساس مقادیر محاسبه شده، اهمیت بیشتری نسبت به مقدار مطلق آن را دارد. از این رو استفاده از ضریب اهمیت قابلیت اطمینان نرمالیزه $(NI_R^i(t))$ برای جزء/زیرسیستم i پیشنهاد شده است که به‌صورت رابطه (۲-۴۱) بیان می‌شود (Kim and Frangopol, 2010):

$$NI_R^i(t) = \frac{I_R^i(t)}{\sum_{j=1}^n I_R^j(t)} \quad (۲-۴۱)$$

در این رابطه n تعداد اجزای/زیرسیستم‌های موجود در سیستم است و $0 \leq NI_R^i \leq 1$. برای تحلیل کامل‌تر رفتار سیستم و وارد کردن تأثیرات تعمیرات انجام گرفته از قابلیت دسترسی به‌عنوان شاخص عملکرد استفاده می‌شود. قابلیت دسترسی یکی از پرکاربردترین شاخص‌های عملکردی سیستم است که دربرگیرنده دو شاخص عملکردی قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری برای زیرسیستم و پیکربندی سیستم است. افزایش قابلیت اطمینان از طریق ارتقای زمان‌های در حال کار سیستم (Uptime) و کاهش قابلیت تعمیرپذیری با تنزل زمان‌های در حال تعمیر یا غیرفعال (Down time) می‌توان قابلیت دسترسی سیستم را بهبود بخشید، که این دو روش می‌تواند پایه‌ای برای دو رویکرد مختلف بهینه‌سازی

قابلیت دسترسی باشد (Barabady and Kumar, 2007). سنجش اهمیت قابلیت دسترسی نیز ایده‌ای نو برای تحلیل سیستم و تعیین زیرسیستم‌های بحرانی است. این شاخص رتبه‌بندی عددی از زیرسیستم‌ها بر اساس اهمیت قابلیت دسترسی ارائه کرده و همچنین قادر به تعیین وجه بحرانی برای یک زیرسیستم از لحاظ تعمیرات یا خرابی است (Beeson and Andrews, 2003). در کاربرد اهمیت قابلیت دسترسی نیز مانند اهمیت قابلیت اطمینان از رتبه‌بندی اجزای/زیرسیستم‌ها نسبت به مقدار مطلق آن استفاده می‌شود (Kuo and Zhu, 2012b). همچنین اهمیت زیرسیستم‌های با عملکرد یکسان بسته به محل قرارگیری آن‌ها در ساختار سیستم ممکن است متفاوت باشد.

۲-۲-۹- جمع‌بندی

در این فصل نخست ایده تضمین تولید مورد بررسی قرار گرفت و یکی از شاخه‌های این رویکرد یعنی قابلیت اطمینان با جزئیات بیشتری تشریح شد. همچنین به دو وجه از قابلیت پشتیبانی یعنی تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز برای قطعات تعمیرناپذیر و پیشنهاد نت پیشگیرانه ناقص با در نظرگیری تأثیر شرایط محیطی پرداخته شد. در ادامه فصل نیز سنجش اهمیت سیستم بر اساس شاخص‌های عملکردی بررسی شد. این فصل به مختصر دربرگیرنده جعبه ابزار اصلی برای تحلیل مطالعه موردی است. در فصل بعدی سابقه علمی زیرشاخه‌های تضمین تولید در مهندسی معدن مرور خواهد شد.

فصل سوم

بررسی سابقه علمی



۳-۱- مقدمه

در این بخش به طور اجمالی به تحقیقات مهم و تأثیرگذار در حیطه مهندسی معدن اشاره می‌شود و سعی بر آن است که نحوه ورود هر یک از زیرشاخه‌های موضوع در مهندسی معدن و روند کارهای انجام گرفته تا به امروز مورد بررسی قرار گیرد. هرچند، حجم تحقیقات انجام گرفته در مقایسه با وسعت و پیچیدگی ماشین‌آلات و سیستم‌های معدنی بسیار ناچیز است و میزان استفاده از مفاهیم ظرفیت عملیاتی و قابلیت اعتماد در مهندسی معدن بسیار کمتر از سایر شاخه‌های مهندسی است. این فصل در واقع به مروری بر پژوهش‌های انجام گرفته در رابطه با موضوع ظرفیت عملیاتی و ارتباط آن با معیار قابلیت اعتماد و زیرشاخه‌های آن اختصاص دارد. تحقیقات انجام شده دامنه وسیعی از کارهای انجام گرفته در زمینه‌های مختلف مهندسی، پزشکی، هواضا و غیره را در برمی‌گیرد، ولی توجه به هدف و مطالعه موردی رساله و پژوهش‌های مربوط به سایر زمینه‌ها در قالب تحلیل آماری است. ضمن اینکه در مورد پژوهش‌های مربوط به سایر زمینه‌ها عمدتاً سیستم‌های صنعتی و مهندسی مورد توجه قرار گرفته است و تا حد ممکن از ورود به سایر زمینه‌ها مانند پزشکی و محیط‌زیست خودداری شده است.

۳-۲- ظرفیت عملیاتی

زمان‌های افت ناشی از تدارکات و خرابی بر ظرفیت عملیاتی تأثیر دارد و باعث کاهش خروجی، افزایش هزینه‌های عملیاتی، تداخل در سرویس‌دهی و سطح نامطلوب عملکرد می‌شود. حال آنکه سناریوی رقابت جهانی حاضر بر تحویل سریع‌تر (به موقع) تولید (خدمات) استوار است و عملکرد رضایتمند تمام سیستم یا زیرسیستم یا دستگاه‌های تولیدی در طول بازه عمر مفید آن‌ها گریزناپذیر است. این امر در طول پنج دهه اخیر علوم مهندسی را به سمت تحقیق و انجام تحلیل‌های گسترده برای برقراری ارتباط بین شاخص‌های رفتاری سیستم و ظرفیت عملیاتی سوق داده است. سازمان استاندارد نروژ با همکاری شرکت نفت و گاز این کشور در سال ۱۹۹۸ برای نخستین بار این ارتباط را به صورت نظام مند برای تجهیزات صنعتی ارائه کرد. در این رویکرد ارتباط بین ظرفیت عملیاتی با قابلیت اعتماد بیان شده است

(Standard, 1998). قابلیت اعتماد معیاری برای نمایش شاخص‌های رفتاری سیستم است که نخستین بار توسط گروه بین‌المللی الکترونیک در سال ۱۹۹۰ تعریف شد (IEC 60050, 2014). در سال ۲۰۰۷ جواد برآبادی برای نخستین بار به مفاهیم اصلی موضوع ظرفیت عملیاتی در زمینه مهندسی معدن پرداخت و کارهای انجام گرفته را مرور کرد. وی در این تحقیق موضوع ظرفیت عملیاتی را در قالب تضمین تولید را مورد بررسی قرار داد و تلاش کرد تا رویکردی برای انتقال این مفهوم از صنعت نفت و گاز به مهندسی معدن و سیستم‌های تولیدی ارائه کند (Barabady, 2007). وی در همین سال شاخه قابلیت دسترسی از قابلیت اعتماد را مورد توجه قرار داد و با استفاده از معیار اهمیت قابلیت دسترسی و هزینه‌های نت به اولویت‌بندی زیرسیستم‌های سنگ‌شکن کارخانه فرآوری بوکسیت جاجرمد پرداخت و سپس بر اساس اولویت به دست آمده تخصیص فعالیت‌های لازم برای بهبود وضعیت سیستم را مورد بررسی قرار داد (Barabady and Kumar, 2007). در سال ۲۰۱۱ عباس برآبادی و همکاران برای نخستین بار به بررسی رفتار سیستم‌های معدنی با در نظر گرفتن ملاحظات شرایط محیطی پرداختند و چارچوبی آماری برای بررسی ظرفیت عملیاتی زیرسیستم و سیستم معرفی کردند (Barabadi et al., 2011a). در این رساله پس از بررسی و تعیین فاکتور ریسک مؤثر در تحلیل‌ها، مدل‌های پرکاربرد در تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر شرایط محیطی به‌مانند PHM, ECHM و SPHM برای تحلیل زیرسیستم‌ها مورد بررسی قرار داده و پس از معرفی مختصر روش‌هایی مانند نمودار بلوکی قابلیت اطمینان پویا و نمودار فازی قابلیت اطمینان برای بررسی تعامل زیرسیستم‌ها در قالب سیستم، به تخمین ظرفیت عملیاتی کل سیستم پرداخته شد. مطالعه موردی این تحلیل بخشی از ناوگان استخراجی معدن بوکسیت جاجرمد بود که از دریل واگن، لودر، بلدوزر و کامیون‌های معدنی تشکیل می‌شد. این ناوگان در دو نوبت هشت‌ساعته و با ترکیب متغیر ناشی از استخراج ماده معدنی و باطله در طول نوبت‌ها فعالیت می‌کرد. پس از اعمال تأثیر شرایط محیطی بر رفتار اجزای ناوگان، سیستم به‌صورت پویا مورد تحلیل قرار گرفت. در این تحقیق به جزء تأثیر جنس سنگ (باطله یا ماده معدنی) از تأثیر سایر پارامترهای اثرگذار محیطی صرف نظر شده بود. ضمن اینکه هیچ‌کدام از وجوه پشتیبانی نیز در این تحلیل بررسی نشد. در واقع ایده ظرفیت عملیاتی و ترکیب آن با قابلیت اعتماد به طور کلی مفهومی نوپا است و عمر به‌کارگیری آن در زمینه معدنی به بیش از یک دهه نمی‌رسد، از این رو تعداد کارهای انجام گرفته نیز بسیار محدود است و جای کار بسیار گسترده برای بلوغ آن احساس می‌شود.

۳-۳- قابلیت دسترسی

تحقیق کومار و هانگ در سال ۱۹۹۳ را در سیستم تولیدی معدن زیرزمینی شاید بتوان به عنوان نخستین قدم در تحلیل قابلیت دسترسی در حوزه معدن معرفی نمود (Kumar and Huang, 1993). واگناژ و همکاران (Vagenas et al., 1997) برای تحلیل عملکرد ماشین‌های LHD از قابلیت دسترسی استفاده کردند. در این تحقیق پس از مرور جامع روش‌های جمع‌آوری داده از ماشین‌آلات معدنی، بازه‌های مناسب برای انجام تحلیل‌های قابل قبول ارائه شد. تشریح زیرسیستم‌های LHD و تحلیل قابلیت دسترسی آن‌ها بخش دیگری از این تحقیق بود که طی آن ۱۰ زیرسیستم برای هر دستگاه شناسایی شد. در دهه نخست هزاره سوم میلادی، محققین با تمرکز بیشتر بر تجهیزات معدنی نظیر شاول هیدرولیکی، اسکوپ (خاک‌انداز) معدنی، ماشین‌کند و برداشت، LHD، سنگ‌شکن، شاول کابلی، سیستم تولید در جبهه کار طولانی به بسط بیشتر موضوع قابلیت دسترسی در زمینه معدنکاری پرداختند. تحلیل قابلیت دسترسی شاول هیدرولیک توسط هال و دانشمند (۲۰۰۳) از جمله این پژوهش‌ها است. این محققین برای تحلیل برخی سیستم‌ها، از ماشین‌های نو (با عمر کارکرد صفر)، مانند سیستم هیدرولیک که امکان دستیابی به داده‌های تاریخی برای آن‌ها وجود نداشت، از روش FMEA استفاده کردند (Hall and Daneshmend, 2003a). وی در همین سال، قابلیت اطمینان تجهیزات بارگیری و باربری شامل چهار خاک‌کش و یازده کامیون محرک در معادن زیرزمینی را بررسی نمود (Hall and Daneshmend, 2003b). در سال ۲۰۰۴ سامانتا و همکاران از روندی مشابه فرآیند چهار مرحله‌ای هال و دانشمند (۲۰۰۳) (Hall and Daneshmend, 2003a)، برای تحلیل قابلیت دسترسی سیستم LHD استفاده کردند. با این تفاوت که مدل مورد استفاده در مرحله سوم این تحقیق از مدل مارکوف استفاده شد (Samanta et al., 2004). طی سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ عباس برآبادی و کومار طی مجموعه تحقیقاتی بر روی قابلیت دسترسی دپارتمان سنگ‌شکنی کارخانه بوکسیت جاجرم، به نتایج بسیار خوبی دست یافتند. در این تحقیقات سنگ‌شکن به زیرسیستم‌هایی مانند سیستم خوراک دهنده، نوارنقاله، سنگ‌شکن اولیه، سنگ‌شکن ثانویه، سرند اولیه و سرند ثانویه تقسیم شد و سپس فرآیند ارائه شده توسط هال و دانشمند تکرار شد و در مرحله سوم برای زیرسیستم‌های رونددار، مدل فرآیند قانون توانی (مدل فرآیند پواسون ناهمگن) مورد استفاده قرار گرفت. در پایان نیز زمان‌های نت پیشگیرانه در سطوح مختلف قابلیت اطمینان ارائه شد (Barabady, 2005; Barabady, 2005; Barabady, Javad, 2005; Kumar, 2008). در سال ۲۰۰۹ نیز واگناژ و ویو همین روند را برای داده‌های به دست آمده از ناوگانی با ۱۳ ماشین LHD و در مدت زمان ۱۷ ماه تکرار کردند (Vayenas and Wu, 2009). در سال‌های اخیر نیز عباس برآبادی و همکاران (۲۰۱۱) قابلیت دسترسی ناوگان

استخراجی معدن بوکسیت جاجرم را تحت بررسی قرار دادند. این تحقیق تنها مورد در زمینه معدنی است که شرایط محیطی (جنس سنگ استخراجی: باطله یا ماده معدنی) در قابلیت دسترسی وارد شده است و نتایج حاصل به شرایط واقعی نزدیک تر است. در این تحقیق پس از محاسبه قابلیت اطمینان با استفاده از مدل PHM برای اجزای ناوگان، قابلیت تعمیرپذیری اجزای نیز با استفاده از مدل PRM محاسبه شده است. در نهایت پس از مدل کردن پیکربندی پویای سیستم و محاسبه قابلیت دسترسی اجزای و سیستم، مقدار ظرفیت عملیاتی سیستم برآورد شده است (Barabadi et al., 2011a).

۴-۳- قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان نخستین و پرکاربردترین زیرشاخه قابلیت اعتماد در زمینه کارهای معدنی است. این شاخص از اواسط دهه ۱۹۶۰ تا اواخر دهه ۱۹۸۰، توسط محققینی چون، لوکویچ و چالانکو (Levkovich and Chalenko, 1969)، آل تشولر (Al'tshuler, 1969)، ایوکو و همکاران (Ivko et al., 1973)، فردینا و همکاران (Freidina et al., 1975)، بوندار و مرنو (Bondar and Mernov, 1979)، گارااکاوی و همکاران (Garakavi et al., 1984) و دهیلون (Dhillon, 1986) وارد حوزه مهندسی معدن شده است و این سالها را می توان به عنوان دوران آشنایی جامعه معدنی با مفهوم قابلیت اطمینان معرفی کرد. این مقالات عمدتاً کوتاه هستند و به دلیل ضعف بانک داده و عدم توسعه نرم افزارهای مدل سازی آماری به لحاظ محتوایی چندان قوی نیستند. در اواخر دهه ۱۹۸۰، گودمن قابلیت اطمینان راه های فرار اضطراری در معادن زغال اتاق و پایه را با استفاده از روش تحلیل درخت خطا مورد بررسی قرار داد (Goodman, 1988). کومار و همکاران (Kumar et al., 1989) برای نخستین بار در زمینه مهندسی معدن، فرآیند منسجمی را برای تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان بارگیری متشکل از سه دستگاه LHD را اجرا کردند. در دو دهه بعد نیز مشابه روند کومار توسط همین محقق (Kumar, 1990; Kumar and Klefsjö, 1992)، واگناژ و همکاران (Vagenas et al., 1997)، هال و دانشمند (Hall and Daneshmend, 2003b)، واگناژ و همکاران (Vagenas et al., 2003)، سامانتا و همکاران (Samanta et al., 2004)، جواد برآبادی و همکاران (Barabady, Javad, 2005; Barabady and Kumar, 2008; Barabady, 2005)، وایناس و وو (Vayenas and Wu, 2009) و در سال های اخیر حسینی و همکاران (Hoseinie et al., 2011b, 2011a, 2012a, 2012b) برای تحلیل قابلیت اطمینان ماشین LHD، سیستم های هیدرولیک در ماشین LHD، شاول هیدرولیکی، خاک کش و کامیون زیرزمینی، ماشین های کند و برداشت در معادن زیرزمینی، دپارتمان سنگ شکنی، ماشین شیرر مورد استفاده قرار گرفته است. در

آخرین تحقیق اجرا شده با رویکرد مذکور، گوستافسون و همکاران (Gustafson et al., 2013) به مقایسه دو دستگاه لودر معمولی و لودر LHD خودکار پرداختند.

وجه مشترک تحقیقات بررسی شده درباره قابلیت اطمینان، عدم در نظر گرفتن شرایط محیطی است و در این پژوهش سهم عمده تحلیل را روش کلاسیک به عهده دارد. در سال ۱۹۹۳ کومار و کلفسجو طی رساله‌ای برای نخستین بار به مروری نسبتاً کامل درباره مدل نرخ مخاطرات متناسب (PHM) پرداختند تا با استفاده از آن بتوان تأثیر شرایط محیطی را در تحلیل قابلیت اطمینان لحاظ کرد. آنها پس از معرفی اساس مدل، نحوه تخمین پارامترهای رگرسیون و تعیین تابع نرخ مخاطره پایه را بیان کردند. سپس دو نوع آزمون ترسیمی و تحلیلی برای آزمون نیکویی برازش مدل معرفی شد. در بخش بعدی تحقیق، بسط‌های مدل PHM مانند مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی، مدل زمان خرابی شتاب‌یافته، مدل نرخ تعمیرات متناسب معرفی شد، که در نهایت چندین نرم‌افزارهای کاربرپسند برای تحلیل‌ها در زمینه قابلیت اطمینان معرفی شد (Kumar and Klefsjö, 1994a). یک سال بعد محققین مذکور از مدل PHM برای تحلیل قابلیت اطمینان کابل انتقال الکتریسیته، در لودرهای معدنی استفاده کردند (Kumar and Klefsjö, 1994b). در سال ۱۹۹۵ نیز کومار مدل PHM را برای سیستم‌های تعمیرپذیر گسترش داد (Kumar, 1995). تحقیقات کومار و وستبرگ در سال ۱۹۹۶ نیز بر روی ماشین LHD ادامه داشت و طی آن فرض ثابت بودن فاکتورهای ریسک در طول زمان برای مدل PHM مورد ارزیابی قرار گرفت. در این رساله روش نموداری بر اساس تابع تجمعی خرابی برای ارزیابی واقع‌بینانه بودن این فرض ارائه شده است (Kumar and Westberg, 1996). پارساد و رائو (۲۰۰۲) سه نمونه مطالعاتی مختلف را مورد بررسی قرار دادند. در نخستین مورد با استفاده از مدل غیرپارامتریک PHM داده‌های تجهیزات الکترومکانیکی در سیستم‌های LHD تحت فرآیند تجدیدشونده با فاکتورهای ریسک مانند مشکلات الکتریکی، هوای فشرده و خرابی کابل مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج حاصل با مدل پارامتریک ویبول مقایسه شد. در دومین مورد برای ارزیابی بازه‌های بهینه نت پیشگیرانه از داده‌های واحد قدرت حرارتی تحت فرآیند پوآسون ناهمگن با فاکتورهای ریسک مانند خرابی دیگ بخار، الکتریکی و توربین استفاده شد. برای ارزیابی این کار از تخمین‌گر غیر پارامتریک نرخ مخاطره تجمعی استفاده شد. در آخرین مطالعه نرخ مخاطره حاصل از داده‌های موتور D.C. با فاکتورهای ریسک شامل ولتاژ، نوع کارکرد و جریان بار تحت شرایط مختلف عملیاتی برای دو مدل PHM- غیرپارامتریک و مدل نیمه پارامتریک ویبول- PHM مقایسه شدند. نتیجه تحقیق حاکی از آن بود که مدل PHM روشی مناسب برای تحلیل سیستم‌های تعمیرپذیر است و به‌کارگیری آن برای داده‌هایی با فرآیند پوآسون ناهمگن نیز امکان‌پذیر است (Prasad and Rao, 2002). طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ قدرتی و همکاران برای

نخستین بار در مدیریت قطعات یدکی برخی از اجزای ماشین‌آلات معدنی مانند واشرها و سیستم ترمز لودرهای معدن روباز و جک‌های هیدرولیکی LHD از ترکیب تأثیرات شرایط محیطی مانند آب‌وهوا، رطوبت، مهارت اپراتور و ... بر قابلیت اطمینان استفاده کردند. آنان در این تحقیقات علاوه بر تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز، زمان تجدید انبار (خرید مجدد برای پر کردن انبار) را نیز تعیین کردند (Ghodrati et al., 2003, 2010, 2012, Ghodrati and Kumar, 2005a, 2005b). قدرتی همچنین به مقایسه مدل‌های نیمه پارامتریک PHM نمایی و ویبول پرداخت. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که می‌توان از مدل ویبول - PHM برای تخمین قطعات یدکی تعمیرناپذیر با نرخ خرابی متغیر استفاده کرد، درحالی‌که مدل نمایی - PHM تنها در مورد نرخ خرابی ثابت صادق است (Ghodrati, 2006). عباس برآبادی در سال 2011 از مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده در تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان استخراجی معدن بوکسیت استفاده نمود (Barabadi et al., 2011a). ویجایا در سال 2012 رساله دکتری خویش را در زمینه روش‌های بهبود قابلیت دسترسی دستگاه لقی‌گیر ارائه کرد. وی در این تحقیق خرابی‌های دستگاه را مورد مطالعه قرار داد و زیرسیستم‌های بحرانی (سیستم مرکزی روان کاری، چکش هیدرولیکی و بازوی دستگاه) در تشکیل زمان‌های توقف و دلایل وقوع آن‌ها را بیان کرد. ویجایا همچنین به بهینه‌سازی هزینه‌های لازم برای بهبود قابلیت اطمینان پرداخت. نتیجه تحلیل فوق نشان داد که سرمایه‌گذاری برای بهبود قابلیت اطمینان بیش از 84/5 درصد امکان‌پذیر نخواهد بود (Rahadiyan, 2012).

۳-۵- قابلیت تعمیرپذیری

یکی دیگر از شاخص‌های مرتبط با مفهوم قابلیت اعتماد که کمتر مورد توجه قرار گرفته، قابلیت تعمیرپذیری است. با توجه به شباهت این شاخص و تحلیل‌های آن با قابلیت اطمینان کمتر به‌طور مستقل بررسی شده است و عموماً به همراه قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی مطرح بوده است. لذا پیشینه قابلیت تعمیرپذیری با دو شاخص قبلی گره خورده و ورود آن در حیطه معدنی نیز در اوایل دهه نود با کار کومار و هانگ به همراه قابلیت دسترسی بوده است (Kumar and Huang, 1993). در سال‌های بعد نیز واگناژ و همکاران (Vagenas et al., 1997, 2003)، سامانتا و همکاران (Samanta et al., 2004)، جواد برآبادی و کومار (Barabady and Kumar, 2008; Barabady, Javad, 2005) و حسینی و همکاران (Hoseinie et al., 2011b) به تحلیل قابلیت تعمیرپذیری با استفاده از روش کلاسیک (داده‌های زمانی) پرداختند. از آنجایی که شرح این تحقیقات در بخش‌های قابلیت دسترسی و اطمینان ذکر شد، در این

قسمت از تکرار مجدد خودداری می‌شود، در ادامه نیز به محدود کارهایی اشاره می‌شود که مستقلاً به قابلیت تعمیرپذیری پرداخته‌اند.

الولی و همکاران در سال ۲۰۰۸ قابلیت تعمیرپذیری سیستم‌های مکانیکی هفت دستگاه شاول کابلی را مورد مطالعه قرار دادند که داده‌های زمان انجام تعمیرات برای بازه ۱۲ ماه از معادن زغال ترکیه جمع‌آوری شده بود. فرآیند کلی در این تحقیق مشابه کار ارائه شده توسط کومار و همکاران (Kumar et al., 1989) است. با این تفاوت که در این تحقیق برای ارزیابی فرض توزیع مستقل داده‌ها (خودهمبستگی) از روش آزمون ریشه واحد استفاده شده است. نتیجه تحقیق حاکی از آن بود که دو دستگاه از هفت دستگاه در وضعیت بحرانی قرار دارند و نیازمند توجه بیشتری می‌باشند (Elevli et al., 2008). در آخرین تحقیقات در رابطه با قابلیت تعمیرپذیری به روش کلاسیک نیز ویجایا و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی زمان توقف در ماشین لقی‌گیری در معادن زیرزمینی پرداختند (Wijaya et al., 2012). در سال ۲۰۱۱ عباس برآبادی و همکاران برای نخستین بار به تحلیل قابلیت تعمیرپذیری با در نظر گرفتن شرایط محیطی پرداختند. در این تحقیق برای تحلیل قابلیت تعمیرپذیری سرنده دپارتمان سنگ‌شکنی معدن بوکسیت جاجرم از روش مدل تعمیرات متناسب و مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده استفاده شد. شرایط محیطی مانند دما، نوبت، موقعیت مکانی، باد، یخبندان و باران به‌عنوان هفت فاکتور ریسک در نظر گرفته شد. تحلیل اولیه انجام گرفته با مدل تعمیرات متناسب نشان داد که فاکتور ریسک در طول زمان متغیر است. در ادامه داده‌ها از لحاظ دما در دو لایه بالاتر از ۲ و زیر ۲ درجه جدا شده و توسط مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده تحلیل شدند. در نتیجه تحلیل انجام گرفته، دو فاکتور ریسک نوبت و موقعیت مکانی به‌عنوان مؤثرترین عوامل مشخص شدند و در نهایت با افزودن نرخ تعمیرات اساسی مربوط به هر لایه، نرخ تعمیرات کلی سیستم به‌صورت ترکیبی از دو فاکتور ریسک و تابع نرخ تعمیرات اساسی بیان شد (Barabadi et al., 2011b).

۳-۶- قابلیت پشتیبانی

قابلیت پشتیبانی به‌عنوان آخرین شاخه از قابلیت اعتماد، سعی در بیان مفهوم پشتیبانی و تأمین منابع مورد نیاز برای نت (ابزارآلات، کارکنان، قطعات یدکی و ...) را داشته تا از بروز تاخیرات تدارکاتی و اتلاف زمان جلوگیری کند. قدرتی در سال ۲۰۰۵ برای نخستین بار در حیطه مهندسی معدن به بررسی پشتیبانی از منظر انبارداری و تدارکات قطعات یدکی در مورد تجهیزات لودرهای معدنی روباز و زیرزمینی پرداخت. قدرتی و همکاران در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ نیز به بسط بیشتر این موضوع کمک نمود. تحقیقات آنان به ترکیب تأثیرات شرایط محیطی با قابلیت اطمینان و لحاظ کردن این

ترکیب در برنامه‌ریزی قطعات یدکی مربوط می‌شود. آنان در تحقیقات خود اجزای تعمیرناپذیر تجهیزات معدنی مانند سیستم ترمز، جک‌های بالابر و واشرها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیقات عواملی مانند مهارت اپراتور، مهارت گروه نت، کیفیت روغن هیدرولیک، شرایط آب‌وهوایی و محیط فیزیکی به‌عنوان فاکتورهای ریسک در نظر گرفته و سپس برای ترکیب فاکتورهای ریسک با قابلیت اطمینان از مدل PHM و عمدتاً دو بسط از این مدل یعنی ویبول - PHM و نمایی - PHM استفاده شده است. دو مدل مذکور مبتنی بر حالت نیمه پارامتریک از مدل PHM و معتبر بودن فرض توزیع مستقل و یکسان داده‌ها می‌باشد. در این تحقیقات پس از تخمین تعداد قطعات یدکی، تعداد موجودی قطعات یدکی در انبار را نیز برآورد شده، زمان خریداری مجدد قطعات برحسب تعداد قطعات یدکی موجود در انبار نیز بیان شده است. در سال‌های اخیر عباس برآبادی (۲۰۱۲) و نان و همکاران (۲۰۱۱) تدارکات قطعات یدکی را با همان رویکرد ارائه شده توسط قدرتی، در زمینه سیستم‌های الکترونیکی و قطعات یدکی اسکاواتور بیل چرخشی به‌کار گرفته (Barabadi, 2011; Nan et al., 2011). مقایسه استفاده از دو مدل نمایی - PHM با ویبول - PHM در تخمین قطعات یدکی نیز توسط قدرتی نشان داد که مدل نمایی از لحاظ جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و تحلیل آن‌ها بسیار ساده‌تر بوده درحالی‌که مدل ویبول برای محاسبه دقیق تعداد کل قطعات یدکی مناسب است. ضمن اینکه تأثیر فاکتورهای ریسک بر مدل نمایی در مقایسه با مدل تجدیدپذیر ویبول تأثیر بیشتری دارند (Ghodrati, 2006). قدرتی همچنین به تحلیل ریسک در زمینه مدیریت پشتیبانی نیز پرداخته است (Ghodrati et al., 2007). در تحقیقات انجام شده در رابطه با پشتیبانی، تمرکز اصلی صرفاً بر قطعات یدکی بوده است، درحالی‌که مقوله دیگری تحت عنوان نت نیز حتماً باید بررسی شود.

نت به‌عنوان یک سیستم منسجم عهده‌دار نقش کلیدی در دستیابی به اهداف سازمانی و مدیریت است. در صورت گزینش سیاست صحیح و اجرای دقیق، نت می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بهره‌وری شود.

مقوله نت مبتنی بر قابلیت اطمینان در کارهای معدنی در سال ۱۹۹۲ توسط کومار و کلسجو مطرح شد (Kumar et al., 1992). در سال ۲۰۰۴ نیز سامانتا و همکاران پس از تحلیل قابلیت اطمینان سیستم LHD به روش کلاسیک بازه‌های نت را به‌ازاء سطوح مختلف نت محاسبه کردند (Samanta et al., 2004). جواد برآبادی و کومار در سال ۲۰۰۵ روندی مشابه را برای زیرسیستم‌های سرند و نوارنقاله از دپارتمان سنگ‌شکنی اجرا کردند (Barabady, Javad, 2005). در سال‌های بعدی مشابه همین روند مجدداً توسط جواد برآبادی و حسینی و همکاران در مورد دپارتمان سنگ‌شکن و دستگاه شیرر به کار

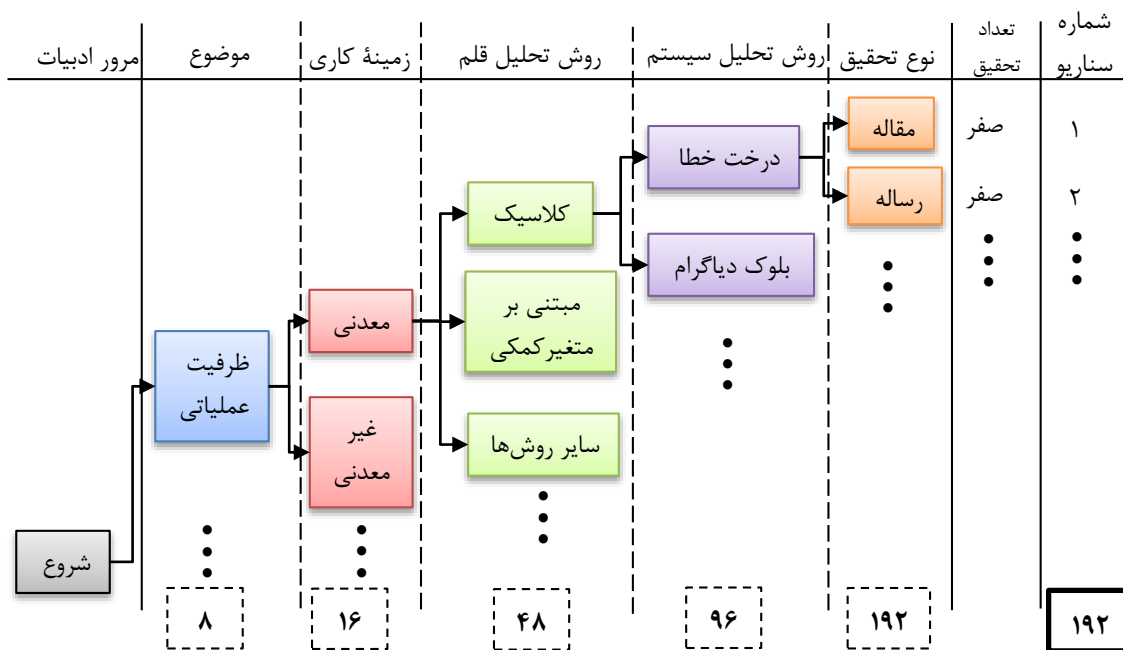
گرفته شد که در تمام این تحقیق‌ها استراتژی نت با فرض دو حالت GAN یا BAO پیشنهاد شده است (Barabady and Kumar, 2008; Barabady, Javad, 2005; Hoseinie et al., 2011b, 2012a).

۳-۷- تحلیل آماری پیشینه موضوع در زمینه‌های مختلف

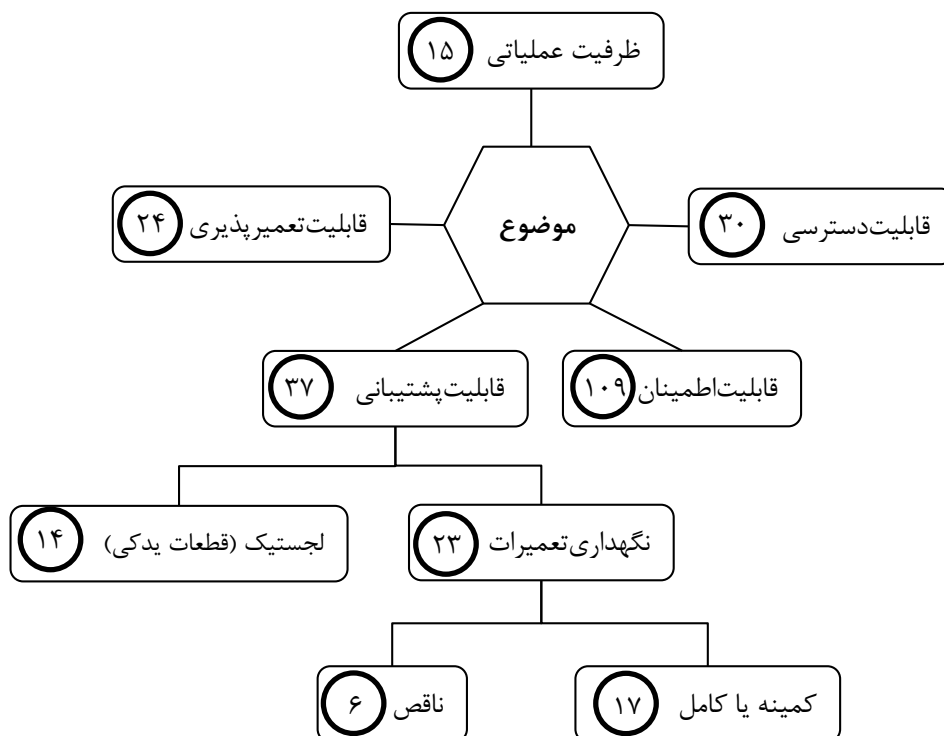
همان‌طور که اشاره شد، در این بخش تحلیل آماری از کارهای انجام گرفته در زمینه‌های مختلف مهندسی در رابطه با موضوع ارائه شده است. در این رساله عناوین زیر مورد توجه قرار گرفته است:

- ا. اولویت تحقیق برای رساله
- ب. موضوع تحقیق (ظرفیت عملیاتی، قابلیت دسترسی، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، ریسک، پشتیبانی: نت (کامل و ناقص)، قطعات یدکی)
- ج. زمینه کاری (معدنی یا غیر معدنی)
- د. روش تحلیل (دستگاه‌های: کلاسیک، مبتنی بر فاکتور ریسک، سایر روش‌ها- سیستم: روش درخت خطا و نمودار بلوکی قابلیت اطمینان)
- ه. ساختار سیستم (سیستم، زیرسیستم، قطعه یا جزء)
- و. نوع تحقیق (رساله یا رساله)
- ز. پایگاه‌های علمی

گزارش به‌گونه‌ای تنظیم شده که اگر تنها در ۵ سطح: موضوع، زمینه کاری، روش تحلیل، نوع تحقیق و ساختار سیستم در نظر گرفته شود، ۱۹۲ سناریوی مختلف در تعیین هویت تحقیقات به دست خواهد آمد. در شکل ۳-۱، برای ادراک بهتر موضوع بخشی از تقسیم‌بندی تحقیقات مروری به روش درخت رویداد (ETA) برای سناریوی شماره ۱: با موضوع ظرفیت عملیاتی، در زمینه معدن، روش تحلیل دستگاه‌های از نوع کلاسیک، روش تحلیل سیستم از نوع درخت و نوع تحقیق رساله، پژوهشی یافت نشد که با مقدار صفر در نخستین ردیف ستون تعداد تحقیق مشخص شده است. تحقیقات انجام گرفته در طول پنج دهه (از اواسط دهه ۱۹۶۰ تاکنون)، در رابطه با موضوع رساله و زیرشاخه‌های آن مطابق شکل ۳-۲ تقسیم‌بندی شده است. اعداد داخل هر مستطیل نشان‌دهنده تعداد مطالعات انجام گرفته در رابطه با آن موضوع می‌باشد، به طور مثال ۱۵ پژوهش در رابطه با ظرفیت عملیاتی وجود دارد. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد، بیشترین کارهای انجام گرفته متعلق به قابلیت اطمینان و کمترین میزان تحقیقات نیز در رابطه با ظرفیت عملیاتی است. فراوانی تحقیقات انجام گرفته در زمینه قابلیت اطمینان را می‌توان در قدمت حدوداً هشتاد ساله و کاربرد گسترده آن در زمینه‌های مختلف مانند هوافضا، تسهیلات نظامی، صنعت حمل‌ونقل (قطار، کشتی و ...) تولید و انتقال برق و ... بیان کرد.

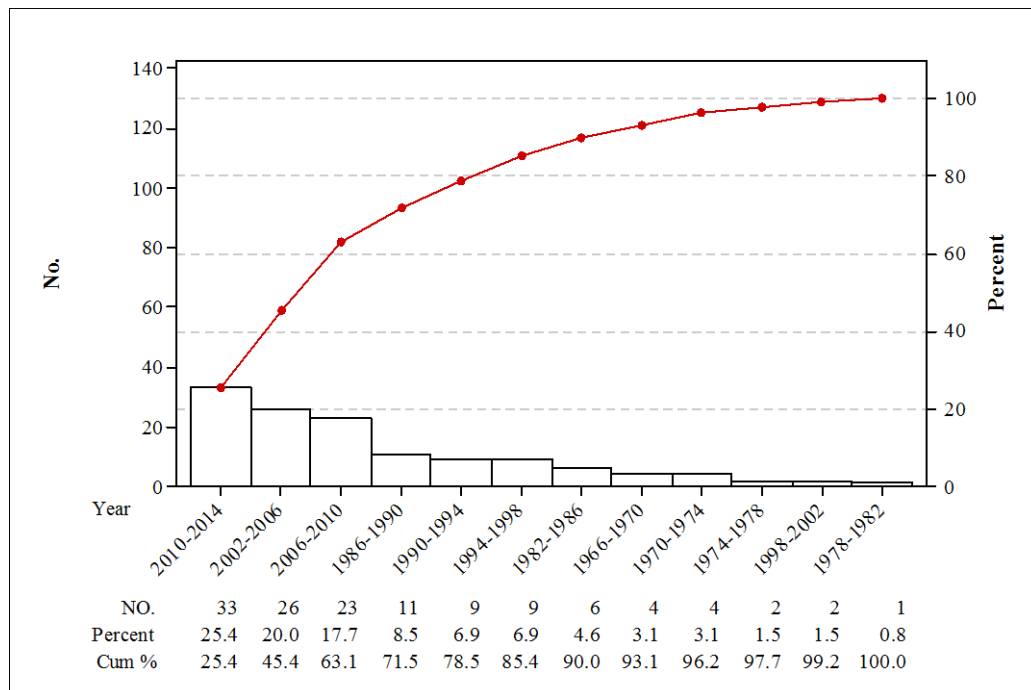


شکل ۳-۱- سناریوهای مختلف برای تحقیقات مروری



شکل ۳-۲- تقسیم‌بندی مرور ادبیات بر اساس موضوع

از سوی دیگر مهندسی قابلیت اطمینان اساس و سنگ بنای سایر تحقیقات و روش‌های ارائه شده است که این مسئله سبب همبستگی بین تحقیقات شده و لذا ممکن است تحقیقی به بیش از یک موضوع پرداخته و در چندین زمینه وارد شده باشد. این تحقیقات، در کل شامل ۱۳۰ تحقیق بوده که از این مقدار ۱۲۳ تحقیق (۹۵ درصد) متعلق به مقالات علمی معتبر و ۷ تحقیق (۵ درصد) رساله دکتری دانشگاه‌های معتبر و متخصص در زمینه قابلیت اطمینان است. همچنین از ۱۳۰ تحقیق مروری، ۶۶ مورد (۴۹ درصد) در زمینه معدنی و ۶۵ مورد (۵۱ درصد) مربوط به سایر زمینه‌های پژوهشی (انسانی، صنایع مختلف و ...) است. تحلیل فراوانی تحقیقات بر اساس تاریخ ارائه (شکل ۳-۳) نشان می‌دهد که پس از ثبات طی دو دهه اول (حدود ۷ درصد از تحقیقات)، در دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ با گسترش مدل‌سازی آماری تعداد کارهای انجام گرفته نیز افزایش یافته است (حدود ۲۱ درصد از تحقیقات).



شکل ۳-۳- تحلیل پارتوی مرور ادبیات بر اساس سال ارائه پژوهش

از سال ۲۰۰۰ با افزایش رویکرد جهانی به ماشین‌آلات و مهندسی قابلیت اطمینان فعال‌ترین دوران برای تحقیقات در زمینه‌های مرتبط با آن شروع شد. از این رو عمده تمرکز تحقیقات مروری بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ (۶۲/۳ درصد) است. همچنین تعلق یافتن بیشترین تعداد (۳۳ تحقیق ۲۵/۴ درصد) به بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ نشان از به‌روز بودن کار انجام گرفته دارد و این تمرکز از نوپایی کلیت موضوع حکایت می‌کند. لذا موضوع رساله در حال حاضر از پتانسیل بالایی برخوردار است.

۳-۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

مرور ادبیات انجام گرفته حاکی از آن است که محققین عمدتاً به سمت قابلیت اطمینان تمایل داشته و سایر شاخص‌های رفتاری سیستم (قابلیت تعمیرپذیری، دسترسی و پشتیبانی) کمتر مورد توجه بوده است، درحالی‌که مفهوم قابلیت اعتماد همه این شاخص‌ها را دربر می‌گیرد و بازه عمر سیستم را موشکافانه‌تر مورد بررسی قرار می‌دهد. از سوی دیگر هدف اکثر محققین از تحلیل قابلیت دسترسی، اطمینان و تعمیرپذیری، دستیابی به عملکرد سیستم و تنظیم یا پیشنهاد سیاست نت برای سیستم یا زیرسیستم یا جزء حفظ یا بهبود وضعیت بوده است و مقوله ظرفیت عملیاتی در قالب سیستم کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در مورد نت نیز تمایل کلی به سمت ساده‌سازی (نت کامل یا کمینه) بوده است و تأثیرات واقعی‌تر نت (نت ناقص) کمتر مورد توجه قرار گرفته و به‌ویژه در زمینه معدنی به تحقیقی در این مورد برخورد نشده است. در کارهای انجام گرفته، عمدتاً تنها از داده‌های زمانی (روش کلاسیک) در تحلیل‌ها استفاده شده و در صورت لحاظ کردن تأثیر شرایط محیطی نیز تحلیل کاملی انجام پذیرفته است. دلایل این موضوع می‌تواند در دسترس نبودن داده‌های مورد نیاز یا به‌صورت کلی‌تر، نوپایی و جوانی مقوله ظرفیت عملیاتی، به‌ویژه در مورد معدنکاری باشد.

فصل چهارم

مطالعه موردی و چارچوب اجرا

مس سونگون



۴-۱- مقدمه

در این فصل نخست نمونه مطالعاتی معرفی می‌شود. سپس به مرزبندی ناوگان استخراجی معدن به عنوان نخستین و مهمترین مرحله تحلیل رفتاری سیستم مشخص می‌شود. عملکرد کلی یک سیستم نتیجه ترکیب و برآیند عملکرد زیرسیستم و اجزای مختلف است، لذا تضمین تولید و برآورد دقیق از رفتار کلی یک سیستم نیازمند شناسایی دقیق رفتار زیرسیستم (و اجزای) و مدلسازی مناسب تراکنش بین آن‌ها در قالب یک سیستم است. در آخرین بخش از این فصل نیز چارچوب مطالعه موردی ارائه شده است. در این زیربخش ابتدا الگوریتم ساده‌ای از اهمیت اجرای کار بیان شده و در ادامه الگوریتم جامع با شرح مختصری از تحلیل‌های مورد نیاز برای دستیابی به تضمین تولید، اهمیت سیستم، تخمین قطعات یدکی و سیاست نگهداری و تعمیرات مطرح شده است.

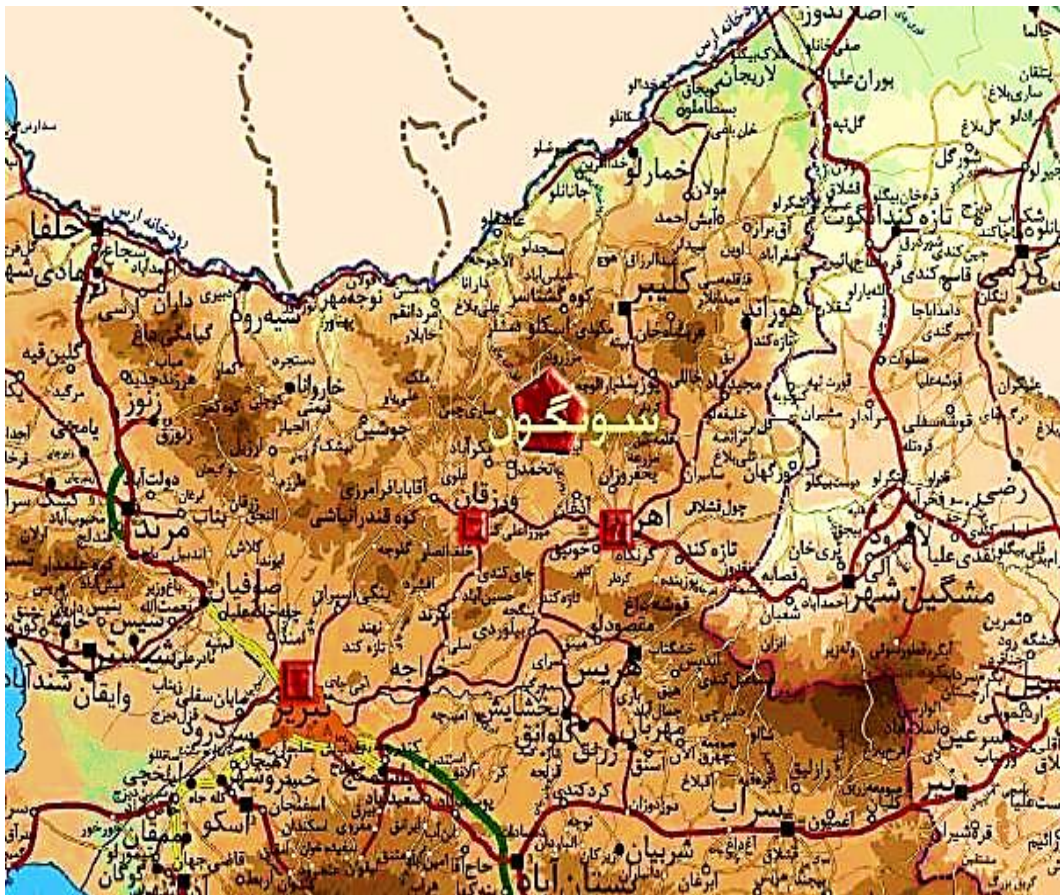
۴-۲- موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون

کانسار سونگون در ۸۵ کیلومتری شمال غرب شهرستان اهر و ۳۵ کیلومتری شمال ورزقان، با مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۲ دقیقه و ۲۰ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۸ درجه و ۴۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض جغرافیایی قرار دارد. ناحیه فراگیر کانسار کوهستانی است و بلندای آن از ۱۵۰۰ تا ۲۷۰۰ متر است. میزان بارش این منطقه زیاد است و زمستان‌های سرد و طولانی همراه با برف دارد. دامنه‌های شمالی پوشیده از جنگل است و کارهای معدنی در زمستان با دشواری انجام می‌گیرد. راه کنونی دسترسی به معدن از طریق ورزقان با جاده‌ای آسفالت‌ه به طول ۳۲ کیلومتر برقرار است. دسترسی به کانسار از طریق اهر و از راه کوهستانی به درازای ۴۰ کیلومتر نیز امکان‌پذیر است بلوکی که کانسار در آن قرار دارد به‌وسیله دو رودخانه دائمی سونگون چای و تچیر چای دور زده می‌شود. این دو رودخانه در پایانه بلوک در گوشه شمال شرقی به یکدیگر می‌پیوندند. رودخانه حاصل از به هم پیوستن دو رودخانه مذکور از سمت شمال به رودخانه ارس می‌پیوندد. مرز جنوبی و شرقی این کانسار، منطبق بر رودخانه سونگون و

مرز شمالی آن در محل برخورد با رودخانه پخیر و حد غربی آن ارتفاعات مشرف به کانسار است. در شکل ۴-۱ می‌توان موقعیت معدن را مشاهده کرد. در این شکل تراز دره ۱۷۶۰ متر است و تراز معدن بیش از ۲۳۶۰ متر است. " بلندترین و پست‌ترین نقاط درروی کانسار، به ترتیب ۲۴۵۰ متر (داش دیبی) و ۱۷۰۰ متر (بستر سونگون چای) با اختلاف ۷۵۰ متر است " (Jafarri, 2013).

۳-۴- شرایط آب‌وهوایی منطقه

زمستان‌های سرد و یخبندان و تابستان‌های معتدل از خصوصیات آب‌وهوایی منطقه سونگون است. میانگین حداکثر درجه حرارت در تابستان ۳۳ درجه سانتی‌گراد و در زمستان ۲۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. مقدار حداکثر بارندگی در محل ۴۰۰ میلی‌متر در سال است و مقدار رطوبت نسبی در سال بین ۵۲ تا ۸۵ درصد متغیر است. غالباً جهت وزش باد جنوب غربی است. به علت رطوبت هوا، اراضی این منطقه دارای پوشش گیاهی نسبتاً متراکم و جنگلی است و اکثراً از درختان راش، بلوط، ون و افرا پوشیده شده است (Jafarri, 2013).



شکل ۴-۱ - نقشه جغرافیایی و موقعیت معدن مس سونگون

۴-۴- معدن مس سونگون

سابقه معدنکاری در معدن مس سونگون به دو قرن پیش (دوره قاجاریه) برمی گردد که استخراج در آن زمان به صورت زیرزمینی صورت می پذیرفته است. پس از احراز وجود ذخیره مس پورفیری در این منطقه در سال ۱۳۵۶ و انجام مطالعات مقدماتی در سال ۱۳۷۴ عملاً پیش باطله برداری ابتدائی از سال ۱۳۷۳ آغاز شد. با تکمیل مطالعات، عملیات باطله برداری شروع شده و ساخت کارخانه تغلیظ از سال ۸۰ شدت گرفت تا اینکه در نیمه دوم سال ۸۵ عملاً بهره برداری از این معدن با ارسال ماده معدنی به کارخانه آغاز شد. روش استخراج در معدن سونگون روباز است و با مطالعه و بررسی های به عمل آمده توسط کارشناسان داخلی و خارجی بهینه سازی حد نهایی کاواک معدن به همراه مسیرهای ارتباطی مشخص شده است. ذخیره زمین شناسی کانسار در حدود ۷۹۶ میلیون تن و عمر معدن ۳۲ سال با عیار متوسط ۰/۶ درصد مس برآورد شد.

۴-۵- مرزبندی (تعیین سیستم، زیرسیستم و اجزای) سیستم استخراجی معدن سونگون و تعیین محدودیتها و فرضیات

برای دستیابی به اهداف مورد نظر در رساله باید سیستم و زیرسیستم های مربوط مشخص باشند تا رفتار آنها تحلیل شود. از این رو روش شناسی با تعریف **مرزها** در سطوح مختلف، اجزای، زیرسیستم و سیستم آغاز می شود. مرزها را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

- مرز سیستم بر اساس اجزای داخلی سیستم تعریف می شود تا از همپوشانی با سیستم های مجاور جلوگیری شود.
- مرز زیرسیستم: زیرسیستم را می توان به عنوان یک گروه منطقی از اجزا در نظر گرفت می شود که توانایی انجام فعالیت مورد نظر را دارد. به عبارت ساده تر زیرسیستم در صورت جدا شدن از سیستم به صورت مستقل یا نصب در سیستم دیگر قادر به انجام فعالیت باشد که پیش از این داشته است.
- مرز اجزای نیز به عنوان سطحی تعریف می شود که داده های مورد نیاز برای تخمین یا محاسبه ویژگی های آن قابل دستیابی باشد. در واقع جزء پایین ترین سطح سیستم است که قابل تجزیه نیست و در صورت خرابی تعمیر نشده و تعویض خواهد شد.

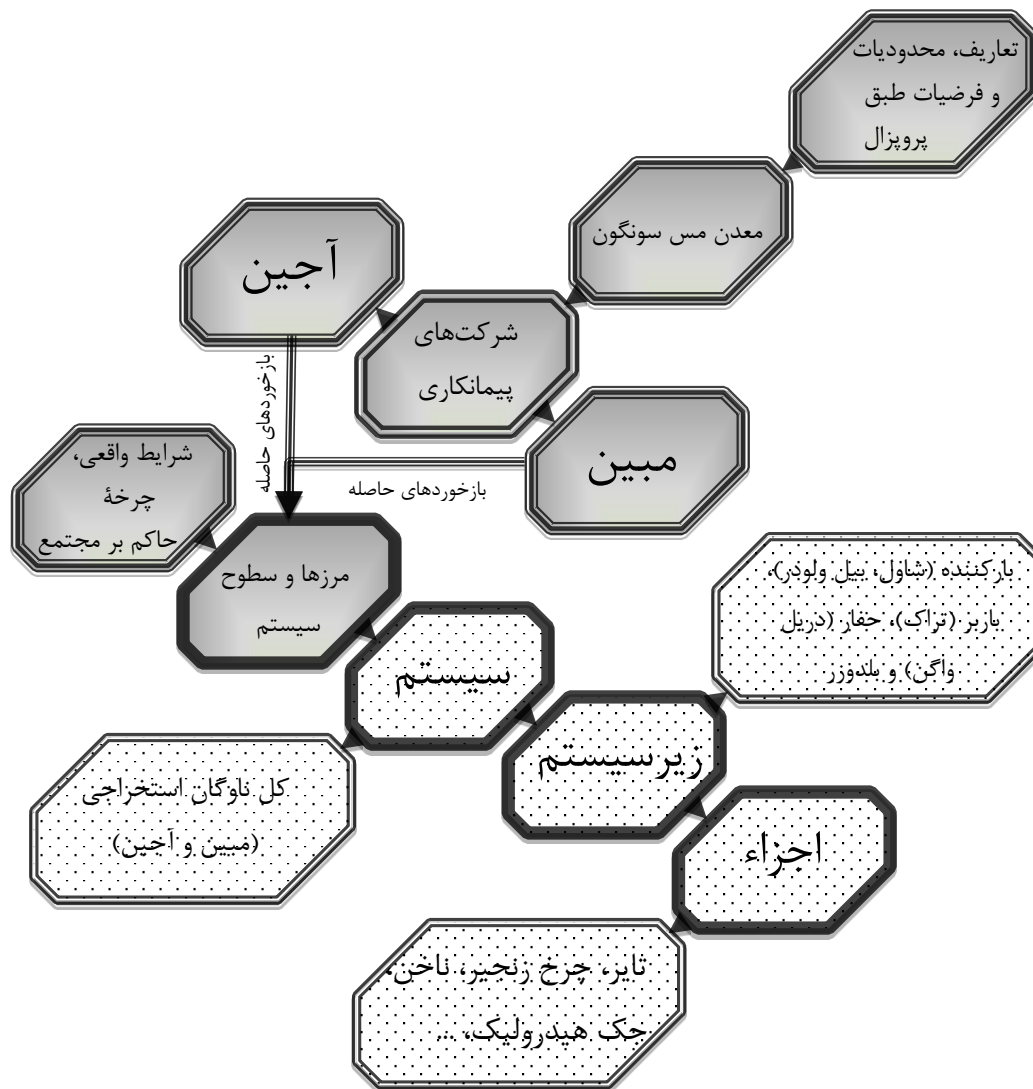
تحت این تفسیر، مرزهای جزء، زیرسیستم و سیستم برای تعیین پارامترهای قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری تجهیزات در مطالعه موردی باید به دقت تعریف شود. تنها خرابی های واقع در داخل مرزها

در محاسبات وارد خواهند شد. مرزبندی، تأثیر مستقیم در جمع‌آوری داده نیز خواهد داشت. لذا مرزبندی باید با داده‌های موجود سازگار باشد.

در اولین گام، برای تطبیق محدودیت‌ها و فرضیات به معدن رجوع شد و کل معدن بر حسب ماشین‌آلات موجود و تعلق این تجهیزات به دو شرکت پیمانکاری اصلی به دو دسته کلی تقسیم شد که در شکل ۲-۴ روند کلی از فعالیت انجام گرفته ترسیم شده است. در گام بعدی، با توجه به تقسیم‌بندی انجام گرفته به شرکت‌های پیمانکاری مراجعه شد. طی این بازدیدها، ملاقات و مصاحبه‌ها با متخصصین امر صورت گرفته و محدودیت‌ها، فرضیات، داده‌های مورد نیاز و اهداف رساله برای ایشان تفهیم شده و بازخوردهایی (شکل ۲-۴، خطوط دوتایی) از کلیت سیستم، بخش‌های ثبت داده، نحوه ثبت، داده‌های ثبت شده، ... دریافت شد. بر اساس این بازخوردها و فرضیات ارائه شده، مرزها و سطوح مختلف سیستم استخراجی معدن به صورت شکل ۲-۴ تعیین شد:

- تنها فازهای عملیاتی و نگهداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد (به عنوان مثال فاز طراحی مورد نظر نخواهد بود)، در عمل نیز غیر از این امکان‌پذیر نیست، چرا که از عمر طراحی معدن چندین سال گذشته و پیمانکاران موجود نه بر اساس طرح موجود، بلکه بر اساس توانایی مالی و سرمایه شرکت اقدام به تجهیز کارگاه کنند. حجم حمل شده مهم‌ترین عامل است و سایر موارد همچون، تناسب نوع ماشین با ابعاد هندسی معدن، تناسب ماشین‌آلات با یکدیگر، تخصیص ماشین مناسب به پله مناسب و سایر پارامترهای طراحی در اولویت‌های بعدی قرار دارند.
- تنها محیط معدنی مورد توجه است و سایر محیط‌های عملیاتی در این پژوهش مطالعه نمی‌شود، همان‌طور در توصیف نمونه مطالعاتی اشاره شد، معدن سونگون کارخانه فراوری نیز دارد که فعالیت‌ها و حتی پیمانکاران فعال در این بخش نیز مستقل از واحد معدن است. فعالیت پژوهشی متمرکز بر معدن، شرکت‌های فعال در این واحد و ماشین‌آلات مربوط است.
- فاکتورهای ریسک بر اساس توانایی بانک داده موجود تعیین شود، این فرض یکی از پارامترهای مؤثر در تشکیل بانک داده، و تعیین فاکتورهای ریسک است و در عمل بدون استفاده از اسناد ثبت شده و داده‌های موجود بررسی رفتار ماشین‌آلات امکان‌پذیر نیست. ثبت شخصی داده‌های مورد نیاز در عمل با توجه به گستردگی کار غیرممکن و در صورت انجام نیز دوباره کاری، هزینه‌بر و از همه مهم‌تر بسیار وقت‌گیر بود. در نتیجه بر اساس بانک‌های داده موجود در بخش‌های مختلف معدن به فاکتورهای ریسک تعیین شد تا با استفاده از آن‌ها رفتار واقعی سیستم توصیف شود.

- برای پیش‌بینی شاخص‌های عملکردی سیستم از داده‌های تاریخی ثبت شده استفاده می‌شود، طبق فرض ارائه شده و شرایط حاکم بر مطالعه موردی یکی از مهم‌ترین منابع مورد استفاده، اسناد ثبت شده توسط بخش‌ها مختلف بود که در بخش گردآوری داده تشریح می‌شود.



شکل ۴-۲- فرایند کلی تعیین مرزها و محدودیت‌ها

- ناوگان در سطوح: اجزای، زیرسیستم و سیستم مورد بررسی قرار خواهد گرفت، ناوگان طبق فرض در نظر گرفته در سه سطح بررسی می‌شود. مطابق شکل ۴-۲ سطوح مختلف مورد تحلیل در این رساله به صورت زیر مرزبندی شد:
 - سیستم، در هر بخش قسمتهایی از ناوگان استخراجی معدن به عنوان سیستم در نظر گرفته شده است. ناوگان از ماشین حفاری، شاول یا لودر، کامیون‌ها و بلدوزر تشکیل می‌شود.

○ زیرسیستم، ماشین‌های بارگیری (لودر، شاول، بیل مکانیکی)، باربری (تراک)، حفاری (دریل واگن) و بلدوزر به‌عنوان زیرسیستم در نظر گرفته شده است. تحلیل در این سطح برای قابلیت اعتماد و تعیین سیاست نگهداری و تعمیرات انجام می‌شود. بازه تحلیل برای این سطح از اول فروردین‌ماه ۱۳۹۲ تا آخر خردادماه ۱۳۹۳ به مدت ۱۵ ماه در نظر گرفته شده است. در جدول ۴-۱ زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی معدن مشخص شده است.

جدول ۴-۱- زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی معدن مس سونگون

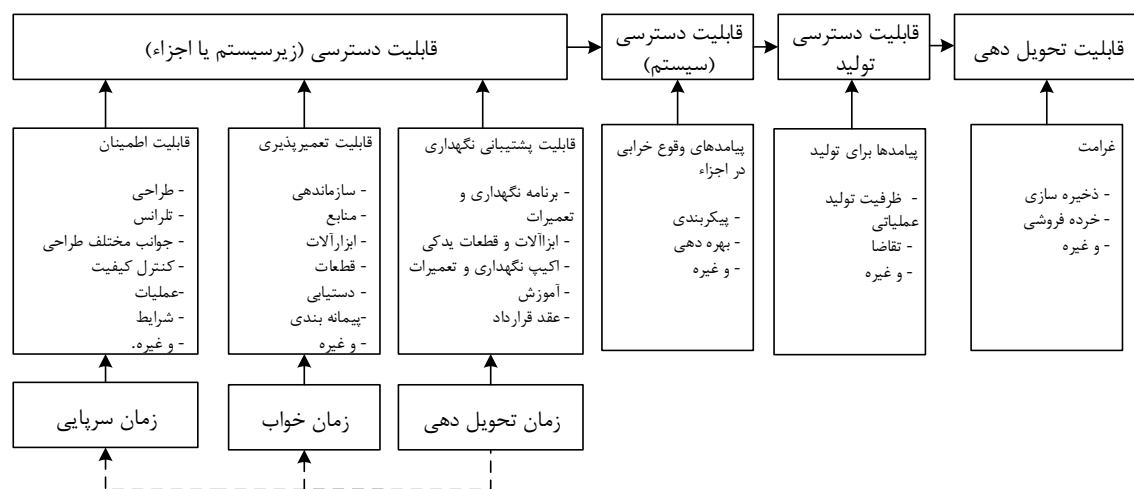
زیرسیستم‌های باربری		زیرسیستم‌های بلدوزر		زیرسیستم‌های حفاری		زیرسیستم‌های بارگیری	
مدل دستگاه	نام دستگاه	مدل دستگاه	نام دستگاه	مدل دستگاه	نام دستگاه	مدل دستگاه	نام دستگاه
HD-785-5	تراک کوماتسو	D8N	بلدوزر کاتریپیلار	TD-222	دریل واگن بهرلر	WA470-3	لودر کوماتسو
HD-325-6	تراک کوماتسو	D10N	بلدوزر کاتریپیلار	RBH-30	دریل واگن هلمن	988-B	لودر کاتریپیلار
777C	تراک کاتریپیلار	D11N	بلدوزر کاتریپیلار	D245S	دریل واگن تامراک	WA600-3A	لودر کوماتسو
		D155A	بلدوزر کوماتسو	D245S	دریل واگن تامراک	PC-800	بیل کوماتسو
				SK35	DR-DREIL	870	بیل هیتاچی
						PC-800	بیل کوماتسو
						9350	شاول لیپهر

○ اجزاء، قطعاتی مانند لاستیک، زنجیر ماشین‌آلات چرخ زنجیری، ناخن ماشین‌های بارگیری، موتور و گیربکس را می‌توان به عنوان جزء در نظر گرفت. این سطح از سیستم نیز برحسب داده‌های موجود و شرایط واقعی در نظر گرفته شد. تحلیل سیستم در این سطح به تخمین تعداد قطعات یدکی مربوط می‌شود و تنها داده‌های جمع‌آوری شده از شرکت مبین در این زمینه قابل کاربرد بود. در این رساله با توجه به هزینه‌های قابل ملاحظه لاستیک در شرایط معدنی و کامل بودن اطلاعات مربوط به این جزء در ماشین‌آلات چرخ لاستیکی (لودر و تراک) بانک داده‌های کارکرد لاستیک برای ۱۱

سال (از ابتدای سال ۱۳۸۳ تا انتهای سال ۱۳۹۴) تشکیل شده است و تخمین قطعات یدکی برای آن‌ها انجام می‌شود.

۴-۶- چارچوب اجرا

کارکرد سیستم‌های صنعتی با شاخص‌های عملکردی سیستم مانند قابلیت اطمینان، دسترسی، تعمیرپذیری و پشتیبانی تعمیرات (RAMS) ارتباط تنگاتنگ دارد، بنابر این بهبود RAMS تجهیزات و ماشین‌آلات بسیار حائز اهمیت است. شرکت‌ها، پیمانکاران و تولیدکنندگان باید شناخت کافی از ویژگی‌های عملکردی سیستم‌ها داشته باشند و در مراحل مختلف طراحی و پشتیبانی از محصول آن را به‌کار ببندند تا توان پاسخگویی به‌موقع به تقاضای خدماتی را داشته باشند و رضایت مشتریان/ مصرف‌کنندگان را جلب کنند. نخستین بار صنعت نفت و گاز نروژ در سال ۱۹۹۸ ایده ارتباط بین شاخص‌های عملکردی در سطح قطعه (جزء یا زیرسیستم) و ارتباط اجزای با یکدیگر در چارچوب سیستم و در نهایت تأثیر این عوامل بر قابلیت پاسخ‌دهی سیستم را در قالبی تحت عنوان «تضمین تولید» صورت‌بندی کرد. در این رویکرد در سال ۲۰۰۵ به‌عنوان استاندارد ISO/CD 20815 مطرح شد (Standard, 1998). در شکل ۳-۴ ایده اصلی روش تضمین تولید نشان داده شده است.



شکل ۳-۴- ایده تضمین تولید (Standard, 1998)

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود پس از تعیین شاخص‌های عملکردی در سطح قطعه/جزء/ زیرسیستم قابلیت دسترسی در سطح سیستم تحقیق می‌شود. روش برگرفته شده از نظریه تضمین تولید در این رساله مبتنی بر فعالیت‌های زیر است که در شکل ۴-۴ دیده می‌شود (Barabadi et al., 2011a):

أ. تعریف محدودیت‌ها، فرضیات

ب. گردآوری داده

ج. شناسایی، صورت‌بندی فاکتورهای ریسک و استخراج داده‌های زمانی مورد نیاز

د. شناسایی رویکردی مناسب برای تخمین تأثیرات فاکتورهای ریسک و تحلیل هم‌زمان

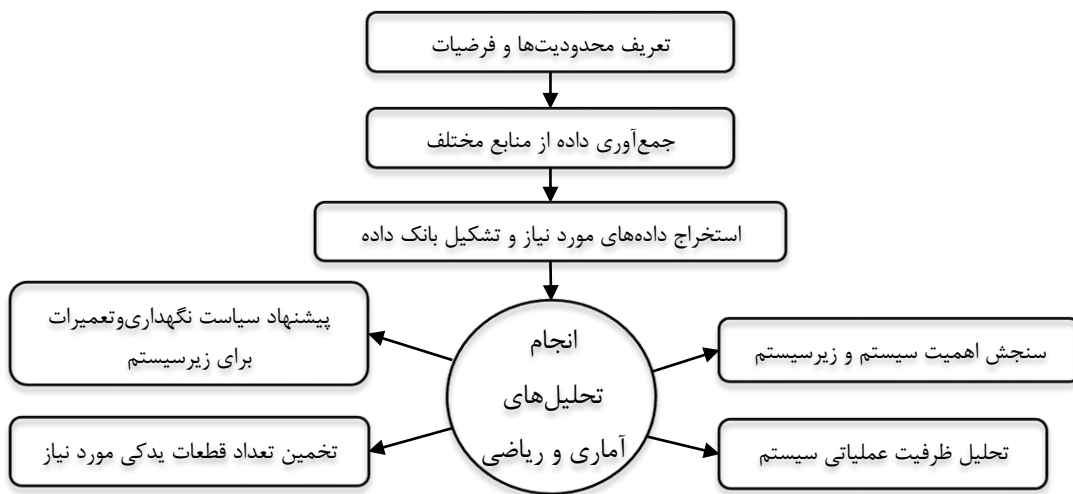
داده‌های زمانی عملکرد تجهیزات در سطح زیرسیستم و اجزای

ه. سنجش اهمیت شاخص‌های عملکردی زیرسیستم و سیستم

و. تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز در سطح اجزای

ز. پیشنهاد سیاست نت

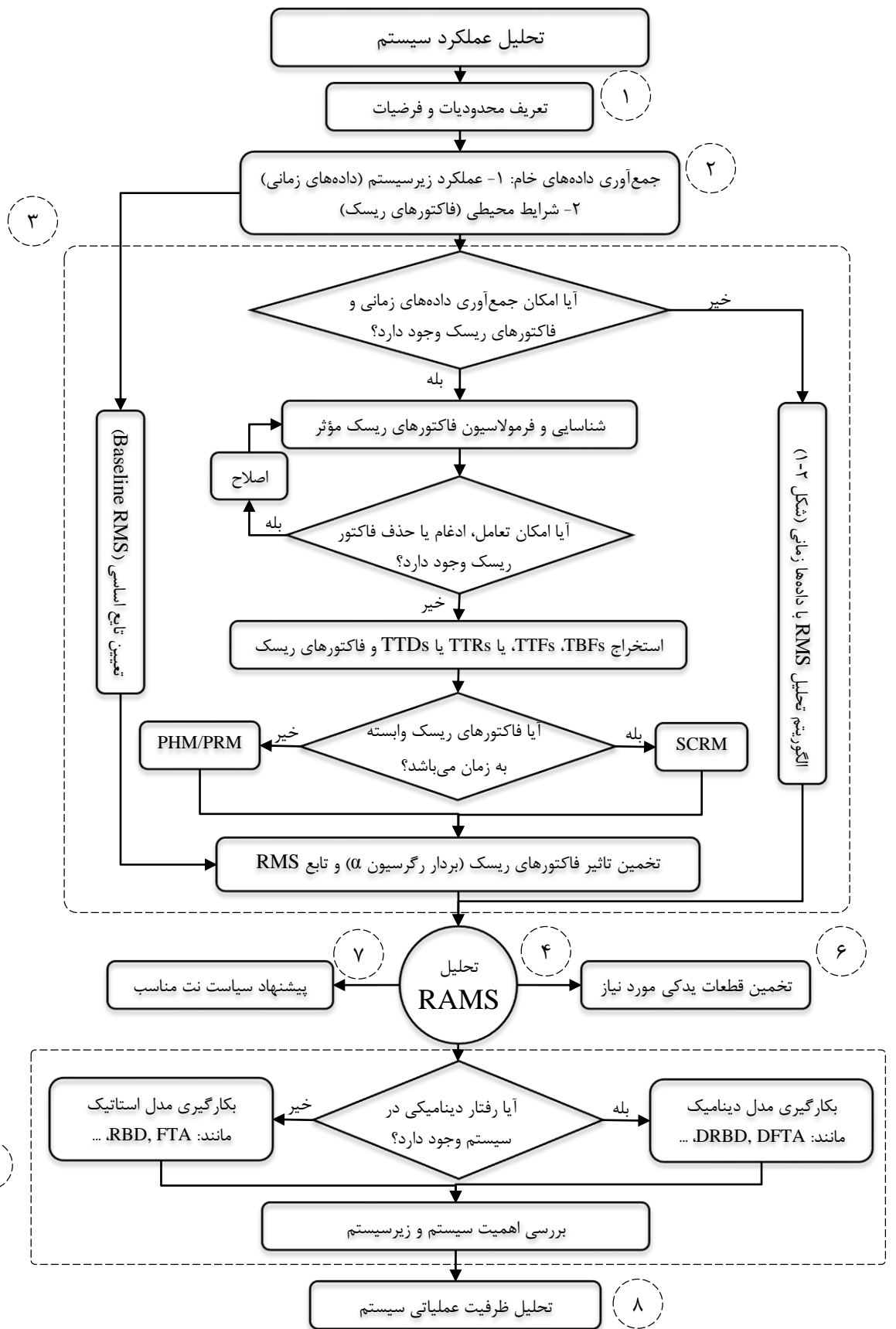
ح. تحلیل ظرفیت عملیاتی سیستم



شکل ۴-۴- ساختار روش اجرایی

در شکل ۴-۵ نیز الگوریتم کامل با جزئیات بیشتر برای همه مراحل نشان داده شده است. شناسایی و صورت‌بندی فاکتورهای ریسک (مرحله دوم) را می‌توان به موازات مرحله اول اجرا کرد. در سومین مرحله شناسایی و صورت‌بندی فاکتورهای ریسک (تأثیرات، تراکنش و یا حذف آن‌ها) انجام می‌شود (Gao et al., 2010a). فاکتورهای ریسک ممکن است از عوامل مختلفی نظیر، شرایط محیطی، تاریخچه عملیات ماشین (مانند، تعمیرات اساسی، تأثیر تعمیرات و نوع تعمیرات انجام گرفته)، نوع طراحی و مصالح به کار رفته در تجهیزات، ناشی شود. برای صورت‌بندی فاکتورهای ریسک باید نکات زیر در نظر گرفت شود (Barabadi et al., 2011a):

- اثرات متقابل فاکتورهای ریسک: اثرات متقابل دو یا چند فاکتور ریسک را می‌توان، با معرفی فاکتور ریسک جدید برای آن، مدل کرد.



شکل ۴-۵- فرایند تحلیل رفتار سیستم بر اساس شاخص‌های عملکرد و شرایط محیطی

- حذف فاکتور ریسک مؤثر: این مسئله ممکن است به اریب شدن تحلیل منجر شود.
- وابستگی فاکتور ریسک به زمان: باید به صورت بندی فاکتور ریسک وابسته به زمان در صورت وجود توجه شود.

سهم هیستوگرام و نمودارهای پراکنش، برای ارزیابی توزیع فاکتور ریسک و شناسایی نقاط پرت و بررسی همبستگی بین آنها مفید است (Barabadi et al., 2011a). در مرحله بعد رویکرد مناسب برای تحلیل داده و تخمین شاخص های عملکردی جزء یا زیرسیستم یعنی RAMS شناسایی می شود. در این مرحله در صورت عدم دستیابی به اطلاعات لازم برای فاکتورهای ریسک از الگوریتم تحلیل RMS با داده های زمانی (شکل ۲-۱) استفاده می شود. در صورت امکان دستیابی به هر دو دسته داده های زمانی و فاکتورهای ریسک باید از روش های رگرسیونی مانند PHM، RPM یا SCRM استفاده کرد. تعیین تابع نهایی RMS بر اساس داده های زمان و فاکتورهای ریسک نیازمند تعیین تابع اساسی (نرخ مخاطره، تعمیرپذیری و پشتیبانی) است که برای تعیین آن می توان از دو رویکرد زیر استفاده کرد:

أ. استفاده از پیشنهاد تولیدکنندگان (Ghodrati et al., 2007; Ghodrati, 2006; and Kumar, 2005b, 2005a)

ب. استفاده از روش کلاسیک آماری برای داده های زمانی مربوط به مشخص ترین شرایط کاری که ویژگی های آن کاملاً مشخص است و بیشترین مقدار داده از آن در دسترس است (Barabady and Kumar, 2008; Hoseinie et al., 2012b).

پس از تحلیل رفتار عملکردی جزء/قطعه/ زیرسیستم بر اساس شاخص های عملکردی RAMS با داده های زمانی و شرایط محیطی (در صورت امکان) در مرحله بعد می توان دو رکن اصلی قابلیت پشتیبانی یعنی تخمین تعداد قطعات یدکی و برنامه نت را مورد بررسی قرار داد. قبل از ورود به مرحله تحلیل سنجش اهمیت و تحلیل ظرفیت عملیاتی اجزای یا زیرسیستم ها در قالب یک سیستم، ویژگی های سیستم تحلیل می شود. چرا که ویژگی های تسهیلات تولیدی علاوه بر رفتار عملکردی تک تک اجزاء به نحوه تراکنش بین این اجزاء در قالب سیستم نیز بستگی دارد. نقطه شروع این مرحله مدل سازی رابطه بین اجزای سیستم است (Barabadi et al., 2011b; Distefano and Xing, 2006). همان طور که اشاره شد گزینه های متعددی برای تحلیل RMS سیستم پیشنهاد شده است. بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان

(RBD) و حالت‌های پویا این روش DRBD از پرکاربردترین روش‌ها در این زمینه است. این مدل‌ها نمایی نزدیک از سیستم برای طراح فراهم می‌کنند که قابل‌درک‌تر از صورت‌بندی است. پس از تعیین رفتار سیستم بر اساس اجزای یا زیرسیستم‌های آن، نخست سنجش اهمیت زیرسیستم بر اساس پیکربندی سیستم، شاخص‌های عملکردی قابلیت اطمینان و دسترسی با در نظرگیری تأثیر فاکتورهای ریسک انجام می‌گیرد. در مرحله بعد ظرفیت عملیاتی سیستم بر اساس ظرفیت زیرسیستم‌ها، شاخص‌های RMS و تأثیر شرایط محیطی پویا بررسی می‌شود.

۴-۷- جمع‌بندی

در این فصل نخست به شرح مختصری از نمونه موردی پرداخته شده و اطلاعاتی از مختصات جغرافیایی و شرایط آب و هوایی معدن سونگون بیان شد. در ادامه مرزبندی سیستم استخراجی به عنوان نخستین و مهمترین گام در تحلیل رفتاری سیستم انجام گرفت. سپس بر اساس اطلاعات میدانی و مصاحبه‌های انجام گرفته با متخصصین در سطح جزء، لاستیک ماشین‌های چرخ لاستیکی باربری و بارگیری برای مطالعه انتخاب شد. ماشین‌های حفاری، بارگیری، باربری و بلدوزر نیز به عنوان زیرسیستم در نظر گرفت شدند که ترکیب آن‌ها پیکربندی سیستم یعنی ناوگان استخراجی معدن را تشکیل می‌دهد. در بخش آخر فصل چارچوبی برای تحلیل تضمین تولید، سنجش اهمیت سیستم، تخمین قطعات یدکی مورد نیاز و پیشنهاد سیاست نگهداری و تعمیرات ارائه شد. این چارچوب پایه تحلیل مطالعه موردی است. سپس از مرزبندی و تعیین سطوح مختلف سیستم نوبت جمع‌آوری داده‌ها می‌رسد که موضوع فصل بعدی مورد گزارش است.

فصل پنجم

جمع آوری داده از مس سونگون



۵-۱- مقدمه

در این فصل گردآوری داده‌ها از منابع مختلف براساس چارچوب ارائه شده در فصل قبل تشریح می‌شود. علاوه بر تشکیل بانک داده برای داده‌های زمانی مربوط به خرابی و تعمیرات زیرسیستم‌ها و اجزاء، باید پارامترهای محیطی موثر بر رفتار خرابی و تعمیرات در قالب فاکتورهای ریسک نیز مشخص شود. داده‌ها در دو سطح زیرسیستم و اجزاء دسته‌بندی شدند. برای تشکیل بانک داده از نرم‌افزار Excel استفاده شد. در ادامه جزئیات بیشتری از این فرایند ذکر می‌شود.

۵-۲- سطوح جمع‌آوری داده

سطوح جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از منابع مختلف به شرح زیر مشخص شد:

• سطح اول: سطح زیرسیستم

در سطح نخست با عنایت به فرضیات تحقیق، ناوگان استخراجی معدن به‌عنوان سیستم مطرح بوده و هر یک از ماشین‌آلات موجود در مراحل استخراجی مانند دستگاه چال‌زنی (دریل واگن)، بارگیری (لودر، شاول،...) باربری (تراک) و بلدوزر به‌عنوان زیرسیستم در نظر گرفته شدند. در این سطح داده‌های خرابی (زمان‌های بین خرابی‌ها) و تعمیرات (زمان‌های بین تعمیرات) برای تعیین شاخص‌های عملیاتی سیستم بر مبنای شرایط محیطی (فاکتورهای ریسک) گردآوری شد. همچنین این داده‌ها در تحلیل زیرسیستم‌های بحرانی و تعیین ظرفیت عملیاتی نیز به‌کار گرفته شدند. بازه مورد تحلیل در این سطح ۱۵ ماه بود که از ابتدای فروردین‌ماه سال ۱۳۹۲ تا پایان خردادماه سال ۱۳۹۳ را دربر می‌گیرد.

• سطح دوم: سطح اجزای

بررسی قابلیت پشتیبانی و بخصوص تخمین تعداد قطعات یدکی نیازمند گسترش تحلیل‌ها به سطح اجزای هست، که این مسئله با توجه گستردگی فوق‌العاده ماشین‌آلات و اجزای آن‌ها نیازمند تلاشی بسیار گسترده بود که از حوصله یک رساله دکتری خارج بوده و از سوی دیگر

در این تحقیق تنها تخمین قطعات یدکی تعمیرناپذیر مد نظر بود. لذا برای ارائه روش پیشنهادی و صحت سنجی آن، همچنین با در نظرگیری بازه زمانی محدود در راستای تنظیم رساله تنها داده‌های خرابی لاستیک (لاستیک ماشین‌آلات چرخ لاستیکی، لودرها و تراک‌ها) برای این سطح گردآوری شد. قابل ذکر است که تخمین قطعات یدکی مورد نیاز در این تحقیق صرفاً بر اساس قابلیت اطمینان و شرایط محیطی بوده و از این رو تنها جمع‌آوری داده‌های زمانی خرابی و فاکتورهای ریسک باید انجام پذیرد. داده‌های این سطح نیز در بازه تقریباً ۱۱ ساله مورد بررسی قرار گرفته است. این بازه از نیمه دوم سال ۱۳۸۳ شروع شده و به نیمه دوم سال ۱۳۹۴ ختم می‌شود.

۵-۳- بانک داده‌ها

قابلیت دسترسی عملیاتی با استفاده از متوسط زمان بین تعمیرات (مرتبط با قابلیت اطمینان) و متوسط زمان توقف نت (مرتب با قابلیت تعمیرپذیری) قابل اندازه‌گیری می‌باشد. نوع داده‌های مورد نیاز برای این نوع از قابلیت دسترسی، زمان بین خرابی (TBF) و زمان انجام تعمیرات (TTR) هست. از سوی دیگر برای وارد کردن تأثیرات شرایط محیطی بر قابلیت دسترسی و در نهایت قابلیت اعتماد سیستم، تعیین فاکتورهای ریسک مرتبط با زیرسیستم‌ها نیز باید انجام شود. به طور کلی با دو نوع داده یعنی داده‌های از جنس زمان (TBF و TTR) و داده‌های کیفی (فاکتورهای ریسک) که باید کمی‌سازی شوند تا قابل کاربرد در تحلیل‌های آماری باشند سرو کار داریم. این داده‌ها را می‌توان از منابع مختلف همچون: اسناد ثبت شده (گزارش‌های روزانه گروه نت، مکانیک،...)، مدارک آرشیو شده (گزارش‌های قبلی، دفترچه ماشین‌آلات...)، ملاقات و مصاحبه‌ها، مشاهدات مستقیم گردآوری نمود. در این رساله پس از مطالعه نمونه موردی و بررسی شرایط حاکم پنج منبع اصلی: **اطلاعات بخش نظارت، ایستگاه هواشناسی، ملاقات و مصاحبه‌ها، مشاهدات مستقیم و بانک داده پیمانکاران** برای جمع‌آوری داده در نظر گرفته شد.

کارفرما یا نظارت که در واقع شرکت ملی مس بوده و وظیفه بازبینی، نظارت، کنترل، اصلاح، ارائه پیشنهاد، تصمیم‌گیری و مواخذه بخش‌های مختلف را عهده‌دار و کلیه تصمیمات اتخاذ شده در سطح کلان معدن بر عهده این بخش هست. در این تحقیق از داده‌های نظارت که به نحوی شامل همه داده‌های خام بوده و عمدتاً به‌عنوان میزان یا شاخصی برای صحت سنجی داده‌های به دست آمده از دیگر بخش‌هاست استفاده شده است. چرا که داده‌های این بخش قالباً خام بوده (کتبی)، یا ادغام نشده و یا تنها برحسب نیاز بخشی از داده‌ها از منبع اصلی دریافت شده که این منجر به نقص در آن‌ها شده است.

از این رو اساس بانک داده برحسب داده‌های دریافتی از منابع اصلی هست. داده‌های مربوط به هواشناسی از ایستگاه هواشناسی واقع در خود مجتمع دریافت شد. این ایستگاه روزانه داده‌های مربوط به وضعیت آب‌وهوا را در قالب تیتروهای زیر ثبت می‌نماید:

- ✓ تاریخ: شامل روز، ماه و سال
- ✓ دما: برحسب درجه سلسیوس شامل کمینه دما، بیشینه دما و متوسط دما
- ✓ رطوبت نسبی: برحسب درصد شامل: کمینه رطوبت، بیشینه رطوبت و متوسط رطوبت
- ✓ بارندگی: برحسب میلی‌متر شامل: مجموع بارندگی برف، باران
- ✓ وضعیت جوی: شامل دو بخش:
 - نوع: آفتابی، صاف، ابری، نیمه‌ابری، مه‌آلود
 - میزان: شامل اعدادی به صورت ۱/۸، ۲/۸، ...، ۸/۸ که برحسب شرایط ابری پراکنده (۱/۸) تا کاملاً ابری به همراه بارش (۸/۸) امتیازبندی شده است.

در نهایت داده‌های روزانه در قالب یک گزارش ماهیانه به صورت جدول ۵-۱ ارائه می‌شود. ۱۵ سری شیت گزارش ماهیانه (فروردین ۹۲ تا خرداد ۹۳) خام از ایستگاه دریافت شد. داده‌های مربوطه به ملاقات و مصاحبه‌ها از سه منبع زیر حاصل می‌شود:

- مصاحبه‌ها انجام گرفته با اپراتورهای ماشین‌آلات مختلف
- ملاقات با متخصصین تعمیرگاه به‌ویژه سرپرست تعمیرگاه شرکت مبین و مسئولین دفتر فنی معدن در هر دو شرکت
- بحث‌های انجام گرفته با مشاور صنعتی محترم، مدیریت مجتمع، مدیریت امور تحقیق و توسعه، مدیریت طراحی و نظارت، سرپرستی معدن شرکت مبین، مسئول نوبت، مسئولین پله، اکیپ آتشیاری، واحد نقشه‌برداری

این داده‌ها عمدتاً به شکل کیفی بوده در پروسه شناخت معدن، رفع ابهامات، مرزبندی و تعیین سطوح سیستم و از همه مهم‌تر در تعیین مقادیر کیفی فاکتورهای ریسک مورد استفاده قرار گرفتند. مشاهدات مستقیم نیز با حضور میدانی در محل مطالعه موردی تکمیل شده است. این منبع شاید از لحاظ کیفی در فرایند گردآوری داده جایی نداشته باشد، ولی در تحلیل سیستم، شناسایی چرخه کار، آشنایی با ماشین‌آلات موجود، مشاهده مستقیم شرایط کار و بسیاری از مسائل روانی حاکم در مجتمع مهم‌ترین پارامتر تحقیق بوده و در نتایج تحلیل‌ها نقش بسزایی دارد. حضور و مشاهده مستقیم امکان درک کاملی

از سیستم را فراهم نموده که این موضوع از هیچ منبع دیگری قابل جبران نخواهد بود. شاید بتوان گفت که مهم‌ترین و عمده‌ترین بخش داده‌های کمی بانک داده متعلق به بانک داده پیمانکاران هست.

جدول ۵-۱- نمونه گزارش ماهیانه هواشناسی - فروردین ۱۳۹۲

Date	Temperature(°C)			Rel.Humidity (%)			Rain (mm)	Sky Condition	
	Min	Max	Avr	Min	Max	Avr	Sum	Type	Rate
92/1/1	0.1	7.4	3.3	28.2	54.8	40.4	0.0	Sunny & Clear	
92/1/2	0.0	10.6	4.8	19.6	65.2	42.3	0.0	Sunny & Clear	
92/1/3	3.0	10.1	5.8	25.9	58.8	42.3	0.3	Sunny & Clear	
92/1/4	-4.7	4.6	-1.3	55.2	99.9	89.0	0.5	Semi - Cloudy	3/8
92/1/5	-6.3	-1.0	-4.9	35.0	79.5	65.3	0.0	Sunny & Clear	
92/1/6	-1.0	7.3	3.6	33.6	59.7	44.2	0.0	Overcast	8/8
92/1/7	2.0	10.7	5.3	19.6	99.9	46.7	0.0	Semi - Cloudy	2/8
92/1/8	0.9	9.7	5.1	38.3	71.4	55.1	0.0	Semi - Cloudy	1/8
92/1/9	1.5	7.7	4.2	49.2	99.9	67.3	0.4	Overcast	8/8
...
MONTH	Temp (°C)			Humidity (%)			Rain (mm)		
	Min	Max	Avr	Min	Max	Avr	Sum		
farvardin	-6.3	18.8	5.1	11.7	99.9	69.0	48.3		

این منبع از دو شرکت پیمانکاری عمده تشکیل یافته و هر یک از این شرکت‌ها فلوچارت خاص خود را داشته ولی به علت فعالیت در یک محیط و کارفرمای مشترک دارای اشتراک‌هایی می‌باشند که این شباهت در چارت سازمانی دو شرکت تشکیل بانک داده را سهولت می‌بخشد. چرا که پس از تعیین محل ثبت داده مورد نیاز برای یک شرکت در شرکت بعدی نیز همان داده از همان محل و در همان چارچوب دریافت شد.

داده‌های مورد نیاز در دو بخش اداری به شرح زیر ثبت می‌شوند:

- دفتر فنی تعمیرگاه: داده‌های مربوط به خرابی، انبارداری، تعمیرات انجام گرفته، نوع تعمیرات، زمان و تاریخ تعمیرات، شرح تعمیرات، کد ماشین، زمان راه‌اندازی در آن ثبت می‌شود. داده‌های خام این قسمت از گزارش‌های مکانیک‌ها بخش‌های مختلف و انبارداری جمع‌آوری می‌شوند.
- دفتر فنی معدن: داده‌های این بخش در دو دسته تابلو فواصل و گزارش‌های روزانه تقسیم‌بندی می‌شود.

۵-۴- رابطه فاکتورهای ریسک و استخراج داده‌های زمانی

در این بخش نحوه دسته بندی فاکتورهای ریسک مؤثر در خرابی‌های رخ داده و تعمیرات انجام گرفته در دو سطح زیرسیستم و اجزا مورد بحث قرار گرفته است. همچنین نحوه استخراج داده‌های زمانی خرابی: در دو قالب TBFs و TTRs برای زیرسیستم‌های تعمیرپذیر و اجزای تعمیرناپذیر و داده‌های زمانی تعمیرات برای زیرسیستم‌های تعمیرپذیر در قالب TTRs بررسی شده است.

۵-۴-۱- داده‌های سطح اول

پس از تشکیل بانک داده از اطلاعات پنج منبع اصلی اشاره شده، داده‌ها در نخستین گام ادغام می‌شوند. منظور از ادغام اینکه داده‌های گزارش‌های روزانه با افزودن تاریخ در سه ستون سال، ماه و روز در یک شیت مرتب شدند. و نتیجه ادغام به صورت یک فایل Excel برای هر سری از دستگاه‌های حفاری، بارکننده، باربری و بلدوزر و برای هر کدام از شرکت‌ها به صورت جداگانه مرتب شد. در دومین گام از استخراج داده پس از ادغام کردن، داده‌های مورد نیاز از بانک داده استخراج شد. این داده‌ها همان طوری که ذکر شد به دو دسته داده‌های زمانی، زمان بین خرابی (TBF) و زمان انجام تعمیرات (TTR) تقسیم شده که دسته اول برای تحلیل قابلیت اطمینان و دسته دوم برای تحلیل قابلیت تعمیرپذیری به کار گرفته می‌شوند. هر یک از این دو دسته نیز حاوی دو نوع داده یعنی فاکتورهای ریسک و داده‌های زمانی می‌باشند. قابل ذکر است که مراحل استخراج فاکتورهای ریسک با داده‌های زمانی موازی بوده و صرفاً برای حفظ توالی در گزارش نویسی به صورت جداگانه توضیح داده می‌شوند. همچنین استخراج داده‌های زمانی (TBF یا TTR) برای همه زیرسیستم‌ها در هر مرحله از استخراج (حفاری، بارگیری، باربری و بلدوزر) به یک شکل بوده و داده‌های خروجی در نهایت ساختاری کاملاً مشابه (TBF یا TTR) خواهند داشت. ولی فاکتورهای ریسک خرابی هر دسته (حفاری، بارگیری، باربری و بلدوزر) از زیرسیستم برحسب شرایط کاری و نوع ماشین متفاوت می‌باشند. حال آنکه فاکتورهای ریسک تعمیرات با توجه به مشترک بودن تعمیرگاه و داشتن شرایط محیطی مشابه برای همه زیرسیستم‌ها از مراحل مختلف فرایند استخراج معدن یکسان خواهد بود. در این تحقیق فاکتور ریسک هر کدام از زیرسیستم‌ها به صورت جداگانه کمی‌سازی شده و در نهایت در قالب یک شیت Excel مرتب شد. در ادامه نحوه استخراج TBM و TTR های حامل هر دو نوع داده توضیح داده می‌شود.

۵-۴-۱-۱- داده‌های زمانی - خرابی (TBF)

داده‌های زمانی خرابی در قالب زمان بین خرابی از گزارش‌ها روزانه با استفاده از سه ستون ساعت‌های کارکرد، فعال و خرابی حاصل شد. به‌منظور روشن شدن موضوع، نحوه استخراج TBF از داده‌های مرتب شده برای زیرسیستم حفاری توضیح داده می‌شود. در جدول ۵-۲، پنج ردیف از داده‌های ادغام شده در زیرسیستم‌های حفاری وارد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این داده‌ها از ستون‌های: ردیف، تاریخ، ردیف گزارش‌های (شماره ردیف گزارش‌های اصلی برای مرور در صورت بروز مشکل)، کد دستگاه و سه ستون زمان کارکرد، فعال و خرابی برحسب ساعت برای هر ردیف تشکیل یافته است.

جدول ۵-۲- نمونه داده‌های ادغام شده برای همه دستگاه‌های حفاری

ردیف	سال	ماه	روز	کد-دستگاه	ساعت کارکرد	ساعت فعال	ساعت خرابی
۱	۹۲	۱	۲	۷۶۴	۶/۵	۰/۲۵	۰
۲	۹۲	۱	۲	۷۶۵	۶/۵	۰/۲۵	۰
۳	۹۲	۱	۲	۷۶۷	۶/۵	۰/۲۵	۰
۴	۹۲	۱	۲	۷۶۷	۲/۵	۰	۵
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

در جدول ۵-۴ نمونه‌ای از داده‌های TBF، TTR و TTD برای یک دستگاه حفاری (زیرسیستم) به شکل نهایی مشاهده می‌شود. ولی در مورد فاکتورهای ریسک، علی‌الخصوص در مورد خرابی‌ها مشکلات عدیده‌ای همچون: نوع داده موجود یا ثبت شده، پارامتر مؤثر موجود در این داده‌ها، پارامترهای مؤثر در حالت واقعی، تلفیق پارامترهای مؤثر، حذف پارامترهای غیر مؤثر، ... وجود داشت.

جدول ۵-۳- نمونه‌ای از داده‌های زیرسیستم حفاری

خرابی		تعمیرات		پاسخ‌دهی	
شماره خرابی	TBFs (Hr)	شماره تعمیرات	TTRs(Hr)	شماره زمان پاسخ‌دهی	TTD (Hr)
۱	۹	۱	۵	۱	۰/۲۷۵
۲	۴۳/۷۵	۲	۲۵/۵	۲	۰/۰۷۵
۳	۷۳/۵	۳	۱	۳	۱/۴۵
۴	۳/۵	۴	۲۵/۳	۴	۰/۳۲۵
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

با این وجود پس از تلاش‌ها و راهنمایی‌های انجام گرفته برای هر دسته از ماشین‌آلات چرخه استخراج این فاکتورها تعیین شد. در جدول ۴-۵ و جدول ۵-۵ همه فاکتورهای ریسک زیرسیستم حفاری، بارکننده، باربری و بلدوزر با مقادیر کمی در نظر گرفته شده برای آن‌ها مرتب شده است.

۵-۴-۱-۲- فاکتورهای ریسک - تعمیرات (TTR)

همان‌طور که اشاره شد برخلاف فاکتورهای ریسک خرابی که وابسته به زیرسیستم بوده و بر اساس شرایط محیطی حاکم بر آن تعریف شدند. فاکتورهای ریسک تعمیرات به علت مشترک بودن تعمیرگاه و شرایط حاکم به صورت یک شکل تعریف شده‌اند. برخی از این فاکتورها در آینده برای تخمین قطعات یدکی به کار گرفته خواهند شد. از فاکتورهای ریسک اشاره شده در این جدول "نوبت کاری"، "دما"، "وضعیت جوی"، "نزولات جوی" و "وضعیت تعمیرات" در تحلیل قابلیت اعتماد زیرسیستم‌ها به کار گرفته شد. در جدول ۵-۶ نیز نمونه‌ای از داده‌های مرتب شده به شکل نهایی از داده‌های TTR زیرسیستم بارکننده نشان داده شده است. در این جدول نخستین ستون نشان دهنده فراوانی تعمیرات انجام گرفته برای زیرسیستم، ستون دوم شماره تعمیرات در گزارش‌های اولیه و برای پیگیری داده تعمیرات، ستون سوم مدت زمان انجام تعمیرات برحسب ساعت، ستون چهارم نشان دهنده وضعیت تعمیرات از لحاظ داده کامل یا سانسور شده بود.

جدول ۴-۵- فاکتورهای ریسک خرابی زیرسیستم‌های حفاری و بارکننده

بار کننده		حفاری	
طبقه‌بندی (مقدار کمی)	فاکتور ریسک	طبقه‌بندی (مقدار کمی)	فاکتور ریسک
خرابی کامل (۱)	وضعیت خرابی	خرابی کامل (۱)	وضعیت خرابی
خرابی سانسور شده (۰)		خرابی سانسور شده (۰)	
صبح (A)	نوبت	صبح (A)	نوبت
ظهر (B)		ظهر (B)	
شب (C)		شب (C)	

ادامه جدول ۴-۵

سینه‌کار (۲)	محل کار	ORE, OXD, SUF (۱)	نوع سنگ
دامپ تخلیه (۱)			
متناسب (۱)	تناسب با باربر	MZT(۲)	
نسبتاً مناسب (۲)		دامپ (۲)	
نامناسب (۳)		TRT(۳)	
آفتابی و بدون ابر (۱)	وضعیت آب‌وهوایی	آفتابی و بدون ابر (۱)	
نیمه‌ابری (۲)		نیمه‌ابری (۲)	
ابری (۳)		ابری (۳)	
مه شدید (۴)		مه شدید (۴)	
عادی (۱)	وضعیت جاده	عادی (۱)	
لغزنده (۲)		لغزنده (۲)	
لغزنده و مسدود (۲)		لغزنده و مسدود (۲)	
خوب (۱)	تعداد سرویس	متناسب (۱)	اندازه سرمته
متوسط (۲)		نامناسب (۲)	
بد (۳)			
MZT-S(۵)	محل عملیات	خوب (۱)	متراژ حفاری
TRT(۴)		متوسط (۲)	
MZT-N(۳)		بد (۳)	
MZT-M(۲)			
ORE-SUF-OXD- و دامپ (۱)			
نامطلوب (۳)	میزان جابجایی ماشین چرخ‌زنجیری		
مطلوب (۲)			
مطلوب‌ترین (۱)			
ORE, OXD, SUF (۱)	نوع سنگ		
MZT(۲)			
دامپ (۲)			
TRT(۳)			

جدول ۵-۵- فاکتورهای ریسک خرابی زیرسیستم‌های باربری و بلدوزر

بلدوزر		باربر	
طبقة‌بندی (مقدار کمی)	فاکتور ریسک	طبقة‌بندی (مقدار کمی)	فاکتور ریسک
خرابی کامل (۱)	وضعیت خرابی	خرابی کامل (۱)	وضعیت خرابی
خرابی سانسور شده (۰)		خرابی سانسور شده (۰)	
صبح (A)	نوبت	صبح (A)	نوبت
ظهر (B)		ظهر (B)	
شب (C)		شب (C)	
آفتابی و بدون ابر (۱)	وضعیت آب‌وهوایی	خوب (۱)	تعداد سرویس
نیمه‌ابری (۲)		متوسط (۲)	
ابری (۳)		بد (۳)	
مه شدید (۴)		متناسب (۱)	
عادی (۱)	وضعیت جاده	نسبتاً مناسب (۲)	تناسب با بارکننده
لغزنده (۲)		نامناسب (۳)	
لغزنده و مسدود (۲)		MZT-S(۵)	
ORE, OXD, SUF (۱)	نوع سنگ	TRT(۴)	محل عملیات
		MZT-N(۳)	
		MZT-M(۲)	
		ORE-SUF-OXD- و دامپ (۱)	
دامپ (۲)	شیب جاده	شیب رو به بالا (U)	شیب جاده
TRT(۳)		شیب رو به پایین (D)	
نامطلوب (۳)		هم‌سطح (S)	
مطلوب (۲)	میزان جابجایی ماشین چرخ‌زنجیری	آفتابی و بدون ابر (۱)	وضعیت آب‌وهوایی
مطلوب‌ترین (۱)		نیمه‌ابری (۲)	
دامپ (۱)		ابری (۳)	
سینه‌کار (۲)	محل کار	مه شدید (۴)	

ادامه جدول ۵-۵

	عادی (۱)	وضعیت جاده
	لغزنده (۲)	
	لغزنده و مسدود (۲)	
	ORE, OXD, SUF (۱)	نوع سنگ
	MZT(۲)	
	دامپ (۲)	
	TRT(۳)	فاصله حمل
	نامطلوب (۳)	
	مطلوب (۲)	
	مطلوب‌ترین (۱)	

جدول ۵-۶- نمونه‌ای از TTR-های زیرسیستم بار کننده به همراه فاکتورهای ریسک

ردیف	TTRS (Hr)	وضعیت خرابی	نوع	شرایط تعمیرات	شرایط آب و هوایی	میران بارندگی (میلیمتر)	دوای هوا (درجه سانتیگراد)	TTRS (Hr)
۱	۲/۵۰	۰	B	۲	۱	۰	۴	۲/۵۰
۲	۱	۱	B	۲	۲	۱	-۱	۲/۵۰
۳	۳/۵۰	۱	B	۰	۴	۰	۳	۳۳
۴	۵/۲۵	۱	B	۱	۳	۰	-۱	۸/۲۵
۵	۳	۱	B	۲	۳	۲	-۱	۸/۲۵
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

ستون پنجم تا هشتم شامل فاکتورهای ریسک مؤثر بر تعمیرات، ستون نهم نشان دهنده وضعیت کلی زیرسیستم و ستون آخر مقادیر تجمعی زمان تعمیرات انجام گرفته را نشان می‌دهد. در پیوست الف - داده‌های خرابی لودر و پیوست ب - داده‌های تعمیرات لودر به همراه فاکتورهای ریسک آن درج شده است.

۵-۴-۲- داده‌های سطح دوم

همان‌طور که اشاره شد در این سطح نیز مشابه سطح اول باید دو نوع داده جمع‌آوری شود. داده‌های نوع اول داده‌های عملکردی اجزای از جنس زمان که با توجه به تعمیرناپذیری آن‌ها باید در قالب زمان تا وقوع خرابی (TTFs) استخراج می‌شدند. به تبع آن در سطح دوم با توجه به تعمیرناپذیری اجزای از داده‌های تعمیرات صرف نظر می‌شود. داده‌های نوع دوم نیز دربرگیرنده شرایط محیطی بوده و از آن‌ها به‌عنوان فاکتورهای ریسک یاد شد که به دو صورت مطلق و کمی در محاسبات وارد خواهند شد.

۵-۴-۲-۱- داده‌های زمانی - خرابی (TTF)

برای استخراج TTFs لاستیک‌ها پس از مرتب‌سازی آن‌ها بر اساس تاریخ وقوع با توجه به شماره سریال لاستیک‌ها زمان تجمعی کارکرد آن‌ها محاسبه شد. برای انجام این مرحله از جداول محوری در Excel استفاده شد. همچنین با توجه به ثبت دقیق داده‌های خرابی لاستیک‌ها همه TTFs به‌عنوان خرابی کامل در نظر گرفته شدند.

۵-۴-۲-۲- فاکتورهای ریسک - خرابی

فاکتورهای ریسک در نظر گرفته شده برای این سطح با توجه به اطلاعات موجود و عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم از دیدگاه قابلیت اطمینان عبارت‌اند از: نوع زیرسیستمی که لاستیک بروی آن قرار داشته، محوری که لاستیک در روی آن نصب شده، عمق آج لاستیک، برند لاستیک، میزان بارندگی و دمای محیط هستند که به شرح آن‌ها پرداخته می‌شود.

- فاکتور ریسک مدل: این فاکتور برای لودر و تراک به‌صورت جدول ۵-۷ کدگذاری می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در چهار ردیف در نظر گرفته شده که ردیف ۴ در واقع تلفیقی از ردیف های ۲ و ۳ هست که به خاطر امکان جابجایی لاستیک در طول عمر مصرف بین این دو نوع لودر هست.
 - فاکتور ریسک محور: این فاکتور بر اساس اینکه لاستیک بیشتر در محور جلو کار کرده یا در محور عقب با دو حرف لاتین "F" و "B" کدگذاری شده‌اند.
- فاکتور ریسک عمق: عمق آج ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان مرز آج در نظر گرفته شده و از کمیت‌های "۱" و "۰" برای مقادیر کمتر و بیشتر استفاده شد.

جدول ۵-۷- فاکتور ریسک "مدل" و "برند"

برند		تراک		لودر	
کد	لاستیک برند	کد	مدل	کد	مدل
۱	BRIDGESTONE	A	HD 325-6	A	WA470-3
۲	TRIANGLE	B	HD 465-7	B	WA600-3
۲	GOOD YEAR	C	777	C	988B
۳	Other	D	HD 785-5	D	WA600-3 & 988B

- فاکتور ریسک "برند": لاستیک مصرفی برحسب نشانام‌های به کار رفته به چهار دسته تقسیم شد که در جدول ۷-۵ مشاهده می‌شود.
- فاکتورهای ریسک "بارندگی" و "دما": این دو فاکتور از نوع فاکتورهای ریسک پیوسته بوده و با مقادیر مطلق در محاسبات وارد می‌شوند. در این تحقیق "دما" برحسب "درجه سلسیوس" و "بارندگی" برحسب "میلی‌متر" در نظر گرفته شد.

در جدول ۵-۸ بخشی از داده‌های لاستیک لودر به همراه فاکتورهای ریسک مشاهده می‌شود.

جدول ۵-۸ - نمونه داده‌های خرابی لاستیک لودر به همراه فاکتورهای ریسک

تراوانی	TTFs (Hr)	وضعیت خرابی	مدل لودر	عمق آج	برند لاستیک	میزان بارندگی (میلیمتر)	دما محیط (سانتیگراد)	TTFs (Hr)
۱	۱۲۸۷۰	۱	C	۱	۱	۰/۹۸۷	۵/۵۳۹	۱۲۸۷۰
۲	۶۰۵۰	۱	C	۰	۳	۱/۰۸۰	۶/۹۸۴	۱۸۹۲۰
۳	۷۷۰۰	۱	C	۱	۳	۱/۰۶۶	۶/۱۳۱	۲۶۶۲۰
۴	۹۰۰۰	۱	C	۱	۱	۱/۰۰۳	۶/۱۸۷	۳۵۶۲۰
...

در این جدول ستون آخر (TTFs) نشان دهنده زمان تجمعی تا وقوع خرابی‌ها است. در پیوست ج - داده‌های لاستیک لودر درج شده است.

۵-۵- جمع‌بندی

در این فصل داده‌های مورد نیاز برای رساله در دو سطح زیرسیستم و جزء تقسیم‌بندی شده و اطلاعات مورد نیاز از منابع مختلف مانند گزارش‌ها روزانه، اطلاعات تعمیرگاه، مصاحبه‌ها، ملاقات‌های انجام

گرفته و ... جمع‌آوری شدند. در مرحله بعدی اطلاعات به دست آمده مرتب شده و برای هر سطح بانک داده‌های شامل دو سری داده تشکیل شد. سری اول داده‌های زمانی شامل: زمان‌های بین خرابی، زمان‌های انجام تعمیرات، زمان تا وقوع خرابی و زمان‌های پاسخ‌دهی بوده و سری دوم شامل داده‌های مربوط به شرایط محیطی که در قالب فاکتورهای ریسک استخراج شدند. مطابق چارچوب اجرایی ارائه شده در فصل چهار در فصل بعدی تحلیل‌های آماری بر داده‌های مستخرج انجام می‌شود. نتایج این تحلیل‌ها در تضمین تولید، سنجش اهمیت سیستم، تخمین قطعات یدکی مورد نیاز و پیشنهاد برنامه نگهداری و تعمیرات به کار گرفته خواهند شد.

فصل ششم

تضمین تولید سیستم استخراجی

معدن مس سونگون



۶-۱- مقدمه

در این فصل داده‌های جمع‌آوری شده مورد تحلیل قرار گرفته است. تحلیل‌ها در هر گام (بخش) با مدل‌های کلاسیک و بدون در نظرگیری فاکتورهای ریسک شروع می‌شود و به سمت تحلیل با مدل‌های مبتنی بر شرایط محیطی و با در نظرگیری فاکتورهای ریسک پیش می‌رود.

در بخش اول برای مشخص شدن نحوه تعیین رفتار سیستم سه مرحله در نظر گرفته شده است: در مرحله نخست قابلیت دسترسی سیستمی متشکل از زیرسیستم‌ها: لودر (یک دستگاه)، بلدوزر (یک دستگاه) و تراک (یک دستگاه) به یک شبکه سری، به صورت کلاسیک و بدون در نظرگیری تأثیر فاکتورهای ریسک محاسبه شده است. در مرحله دوم قابلیت اطمینان زیرسیستم یک دستگاه لودر با در نظرگیری فاکتورهای ریسک تحلیل شده است و سومین مرحله نیز شامل تحلیل قابلیت تعمیرپذیری با در نظرگیری فاکتورهای ریسک برای زیرسیستم‌های تراک (دو دستگاه)، لودر و بلدوزر است.

در بخش دوم برای تعیین زیرسیستم‌های بحرانی و اولویت‌بندی آن‌ها از ایده سنجش اهمیت استفاده شد. ابتدا سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بدون در نظرگیری تأثیر شرایط محیطی برای تحلیل بخشی از ناوگان استخراجی معدن متشکل از یک دستگاه واگن دریل، لودر، بلدوزر و پنج دستگاه تراک ۱۰۰ تنی به کار گرفته شد. سپس سنجش اهمیت بر اساس یک شاخص عملکردی یعنی قابلیت اطمینان و در نظرگیری فاکتورهای ریسک، تحلیل شد. برای این کار از دو دستگاه لودر و هشت دستگاه تراک در قالب یک شبکه سری-موازی استفاده شد. در برای سنجش اهمیت سیستم از شاخص قابلیت دسترسی با در نظرگیری تأثیرات شرایط محیطی استفاده شد. در این مرحله ناوگان استخراجی از زیرسیستم‌های واگن دریل، بلدوزر، لودر و تراک‌ها تشکیل می‌شود.

در بخش سوم به مقوله تخمین قطعات یدکی مورد نیاز پرداخته شد. در این بخش لاستیک ماشین‌های چرخ لاستیکی در ناوگان استخراجی یعنی لودرها و تراک‌ها به عنوان جزء در نظر گرفته شد و طی دو مرحله تعداد قطعات یدکی مورد نیاز برآورد و بحث مختصری در مورد انبارداری ارائه شد. در ابتدا داده‌های لاستیک ۱۱ تراک ۱۰۰ تنی مدل کوماتسو ۷۸۵-۵ بدون وارد کردن تأثیر شرایط محیطی تحلیل شد و در ادامه نیز داده‌های مربوط به داده‌های ۴۴ دستگاه تراک در چهار مدل کوماتسو HD 785-5، HD 465-7، HD 325-6 و کاترپیلار 777 و ۱۲ دستگاه لودر چرخ لاستیکی در سه مدل کاترپیلار ۹۸۸، کوماتسو ۴۷۰ خط ۳ و کوماتسو ۶۰۰ خط ۳ معدن با وارد کردن تأثیرات محیط کاری مورد تحلیل قرار گرفت و تعداد لاستیک مورد نیاز برای تراک و لودر، زمان سفارش برای خرید مجدد و تعداد سفارش تعیین شد.

در بخش چهارم به حالت خاصی از استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات یعنی نت پیشگیرانه پرداخته شد. در این بخش الگوریتم پیشنهاد استراتژی نت پیشگیرانه برای یک زیرسیستم تراک ارائه می‌شود. این استراتژی در چهار حالت مختلف پیشنهاد شده است که عبارتند از:

۱- نت پیشگیرانه که نه شرایط محیطی در آن وارد شده و نه تأثیر نت ناقص.

۲- نت پیشگیرانه که تأثیر شرایط محیطی در آن وارد شده ولی از تأثیر نت ناقص صرف نظر شده است.

۳- نت پیشگیرانه تنها بر اساس تأثیر نت ناقص و از تأثیر شرایط محیطی صرف شده است.

۴- تأثیرات شرایط محیطی و هم تأثیرات نت ناقص در آن لحاظ شده است.

در آخرین بخش نیز با استفاده از ایده تضمین تولید به بررسی سیستم ناوگان استخراجی متشکل از زیرسیستم‌های یک دستگاه واگن دریل، یک دستگاه بلدوزر، یک دستگاه لودر و شش دستگاه تراک در قالب یک شبکه سری-موازی پرداخته شده است. این تحلیل برای یک محیط پویا با حالت‌های مختلف شرایط محیطی و تأثیرات آن بر میزان تولید انجام گرفته است.

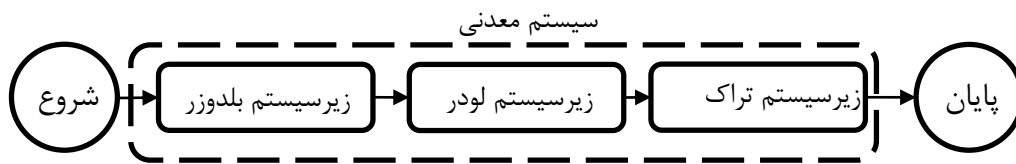
در برازش توابع یا مدل‌های مناسب، تخمین پارامترها، تخمین ضرایب رگرسیون و مقادیر میانگین نرم‌افزارهای Wolframalpha و Blocksim، SPSS، Excel، Minitab 16، ReliaSoft's Weibull++9، RGA 9 software به کار رفته است.

۶-۲- تحلیل رفتار سیستم و زیرسیستم

در این بخش نخست با استفاده از داده‌های زمانی به تحلیل قابلیت دسترسی پرداخته شده و در ادامه دو عنصر اصلی، قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری با استفاده از تأثیر شرایط محیطی برای سیستم و زیرسیستم‌های معدن سونگون مورد بررسی قرار گرفت.

۶-۲-۱- قابلیت دسترسی

در این بخش سیستم معدنی که شامل زیرسیستم‌های لودر WA470-3، بلدوزر کوماتسو D155A و تراک کوماتسو HD785-5 است، در یک بازه‌ی ۱۵ ماهه و بدون وارد کردن تأثیر شرایط محیطی در محاسبات تحلیل شده است. با استفاده از تحلیل‌های آماری تابع یا مدل مناسبی بر داده‌های خرابی (زمان بین خرابی‌ها) و تعمیرات (زمان تا انجام تعمیر) زیرسیستم‌ها برآزش شده، سپس مقدار قابلیت دسترسی زیرسیستم و سیستم محاسبه شد. دیاگرام بلوکی این سیستم در شکل ۶-۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۶-۱ - نمودار بلوکی سیستم معدنی

الف- قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرسیستم‌های معدنی

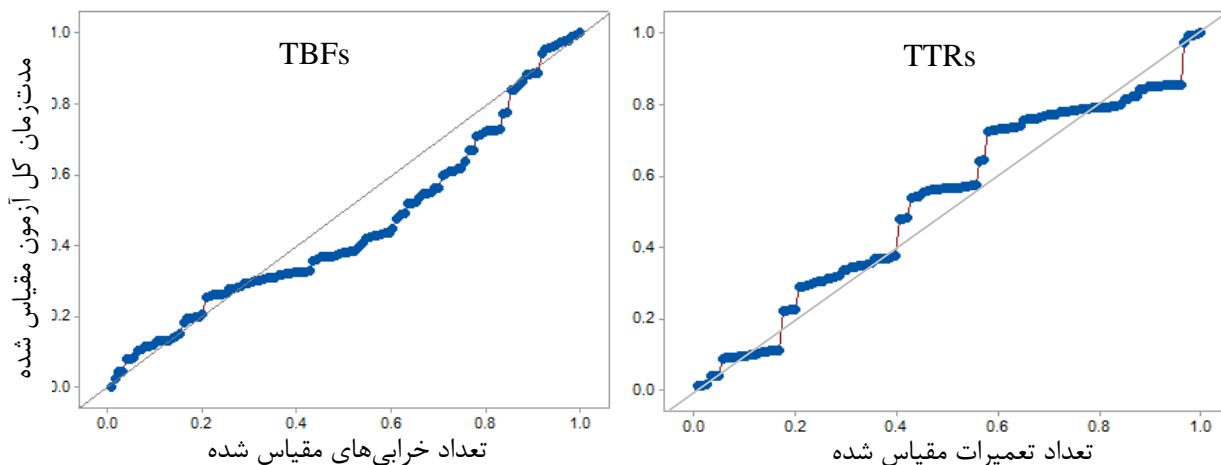
ابتدا فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها بررسی می‌شود. برای تحلیل فرض iid از دو آزمون روند و خودهمبستگی استفاده می‌شود. در صورتی که داده‌ها دارای توزیع یکسان بوده ولی مستقل از هم نباشند، از مدل‌های غیر مانا مانند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توانی) استفاده می‌شود (Barabady and Kumar, 2008). در این پژوهش، برای انجام آزمون روند از روش‌های تحلیلی (آزمون‌های MLI-Hdbk-189 و Laplace) و ترسیمی (TBF-های تجمعی به تعداد وقوع تجمعی خرابی‌ها) و برای آزمون خودهمبستگی از روش‌های تحلیلی (آزمون‌های تابع خودهمبستگی نما (ACF)، TSTA و LBQ) و ترسیمی (نمودار تابع خودهمبستگی نما) استفاده شده است (Kumar and Klefsjö, 1992; "Minitab® 16.2.0, Help", 210AD). به علت پیشگیری از تکرار و محدودیت فضا تنها بخشی از نتایج تحلیل‌های آماری برای داده‌های خرابی و تعمیرات زیرسیستم لودر برای دستیابی به توابع قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری، در جدول ۶-۱ نشان داده شده است. سطح معنی‌داری آزمون‌ها ۵ درصد بوده است.

همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر P -value در این زیرسیستم برای هر دو آماره‌ی آزمون تحلیلی روند و در هر دو سری داده‌های خرابی (TBFs) و تعمیرات (TTRs) بزرگ‌تر از α است، در نتیجه در این زیرسیستم فرضیه صفر نبودن روند پذیرفته می‌شود، در مورد آماره Laplace نیز با توجه به اختلاف ناچیز p -value آن با α و نتایج حاصل سایر آزمون‌ها (ترسیمی و تحلیلی روند) فرض صفر پذیرفته می‌شود. نتایج آزمون ترسیمی روند نیز در شکل ۶-۲ نشان دهنده صحت نتایج حاصل از آزمون تحلیلی است، چرا که در هر دو نمودار تقعر یا تحدب چندانی نسبت به قطر نمودار (خط صاف) مشاهده نمی‌شود.

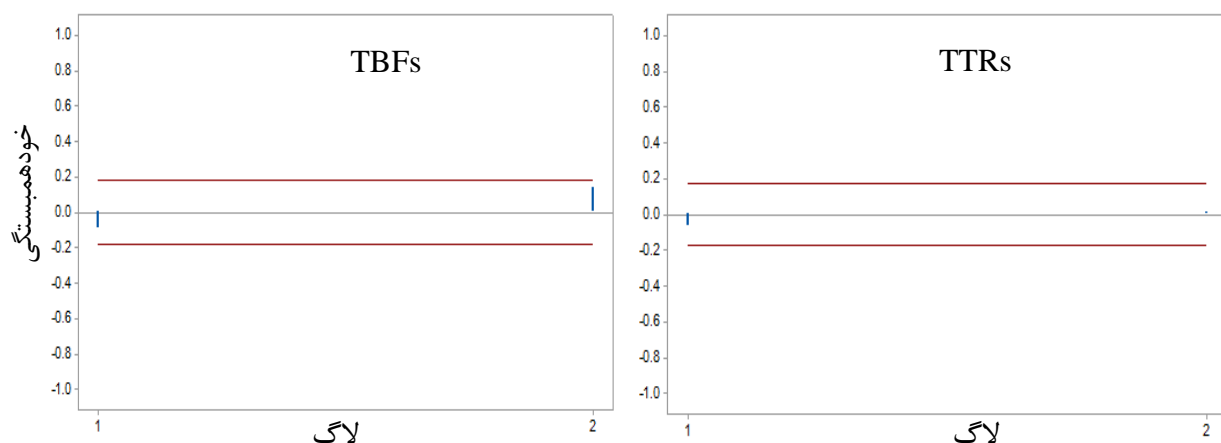
برای تصمیم‌گیری درباره رد یا پذیرش فرضیه صفر عدم وجود خودهمبستگی با استفاده از AFC در سطح اطمینان ۹۵ درصد، از نمودارهای خودهمبستگی نما در شکل ۶-۳ استفاده شده است.

جدول ۱-۶ - فرایندی آماری برای برازش تابع یا مدل مناسب برای لودر WA470-3

TBFs						
آزمون خودهمبستگی				آزمون روند		
LBQ	TSTA	ACF		Laplace's	MIL-Hdbk-189	
-۰/۰۹۲	-۱/۰۲۶	۱/۰۷۹	آماره آزمون (لاگ ۱)	-۱/۹۹	۲۶۰/۰۲	آماره آزمون
۳/۵۷۸	۱/۵۴۲	۰/۱۴۰	آماره آزمون (لاگ ۱)	۰/۰۴۷	۰/۵۱۵	P-Value
بدون خودهمبستگی			نتایج آزمون تحلیلی	بدون روند		نتایج آزمون تحلیلی
بدون خودهمبستگی			نتایج آزمون ترسیمی	بدون روند		نتایج آزمون ترسیمی
بدون خودهمبستگی			خودهمبستگی	بدون روند		روند
فرض iid پذیرفته شد و مدل Lognormal-2P برازش شد						
پارامتر دوم				پارامتر اول		
۱/۳۸۳				۲/۷۰۱		
TTRs						
آزمون خودهمبستگی				آزمون روند		
LBQ	TSTA	ACF		Laplace's	MIL-Hdbk-189	
۰/۴۹۷	-۰/۶۹۶	-۰/۰۶۲	آماره آزمون (لاگ ۱)	۱/۰۱	۲۳۱/۴۳	آماره آزمون
۰/۵۱۲	۰/۱۴۳	۰/۰۱۳	آماره آزمون (لاگ ۱)	۰/۳۱۳	۰/۴۱۱	P-Value
بدون خودهمبستگی			نتایج آزمون تحلیلی	بدون روند		نتایج آزمون تحلیلی
بدون خودهمبستگی			نتایج آزمون ترسیمی	بدون روند		نتایج آزمون ترسیمی
بدون خودهمبستگی			خودهمبستگی	بدون روند		روند
فرض iid پذیرفته شد و مدل Normal-2P برازش شد						
پارامتر دوم				پارامتر اول		
۶۴۹/۷۴۴				۱۲۲۶/۲۳۶		



شکل ۲-۶ - آزمون ترسیمی روند لودر WA470-3



شکل ۳-۶ - نمودار خودهمبستگی نما برای دو لاگ یک و دو در لودر WA470-3

در این نمودار مقادیر AFC با ستون‌ها و مرز بحرانی اطمینان ۹۵ درصد برای ارزیابی فرضیه صفر با خطوط پررنگ در بالا و پائین نمایش داده شده است. همان‌طوری که دیده می‌شود ستون AFC مربوط به گام ۱ داده‌های خرابی و تعمیرات زیرسیستم به ترتیب دارای مقدار $1/079$ و $-0/062$ است و در محدوده خط‌چین‌ها قرار دارد و در نتیجه فرض صفر عدم وجود خودهمبستگی برای آن پذیرفته می‌شود. آماره‌ی دوم نشان داده شده در جدول T -test (TSTA) است. مقدار این آماره برای داده‌های خرابی و تعمیرات به ترتیب $-1/026$ و $-0/696$ است. همان‌طوری که دیده می‌شود در هر دو مورد مقدار آماره در محدوده‌ی دو مرز بحرانی $-1/96$ و $1/96$ قرار دارد، بنابراین این، این آماره نیز پذیرش فرضیه صفر عدم وجود خودهمبستگی را تأیید می‌کند. آماره‌ی سوم مورد استفاده LBQ است که این آماره نیز با توجه به مقایسه‌ی مقادیر آماره با مقدار بحرانی آماره یعنی $3/841$ پذیرش فرضیه صفر و عدم وجود خودهمبستگی در لودر را تأیید می‌کند.

بنابراین با توجه به نتایج آزمون‌های روند و خودهمبستگی فرض iid در مورد TBFs و TTRs لودر پذیرفته شده است. در مرحله‌ی بعد توابع توزیع مناسب برای خرابی و تعمیرات بر اساس آماره کلموگروف-اسمیرنوف تعیین شد. مطابق جدول ۶-۲ تابع توزیع لاگ نرمال دو پارامتری با لگاریتم میانگین (μ) ۲/۷۰۱ و لگاریتم انحراف معیار (σ) ۱/۳۸۳ برای TBFs و تابع توزیع نرمال دو پارامتری با میانگین (μ) ۱۲۲۶/۲۳۶ و انحراف معیار (σ) ۶۴۹/۷۴۴ برای TTRs برآزش شد. جدول ۶-۲ نتایج تحلیل‌های آماری برای زیرسیستم‌ها را نشان می‌دهد. طبق این جدول تنها برای زیرسیستم تراک فرض iid رد شده لذا رفتار خرابی‌ها (TBFs) و تعمیرات (TTRs) آن با مدل PLP توصیف شده است.

جدول ۶-۲ - برآزش توابع یا مدل آماری برای زیرسیستم‌های معدنی

پارامترها	تابع یا مدل	فرض iid	نوع داده‌ها	زیرسیستم
Log-mean: ۲/۷۰۱ , Log-std: ۱/۳۸۳	Lognormal-2P	قبول	TBFs	لودر
Mean: ۱۲۲۶/۲۳۶ , Std: ۶۴۹/۷۴۴	Normal-2P	قبول	TTRs	
Beta: ۱/۳۵۷ , Eta: ۱۱۴/۷۱۱	PLP	رد	TBFs	تراک
Beta: ۰/۵۰۷ , Eta: ۰/۰۹۸	PLP	رد	TTRs	
Beta: ۰/۸۷۸ , Eta: ۴۳/۱۵۸ , Gamma: ۱/۶۴۷	Weibull-3P	قبول	TBFs	بلدوزر
Mu: ۱/۴۴۲ , Sigma: ۰/۶۶۱	Loglogistic-2P	قبول	TTRs	

در شکل ۶-۴ و شکل ۶-۵ قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های معدنی برای بازه‌ی کارکرد ۱۰۰ ساعت ترسیم شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان زیرسیستم لودر پس از ۲۰ ساعت کارکرد به مقدار تقریبی ۴۰ درصد افت می‌کند و تقریباً پس از ۱۰۰ ساعت کارکرد عملاً صفر می‌شود. در این سیستم به لحاظ قابلیت اطمینان، زیرسیستم لودر در کل بازه کارکرد ۱۰۰ ساعت بالاترین مقدار و زیرسیستم تراک بدترین وضعیت را دارد. در مورد قابلیت تعمیرپذیری نیز مطابق شکل ۶-۵ برای دو زیرسیستم تراک و بلدوزر وضعیت یکسان است و احتمال تعمیر این دو زیرسیستم در ۲۰ ساعت تقریباً ۱۰۰ درصد است. درحالی‌که زیرسیستم لودر از منظر قابلیت تعمیرپذیری بحرانی‌ترین حالت را دارد و احتمال تعمیر آن حتی پس از ۱۰۰ ساعت نیز از ۱۰ درصد بیش‌تر نشده است.

ب- قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های معدنی

برای به دست آوردن قابلیت دسترسی در زیرسیستم لودر باید MTBF و MTTR تعیین شود. مقدار متوسط توابع قابلیت اطمینان (MTBF) با توزیع لاگ نرمال را می‌توان از رابطه (۶-۱) به دست آورد:

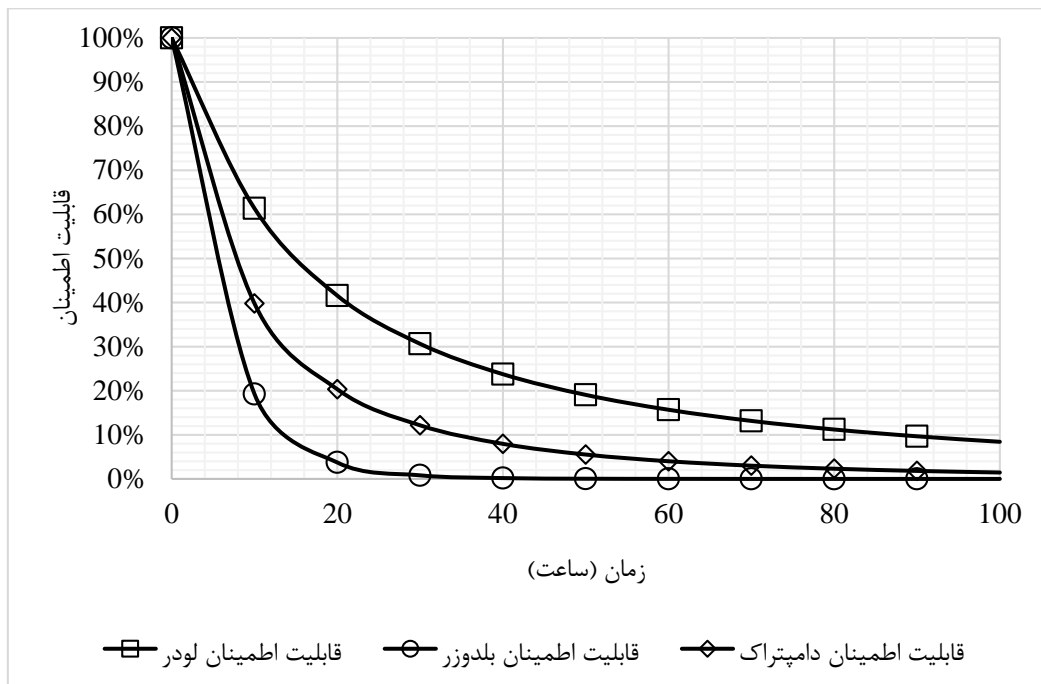
$$MTBF = \mu = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \Rightarrow MTBF = 38/74 \text{ Hr} \quad (1-6)$$

مقدار متوسط توابع قابلیت تعمیرپذیری (MTTR) با توزیع نرمال را نیز می‌توان از رابطه (۶-۲) به دست آورد:

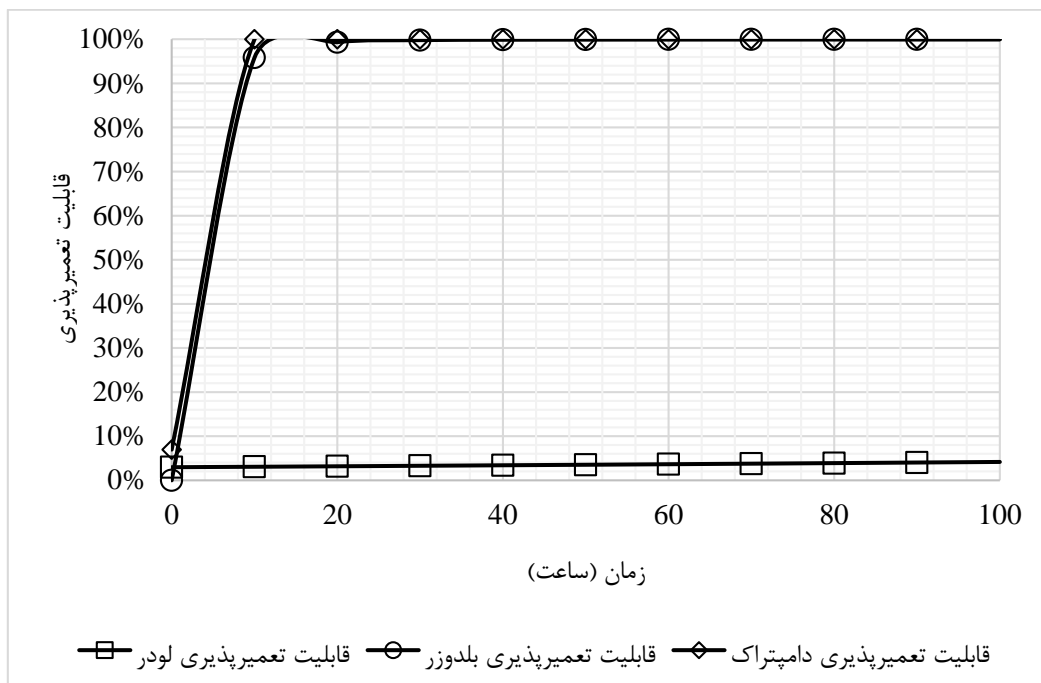
MTTR= μ ⇒

MTTR=۱۲۲۶/۲۳۶ Hr

(۲-۶)



شکل ۴-۶ - قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های معدنی



شکل ۵-۶ - قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های معدنی

در نهایت قابلیت دسترسی زیرسیستم لودر به صورت زیر است:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \Rightarrow A = 0.031 = 3.1\% \quad (3-6)$$

پس در واقع زیرسیستم فوق تنها قادر به پوشش بخش ناچیزی از زمان کارکرد دستگاه بوده و به شدت نیازمند بهبود وضعیت است. به طور کلی قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های معدنی به صورت جدول ۳-۶ است.

جدول ۳-۶ - قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های معدنی

زیرسیستم	MTBF (Hr)	MTTR (Hr)	قابلیت دسترسی (%)
بلدوزر	۴۷/۷۲۲	۱۰/۰۳۸	۸۲/۶
لودر	۳۸/۷۴	۱۲۲۶/۲۳۶	۳/۱
تراک	۱۰۵/۰۹۳	۰/۱۹۱	۹۹/۸

ج - قابلیت دسترسی سیستم معدنی

با توجه به شکل ۱-۶ پیکربندی زیرسیستم‌های معدنی به صورت سری است و لذا از رابطه (۴-۶) برای محاسبه قابلیت دسترسی کل سیستم استفاده می‌شود:

$$A_s(t) = \prod_{i=1}^3 (0.031 \times 0.826 \times 0.998) = 2.5\% \quad (4-6)$$

۶-۲-۲ - تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر شرایط محیطی

پس از تحلیل رفتار عملکردی سیستم و زیرسیستم با شاخص قابلیت دسترسی و بدون وارد کردن تأثیر شرایط محیطی در قسمت قبلی به محاسبه قابلیت اطمینان زیرسیستم یک دستگاه لودر کاتریپلار 988-B با استفاده از مدل نرخ مخاطرات متناسب پرداخته می‌شود که دربرگیرنده تأثیر شرایط محیطی بر رفتار عملکردی زیرسیستم است. این مدل از دو تابع یکی بر اساس داده‌های زمانی و دیگری شامل شرایط محیطی (فاکتورهای ریسک) تشکیل می‌شود. برای تعیین تابع پایه نرخ مخاطره، آزمون‌های روند و خودهمبستگی برای ارزیابی فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها (iid) مورد استفاده قرار گرفته و در نتیجه آن فرض iid رد شد. در نتیجه، مدل فرایند قانون توانی برای تحلیل سیستم تعمیرپذیر انتخاب شد. در مرحله بعدی نیز ضرایب رگرسیون برای فاکتورهای ریسک با سطح تأثیر معناداری مشخص و با به‌کارگیری روش بازگشتی انجام گرفت. طبق نتایج حاصل از تحلیل فاکتورهای نوبت، محل کار، تناسب با تراک، وضعیت آب‌وهوا، دمای محیط و وضعیت جاده دارای تأثیر معناداری بودند که در نتیجه آن قابلیت اطمینان لودر بر اساس تابع زمانی و شش فاکتور ریسک محاسبه شد. در نهایت نیز اختلاف حدوداً سه برابری بهره‌وری برای دو حالت تحلیل قابلیت اطمینان با

در نظرگیری و بدون در نظر گیری فاکتورهای ریسک به دست آمد. همان طور که اشاره شد برای تحلیل قابلیت اطمینان و وارد کردن تأثیر شرایط محیطی باید علاوه بر داده‌های زمانی (TBFs) و داده‌های کیفی (فاکتورهای ریسک) نیز باید در دسترس باشد و این داده‌های کیفی برای به کارگیری در تحلیل‌های آماری باید کمی‌سازی شوند.

در تحلیل قابلیت اطمینان به روش PHM در نخستین گام باید تابع نرخ مخاطره پایه که تنها مبتنی بر زمان است تعیین شود. برای ان کار از الگوریتم ارائه شده در شکل ۲-۱ استفاده می‌شود. طبق این الگوریتم قبل از انجام هر نوع تحلیل باید فرض iid بررسی شود. نتیجه روش تحلیلی آزمون روند سیستم در سطح معنی‌داری $\alpha=0/05$ در جدول ۴-۶ ارائه شده است.

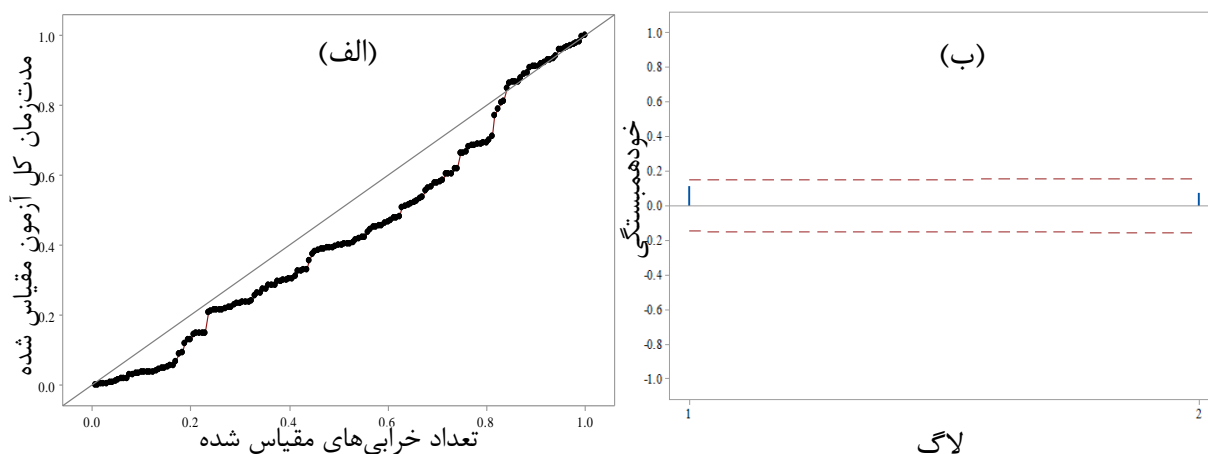
جدول ۴-۶ - نتایج آزمون تحلیلی روند

Laplace	MIL-Hdbk-189	سیستم لودر
-۳/۲۴	۴۶۱/۸۷	آماره محاسبه شده
۰/۰۰۱	۰	p- مقدار
روند دارد	روند دارد	نتیجه آزمون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵

همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر P -value در سیستم کوچک‌تر از α است، در نتیجه فرضیه صفر عدم وجود روند رد می‌شود. نمودار آزمون ترسیمی روند سیستم در شکل ۶-۶ دیده می‌شود. این نمودار انطباق کامل بین نتایج آزمون‌های تحلیلی و ترسیمی را نشان می‌دهد. برای تصمیم‌گیری درباره رد یا پذیرش فرضیه صفر مبنی بر عدم وجود خودهمبستگی با استفاده از AFC در سطح اطمینان ۹۵ درصد، از نمودارهای خودهمبستگی در شکل ۶-۶ استفاده شده است. در این نمودار مقادیر AFC با ستون‌ها و مرز بحرانی اطمینان ۹۵ درصد برای ارزیابی فرضیه صفر با خط‌چین نمایش داده شده است. همان طوری که دیده می‌شود مقدار ستون AFC مربوط به گام ۱ برای سیستم ۰/۱۱ است و در محدوده خط‌چین‌ها قرار دارد و در نتیجه فرض صفر عدم وجود خودهمبستگی برای آن پذیرفته می‌شود. با توجه به نتایج آزمون‌های روند و خودهمبستگی فرض iid در مورد TBF-های لودر کاتریپلار رد می‌شود و روش NHPP برای توصیف رفتار، خرابی‌ها در طول زمان مناسب است. در این پژوهش از روش PLP که نوع خاصی از روش NHPP است، برای تابع نرخ مخاطره پایه سیستم استفاده می‌شود. پارامترهای شکل (β) و مقیاس (θ) در سطح اطمینان ۹۵ درصد به ترتیب ۰/۷۶۳ و ۴/۰۳۸ محاسبه شد

برای وارد کردن تأثیر شرایط محیطی باید تابع پیوند مدل PHM تعیین شود. به این منظور داده‌های TBFs و فاکتورهای ریسک مربوطه به روش بازگشتی (BSTEP) تحلیل شد. تخمین ضرایب رگرسیون در این مدل‌ها

به روش بازگشتی - والد انجام می‌گیرد. در این روش فاکتورهای ریسک کم‌اهمیت‌تر بر اساس آماره والد و p -value به‌طور گام‌به‌گام از محاسبات حذف می‌شود. در این رساله سطح اعتماد ۵ درصد برای سنجش معناداری انتخاب شده است. همچنین برای آزمون فرض متناسب بودن نیز از آزمون تحلیلی باقیمانده‌های شوئنفلد استفاده است.



شکل ۶-۶- الف - آزمون ترسیمی روند سیستم لودر کاترپیلار و ب- نمودار خودهمبستگی برای لگ‌های ۱ و ۲ برای زیرسیستم‌های با عدم برقراری فرض متناسب بودن نیز از SCRM استفاده شده و داده‌ها بر اساس فاکتور ریسک وابسته به زمان لایه‌بندی می‌شوند. در واقع این مدل فاکتور ریسک متغیر در طول زمان را از طریق لایه‌بندی کنترل می‌کند و اثر این فاکتور در تابع اساسی نمایان خواهد شد. پس در صورت کاربرد مدل SCRM برای یک زیرسیستم قسمت دوم تابع مربوط به تأثیر شرایط محیطی از ضرایب یکسان برای فاکتورهای ریسک یکسان ولی تابع اساسی مختلف برای لایه‌های مختلف برخوردار خواهد بود. از سویی دیگر به‌منظور پیشگیری از هر نوع انحرافی در نتایج به دست آمده از PHM، فرض متناسب بودن (PH) مدل باید کنترل شود. برای این منظور می‌توان از آزمون فرض GOF استفاده نمود که با ارائه آماره استاتیک و p -value به ارزیابی فرض PH برای هر یک از فاکتورهای ریسک می‌پردازد.

برای این آزمون روش‌های مختلفی وجود دارد از جمله روش نموداری که یکی از پرکاربردترین‌ها است. مشکل این روش ارائه تصویر بصری از موازی بودن از نرخ‌های مخاطره است که باید از آن فرض متناسب بودن را نتیجه‌گیری کرد. در این روش پس از ترسیم نرخ مخاطره به ازای مقادیر مختلف فاکتورهای ریسک مقایسه آن‌ها به‌صورت بصری برای تعیین موازی بودن آن است، حال مشکل این است که منظور از "موازی بودن چه نوع موازی بودن است؟" چرا که این موضوع منجر به نتیجه‌گیری جداگانه بر اساس منطق‌های مختلف خواهد شد.

جدول ۵-۶ مقدار $\text{Exp}(\alpha)$ نشان دهنده نرخ مخاطره است، این نرخ بیانگر تغییرات ریسک ناشی از تغییر مقادیر فاکتورهای ریسک و یا به طور خاص پیش‌بینی تغییرات نرخ مخاطره به ازای هر واحد تغییر فاکتورهای ریسک است. این مقدار اگر کمتر از ۱ باشد فاکتور ریسک سبب کاهش نرخ مخاطره شده و اگر مساوی ۱ باشد فاکتور ریسک در نرخ مخاطره بی‌تأثیر خواهد بود. طبق نتایج حاصل از تحلیل (از سویی دیگر به منظور پیشگیری از هر نوع انحرافی در نتایج به دست آمده از PHM، فرض متناسب بودن (PH) مدل باید کنترل شود. برای این منظور می‌توان از آزمون فرض GOF استفاده نمود که با ارائه آماره استاتیک و p-value به ارزیابی فرض PH برای هر یک از فاکتورهای ریسک می‌پردازد.

برای این آزمون روش‌های مختلفی وجود دارد از جمله روش نموداری که یکی از پرکاربردترین روش‌ها است. مشکل این روش ارائه تصویر بصری از موازی بودن نرخ‌های مخاطره است که باید فرض متناسب بودن را نتیجه‌گیری کرد. در این روش پس از ترسیم نرخ مخاطره به ازای مقادیر مختلف فاکتورهای ریسک مقایسه آن‌ها به صورت بصری برای تعیین موازی بودن آن است، حال مشکل این است که منظور از "موازی بودن چه نوع موازی بودن است؟" چرا که این موضوع منجر به نتیجه‌گیری جداگانه بر اساس منطق‌های مختلف خواهد شد. مشکل بعدی در رابطه با لایه‌بندی فاکتورهای ریسک پیوسته مانند بارندگی یا دما خواهد بود. چرا که لایه‌بندی بیشتر منجر به نازک‌تر شدن آن، یعنی داده داخل آن کمتر خواهد شد. مشکل سوم نیز درباره نحوه ارزیابی فرض متناسب بودن برای چندین فاکتور ریسک به طور هم‌زمان خواهد بود. در جدول (۵-۶) فاکتورهای نوبت (۱) (Z_{11})، نوبت (۲) (Z_{12})، محل کار (Z_2)، تناسب با تراک (Z_3)، وضعیت آب‌وهوایی (Z_4)، دمای محیط (Z_9)، وضعیت جاده (Z_5) دارای تأثیر معناداری بوده و لذا تابع قابلیت اطمینان لودر را با استفاده از رابطه (۴-۲) می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$R(t, z) = (R_0(t))^{\exp(+0.249z_{11} - 1.517z_{12} - 1.019z_2 - 1.027z_3 + 0.254z_4 - 0.023z_9 - 0.552z_5)} \quad (5-6)$$

$$R(t, z) = (R_0(t))^{\exp(+0.249z_{11} - 1.517z_{12} - 1.019z_2 - 1.027z_3 + 0.254z_4 - 0.023z_9 - 0.552z_5)}$$

از سویی دیگر به منظور پیشگیری از هر نوع انحرافی در نتایج به دست آمده از PHM، فرض متناسب بودن (PH) مدل باید کنترل شود. برای این منظور می‌توان از آزمون فرض GOF استفاده نمود که با ارائه آماره استاتیک و p-value به ارزیابی فرض PH برای هر یک از فاکتورهای ریسک می‌پردازد.

برای این آزمون روش‌های مختلفی وجود دارد از جمله روش نموداری که یکی از پرکاربردترین روش‌ها است. مشکل این روش ارائه تصویر بصری از موازی بودن نرخ‌های مخاطره است که باید فرض متناسب بودن را نتیجه‌گیری کرد. در این روش پس از ترسیم نرخ مخاطره به ازای مقادیر مختلف فاکتورهای ریسک مقایسه آن‌ها به صورت بصری برای تعیین موازی بودن آن است، حال مشکل این است که منظور از "موازی بودن چه

نوع موازی بودن است؟" چرا که این موضوع منجر به نتیجه‌گیری جداگانه بر اساس منطق‌های مختلف خواهد شد. مشکل بعدی در رابطه با لایه‌بندی فاکتورهای ریسک پیوسته مانند بارندگی یا دما خواهد بود. چرا که لایه‌بندی بیشتر منجر به نازک‌تر شدن آن، یعنی داده داخل آن کمتر خواهد شد. مشکل سوم نیز درباره با نحوه ارزیابی فرض متناسب بودن برای چندین فاکتور ریسک به‌طور هم‌زمان خواهد بود.

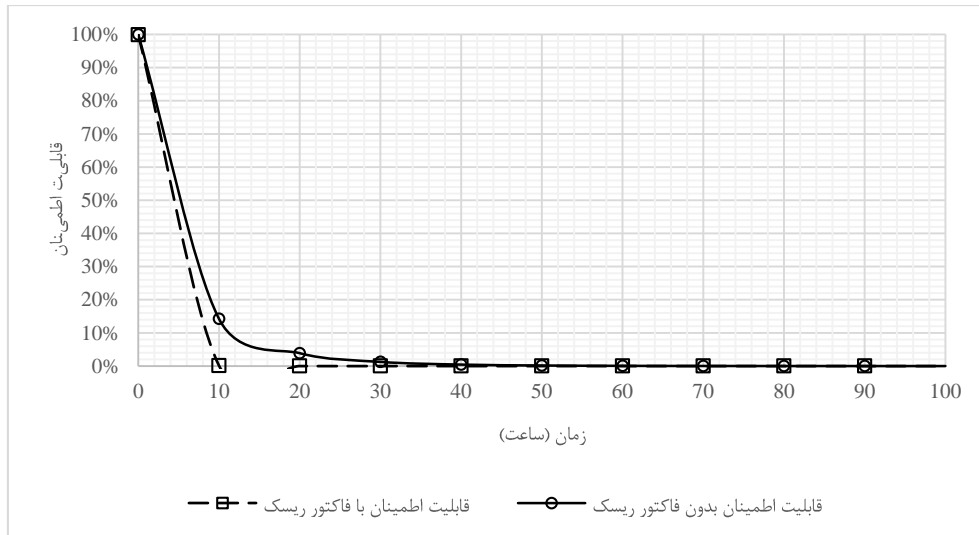
جدول ۶-۵ - فاکتورهای ریسک، معناداری و تأثیرات آن‌ها

فاکتور ریسک	α	Wald	Sig	Exp(α)
نوبت (۱) (Z_{11})	۰/۲۴۹	۰/۴۸۸	۰/۴۵۸	۱/۲۸۳
نوبت (۲) (Z_{12})	-۱/۵۷۱	۱۹۸/۱۹	۰	۰/۲۱۹
محل کار (Z_2)	-۱/۰۱۹	۱۷/۲۵۸	۰	۰/۳۶۱
تناسب با تراک (Z_3)	-۱/۰۲۷	۴/۷۰۴	۰/۰۳	۰/۳۵۸
وضعیت آب‌وهوایی (Z_4)	-۰/۲۵۴	۴/۷۱۰	۰/۰۳	۰/۷۷۶
دمای محیط (Z_9)	-۰/۰۲۳	۳/۱۳۱	۰/۰۷۷	۰/۹۷۷
وضعیت جاده (Z_5)	-۰/۵۵۲	۵/۰۱۳	۰/۰۲۵	۰/۵۷۶

بدین منظور آزمون GOF تحلیلی برای ارزیابی این فرض استفاده می‌شود. در این رساله از آزمون هارل و لی^۱ که حالت تغییر یافته از آزمون شوئنفلد در سال ۱۹۸۲ است که امروزه به‌عنوان آزمون باقیمانده‌های شوئنفلد معروف است. این روش به خاطر ارائه نتایج بر اساس p-value جذاب‌تر بوده و ارزیابی راحت‌تری با استفاده از منطق ریاضی ارائه می‌دهد. یک p-value معنادار بزرگ‌تر از ۰/۱ نشان دهنده قابل قبول بودن فرض متناسب بودن است در حالی که یک p-value کوچک‌تر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که فاکتور ریسک مربوطه فرض متناسب بودن را ارضاء نمی‌کند (Kleinbaum and Klein, 2012). به عبارت دیگر آزمون فرض بر این اساس استوار است که در صورت برقراری فرض PH باقیمانده‌های شوئنفلد همبستگی با زمان نخواهند داشت ($H_0: \rho=0$). در واقع در صورت رد فرض صفر فرض PH نیز رد خواهد شد (Kleinbaum, 2011). نتایج آزمون برای فاکتورهای ریسک مختلف به‌صورت جدول ۶-۶ تنظیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، P(PH)-value برای هیچ‌یک از فاکتورهای ریسک در سطح معناداری ۵ درصد معنادار نیست. بنابراین فرض PH برای

۱ - Harrel and Lee

تمامی فاکتورهای ریسک برقرار است. در نهایت تابع قابلیت اطمینان لودر برای دو حالت: حالت اول، صرف نظر از تأثیرات فاکتورهای ریسک و حالت دوم با در نظرگیری تأثیرات فاکتورهای ریسک به ازای مقادیر آن در جدول ۶-۶ و با استفاده از رابطه (۵-۶) در شکل ۶-۷ ترسیم شده است.



شکل ۶-۷ - قابلیت اطمینان لودر کوماتسو

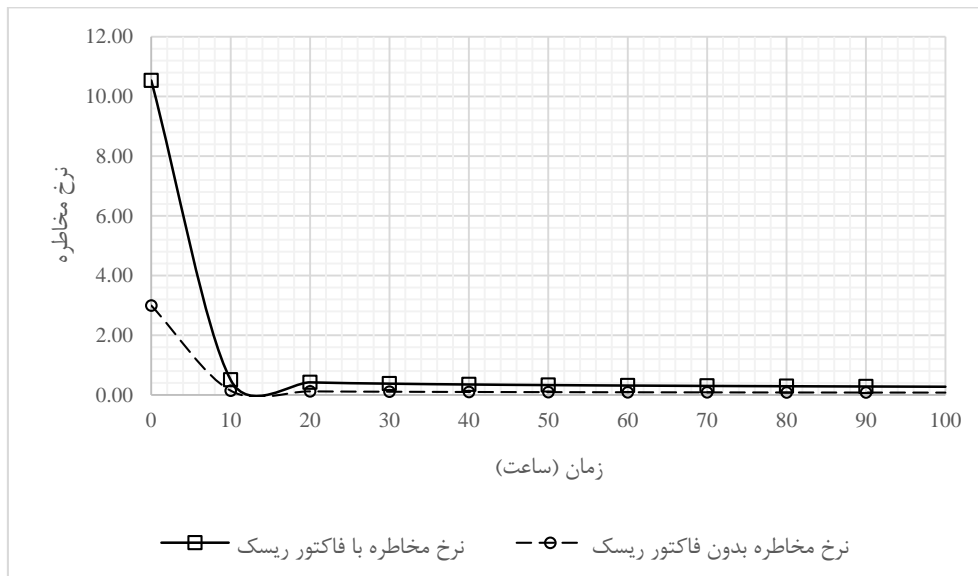
جدول ۶-۶ - مقادیر p-value برای فاکتورهای ریسک

متوسط مقدار فاکتور ریسک	P(PH)	ρ	فاکتورهای ریسک
۰/۲	۰/۹۲۱	-۰/۰۰۸	نوبت (۱) (Z11)
۰/۷۲۴	۰/۴۲۵	-۰/۰۶۲	نوبت (۲) (Z12)
۱/۸۵۳	۰/۵۲۵	-۰/۰۴۹	محل کار (Z2)
۲/۰۲۴	۰/۲۹۷	۰/۰۸۱	تناسب با تراک (Z3)
۳/۰۹۴	۰/۸۳۳	۰/۰۱۶	وضعیت آب و هوایی (Z4)
۵/۲۷۹	۰/۴۳۲	-۰/۰۶۱	دمای محیط (Z9)
۱/۱۹۴	۰/۶۹۷	-۰/۰۳	وضعیت جاده (Z5)

همان‌طور که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان لودر بدون در نظرگیری تأثیرات شرایط محیطی بعد از تقریباً ۲ ساعت کارکرد به ۵۰ درصد افت کرده و در صورت وارد کردن تأثیر شرایط محیطی این زمان به تقریباً به ۰/۵ ساعت کاهش پیدا کرده است.

همچنین قابلیت اطمینان سیستم برای حالت اول بعد از ۳۰ ساعت کارکرد صفر شده درحالی‌که این زمان برای حالت دوم به ۱۰ ساعت افت کرده و در واقع بهره‌وری سیستم حدوداً سه برابر تنزیل یافته است. نرخ

مخاطره لودر نیز برای دو حالت مذکور به شکل ۸-۶ است. در این نمودارهای نیز به خاطر $\beta < 1$ نرخ مخاطره رفته کاهش یافته است.



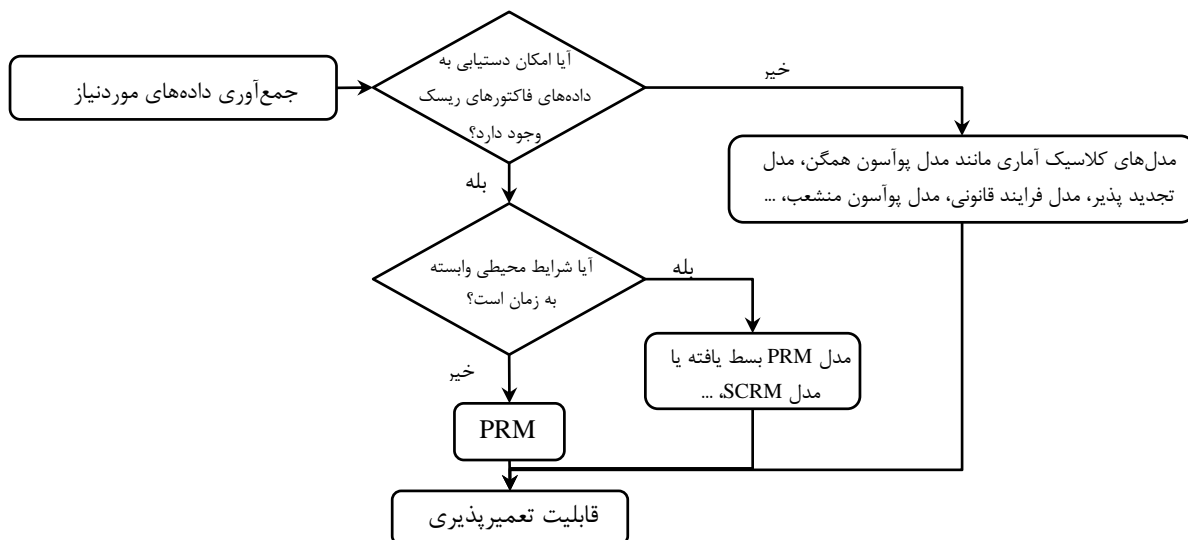
شکل ۸-۶ - نرخ مخاطره لودر کوماتسو

۳-۲-۶- تحلیل قابلیت تعمیرپذیری مبتنی بر شرایط محیطی

در این بخش شاخص دیگری از عملکرد یعنی قابلیت تعمیرپذیری تجهیزات معدنی با توجه به تأثیر شرایط محیطی وابسته به زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور از مدل رگرسیون لایه‌بندی شده (SCRM) استفاده شده که قادر به لایه‌بندی کردن فاکتورهای ریسک وابسته به زمان است. در شکل ۹-۶ الگوریتم ساده‌ای از روند کار در این بخش مشاهده می‌شود. در این بخش از زیرسیستم‌های تراک (دو دستگاه)، لودر و بلدوزر استفاده شد که در جدول ۷-۶ مشخصات و اختصارات (کدگذاری) به کار رفته برای این زیرسیستم‌ها مشاهده می‌شود. داده‌های مورد استفاده در این بخش نیز برای بازه زمانی ۱۵ ماهه گردآوری شد. این بانک متشکل از دو دسته داده‌های زمانی در قالب TTR و شرایط محیطی در قالب فاکتورهای ریسک می‌باشند.

جدول ۷-۶- زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی و کدگذاری

ردیف	زیرسیستم	مدل	کد
۱	لودر	Caterpillar 988B	Lo.
۲	بلدوزر	Caterpillar D8N	Bl.
۳	تراک	Komatsu HD-785-5	DT. 1
۴	تراک	Komatsu HD-785-5	DT. 2



شکل ۹-۶- طرح شماتیک روش ارزیابی قابلیت تعمیرپذیری

در جدول ۸-۶ نیز لیست فاکتورهای ریسک به کار رفته برای همه زیرسیستم‌ها با اختصار نشان داده می شود. نرم افزار SPSS از باقیمانده‌های اسکنفیلد برای آزمون این فرض استفاده می کند. در این آزمون رد فرض صفر به مفهوم رد فرض متناسب بودن است.

جدول ۸-۶- اختصارات فاکتورهای ریسک شرایط محیطی تعمیرات برای زیرسیستم‌ها

تراک	لودر	بلدوزر	فاکتور ریسک
(W_{t1})	(W_{l1})	(W_{b1})	نوبت کاری
(W_{t2})	(W_{l2})	(W_{b2})	وضعیت تعمیرات
(W_{t3})	(W_{l3})	(W_{b3})	وضعیت آب و هوا
(W_{t4})	(W_{l4})	(W_{b4})	میزان بارندگی
(W_{t5})	(W_{l5})	(W_{b5})	دما

جدول ۹-۶ آزمون آماری فرض متناسب بودن برای زیرسیستم‌ها به ازای فاکتورهای ریسک مؤثر در تعمیرات را نشان می دهد. در این جدول ۹-۶ p-value برای فاکتورهای ریسک بدون ستاره در زیرسیستم‌های مختلف بالا بوده که نشان دهنده برقراری فرض متناسب بودن برای این فاکتورها است. به طور مثال مقادیر $0/073$ ، $0/184$ و $0/372$ برای نوبت-۱، نوبت-۲ و وضعیت آب و هوا به ترتیب در زیرسیستم لودر نشان دهنده برقراری فرض متناسب بودن برای این فاکتورهای ریسک است. ولی این مقدار برای وضعیت تعمیرات 0 است که کمتر از دو مقدار $0/05$ و $0/01$ است که نشان دهنده رد فرض صفر برای این فاکتور ریسک است.

در زیرسیستم‌های با برقراری فرض متناسب بودن، برای قسمت مبتنی بر زمان (تابع اساسی تعمیرات (t)) این مدل قبل از توزیع مدل مناسب به ارزیابی فرض توزیع یکسان و مستقل (iid) داده‌ها پرداخته می‌شود. سپس پارامترهای مدل یا توزیع با استفاده از روش درست‌نمایی بیشینه (MLE) تخمین زده شده و بهترین توزیع یا مدل مناسب با استفاده از آماره کلموگروف-اسمیرنوف برای داده‌های زمانی برازش می‌شود. برای قسمت دوم مدل RPM (تأثیر فاکتورهای ریسک) استفاده شده و مقادیر (α) در سطح معناداری ۰/۰۵ برای فاکتورهای ریسک مؤثر که با استفاده از روش "پله‌ای پس‌رو" و بر اساس آماره والد و p-value به دست می‌آیند، تخمین زده می‌شود. جدول ۶-۹ شامل فاکتورهای ریسک مؤثر وارد شده در مدل برای زیرسیستم در آخرین گام است. برای مثال در زیرسیستم لودر فاکتورهای ریسک نوبت، وضعیت نگهداری و تعمیرات و وضعیت آب‌وهوا فاکتورهای مؤثر در نرخ تعمیرات می‌باشند.

جدول ۶-۹- p-value برای ارزیابی فرض متناسب بودن برای فاکتورهای ریسک مؤثر

p-value						زیرسیستم
دما	بارندگی	وضعیت آب‌وهوایی	وضعیت تعمیرات	نوبت-۲	نوبت ۱	
-	-	۰/۳۷۲	***	۰/۱۸۴	۰/۷۳	Lo.
۰/۵۶۹	-	-	۰/۷۰۸	*۰/۰۴۰	۰/۱۷۷	Bl.
۰/۴۴۸	۰/۹۷۷	۰/۶۵۸	***,۰	*۰/۳۴	***۰/۰۰۳	DT. 1
-	۰/۹۸۸	-	۰/۷۵۳	*۰/۱۲۳	***۰/۰۰۲	DT. 2

*همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنادار است، **همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنادار است

در زیرسیستم‌های بدون برقراری فرض متناسب بودن نیز از مدل SCRM برای تحلیل‌ها استفاده می‌شود. در این مدل فرض بر این است که نرخ تعمیرات در یک‌لایه به ازای مقادیر مختلف فاکتورهای ریسک متناسب است ولی این تناسب الزاماً در بین لایه‌های مختلف برقرار نیست. در مدل SCRM تأثیر فاکتور ریسکی که از فرض متناسب بودن پیروی نمی‌کند در نرخ‌های تعمیرات اساسی مختلف برای لایه‌های مختلف که بر اساس این فاکتور لایه‌بندی شده مشاهده می‌شود. به بیان ساده‌تر در SCRM به ازای مقادیر ثابت تأثیر فاکتورهای ریسک که از فرض متناسب پیروی می‌کنند، توابع نرخ تعمیرات اساسی مختلف به ازای فاکتور ریسک که از فرض متناسب پیروی نمی‌کنند وجود دارد. در سیستم استخراج معدن سونگون برای زیرسیستم لودر سه فاکتور نوبت-۱، نوبت-۲ و وضعیت آب‌وهوایی با فرض متناسب بودن دارای تأثیرات ۰/۵۲۵، ۰/۴۵۰ و ۰/۲۱ بوده و نرخ تعمیرات آن بر اساس فاکتور ریسک وضعیت تعمیرات به دو لایه تقسیم می‌شود. نرخ تعمیرات اساسی لایه اول با توجه به برقراری فرض iid از توزیع ویبول سه پارامتری پیروی کرده و در لایه دوم مشابه

لایه اول نیز به علت برقراری فرض iid از روش‌های کلاسیک آماری برای توصیف رفتار تعمیرات اساسی استفاده شده و مدل لگ‌جستیک دو پارامتری به‌عنوان بهترین برازش انتخاب شده است. در جدول ۶-۱۰ نتایج تحلیل تأثیر فاکتورهای ریسک برای زیرسیستم مختلف مشاهده می‌شود. در این جدول ستون دوم نشان دهنده وجود یا عدم وجود فاکتورهای ریسک وابسته به زمان و متناسب با آن استفاده از مدل SCRM یا PRM است. در ستون سوم نیز تأثیر فاکتورهای ریسک وارد شده که در این رابطه مقادیر (e^{Coef}) بیانگر تأثیر هر فاکتور در نرخ مخاطره به ازای مقادیر مختلف آن است.

جدول ۶-۱۰- تخمین ضرایب فاکتورهای ریسک در زیرسیستم‌ها

زیرسیستم	رویکرد	$exp\left(\sum_{j=1}^m w_j \beta_j\right)$
Lo.	SCRM- لایه‌بندی شده با (w_{12})	$exp(0.525w_{111} - 0.450w_{112} - 0.211w_{13})$
Bl.	SCRM- لایه‌بندی شده با (w_{b12})	$exp(-5.178w_{b2})$
DT. 1	SCRM- لایه‌بندی شده با (w_{t12}, w_{t2})	$exp(-0.016w_{t4})$
DT. 2	SCRM- لایه‌بندی شده با (w_{t12})	$exp(-4.412w_{t2})$
نکته : w_{xij} : فاکتور ریسک باینری، w_{xi} : فاکتور ریسک طبقه‌بندی شده		

در جدول ۶-۱۱ نتایج ارزیابی فرض iid و برازش بهترین مدل یا توزیع برای توابع نرخ تعمیرات اساسی در زیرسیستم‌های مختلف با مدل SCRM نشان داده شده است. در این جدول نتایج تحلیل‌های تحلیلی آزمون روند و خودهمبستگی در لگ ۱ برای TTR-ها هر لایه مشاهده می‌شود. به‌طور مثال فرض صفر مبنی بر عدم وجود روند در سطح معناداری ۰/۰۵ در لایه ۱ زیرسیستم لودر رد نشده همچنین نتایج آزمون‌های تحلیلی خودهمبستگی در لاگ ۱ نیز نشان دهنده عدم وجود خودهمبستگی بوده بنابر این فرض iid برای این زیرسیستم برقرار بوده و تابع توزیع ویبول سه پارامتری برای آن برازش شده است. همان‌طور که اشاره شد مدل SCRM شامل دو قسمت و دربرگیرنده عملکرد و تأثیر شرایط محیط کارکرد است که تأثیرات مختلف فاکتورهای ریسک منجر به کاهش یا افزایش نرخ تعمیرات خواهد شد. در زیرسیستم لودر مطابق شکل ۶-۱۰ نرخ تعمیرات در لایه دوم (Lo.2) یعنی به‌هنگام انجام تعمیرات اساسی بالاتر از نرخ مخاطره اساسی قرار گرفته است.

حال آنکه در لایه اول (Lo.1) یعنی برای تعمیرات جزئی نرخ مخاطره پایین‌تر از نرخ مخاطره اساسی قرار گرفته است. در شکل ۶-۱۱ این موضوع برای زیرسیستم‌های بلدوزر و لودر به‌ازای لایه‌های مختلف ترسیم شده است. نتایج تحلیل‌ها با استفاده از رویکرد SCRM نشان داد که اختلاف فاحشی بین قابلیت تعمیرپذیری لایه‌های مختلف وجود دارد که تفاوت قابلیت تعمیرپذیری برای تعمیرات جزئی و اساسی نشان دهنده این حقیقت است.

جدول ۱۱-۶- نتایج تحلیل‌های آماری فرض iid و برازش بهترین توزیع یا مدل

مدل یا تابع توزیع مناسب	iid	آزمون خودهمبستگی				آزمون روند			رتبه	رویکرد	زیر سیستم		
		نتایج آزمون	Test Statistic-Log 1			نتایج آزمون	P-Value						
			LBQ	TSTA	ACF		A.D.	La.				MIL	
Weibull-3P	پذیرش	بدون خودهمبستگی	۰/۰۴۰	-۰/۱۹۰	-۰/۰۲۸	بدون روند	۰/۰۳۸	۰/۲۴۷	۰/۷۱۳	۱	SCRM	Lo.	
3rd		2nd.	1st.	۸/۴۲۵	۳۵/۳۶۹	۰/۵۹							
Loglogistic-2P			بدون خودهمبستگی	۰/۱۱	-۰/۳۳	۰/۰۳۲	بدون روند	۰/۱	۰/۱۴۲	۰/۳۱			۲
3rd	2nd.	1st.									۰/۵۲۲	۱/۳۴۹	
Loglogistic-2P											بدون خودهمبستگی	۰/۰۶	
3rd	2nd.	1st.	۰/۷۳۵	۶/۱۴۸									
PLP			بدون خودهمبستگی	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۲۰۳	روندار	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵			۲
3rd	2nd.	1st.									۳۹/۱۲۹	۰/۵۷۸	
PLP											بدون خودهمبستگی	۰/۸۳	
3rd	2nd.	1st.	۳۹/۱۲۹	۰/۵۷۸									
PLP			بدون خودهمبستگی	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۲۰۳	روندار	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵			۲
3rd	2nd.	1st.									۳۹/۱۲۹	۰/۵۷۸	
PLP											بدون خودهمبستگی	۰/۸۳	
3rd	2nd.	1st.	۳۹/۱۲۹	۰/۵۷۸									
PLP			بدون خودهمبستگی	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۲۰۳	روندار	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵			۲
3rd	2nd.	1st.									۳۹/۱۲۹	۰/۵۷۸	
PLP											بدون خودهمبستگی	۰/۸۳	
3rd	2nd.	1st.	۳۹/۱۲۹	۰/۵۷۸									
PLP			بدون خودهمبستگی	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۲۰۳	روندار	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵			۲
3rd	2nd.	1st.									۳۹/۱۲۹	۰/۵۷۸	

ادامه جدول ۱۱-۶

Exponential-2P			پذیرش	بدون خودهمبستگی	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۱۲	بدون روند	۰/۷۳۳	۰/۵۱۱	۰/۲۴۸	۱	SCRM	DT.1
3rd	2nd.	1st.												
	۰/۵	۱/۹۶۹												
Weibull-3P			پذیرش	بدون خودهمبستگی	۰/۰۹	۰/۳	۰/۰۳۴	بدون روند	۰/۹۵	۰/۹۲۹	۰/۶۹۲	۲		
3rd	2nd.	1st.												
	۰/۴۳	۲/۷۵۶	۰/۸۱۳											
Weibull-3P			پذیرش	بدون خودهمبستگی	۰/۰	-۰/۰۶	-۰/۰۱۱	بدون روند	۰/۳۳	۰/۷۹۴	۰/۴۹۱	۳		
3rd	2nd.	1st.												
	۰/۱۹۴	۴/۳۱۸	۰/۹۳۹											
PLP			رد	بدون خودهمبستگی	۰/۶۵	-۰/۷۴	-۰/۱۷۶	روندار	۰/۰۲۴	۰/۰۳۲	۰/۰۲۶	۴		
3rd	2nd.	1st.												
	۲۳/۰۲۸	۰/۶۵۶												
Weibull-3P			پذیرش	بدون خودهمبستگی	۰/۰	۰/۰۵۰	۰/۰۲۳	بدون روند	۰/۹۷۱	۰/۸۳۶	۰/۹۳۷	۵		
3rd	2nd.	1st.												
	۷/۳۴۶	۱۰/۸۲۱	۸/۴۰۳											
PLP			رد	بدون خودهمبستگی	۰/۰۳	۰/۱۶	۰/۰۱۵	روندار	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱		
3rd	2nd.	1st.												
	۰/۷۵۹	۰/۶۳۳												
Weibull-3P			پذیرش	بدون خودهمبستگی	۰/۱۵	۰/۳۷	۰/۰۴۴	بدون روند	۰/۹۶۶	۰/۷۹۹	۰/۵۷	۲		
3rd	2nd.	1st.												
	۰/۴۳۵	۲/۲۷۱	۱/۱۸۰											
A.D.: Anderson-Darling, La.: Laplace test, MIL: MIL-Hdbk-189, LBQ: Ljung-Box q statistic, TSTA: t-test, ACF: autocorrelations statistic														

با توجه به شکل ۶-۱۱ مشاهده می‌شود که احتمال انجام تعمیرات بلدوزر در مدت زمان ۴۰ ساعت در مرحله دوم تقریباً ۵ درصد، در حالی که انجام تعمیرات در نوبت اول و سوم برای همین مدت زمان به ۵۲ درصد افزایش می‌یابد. لذا وارد کردن تأثیرات شرایط محیطی در تحلیل‌های قابلیت تعمیرپذیری و تصمیم‌گیری در مورد استراتژی نت امری ضروری است. قابل ذکر است که مدل SCRM امکان انجام تحلیل‌های مختلف بر اساس تأثیرات مختلف شرایط محیطی با تغییر مقادیر فاکتورهای ریسک و تغییر لایه‌ها را فراهم می‌نماید که برحسب نیاز می‌توان از آن بهره جست.

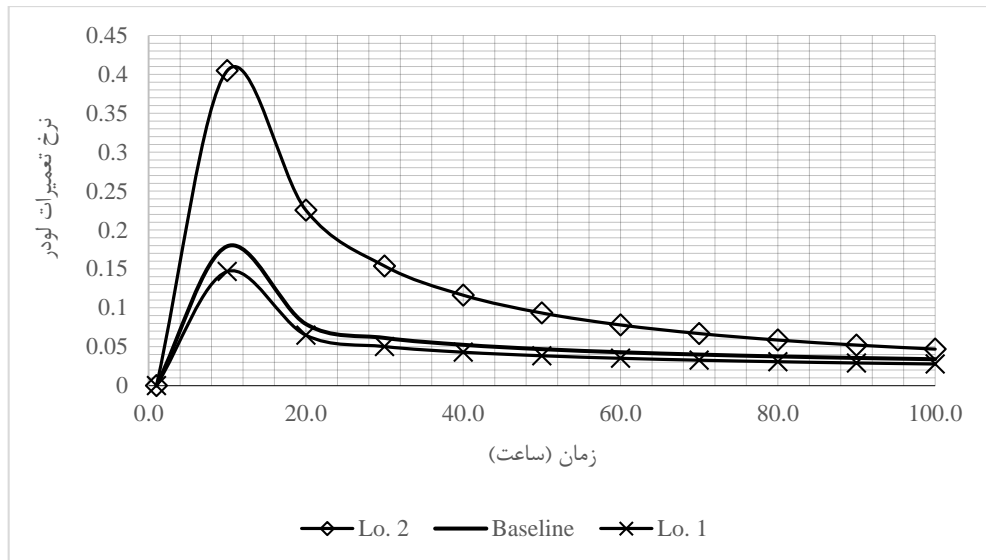
۳-۶- سنجش اهمیت سیستم

پس از تعیین رفتارهای عملکردی سیستم یا زیرسیستم با استفاده از شاخص‌های عملکردی مهندسین به دنبال شناسایی زیرسیستم‌های بحرانی و گلوگاه در ساختار سیستم هستند تا با استفاده از اطلاعات حاصله اولویت‌بندی فعالیت‌ها را انجام داده و عملکرد سیستم را هر چه سریع‌تر و دقیق‌تر بهینه کنند. انجام این مهم نیازمند شاخص‌های جدید و رویکردی نوین است تا با استفاده از چندین وجه بارز همچون عملکرد زیرسیستم/جزء، محل آن در پیکر سیستم و تأثیر شرایط محیطی بر آن‌ها به اولویت‌بندی اجزای سیستم پردازد. در این رساله از رویکرد "سنجش اهمیت" در سه بخش به اصلاح و ارتقای این شاخص پرداخته شده و برای تحلیل سیستم استخراجی معدن سونگون به کار گرفته شد. نخست سنجش اهمیت بر اساس قابلیت دسترسی و بدون در نظرگیری تأثیر شرایط محیطی بررسی می‌شود. سپس سنجش اهمیت صرفاً بر اساس قابلیت اطمینان پیشنهاد شده و تأثیر شرایط محیطی در قالب فاکتورهای ریسک در محاسبات و اولویت‌بندی زیرسیستم‌های هر سیستم وارد شده است. در آخرین مرحله نیز قابلیت دسترسی بر اساس تأثیر شرایط محیطی پیشنهاد شده است.

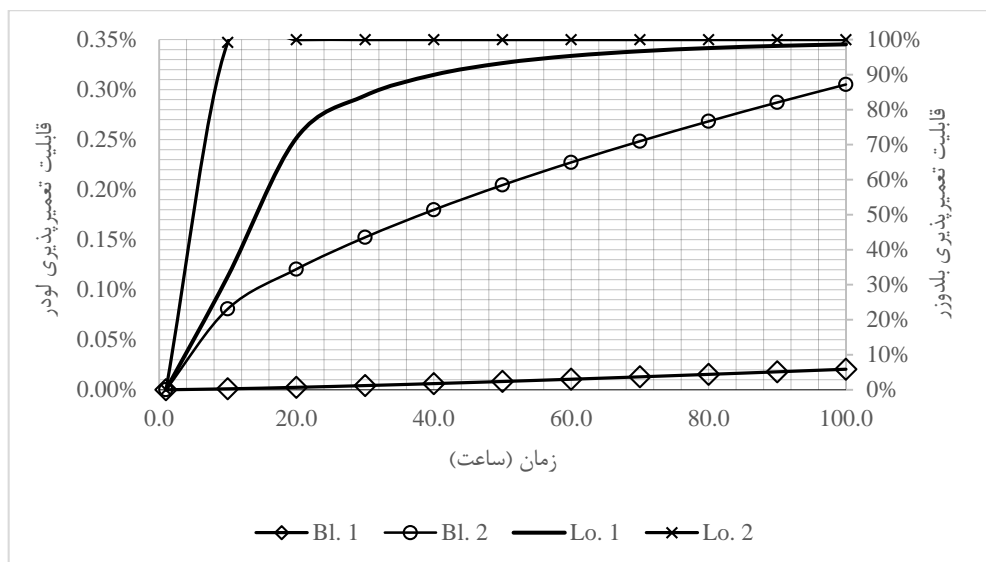
۳-۶-۱- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بدون تأثیر شرایط محیطی

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی (I_A^i) جزء i در زمان t در یک سیستم با n جزء را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (Barabady and Kumar, 2007):

$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \quad (۶-۶)$$



شکل ۶-۱۰- تأثیر فاکتورهای ریسک بر نرخ تعمیرات زیرسیستم لودر



شکل ۶-۱۱- قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های لودر و بلدوزر با استفاده از SCRM

در این رابطه A_s قابلیت دسترسی سیستم و A_i قابلیت دسترسی جزء/زیرسیستم نام است. مشابه رابطه (۲-۴۱) برای سنجش اهمیت قابلیت دسترسی جزء/زیرسیستم نام نیز فاکتور اهمیت اصلاح شده و به صورت سنجش اهمیت قابلیت دسترسی نرمالیزه (NI_A^i) در رابطه (۶-۷) می‌شود (Barabady and Kumar, 2007):

$$NI_A^i = \frac{I_A^i}{\sum_{j=1}^n I_A^j} \quad (7-6)$$

همان طور که قبلاً اشاره شد قابلیت دسترسی یک سیستم تابعی از نرخ مخاطره یا متوسط زمان تا وقوع خرابی (MTBF) (قابلیت اطمینان) و نرخ تعمیرات یا متوسط زمان انجام تعمیرات (MTTR) (قابلیت تعمیرپذیری) است، بنابراین I_A^i پس از انجام اصلاحات و بروزرسانی روابط موجود به صورت زیر ارائه می‌شود:

(a) سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ مخاطره (I_{A,λ_i}^i) :

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ مخاطره به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$I_{A,\lambda_i}^i = -\frac{\partial A_s}{\partial \lambda_i} = -\frac{\partial A_s}{\partial A_i} \times \frac{\partial A_i}{\partial \lambda_i} \quad (8-6)$$

که در این رابطه λ_i نرخ مخاطره جزء i است. این فاکتور نشان دهنده تأثیر نرخ مخاطره جزء/زیرسیستم i در قابلیت دسترسی کل سیستم است. در صورت بیان این فاکتور به صورت نرمالیزه مقدار اصلاح شده آن به صورت با نماد NI_{A,λ_i}^i و بصورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$NI_{A,\lambda_i}^i(t) = \frac{I_{A,\lambda_i}^i}{\sum_{j=1}^n I_{A,\lambda_i}^j} \quad (9-6)$$

(b) سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ تعمیرات (I_{A,μ_i}^i) :

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ تعمیرات به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$I_{A,\mu_i}^i = \frac{\partial A_s}{\partial \mu_i} = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \times \frac{\partial A_i}{\partial \mu_i} \quad (10-6)$$

که در این رابطه μ_i نرخ تعمیر جزء i است. این فاکتور نشان دهنده تأثیر نرخ تعمیرات جزء/زیرسیستم i در قابلیت کل دسترسی سیستم است. در صورت بیان این فاکتور به صورت نرمالیزه مقدار اصلاح شده آن به صورت با نماد NI_{A,μ_i}^i و رابطه زیر بیان می‌شود:

$$NI_{A,\mu_i}^i = \frac{I_{A,\mu_i}^i}{\sum_{j=1}^n I_{A,\mu}^j} \quad (11-6)$$

الف- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برای سیستم با ساختار سری

در سیستم سری در صورت وقوع خرابی در هر یک از اجزای، کل سیستم متوقف خواهد شد. سیستم سری بر اساس رفتار اجزای سالم پس از وقوع خرابی در سیستم به دو حالت تقسیم می‌شود:

۱. **حالت اول:** اجزای سالم به عمر عادی خود ادامه می‌دهند

۲. **حالت دوم:** در طول تعمیرات اجزای خراب بقیه اجزای نیز قادر به کار نیستند.

برای هر یک از حالت‌های موجود روابط اصلاح شده به صورت زیر ارائه می‌شوند (Pham, 2003):

حالت اول:

در این حالت زمان انجام تعمیرات بسیار کوتاه بوده و سیستم به شدت نیازمند اجزای خراب می‌باشد. علاوه بر این در طول تعمیرات اجزای خراب سایر اجزای سیستم به کار خود ادامه داده یا در حال فعالیت بوده و تحت ریسک خرابی قرار دارند. در این حالت قابلیت دسترسی وضعیت پایا (A_s) سیستم عبارت از (Pham, 2003; Sherwin and Bossche, 2012):

$$A_s = \prod_{i=1}^n A_i = \prod_{i=1}^n \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i} \quad (۱۲-۶)$$

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی اجزای (I_A^i)، سنجش اهمیت قابلیت دسترسی اصلاح شده بر اساس نرخ تعمیرات (I_{A,μ_i}^i) و سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ مخاطره (I_{A,λ_i}^i) به صورت روابط زیر خواهد بود:

$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (A_k) \quad (۱۳-۶)$$

$$I_{A,MTTR_i}^i = A_s \times \frac{1}{(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (۱۴-۶)$$

$$I_{A,MTBF_i}^i = A_s \times \frac{MTTR_i}{MTBF_i(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (۱۵-۶)$$

حالت دوم:

در این حالت نیز به شدت نیازمند اجزای خراب بوده به طوری که سایر اجزای سیستم نیز از حالت کار خارج بوده و در حال انتظار می‌باشند. در واقع اجزای بدون خرابی در هنگام انتظار برای تعمیرات اجزای خراب تحت ریسک خرابی نیستند. در این حالت قابلیت دسترسی وضعیت پایای سیستم عبارت از (Pham, 2003; Sherwin, 2000):

$$A_s = \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{1 - a_i}{a_i} \right]^{-1} = \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{MTBF_i}{MTTR_i} \right]^{-1} \quad (۱۶-۶)$$

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی اجزای (I_A^i)، سنجش اهمیت قابلیت دسترسی اصلاح شده بر اساس نرخ تعمیرات (I_{A,μ_i}^i) و سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ مخاطره (I_{A,λ_i}^i) به صورت روابط زیر خواهد بود:

$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = \left(\frac{A_s}{A_i} \right)^2 \quad (۱۷-۶)$$

$$I_{A,MTTR_i}^i = \frac{A_s^2}{A_i} \times \frac{1}{(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (18-6)$$

$$I_{A,MTBF_i}^i = \frac{A_s^2}{A_i} \times \frac{MTTR_i}{MTBF_i(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (19-6)$$

ب- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برای سیستم با ساختار موازی

در سیستم موازی تا زمانی که همه اجزای از کار نیفتاده سیستم متوقف نخواهد شد. در سیستم موازی تنها با یک حالت سرکار داشته و در این حالت قابلیت دسترسی وضعیت پایای سیستم عبارت از (Barabady and Kumar, 2007):

$$A_s = \prod_{i=1}^n A_i = \prod_{i=1}^n \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i} = 1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{MTTR_i}{MTTR_i + MTBF_i}\right) \quad (20-6)$$

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی اجزای (I_A^i)، سنجش اهمیت قابلیت دسترسی اصلاح شده بر اساس نرخ تعمیرات (I_{A,μ_i}^i) و سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ مخاطره (I_{A,λ_i}^i) به صورت روابط زیر خواهد بود:

$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = 1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (1 - A_k) \quad (21-6)$$

$$I_{A,MTTR_i}^i = 1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (1 - A_k) \times A_i \times \frac{1}{(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (22-6)$$

$$I_{A,MTBF_i}^i = 1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (1 - A_k) \times A_i \times \frac{MTTR_i}{MTBF_i(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (23-6)$$

ج- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برای سیستم با ساختار سری-موازی

اگر سیستمی متشکل از n جزء/زیرسیستم به شرطی قادر به انجام فعالیت مورد انتظار باشد که باید همه اجزای/زیرسیستم‌های آن در حالت کارگر باشند آن سیستم دارای ساختار "سری" است. اگر سیستمی متشکل از m جزء/زیرسیستم نیز حداقل با کارکرد یک جزء/زیرسیستم قادر به انجام فعالیت مورد انتظار باشد آن سیستم دارای ساختار "موازی" است (Dhillon, 2008). در ساختار سری-موازی نیز n زیرسیستم مستقل در یک ساختار سری قرار گرفته و هر زیرسیستم دارای m جزء موازی است. در این سیستم نیز بر اساس دو حالت ذکر شده برای سیستم سری دو حالت وجود دارد که روابط اصلاح شده به صورت زیر ارائه می‌شوند:

حالت اول:

قابلیت دسترسی وضعیت پایا (A_s) برای سیستم سری-موازی متأثر از قابلیت دسترسی اجزای/زیرسیستم‌های آن و نحوه قرارگیری آن‌ها در ساختار سیستم بوده و به شکل زیر بیان می‌شود (Barabady and Kumar, 2007):

$$A_s(t) = \prod_{k=1}^n \left(1 - \prod_{l=1}^m (1 - A_{kl}(t)) \right) \quad (24-6)$$

$$= \prod_{k=1}^n \left(1 - \prod_{l=1}^m \left(1 - \frac{MTBF_{kl}}{MTBF_{kl} + MTTR_{KL}} \right) \right)$$

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی (I_A^{ij}) و نرمالیزه شده (NI_A^{ij}) این فاکتور برای سیستم سری-موازی به صورت معادلات زیر خواهد بود (Barabady and Kumar, 2007):

$$I_A^{ij} = \frac{\partial A_s}{\partial A_{ij}} = \left(\prod_{k=1, k \neq i}^n \left(1 - \prod_{l=1}^m (1 - A_{kl}) \right) \right) \times \left(1 - \prod_{l=1, l \neq j}^m (A_{il}) \right) \quad (25-6)$$

$$NI_A^{ij} = \frac{I_A^{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_A^{ij}} \quad (26-6)$$

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ مخاطره ($I_{A,\lambda_{ij}}^{ij}$) و نرخ تعمیرات ($I_{A,\mu_{ij}}^{ij}$) نیز به صورت معادلات زیر خواهد بود (Barabady and Kumar, 2007):

$$I_{A,MTBF_{ij}}^{ij} = A_{ij} \times I_A^{ij} \times \frac{MTTR_{ij}}{MTBF_{ij}(MTBF_{ij} + MTTR_{ij})} \quad (27-6)$$

$$I_{A,MTTR_{ij}}^{ij} = A_{ij} \times I_A^{ij} \times \frac{1}{(MTBF_{ij} + MTTR_{ij})} \quad (28-6)$$

مقادیر نرمالیزه شده سنجش اهمیت قابلیت دسترسی اصلاح شده بر اساس نرخ مخاطره ($NI_{A,\lambda_{ij}}^{ij}(t)$) و نرخ تعمیرات ($NI_{A,\mu_{ij}}^{ij}(t)$) نیز به صورت روابط زیر بیان می‌شود:

$$NI_{A,\lambda_{ij}}^{ij} = \frac{I_{A,\lambda_{ij}}^{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{A,\lambda_{ij}}^{ij}} \quad (29-6)$$

$$NI_{A,\mu_{ij}}^{ij} = \frac{I_{A,\mu_{ij}}^{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{A,\mu_{ij}}^{ij}} \quad (30-6)$$

حالت دوم:

قابلیت دسترسی وضعیت پایا (A_s) برای سیستم سری-موازی متأثر از قابلیت دسترسی اجزای/زیرسیستم‌های آن و نحوه قرارگیری آن‌ها در ساختار سیستم بوده و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$A_s = \left[1 + \sum_{k=1}^n \frac{1 - (1 - \prod_{l=1}^m (1 - A_{kl}(t)))}{(1 - \prod_{l=1}^m (1 - A_{kl}(t)))} \right]^{-1} = \left[1 + \sum_{k=1}^n \frac{1 - (1 - \prod_{l=1}^m (1 - \frac{MTBF_{kl}}{MTBF_{kl} + MTTR_{kl}}))}{(1 - \prod_{l=1}^m (1 - \frac{MTBF_{kl}}{MTBF_{kl} + MTTR_{kl}}))} \right]^{-1} \quad (31-6)$$

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی (I_A^{ij}) و نرمالیزه شده (NI_A^{ij}) این فاکتور برای سیستم سری-موازی به صورت معادلات زیر خواهد بود (Barabady and Kumar, 2007):

$$I_A^{ij} = \frac{\partial A_s}{\partial A_{ij}} = \left(\frac{A_s}{1 - \prod_{l=1}^m (1 - A_{kl})} \right)^2 \times \left(\prod_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^m (1 - A_{kl}) \right) \quad (32-6)$$

$$NI_A^{ij} = \frac{I_A^{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_A^{ij}} \quad (33-6)$$

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی اصلاح شده بر اساس نرخ مخاطره ($I_{A,MTBF_{ij}}^{ij}$) و نرخ تعمیرات ($I_{A,MTTR_{ij}}^{ij}$) نیز به صورت معادلات زیر خواهد بود:

$$I_{A,MTBF_{ij}}^{ij} = A_{ij} \times I_A^{ij} \times \frac{MTTR_{ij}}{MTBF_{ij}(MTBF_{ij} + MTTR_{ij})} \quad (34-6)$$

$$I_{A,MTTR_{ij}}^{ij} = A_{ij} \times I_A^{ij} \times \frac{1}{(MTBF_{ij} + MTTR_{ij})} \quad (35-6)$$

مقادیر نرمالیزه شده سنجش اهمیت قابلیت دسترسی اصلاح شده بر اساس نرخ مخاطره ($NI_{A,MTBF_{ij}}^{ij}(t)$) و نرخ تعمیرات ($NI_{A,MTTR_{ij}}^{ij}(t)$) نیز به صورت روابط زیر بیان می شود:

$$NI_{A,\lambda_{ij}}^{ij} = \frac{I_{A,\lambda_{ij}}^{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{A,\lambda_{ij}}^{ij}} \quad (36-6)$$

$$NI_{A,\mu_{ij}}^{ij} = \frac{I_{A,\mu_{ij}}^{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{A,\mu_{ij}}^{ij}} \quad (37-6)$$

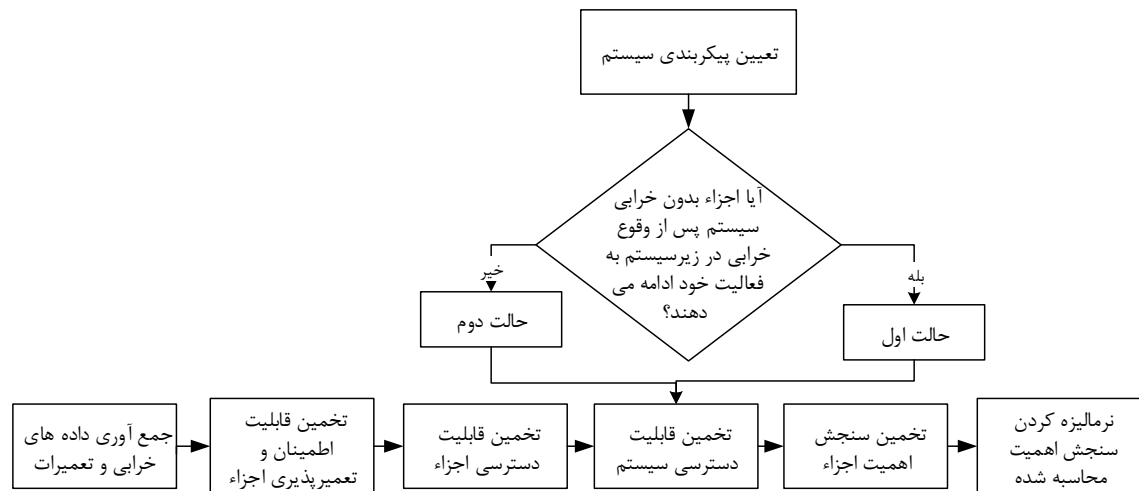
د- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی با تأثیر شرایط محیطی - مس سونگون

در این بخش حالت‌های مختلف سنجش اهمیت، قابلیت دسترسی برای تحلیل بخشی از ناوگان استخراجی معدن سونگون پیشنهاد شده است. با توجه به تعمیرپذیر بودن اکثر تجهیزات معدنی استفاده از سنجشی بر اساس قابلیت دسترسی به علت دربرگیری زمان‌های کارکرد و زمان‌های تعمیرات (غیرفعال) بسیار مناسب خواهد بود. از سوی دیگر با وجود وابسته بودن سنجش اهمیت به زمان این موضوع کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در کل تحقیقات انجام گرفته قابل تقسیم در دو گروه هستند:

گروه اول که صرفاً از یک شاخص کارکرد مانند قابلیت اطمینان برای تحلیل استفاده شده و گروه دوم از فرض دو حالت موجود برای سیستم‌ها صرف نظر شده است، بنابر این به کارگیری سنجش اهمیت قابلیت دسترسی با در نظرگیری هر دو حالت قادر به پوشش این ضعف‌ها خواهد بود. چرا که این شاخص قادر به دربرگیری ویژگی‌های خرابی در قالب قابلیت اطمینان و ویژگی‌های تعمیرات در قالب قابلیت تعمیرپذیری بوده و قابل تعریف برای دو حالت است که از این طریق ضعف رویکردهای سنتی مانند هیستوگرام پارتو را که به طور ایستا و بدون در نظر گرفتن پیکربندی سیستم به بررسی اجزای سیستم می‌پردازد را پوشش خواهد داد. مزیت بعدی این رویکرد سنجش اهمیت هر جزء یا زیرسیستم با توجه به محل قرارگیری آن در سیستم و پیکربندی سیستم است، بنابر این برای نخستین بار در حیطه معدنی میزانی برای ارزیابی اهمیت اجزای یا زیرسیستم پیشنهاد می‌شود که سه المان اصلی یعنی کارکرد، موقعیت و دو حالت مختلف سیستم را شامل می‌شود. این شاخص تحت فرضیات زیر ارائه می‌شود:

- سیستم متشکل از چندین زیرسیستم یا جزء مستقل است.
- همه اجزای یا زیرسیستم‌ها تعمیرپذیر می‌باشند.
- همه اجزای یا زیرسیستم تنها می‌توان در یکی از دو حالت در حال کار یا خرابی باشد.
- ویژگی‌های خرابی و تعمیرات هر یک از اجزای یا زیرسیستم‌ها مشخص است.

به طور کلی مراحل مختلف محاسبه سنجش اهمیت قابلیت دسترسی را می‌توان به صورت شکل ۶-۱۲ خلاصه نمود. در این بخش نخست با استفاده از روش پارتو به تحلیل اهمیت زیرسیستم‌ها پرداخته شده و سپس از رویکرد سنجش اهمیت استفاده شده است. در این قسمت بخشی از ناوگان استخراجی متشکل از یک دستگاه واگن دریل، لودر، بلدوزر و پنج دستگاه تراک ۱۰۰ تنی برای تحلیل انتخاب شده که در جدول ۶-۱۲ مشخصات و کدگذاری این ماشین‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۶-۱۲- تخمین سنجش اهمیت قابلیت دسترسی

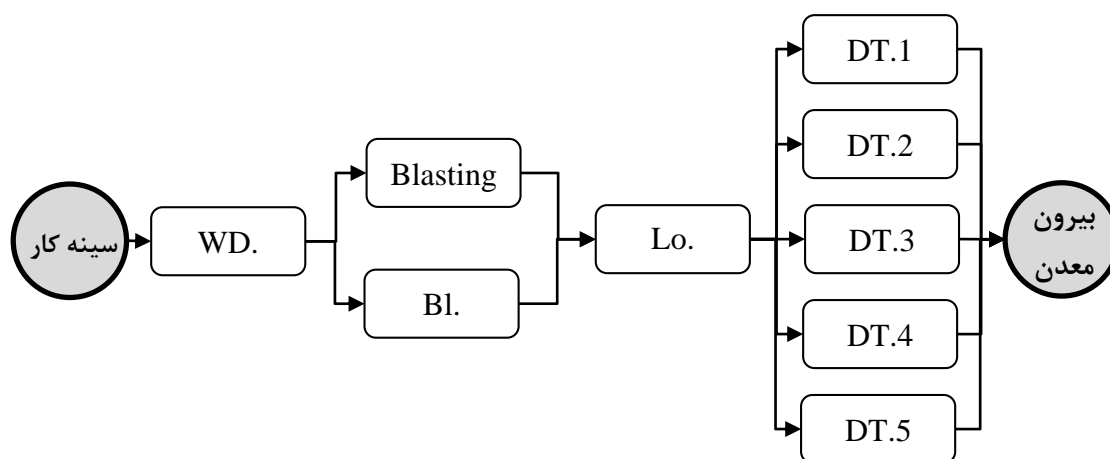
جدول ۶-۱۲- زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی معدن

ردیف	زیرسیستم	مدل	کد
۱	واگن دریل	Holman RBH-30	WD.
۲	لودر	Catepillar 988B	Lo.
۳	بلدوزر	Catepillar D8N	Bl.
۴	تراک	Komatsu HD-785-5	DT. 1
۵	تراک	Komatsu HD-785-5	DT. 2
۶	تراک	Komatsu HD-785-5	DT. 3
۷	تراک	Komatsu HD-785-5	DT. 4
۸	تراک	Komatsu HD-785-5	DT. 5

در شکل ۶-۱۳ بلوک دیاگرام سری-موازی سیستم با شروع از سینه کار تا بیرون معدن رسم شده است. داده‌های مورد نیاز در این بخش داده‌های زمانی جمع‌آوری شده و مرتب شده به ترتیب تاریخ وقوع خرابی و تعمیرات انجام گرفته در قالب TBF-ها و TTR-ها برای ارزیابی دو شاخص قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری هستند.

و- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی (AI)

سنجش اهمیت قابلیت دسترسی به بررسی میزان بحرانی بودن هر زیرسیستم از منظر قابلیت دسترسی می‌پردازد.



شکل ۶-۱۳- بلوک دیاگرام سیستم استخراجی

همان‌طور که اشاره شد دو شاخص قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری عناصر اصلی قابلیت دسترسی می‌باشند، بنابراین شاخص دربرگیرنده هر دو رویداد خرابی و تعمیرات خواهد بود. در این مرحله برای

تعیین اهمیت زیرسیستم‌ها با استفاده از AI نخست باید رفتار خرابی‌ها و تعمیرات انجام برای زیرسیستم‌ها مشخص شود. از این رو در نخستین گام به ارزیابی فرض iid برای TBF-ها و TTR-ها پرداخته شد. آزمون روند و خودهمبستگی دو رویکرد اصلی برای بررسی این فرض می‌باشند. در ادامه مطابق الگوریتم تحلیل RMS بر اساس قبولی یا رد فرض iid از توابع یا مدل‌های آماری استفاده خواهد شد. در جدول ۶-۱۳ نتایج تحلیل‌های انجام گرفته برای داده‌های خرابی و تعمیرات زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی درج شده است.

جدول ۶-۱۳- برازش مناسب‌ترین مدل یا تابع برای TBF-ها و TTR-ها

Ai	TTRs			TBFs			زیرسیستم
	MTTR	پارامترها	بهترین برازش	MTBF	پارامترها	بهترین برازش	
۰/۱۴۹	۷۵/۴	Mu:۲/۲۲۲, Sigma:۰/۸۸۹	Loglogistic -2P	۱۳/۲	Log- mean:۱/۹۲۷, Log-std:۱/۱۴۳	Lognormal- 2P	WD.
۰/۹۴۹	۵/۵	Beta:۲/۹۷۹, Eta:۶/۱۳۹	PLP	۱۰۲/۳	Beta:۱/۵۴۷, Eta:۱۱۳/۷۴۴	PLP	Bl.
۰/۹۳۲	۱/۸	Beta:۰/۷۲۳, Eta:۱/۵۰۸	PLP	۲۵/۴	Log- mean:۲/۴۴۷, Log-std:۱/۲۵۵	Lognormal- 2P	Lo.
۰/۹۹۲	۰/۵	Beta:۰/۶۳۵, Eta:۱/۲۹۱	PLP	۶۰/۷	Beta:۱/۵۳۶, Eta:۱۱۰/۱	PLP	DT. 1
۰/۸۶۲	۷/۸	Beta:۱/۲۰۹, Eta:۸/۲۹۷	PLP	۴۸/۶	Beta:۰/۷۵۴, Eta:۴۰/۷۹۴, Gamma:۰/۲۳۴	Weibull-3P	DT. 2
۰/۹۱۷	۳/۴	Beta:۰/۸۹۱, Eta:۳/۲۳۵	PLP	۳۷/۸	Beta:۰/۷۶۵, Eta:۲۸/۴۴۳, Gamma:۰/۴۸۶	Weibull-3P	DT. 3
۰/۹۶۷	۳/۵	Beta:۰/۸۶۳, Eta:۳/۲۴۳	PLP	۱۰۲/۷	Beta:۱/۲۵۴, Eta:۱۱۰/۳۹۷	PLP	DT. 4
۰/۹۸۹	۰/۹	Mu:۰/۹۳۱, Sigma:۰/۷۲۰	Loglogistic -2P	۸۰/۳	Beta:۱/۲۰۲, Eta:۸۵/۴۸۷/	PLP	DT. 5
۰/۷۹۷	-						آتشباری
۷۳/۱۹۸۶				Case 1		قابلیت دسترسی سیستم (/.)	
۱۴/۷۱۴۳				Case 2			

پس از تعیین ویژگی‌های خرابی و تعمیرات، ایده سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برای اولویت‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیاده‌سازی این ایده در مورد سیستم با پیکربندی ساده مانند سری ساده بوده ولی در مورد سیستم‌های پیچیده این امر بسیار دشوار خواهد بود. در سیستمی چون ناوگان استخراجی با ساختار سری-موازی این مشکل دوچندان شده و نیازمند منطق ریاضی قدرتمند است. در این سیستم با توجه به اینکه در صورت وقوع خرابی در هر یک از زیرسیستم‌ها، سایر زیرسیستم‌های بدون خرابی قادر به انجام فعالیت‌های خود هستند بنابر این با حالت اول و روابط ذکر شده برای آن به حل موضوع باید پرداخت. ولی به منظور مقایسه دو حالت و نشان دادن مشکلات بوجود آمده در صورت صرف نظر از این حالت با هر دو حالت به تحلیل سیستم پرداخته شد

همان‌طور که اشاره شد سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برای اولویت‌بندی سیستم بر اساس شاخص‌های عملکردی اعمال خواهد شد. قابل ذکر است در این معدن تعداد روزهای تعطیلی ۷۴ روز می‌باشد که در آن آتشباری انجام نمی‌گیرد لذا با در نظرگیری ۳۶۵ روز کاری برای معدن قابلیت دسترسی آن ۰/۷۹۷ خواهد بود. در این جدول پس از محاسبه قابلیت دسترسی هر یک از اجزای در ستون آخر، مقادیر قابلیت دسترسی سری-موازی برای حالت اول (۷۴/۱۲ درصد) و دوم (۱۴/۷۱ درصد) محاسبه شده است.

در جدول ۶-۱۴ مقادیر سنجش اهمیت‌های مختلف و مقادیر نرمالیزه آن‌ها برای حالت اول محاسبه شده است. در شکل ۶-۱۴ مقادیر سنجش اهمیت نرمالیزه قابلیت دسترسی اجزای (NI_A^{ij}) و قابلیت دسترسی (A_i) آن‌ها ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زیرسیستم واگن دریل بحرانی‌ترین زیرسیستم است. در رتبه‌های بعدی نیر لودر، تراک ۱، ۵ و ۴ قرار گرفته است.

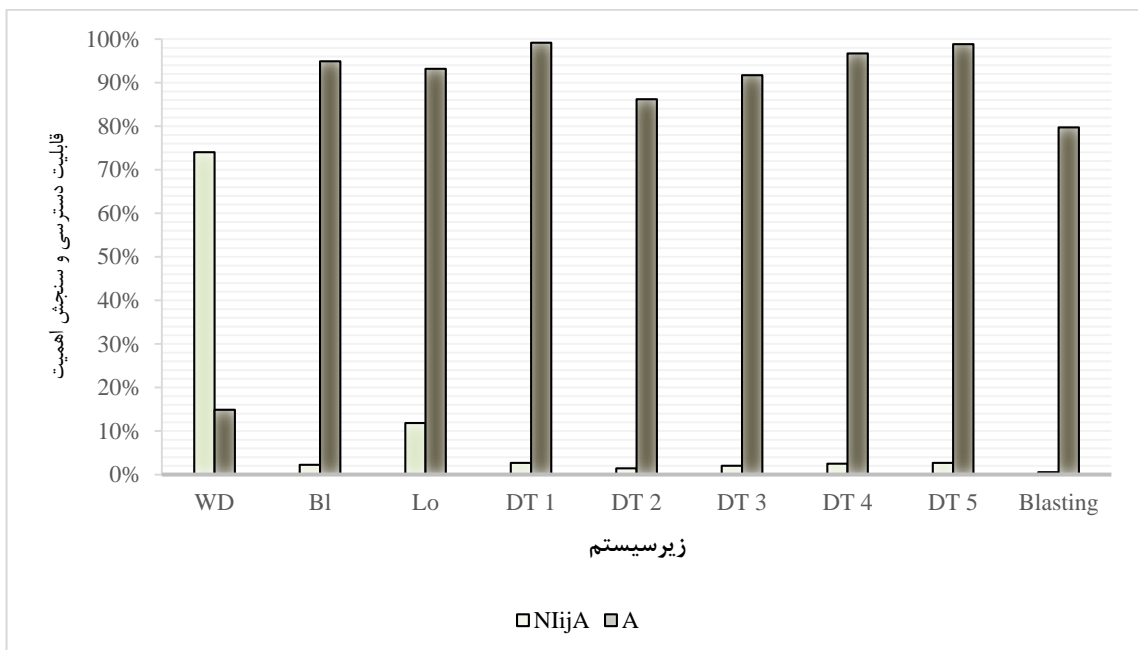
در شکل ۶-۱۵ نیز نمودار سنجش اهمیت نرمالیزه قابلیت دسترسی مبتنی بر نرخ مخاطره و تعمیر ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این سیستم به جزء واگن دریل در بقیه زیرسیستم‌ها اهمیت بهبود قابلیت اطمینان بالاتر از قابلیت تعمیرپذیری می‌باشد.

در صورت صرف نظر کردن از حالت اول سیستم و به‌کارگیری حالت دوم سنجش اهمیت‌های مختلف قابلیت دسترسی به صورت جدول ۶-۱۵ خواهد بود.

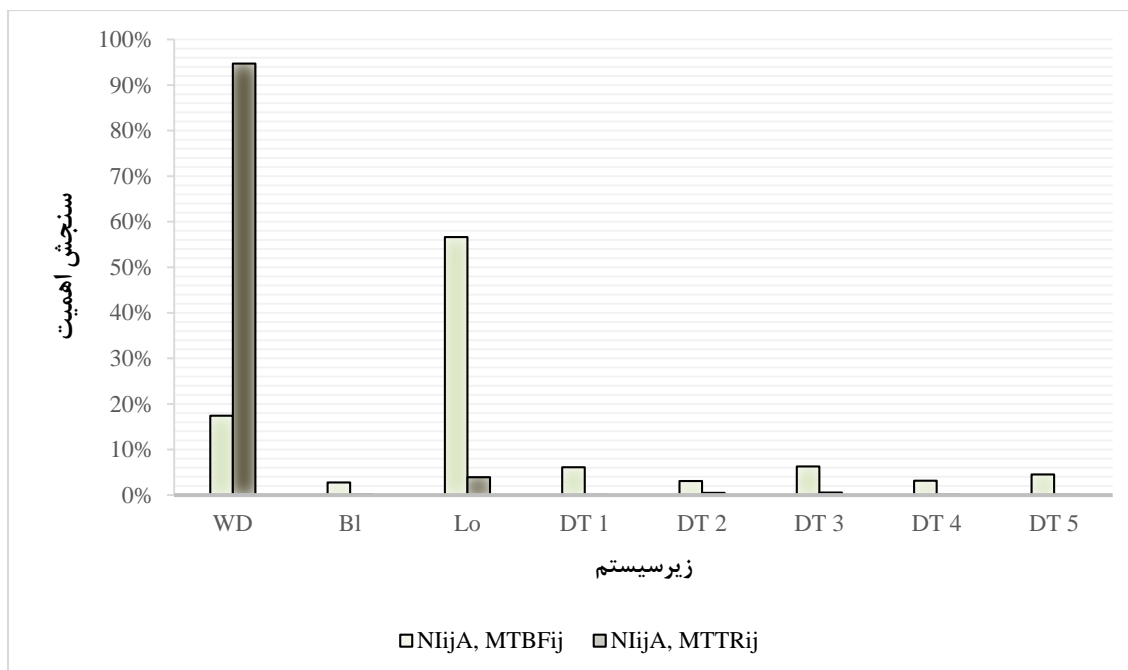
در شکل ۶-۱۶ مقادیر سنجش اهمیت نرمالیزه قابلیت دسترسی اجزای (NI_A^{ij}) و قابلیت دسترسی (A_i) برای حالت دوم ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زیرسیستم واگن دریل بحرانی‌ترین زیرسیستم می‌باشد. در اولویت بعدی لودر، بلدوز و آتشباری قرار داشته و بعداً کامیون‌ها قرار گرفته که این ترتیب با مقادیر به‌دست آمده برای حالت اول متفاوت می‌باشد.

جدول ۱۴-۶- سنجش اهمیت‌های مختلف قابلیت دسترسی و مقادیر نرمالیزه آن‌ها برای حالت اول

Case 1						
$NI_{A,MTTR_{ij}}^{ij}$ (%)	$NI_{A,MTBF_{ij}}^{ij}$ (%)	NI_A^{ij} (%)	$I_{A,MTTR_{ij}}^{ij}$	$I_{A,MTBF_{ij}}^{ij}$	I_A^{ij}	سیستم
۹۴/۷۱	۱۷/۴۱	۷۴/۰۴	۰/۰۰۸۸۵۹۰۰	۰/۰۰۱۵۵۰۷۵	۰/۰۹۲۲۳۸۷۳۱	WD.
۰/۱۴	۲/۷۸	۲/۲۶	۰/۰۰۰۰۱۳۲۷	۰/۰۰۰۲۴۷۸۴	۰/۰۲۸۱۴۸۳۱	Bl.
۳/۹۳	۵۶/۶۳	۱۱/۸۳	۰/۰۰۰۳۶۷۹۹	۰/۰۰۵۰۴۳۰۸	۰/۱۴۷۴۳۵۴۴	Lo.
۰/۰۵	۶/۱۱	۲/۷۰	۰/۰۰۰۰۰۴۵۰	۰/۰۰۰۵۴۴۵۱	۰/۰۳۳۵۹۰۸۵	DT. 11
۰/۴۷	۳/۰۸	۱/۴۴	۰/۰۰۰۰۴۳۹۵	۰/۰۰۰۲۷۴۱۶	۰/۰۱۷۹۳۶۳۸	DT. 12
۰/۵۴	۶/۲۷	۲/۰۲	۰/۰۰۰۰۵۰۵۸	۰/۰۰۰۵۵۸۶۷	۰/۰۲۵۱۲۰۹۷	DT. 13
۰/۱۰	۳/۱۶	۲/۴۸	۰/۰۰۰۰۰۹۵۸	۰/۰۰۰۲۸۱۶۸	۰/۰۳۰۹۳۹۶۵	DT. 14
۰/۰۵	۴/۵۴	۲/۶۷	۰/۰۰۰۰۰۴۶۸	۰/۰۰۰۴۰۴۲۵	۰/۰۳۳۲۵۰۰۳	DT. 15
-	-	۰/۵۷	-	-	۰/۰۰۷۰۵۷۷۶	آتشباری



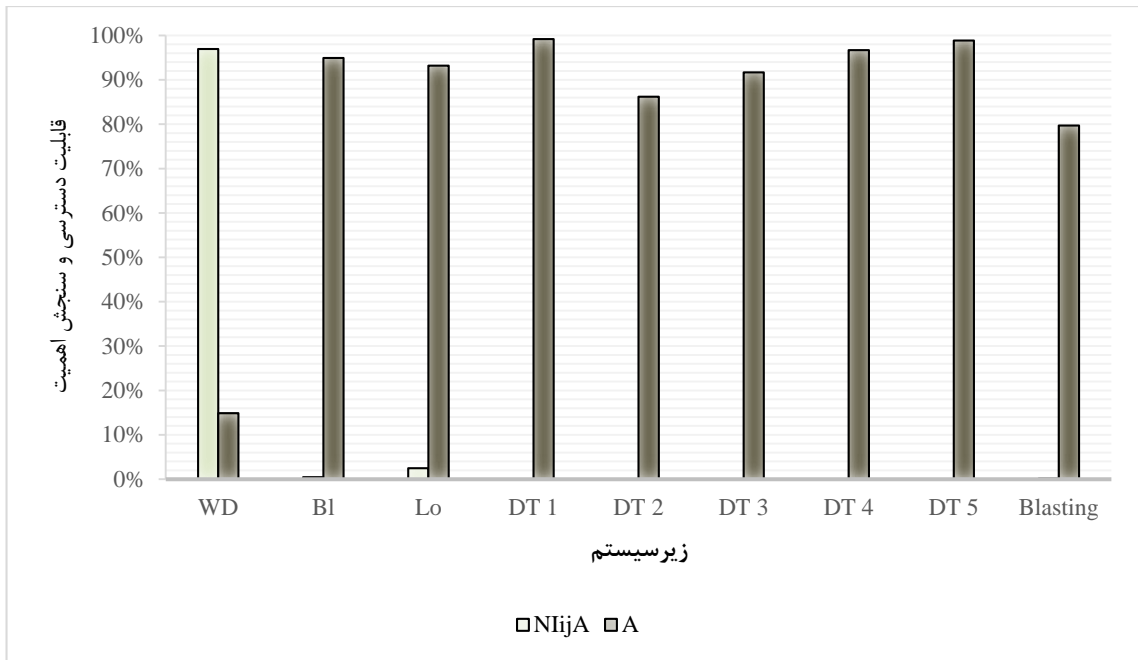
شکل ۱۴-۶- سنجش اهمیت‌های مختلف قابلیت دسترسی و مقادیر نرمالیزه آن‌ها برای حالت اول



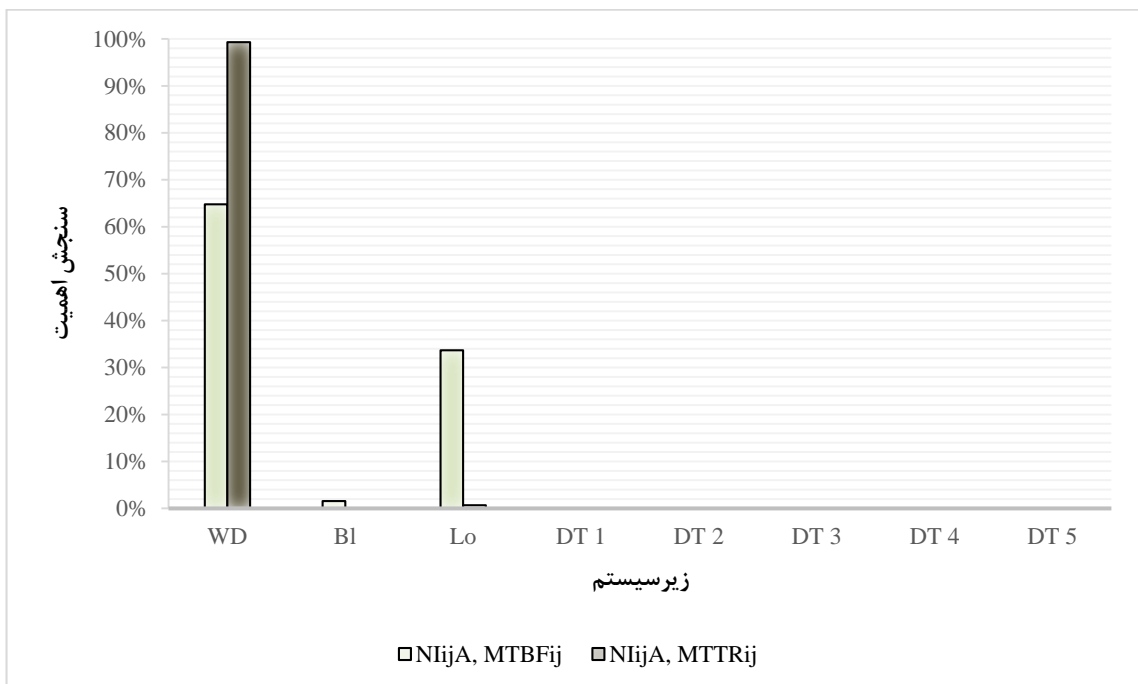
شکل ۱۵-۶- سنجش اهمیت نرمالیزه قابلیت دسترسی مبتنی بر نرخ مخاطره و تعمیر برای حالت اول

جدول ۱۵-۶- سنجش اهمیت‌های مختلف قابلیت دسترسی و مقادیر نرمالیزه آن‌ها برای حالت

Case 2						
$NI_{ijA}, MTTR_{ij}(\%)$	$NI_{ijA}, MTBF_{ij}(\%)$	$NI_{ijA}(\%)$	$I_{ijA}, MTTR_{ij}$	$I_{ijA}, MTBF_{ij}$	I_{ijA}	سیستم
۹۹/۳۲	۶۴/۷۷	۹۶/۹۶	۰/۰۰۹۳۷۰۲۰	۰/۰۰۱۶۴۰۲۳	۰/۹۷۵۶۱۱۹۷	WD.
۰/۰۲۲	۱/۵۹	۰/۴۴	۰/۰۰۰۰۰۲۱۱	۰/۰۰۰۰۰۳۹۴۶	۰/۰۰۴۴۸۱۴۳	BI.
۰/۱۶۶	۳۳/۶۷	۲/۴۷	۰/۰۰۰۰۰۶۲۲۱	۰/۰۰۰۰۰۸۵۲۶۱	۰/۰۲۴۹۲۶۱۰	Lo.
۰/۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۵۹۹	۰/۰۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۹	DT. 1
۰/۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	DT. 2
۰/۰۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۰۸۱	۰/۰۰۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	DT. 3
۰/۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۲	DT. 4
۰/۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۱۱۲	۰/۰۰۰۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۲	DT. 5
-	-	۰/۱۲	-	-	۰/۰۰۱۱۲۳۶۵	اتشباری

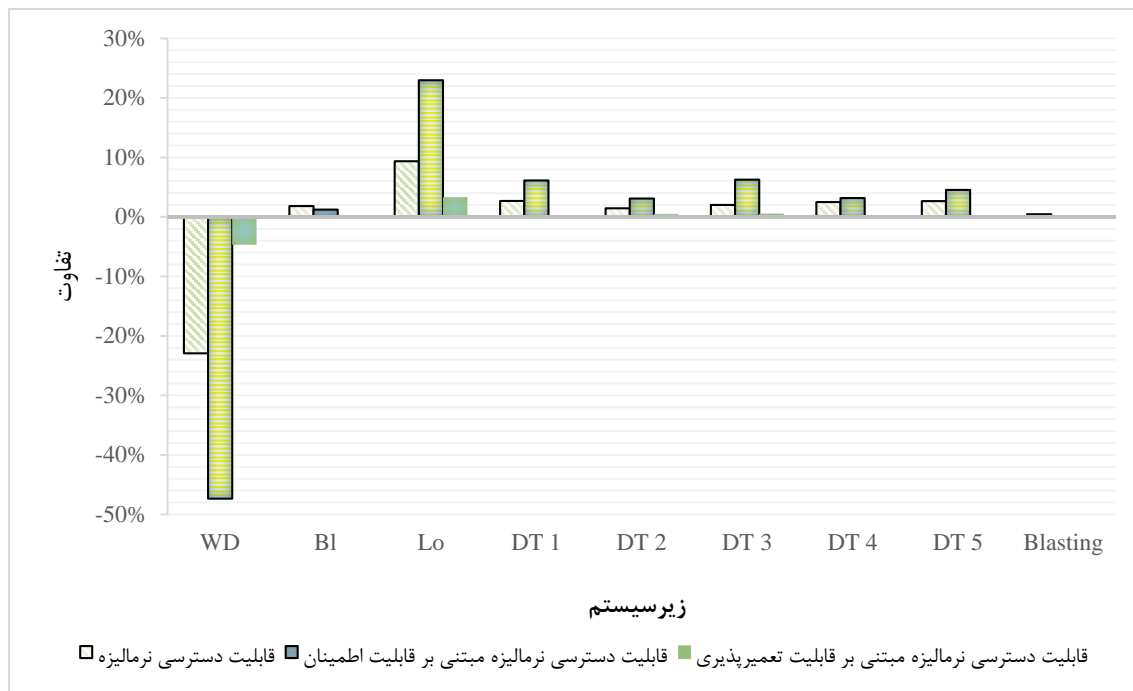


شکل ۶-۱۶- سنجش اهمیت‌های مختلف قابلیت دسترسی و مقادیر نرمالیزه آن‌ها برای حالت دوم
 نتایج به دست آمده برای سنجش اهمیت نرمالیزه قابلیت دسترسی مبتنی بر نرخ مخاطره و تعمیر برای
 زیرسیستم‌ها در شکل ۶-۱۷ ترسیم شده است. نتایج این نمودار نیز اهمیت بیشتر قابلیت اطمینان برای
 همه زیرسیستم‌ها به جزء زیرسیستم واگن را دارد.



شکل ۶-۱۷- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی نرمالیزه زیرسیستم‌ها برای حالت دوم

در شکل ۶-۱۸ اختلاف بین سنجش‌های اهمیت قابلیت دسترسی در دو حالت مشاهده می‌شود. بیشترین اختلاف مربوط به سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بوده و در زیرسیستم بحرانی یعنی واگن دریل بیشترین اختلاف در هر سه شاخص مشاهده می‌شود. لذا این اختلاف حکایت از آن دارد که بایستی به حالت کارکرد زیرسیستم‌های بدون خرابی در سیستم توجه شده و حتما در تحلیل‌ها وارد شود.



شکل ۶-۱۸- اختلاف بین سنجش‌های اهمیت قابلیت دسترسی برای حالت اول و دوم

۶-۳-۲- سنجش اهمیت قابلیت اطمینان مبتنی بر شرایط محیطی

مطابق آنچه در بخش‌های قبلی بحث شد شرایط محیطی تأثیر بسزایی بر قابلیت اطمینان سیستم و زیرسیستم دارد. به‌ویژه در محیط معدنی با شرایط محیطی خشن و دشوار این تأثیر بیشتر نمایان خواهد شد. پس مدیریت برای کنترل عملکرد تجهیزات که بار استخراجی را به دوش کشیده‌اند نیازمند وارد کردن این اثرات در تصمیمات خود بوده و از سوی دیگر برای اولویت‌بندی اقدامات لازم‌الاجرا به دنبال معیاری است که قادر به پوشش این تأثیرات و عملکرد سیستم و زیرسیستم باشد. به همین منظور در این بخش معیار سنجش اهمیت قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مبتنی بر شرایط محیطی ارائه شده است. بدین منظور بخش دیگری از ناوگان استخراجی متشکل از دو دستگاه لودر و هشت دستگاه تراک با ساختار سری-موازی برای مطالعه انتخاب شد. استفاده از این معیار با سه بعد اساسی یعنی:

۱. شاخص‌های عملکردی قابلیت اطمینان

ب. نحوه پیکربندی سیستم

ج. فاکتورهای ریسک

برای نخستین بار در این بخش پیشنهاد شد. بدین منظور اگر قابلیت اطمینان وضعیت پایا با تأثیر شرایط محیطی $(R_s(t, z))$ برای سیستم سری-موازی که متأثر از قابلیت اطمینان اجزای/ زیرسیستم‌های آن و نحوه قرارگیری آن‌ها در ساختار سیستم است، به شکل زیر بیان شود (Barabady and Kumar, 2007)

$$R_s(t, z) = \prod_{k=1}^n \left(1 - \prod_{l=1}^m (1 - R_{kl}(t, z)) \right) \quad (38-6)$$

آنگاه سنجش اهمیت قابلیت اطمینان $(I_R^{ij}(t))$ برای سیستم سری-موازی به صورت معادلات زیر خواهد بود:

$$I_R^{ij} = \frac{\partial R_s(t, z)}{\partial R_{kl}(t, z)} = \left(\prod_{k=1 \text{ \& } k \neq i}^p \left(1 - \prod_{l=1}^q (1 - R_{kl}(t, z)) \right) \right) \times \left(1 - \prod_{l=1 \text{ \& } l \neq j}^q (R_{il}(t, z)) \right) \quad (39-6)$$

به طور کلی مبحث سنجش اهمیت به‌ندرت در حوزه معدنی مورد توجه بوده و در مورد سایر زمینه‌های علمی نیز تاکنون معیاری فراگیر شامل سه عنصر بالا برای اولویت‌بندی و تحلیل اهمیت سیستم ارائه نشده است. در این قسمت برخی فرضیات به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

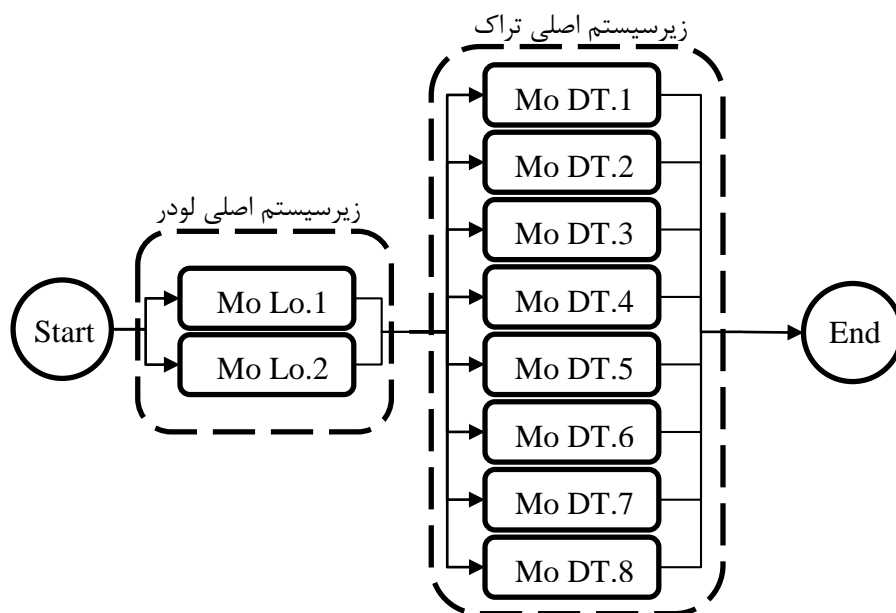
- سیستم (ناوگان استخراجی) شامل s-زیرسیستم (لودر و تراک) مستقل است.
- همه زیرسیستم‌ها تعمیرپذیر هستند.
- همه زیرسیستم‌ها تنها قادر به قرارگیری در یکی از دو حالت کار یا خراب می‌باشند.
- همه ویژگی‌های خرابی و تعمیرات زیرسیستم‌ها مشخص است.

در جدول ۱۶-۶ مشخصات ماشین‌آلات ذکر شده و کدگذاری انجام گرفته است. در شکل ۱۹-۶ نیز نمودار بلوک دیاگرام سیستم سری-موازی ترسیم شده است.

جدول ۱۶-۶- زیرسیستم‌های ناوگان و کدگذاری مربوطه

کدگذاری	مدل	زیرسیستم
Mo Lo. x	Caterpillar 988B	لودر چرخ لاستیکی
Mo DT. x	Komatsu HD-785-5	تراک
X: شماره جزء مربوطه در زیرسیستم		

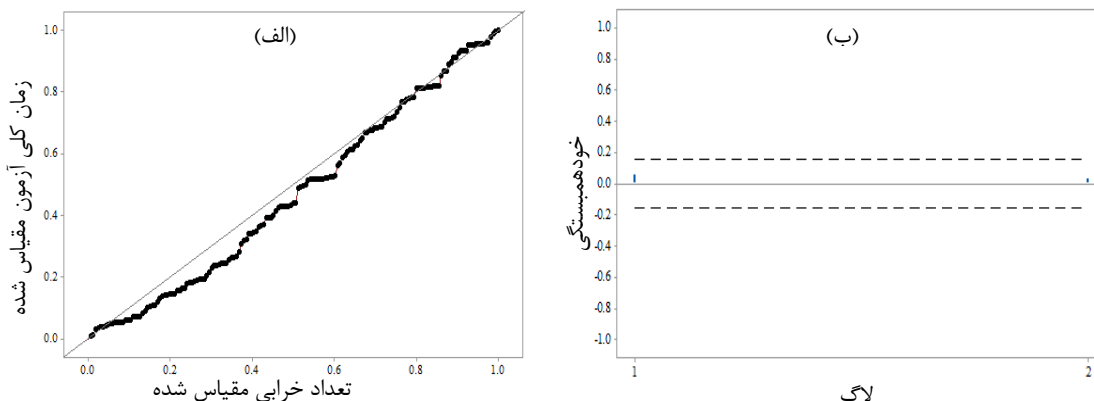
در این قسمت با توجه به وارد کردن تأثیر شرایط محیطی، دو سری داده‌های زمانی (TBF-ها برای خرابی) و فاکتورهای ریسک باید گردآوری شود.



شکل ۶-۱۹- بلوک دیاگرام سیستم استخراجی

الف- تحلیل قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها

مطابق الگوریتم کلی ارائه شده در شکل ۶-۹ در صورت عدم وجود فاکتور ریسک وابسته به زمان یا برقراری فرض متناسب بودن نرخ تعمیرات اساسی $\mu_0(t)$ و نرخ مخاطره اساسی $\lambda_0(t)$ به روش کلاسیک تعیین می‌شود. پیش از شروع تحلیل‌ها آزمون‌های روند و خودهمبستگی برای ارزیابی فرض iid به کار گرفته می‌شود. نمونه‌ای از نتایج تحلیل‌های نموداری آزمون‌های روند و خودهمبستگی برای خرابی‌های زیرسیستم DT.2 در شکل ۶-۲۰ الف و ب مشاهده می‌شود.



شکل ۶-۲۰- آزمون ترسیمی روند (الف) و خودهمبستگی (ب) برای خرابی‌های زیرسیستم DT.2

نتایج آزمون‌های تحلیلی نیز در جدول ۶-۱۷ مشاهده می‌شود. هر دودسته آزمون برقراری فرض iid را تأیید می‌کنند پس داده مستقل از یکدیگر و به صورت یکسان توزیع شده است. در نهایت توزیع مناسب (ویبول سه پارامتری) برای نرخ مخاطره اساسی با استفاده از آماره کلموگروف-اسمیرنوف در فرایند نیکوئی برازش انتخاب می‌شود.

در ادامه از مدل PHM برای محاسبه نرخ مخاطره $(\lambda(t, Z))$ استفاده می‌شود. نتایج تحلیل در جدول ۶-۱۸ درج شده است. برای درک بهتر موضوع نحوه برازش تابع زیرسیستم Mo DT.3 با جزئیات بیشتر بررسی می‌شود. نرخ مخاطره این زیرسیستم دارای سه لایه بر اساس فاکتور ریسک "تعداد سرویس بارگیری (Z_{t2})" است که در ستون "لایه" به آن اشاره شده است. این فاکتور در مدل وارد نشده چرا که وابسته به آن بوده و از طریق لایه‌بندی کنترل می‌شود. در این حالت برای هر لایه نرخ مخاطره اساسی جداگان‌های به ترتیب PLP، ویبول دو پارامتری و ویبول سه پارامتری پیشنهاد شده است. در رفتار خرابی این زیرسیستم فاکتورهای ریسک نوبت (Z_{t11}, Z_{t12}) ، محل کار (Z_{t4}) و شیب جاده (Z_{t51}, Z_{t52}) بیشترین تأثیر را دارند که مقادیر این تأثیر با ضرایب رگرسیون $+0/095$ ، $-1/295$ ، $+0/207$ ، $-0/41$ و $-1/294$ بر نرخ مخاطره وارد می‌شود.

جدول ۶-۱۷- آزمون‌های تحلیلی روند و خودهمبستگی برای خرابی‌های زیرسیستم DT.2

آزمون روند			
آزمون	کتابچه نظامی آمریکا	Laplace	اندسون-دارلینگ
آماره آزمون	۳۶۷/۲۶	-۱/۴۹	۱/۹۲
p-value	۰/۱۵۴	۰/۱۳۷	۰/۱۰۲
آزمون تحلیلی و ترسیمی		روند ندارد	
آزمون خودهمبستگی			
	ACF	TSTA	LBQ
آماره آزمون در لاگ-۱	۰/۰۵۷	۰/۷۳۰	۰/۵۴۳
آماره آزمون در لاگ-۲	۰/۰۲۶	۰/۳۳۲	۰/۶۵۷
آزمون تحلیلی و ترسیمی		همبستگی ندارد	
فرض iid		قبول می‌شود	
مدل یا توزیع مناسب	شکل	مقیاس	محل
Weibull-3P	۰/۷۵۴	۴۰/۷۹۴	۰/۲۳۴

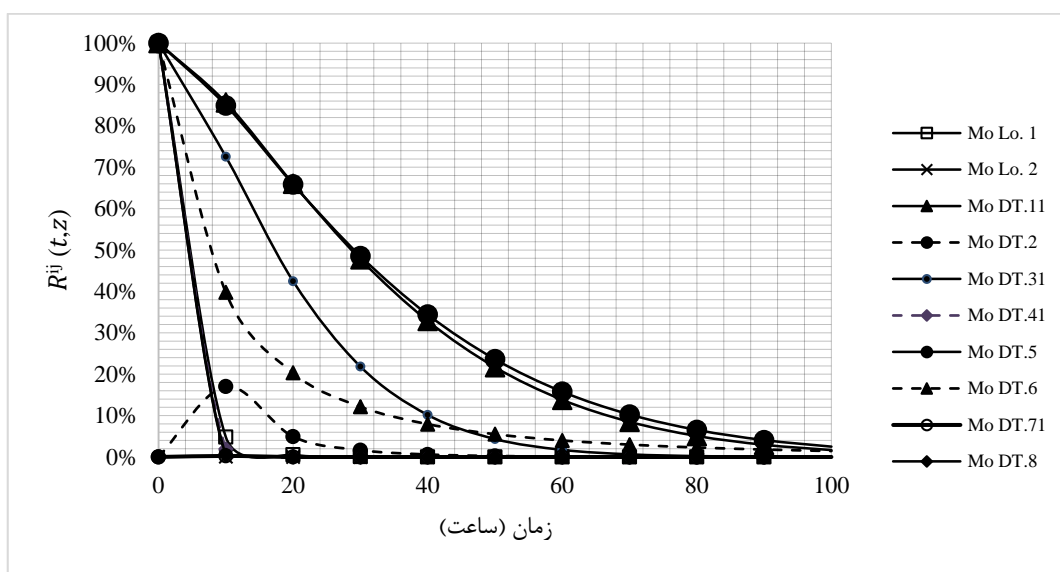
جدول ۶-۱۸- بهترین برازش و تخمین ضرایب برای داده‌های خرابی

$exp\left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right)$	$\lambda_{0s}(t)$ نرخ مخاطره اساسی		نوع	توزیع	زیرسیستم
	پارامتر	بهترین			
$exp(-0.172z_{t11} - 1.383z_{t12} - 0.316z_{t2} + 0.299z_{t4} - 0.081z_{t5})$	Log-mean: ۲/۲۵۶, Log-std: ۱/۳۲۹	Lognormal-2P	N/A	PHM	Mo Lo.1
$exp(0.249z_{t11} - 1.517z_{t12} - 1.019z_{t2} - 1.027z_{t3} - 0.354z_{t4} - 0.23z_{t6} - 0.552z_{t7})$	Beta: ۰/۷۳۶, Eta: ۴/۰۳۸	PLP	N/A	PHM	Mo Lo.2
$exp(0.003z_{t11} - 2.102z_{t12} - 0.409z_{t51} - 0.656z_{t52})$	Beta: ۱/۴۲۲, Eta: ۷۶/۴۹۰	PLP	۱	-SCRM لایه‌بندی شده با (z_{t2})	Mo DT.1
	Beta: ۱/۳۵۷, Eta: ۶۸/۷۵۴	Weibull-2P	۲		
	Beta: ۰/۵۸۰, Eta: ۶/۶۱۴, Gamma: ۶/۴۴۵	Weibull-3P	۳		
$exp(-0.142z_{t11} - 1.837z_{t12} - 0.672z_{t2} - 0.345z_{t51} - 0.846z_{t52} + 0.175z_{t6} + 0.447z_{t9})$	Beta: ۰/۷۵۴, Eta: ۴۰/۷۹۴, Gamma: ۰/۲۳۴	Weibull-3P	N/A	PHM	Mo DT.2
$exp(0.095z_{t11} - 1.295z_{t12} + 0.207z_{t4} - 0.641z_{t51} - 1.294z_{t52})$	Beta: ۱/۴۱۶, Eta: ۶۲/۷۶۸	PLP	۱	-SCRM لایه‌بندی شده با (z_{t2})	Mo DT.3
	Beta: ۰/۹۲۳, Eta: ۴۹/۰۴۶, Gamma: ۱/۸۰۳	Weibull-3P	۲		
	Beta: ۰/۶۰۷, Eta: ۸/۸۳۶, Gamma: ۵/۶۵۹	Weibull-3P	۳		
$exp(-0.243z_{t11} - 2.086z_{t12} + 0.142z_{t4} - 1.025z_{t51} - 1.388z_{t52})$	Log-mean: ۱/۷۷۱, Log-std: ۱/۳۱۱	Lognormal-2P	۱	-SCRM لایه‌بندی شده با (z_{t2})	Mo DT.4
	Log-mean: ۱/۵۲۶, Log-std: ۳۰۵/۹۳۸	Lognormal-2P	۲		
	Beta: ۰/۳۸۷, Eta: ۱۱/۵۹۳	Weibull-3P	۳		
$exp(0.179z_{t11} - 1.862z_{t12} - 0.511z_{t2} - 0.361z_{t51} - 1.235z_{t52} + 0.434z_{t11f})$	Beta: ۱/۳۵۴, Eta: ۱۴۵/۶۹۹	PLP	N/A	PHM	Mo DT.5
$exp(0.25z_{t11} - 1.995z_{t12} - 0.930z_{t2})$	Log-mean: ۲/۵۰۶, Log-std: ۱/۴۱۰	Lognormal-2P	N/A	PHM	Mo DT.6
$exp(0.130z_{t11} - 1.311z_{t12} - 0.413z_{t51} - 0.916z_{t52} + 0.158z_{t6} + 0.316z_{t11f})$	Beta: ۰/۶۹۵, Eta: ۱۰/۴۲۶, Gamma: ۰/۲۴۳	Weibull-3P	۱	-SCRM لایه‌بندی شده با (z_{t2})	Mo DT.7
	Beta: ۱/۰۰۹, Eta: ۳۵/۸۰۹, Gamma: ۲/۷۶۳	Weibull-3P	۲		
	Beta: ۰/۴۴۳, Eta: ۱۵/۴۲۸, Gamma: ۵/۷۰۳	Weibull-3P	۳		
$exp(-0.204z_{t11} - 1.425z_{t12} - 0.505z_{t2} + 0.401z_{t4} - 0.296z_{t51} - 0.967z_{t52} - 0.024z_{t8} - 1.063z_{t10f} + 0.384z_{t11f})$	Log-mean: ۲/۶۶۳, Log-std: ۱۰/۲۰۴	Lognormal-2P	N/A	PHM	Mo DT.8

Note: z_{xij} : Dummy covariate, z_{xi} : categorical covariates

ب- سنجش اهمیت قابلیت اطمینان

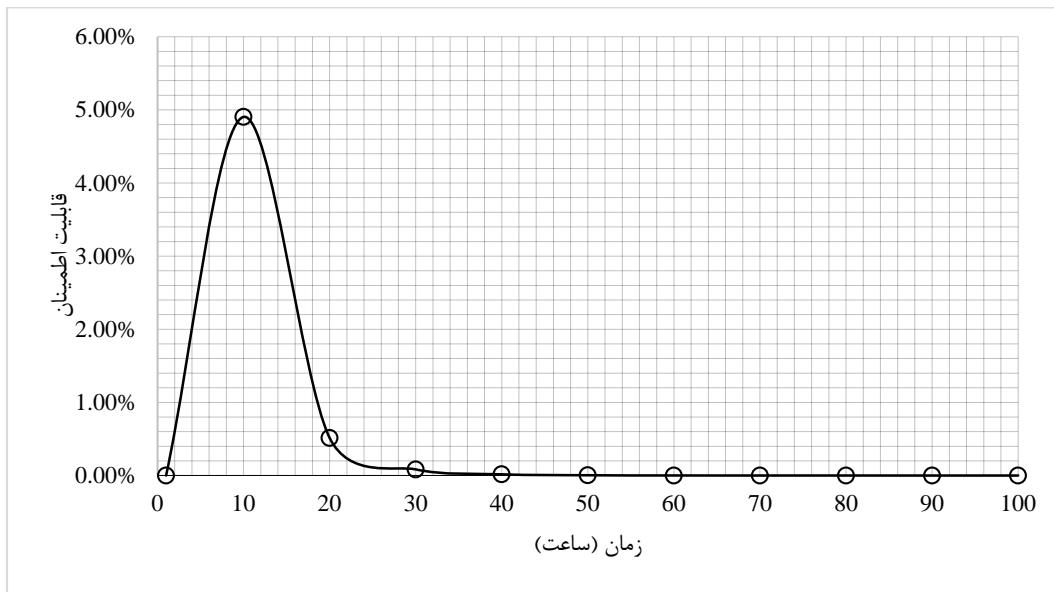
در نخستین گام قابلیت اطمینان سیستم باید محاسبه شود. در این سیستم ۱۰ زیرسیستم با پیکربندی سری-موازی قرار دارد. البته این سیستم را می‌توان متشکل از دو زیرسیستم اصلی لودر و تراک (شکل ۶-۱۹) در یک شبکه سری در نظر گرفت. تأثیر شرایط محیطی نیز در قسمت قبلی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی در پارامترهای عملکردی وارد شد که با توجه به مقادیر مختلف فاکتورهای ریسک سناریوهای مختلفی برای سیستم در نظر گرفت شد. در این قسمت سناریویی برحسب مقادیر یک ($Z_{ij}=1$) برای فاکتورهای ریسک مؤثر در شاخص‌های عملکردی در نظر گرفته شد. قابلیت اطمینان ($R^{ij}(t, z)$) هر زیرسیستم محاسبه شده و نتایج در شکل ۶-۲۱ برای ۱۰۰ ساعت کارکرد سیستم ترسیم شده است.



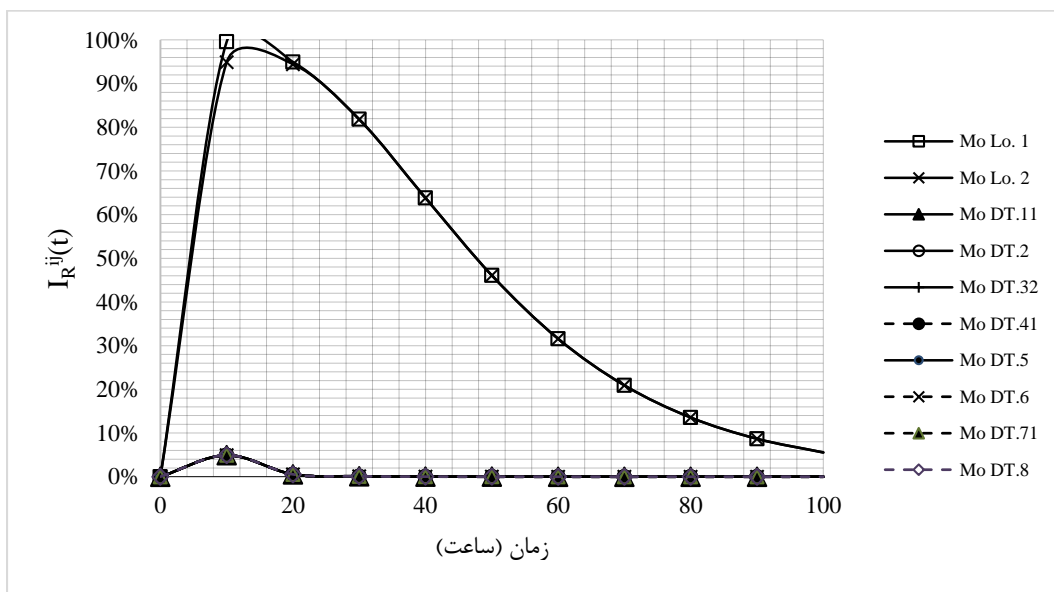
شکل ۶-۲۱- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های معدنی

قابلیت اطمینان سیستم با ساختار سری-موازی برای ۱۰۰ ساعت کارکرد سیستم به صورت شکل ۶-۲۲ خواهد بود. از این نمودار می‌توان برای پیش‌بینی رفتار خرابی سیستم استخراجی استفاده شده تا با به‌کارگیری استراتژی‌های مناسب مانند برنامه‌ریزی نت عملکرد سیستم را بهبود بخشید. به‌طور مثال طبق نمودار قابلیت اطمینان در شکل ۶-۲۱ برای Mo DT. 11 (یعنی لایه یک از زیرسیستم DT. 1) حفظ قابلیت اطمینان در سطح اطمینان ۸۰ درصد نیازمند اجرای نت پیش از ۱۶ ساعت است. نتیجه اینکه پس از ۱۶ ساعت کارکرد پیوسته دستگاه احتمال وقوع خرابی بیشتر از ۲۰ درصد خواهد بود. در آخرین مرحله ایده سنجش اهمیت برای تعیین اولویت هر زیرسیستم در راستای بهبود عملکرد پیشنهاد می‌شود. محاسبه سنجش اهمیت در سیستم‌ها با پیکربندی سری یا موازی امری ساده است ولی انجام این محاسبات در سیستم‌های پیچیده‌ای همچون سیستم سری-موازی استخراجی معدن کمی دشوار

است. نتایج محاسبات سنجش اهمیت قابلیت اطمینان در طول ۱۰۰ ساعت کارکرد به صورت شکل ۲۳-۶ است.

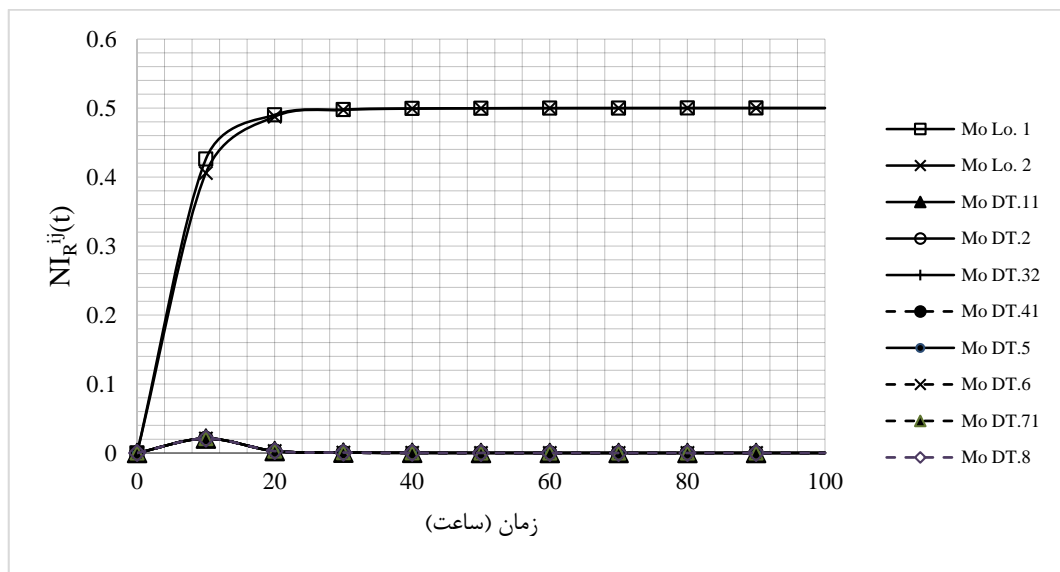


شکل ۲۲-۶- قابلیت اطمینان سیستم



شکل ۲۳-۶- سنجش اهمیت قابلیت اطمینان در معدن سونگون

همان‌طور که قبلاً ذکر شد تحلیل اهمیت یک فرایند، کمی‌سازی رفتار ماشین‌آلات است که رتبه‌بندی ارائه شده توسط آن مهم‌تر از مقادیر مطلق می‌باشد. در نتیجه سنجش اهمیت قابلیت اطمینان نرمالیزه NI_R^{ij} صرفاً برای مقایسه وضعیت زیرسیستم‌ها به صورت شکل ۶-۲۴ ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که زیرسیستم اصلی لودر بالاترین اهمیت قابلیت اطمینان را داشته و زیرسیستم اصلی تراک پایین‌ترین اهمیت را در بازهٔ آزمون دارد. این نمودار نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم Mo Lo.1 و Mo Lo.2 به‌طور بارز باید افزایش یابد چرا که قابلیت اطمینان آن‌ها تأثیر بسزایی بر قابلیت اطمینان سیستم دارد.



شکل ۶-۲۴- سنجش اهمیت قابلیت اطمینان نرمالیزه در معدن سونگون

۳-۳-۶- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی بر شرایط محیطی

مطابق مباحث انجام گرفته قابلیت دسترسی شاخص عملکرد ترکیبی از قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری برای ارزیابی سیستم است. لذا استفاده از قابلیت دسترسی در سنجش اهمیت فراگیرتر از قابلیت اطمینان می‌باشد. درعین حال شرایط محیطی به‌ویژه محیط خشن و سخت معدنی به شدت شاخص‌های رفتاری تجهیزات تحت تأثیر قرار داده و روند وقوع آن‌ها را تغییر خواهد داشت. لذا برای سنجش اهمیت سیستم باید معیاری مناسب داشت که هم شاخص‌های عملکردی و هم تأثیر شرایط محیطی را پوشش دهد. در این بخش "سنجش اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی بر شرایط محیطی" ارائه شده که سه عنصر اصلی یعنی شاخص عملکردی، تأثیر شرایط محیطی و پیکربندی سیستم را در یک معیار نشان می‌دهد. برای ارزیابی شاخص پیشنهادی از لحاظ کاربرد در حالت واقعی نیز بخش دیگری از ناوگان استخراجی متشکل

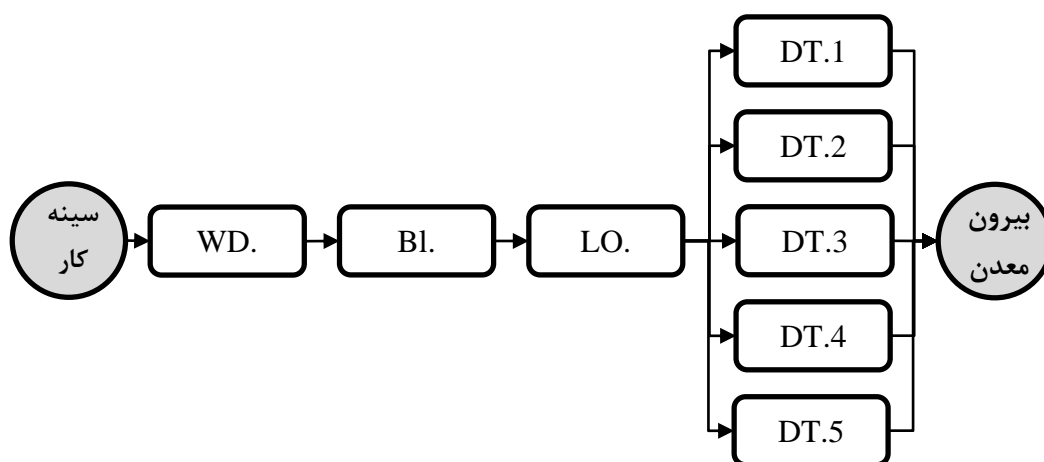
از زیرسیستم‌های واگن دریل، بلدوزر، لودر و تراک‌ها مطالعه شد. فرضیات در نظر گرفته شده را برای این بخش عبارتند:

- سیستم شامل n-زیرسیستم مستقل از هم است.
 - همه زیرسیستم‌ها تعمیرپذیر می‌باشند.
 - همه زیرسیستم‌ها تنها در یکی از دو حالت خرابی یا کارگر هستند.
 - ویژگی‌های خرابی با تعمیرات زیرسیستم‌ها کاملاً مشخص است.
- جدول ۶-۱۹ مشخصات ماشین‌آلات و کدگذاری به کار رفته برای آن‌ها را به نمایش می‌گذارد.

جدول ۶-۱۹- زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی از معدن مس سونگون

ردیف	زیرسیستم	مدل	کدگذاری
۱	واگن دریل	هولمن RBH-30	WD.
۲	لودر	کاترپیلار ۹۸۸B	LO.
۳	بلدوزر	کاترپیلار D8N	Bl.
۴	تراک	کوماتسو HD-785-5	DT. 1
۵	تراک	کوماتسو HD-785-5	DT. 2
۶	تراک	کوماتسو HD-785-5	DT. 3
۷	تراک	کوماتسو HD-785-5	DT. 4
۸	تراک	کوماتسو HD-785-5	DT. 5

بلوک دیاگرام سری-موازی سیستم از سینه کار معدنی تا بیرون معدن نیز در شکل ۶-۲۵ نشان داده شده است.



شکل ۶-۲۵- بلوک دیاگرام ناوگان استخراجی از معدن مس سونگون

در این قسمت نیز با توجه به وارد کردن تأثیر شرایط محیطی از دو سری داده‌های زمانی (TBF-ها و TTR-ها) و فاکتورهای ریسک استفاده می‌شود.

۶-۳-۳-۱- تحلیل قابلیت دسترسی مبتنی بر شرایط محیطی

نتایج تحلیل‌های به‌صورت جدول ۶-۲۰ و جدول ۶-۲۱ نشان داده است. برای شرح جزئیات بیشتر در مورد این جداول رفتار خرابی زیرسیستم واگن دریل را در نظر بگیرید. با توجه به وجود فاکتور ریسک وابسته زمان (فاکتور عمق حفاری (Z_{d8})) از مدل SCRM استفاده شده و داده‌ها بر اساس این فاکتور در دو لایه تقسیم شد. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد قسمت تأثیر شرایط محیطی در این مدل برای همه لایه‌ها یکسان بوده ولی نرخ مخاطره اساسی در هر لایه مستقل خواهد بود.

جدول ۶-۲۰- بهترین توابع برازش شده برای خرابی زیرسیستم‌ها و مقادیر MTTF

MTTF (Hr)	$exp\left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right)$	نرخ مخاطره اساسی ($\lambda_{0s}(t)$)		لاجه	رویکرد	زیرسیستم
		پارامترها	بهترین برازش			
۰/۶۴۲	$exp(5.767z_{d11} + 3.559z_{d12} - 3.087z_{d6} + 0.081z_{d3})$	Scale: ۰/۷۹۹, Shape: ۰/۳۸۳	Loglogistic-2P	۱	-SCRM لایه‌بندی شده با (Z_{d8})	WD.
۷/۶۵۸۶		Beta: ۱/۴۵۶, Eta: ۶۲/۶۹۱	PLP	۲		
۰/۱۲۱۸	$exp(-0.172z_{l11} - 1.383z_{l12} - 0.316z_{l2} + 0.299z_{l4} - 0.081z_{l3})$	Log-mean: ۲/۲۵۶, Log-std: ۱/۳۲۹	Lognormal-2P	۱	PHM	LO.
۲/۶۳۵۰	$exp(-0.251z_{b2} + 0.459z_{d7} - 1.501z_{d8})$	Scale: ۱/۵۶۲, Shape: ۰/۴۵۲	Loglogistic-2P	۱	-SCRM لایه‌بندی شده با (Z_{b11})	BI.
.		Log-mean: ۲/۸۳۶, Log-std: ۱/۰۷۲	Lognormal-2P	۲		

ادامهٔ جدول ۶-۲۰

۳۳/۷۴۸۶	$exp(0.003z_{t11} - 2.102z_{t12} - 0.409z_{t51} - 0.656z_{t52})$	Beta: ۱/۴۲۲ Eta: ۷۶/۴۹۰	PLP	۱	لاپه‌بندی شده با (z_{t2}) -SCRM	DT. 1
۲۹/۵۲۴۹		Beta: ۱/۳۵۷, Eta: ۶۸/۷۴۵	Weibull-2P	۲		
۱/۷۶۹۲		Beta: ۰/۵۸۰, Eta: ۶/۶۱۴, Gamma: ۶/۴۴۵	Weibull-3P	۳		
۵/۴۲۲۲۰	$exp(-0.142z_{t11} - 1.837z_{t12} - 0.345z_{t51} - 0.846z_{t52})$	Beta: ۰/۷۵۴, Eta: ۴۰/۷۹۴, Gamma: ۰/۲۳۴	Weibull-3P	۱	PHM	DT. 2
۲۰/۲۹۳۷	$exp(-0.095z_{t11} - 1.295z_{t12} + 0.207z_{t4} - 0.641z_{t51} - 1.294z_{t52})$	Beta: ۱/۴۱۶, Eta: ۶۲/۷۶۸	PLP	۱	لاپه‌بندی شده با (z_{t2}) -SCRM	DT. 3
۱۰/۴۱۲۱		Beta: ۰/۹۲۳, Eta: ۴۹/۰۴۶, Gamma: ۱/۸۰۳	Weibull-3P	۲		
۱/۰۹۵۷		Beta: ۰/۶۰۷, Eta: ۸/۸۳۶, Gamma: ۵/۶۵۹	Weibull-3P	۳		
۰/۱۵۹۸	$exp(-0.243z_{t11} - 2.086z_{t12} + 0.142z_{t4} - 1.025z_{t51} - 1.388z_{t52})$	Log-mean: ۱/۷۷۱, Log-std: ۱/۳۱۱۱	Lognormal-2P	۱	لاپه‌بندی شده با (z_{t2}) -SCRM	DT. 4
∞		Log-mean: ۱/۵۲۶, Log-	Lognormal-2P	۲		
۱/۴۶۱۰		Beta: ۰/۳۸۷, Eta: ۱۱/۵۹۳	Weibull-2P	۳		
۰/۲۵۳۵	$exp(-0.340z_{t11} - 2.369z_{t12} + 0.238z_{t4})$	Log-mean: ۱/۸۷۷, Log-std: ۱/۴۲۹	Lognormal-2P	۱	لاپه‌بندی شده با (z_{t2}) -SCRM	DT. 5
۱۶/۸۷۳۶		Beta: ۰/۹۸۹, Eta: ۵۶/۴۷۰	Weibull-2P	۲		
۲/۵۲۷۹		Beta: ۰/۵۹۲, Eta: ۱۲/۵۱۷, Gamma: ۵/۹۵۰	Weibull-3P	۳		
z_{xij} : Dummy Covariate; z_{xi} : Categorical covariates						

جدول ۶-۲۱- بهترین توابع برازش شده برای تعمیرات زیرسیستم‌ها و مقادیر MTTR

MTTR (Hr)	$exp\left(\sum_{j=1}^m w_j \beta_j\right)$	نرخ تعمیرات اساسی $(\mu_{0g}(t))$		لایه	رویکرد	زیرسیستم‌ها
		پارامترها	بهترین برازش			
۲/۴۳۸۵	$exp(1.616w_{d11} - 4.775w_{d2} - 0.225w_{d3})$	Scale: ۲/۲۲۲, Shape: ۰/۸۸۹	Loglogistic-2P	۱	PRM	WD.
۱۱/۱۹۵۵	$exp(0.525w_{l11} - 0.450w_{l12} - 0.211w_{l3})$	Beta: ۰/۵۹۰, Eta: ۳۵/۳۹۶, Gamma: ۸/۴۲۵	Weibull-3P	۱	لایه‌بندی شده با (w_{l2})	LO.
۲/۵۸۲		Scale: ۱/۳۴۹, Shape: ۰/۵۲۲	Loglogistic-2P	۲		
۴۱۹/۵۳۲	$exp(-5.178w_{b2})$	Location: ۶/۱۴۸, Scale: ۰/۷۳۵	Logistic-2P	۱	لایه‌بندی شده با (w_{l2})	Bl.
∞		Beta: ۰/۵۷۸ Eta: ۳۹/۱۲۹	PLP	۲		
۱/۴۷۹۵	$exp(-3.415w_{t2} - 0.136w_{t3})$	Beta: ۱/۴۲۳, Eta: ۲/۵۱۸, Gamma: ۰/۲۰۷	Weibull-3P	۱	لایه‌بندی شده با (w_{t2})	DT. 1
۰/۹۸۶۶		Log-mean: ۰/۵۸۹, Log-std: ۰/۶۳۵	Lognormal-2P	۲		
۱/۸۳۶۷		Beta: ۰/۷۸۷, Eta: ۳/۵۲۷, Gamma: ۰/۳۰۹	Weibull-3P	۳		
۲/۰۶۷۳	$exp(-0.061w_{t4})$	Beta: ۱/۴۵, Eta: ۲/۲۸, Gamma: ۰/۱۶۵	Weibull-3P	۱	PHM	DT. 2
۳/۳۰۹۳		Lambda: ۰/۳۲۸, Location: ۰/۲۵	Exponential -2P	۲		
۰/۹۱۴۷		Beta: ۰/۸۲۴, Eta: ۰/۸۲۴, Gamma: ۰/۴۰۷	Weibull-3P	۳		

ادامه جدول ۶-۲۱

۲/۵۳۸۴	$exp(-0.016w_{t4})$	Lambda: ۰/۵۰۸, Location: ۰/۵	Exponential -2P	۱	(W_{t12}, W_{t2}) لایه‌بندی شده با -SCRM	DT. 3
۳/۰۸۷۳		Beta: ۰/۸۱۳, Eta: ۲/۷۵۶, Gamma: ۰/۴۳	Weibull-3P	۲		
۴/۴۵۱۳		Beta: ۰/۹۳۶, Eta: ۴/۳۱۸, Gamma: ۰/۱۹۴	Weibull-3P	۳		
۳۱/۱۴۶۱		Beta: ۰/۶۵۶ Eta: ۲۳/۰۲۸	PLP	۴		
۱۰/۱۹۳۱		Beta: ۸/۰۴۳, Eta: ۱۰/۸۲۱, Gamma: ۷/۳۴۶	Weibull-3P	۵		
۲/۴۱۹۷	$exp(0.094w_{t2})$	Beta: ۱/۵۱۷, Eta: ۲/۶۸۴, Gamma: ۰/۱۶۲	Weibull-3P	۱	(W_{t12}, W_{t2}) لایه‌بندی شده با -SCRM	DT. 4
۳/۰۳۸۳		Beta: ۰/۸۳۴, Eta: ۲/۷۵۹, Gamma: ۰/۴۶	Weibull-3P	۲		
۸/۷۰۶۳		Beta: ۱/۸۵, Eta: ۹/۸۰۲, Gamma: -۱/۰۰۴	Weibull-3P	۳		
۱۰۵/۸۷۱		Beta: ۰/۴۵۳, Eta: ۴۳/۳۵۰, Gamma: ۱۴/۹۵۰	Weibull-3P	۴		
۱۷/۳۴۸۵	$exp(-0.134w_{t3} - 4.601w_{t2})$	Log-mean: ۱/۲۶۵, Log-std: ۱/۴۶۷	Lognormal-2P	۱	(W_{t11}) لایه‌بندی شده با -SCRM	DT. 5
۳/۰۹۰۹		Lambda: ۰/۵۱۱, Location: ۰/۵	Exponential -2P	۲		

لذا در لایه اول این زیرسیستم نرخ مخاطره اساسی از تابع لگ-لجستیک دو پارامتری و لایه دوم از مدل فرایند قانون توانی (PLP) پیروی می‌کنند. پس در واقع تأثیر فاکتور ریسک وابسته به زمان از این طریق کنترل شد. در مرحله بعد مقادیر MTTF و MTTR در ستون آخر به ازای مقادیر متوسط فاکتورهای ریسک محاسبه شده است.

۶-۳-۳-۲- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی بر شرایط محیطی در معدن سونگون

پس از تعیین مقادیر MTTF و MTTR در مرحله قبل اکنون می‌توان سراغ سنجش اهمیت رفته و با رتبه‌بندی زیرسیستم‌ها فهرستی از اولویت‌های زیرسیستم‌ها ارائه کرد. در سیستم استخراجی با توجه به پیچیدگی و گستردگی زیرسیستم‌ها و رابطه سری-موازی، روابط ریاضی قدرتمند و پیچیده برای انجام این محاسبات نیاز است. از سوی دیگر با توجه به وارد کردن تأثیر شرایط محیطی می‌توان سناریوهای مختلف برای حالت واقعی در نظر گرفت. در این بخش سناریویی برحسب لایه‌های موجود (در صورت PHM یا PRM کل مدل به‌عنوان یک‌لایه با شماره ۱ در نظر گرفته شده) به‌صورت جدول ۶-۲۲ در نظر گرفته شد.

جدول ۶-۲۲- سناریوی سنجش اهمیت قابلیت دسترسی در معدن مس سونگون

DT.5	DT.4	DT.3	DT.2	DT.1	Bl.	LO.	WD.	زیرسیستم
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	لایه قابلیت اطمینان
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	لایه قابلیت تعمیرپذیری

قابلیت دسترسی کل سیستم با استفاده از رابطه (۶-۲۴) به صورت زیر خواهد بود:

$$A_s = 0.0001 \quad (۶-۴۰)$$

سپس سنجش اهمیت قابلیت دسترسی (I)، سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ مخاطره (I_{MTBF}) و سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ تعمیرات (I_{MTTR}) برای همه زیرسیستم‌ها به‌صورت جدول ۶-۲۳ خواهد بود. در این شاخص نیز مانند سایر شاخص‌های اهمیت پیشنهاد شده، بیشتر اولویت و رتبه‌بندی زیرسیستم‌ها حائز اهمیت است تا مقدار مطلق ارائه شده توسط این شاخص. از این رو مقدار نرمالیزه از سنجش اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی بر شرایط محیطی NI محاسبه می‌شود. مقادیر نرمالیزه این شاخص و سنجش اهمیت مبتنی قابلیت اطمینان (NI_{MTBF}) و قابلیت تعمیرپذیری (NI_{MTTR}) مطابق جدول ۶-۲۴ و شکل ۶-۲۶ خواهد بود. اهمیت قابلیت دسترسی زیرسیستم‌ها به ترتیب نزولی عبارتند از Bl., LO., WD., DT.1, DT.2, DT.3, DT.4, DT.5 است.

یعنی برای بهبود قابلیت دسترسی سیستم ارتقای قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های Bl، و LO ضروری است.

جدول ۶-۲۳- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی برای معدن مس سونگون

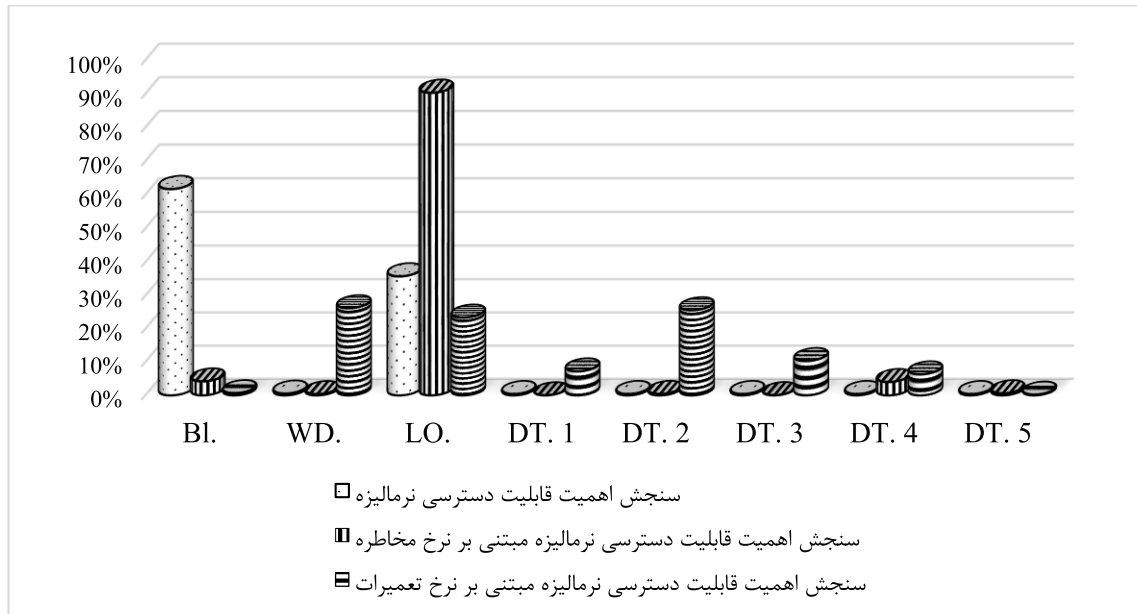
زیرسیستم	$I (\times 10^{-5})$	$I_{MTBF} (\times 10^{-5})$	$I_{MTR} (\times 10^{-5})$
Bl.	۸۱۵/۳۴۱	۱/۹۱۹	۰/۰۱۲
WD.	۶/۷۰۹	۰/۱۶۰	۰/۵۰۴
LO.	۴۷۲/۸۵۹	۴۱/۳۳۲	۰/۴۵۰
DT.1	۵/۰۹۲	۰/۰۰۶	۰/۱۳۸
DT.2	۵/۰۹۱	۰/۱۸۸	۰/۴۹۲
DT.3	۵/۰۹۲	۰/۰۲۵	۰/۱۹۸
DT.4	۵/۵۰۵	۱/۸۳۶	۰/۱۲۱
DT.5	۴/۹۰۱	۰/۲۷۴	۰/۰۰۴

جدول ۶-۲۴- سنجش اهمیت قابلیت دسترسی نرمالیزه برای معدن مس سونگون

زیرسیستم	$NI (\%)$	$I_{MTBF} (\%)$	$I_{MTR} (\%)$
Bl.	۶۱/۷۶	۴/۲۰	۰/۶۳
WD.	۰/۵۱	۰/۳۵	۲۶/۲۵
LO.	۳۵/۸۲	۹۰/۳۶	۲۳/۴۲
DT.1	۰/۳۹	۰/۰۱	۷/۲۱
DT.2	۰/۳۹	۰/۴۱	۲۵/۶۳
DT.3	۰/۳۹	۰/۰۵	۱۰/۳۲
DT.4	۰/۳۸	۴/۰۱	۶/۳۲
DT.5	۰/۳۷	۰/۶۰	۰/۲۱

در رابطه با اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی نرخ مخاطره به ترتیب عبارتند از LO., Bl., DT.4, DT.5, DT.3, WD., DT.2, و DT.1. پس بهبود قابلیت دسترسی سیستم بر اساس نرخ مخاطره زیرسیستم نیز نیازمند بهبود وضعیت خرابی Bl، و DT.4 می‌باشد. برای بهبود قابلیت دسترسی بر اساس نرخ تعمیرات نیز لیست نزولی عبارت از Bl، DT.4, DT.1, DT.3, LO., DT.2, WD., و DT.5. پس برای بهبود قابلیت دسترسی سیستم از لحاظ تعمیراتی نیز اولویت با سه زیرسیستم DT.2، WD. و

LO خواهد بود. با مقایسه NI_{MTBF} و NI_{MTTR} نیز می توان دریافت که آیا MTTF یا MTTR زیرسیستم تأثیر بیشتری بر قابلیت دسترسی ناوگان استخراجی معدن خواهد داشت یا خیر. در این بخش بهتر است توجه بیشتری به MTTR زیرسیستم های WD., DT.1, DT.2 و برای MTBF نیز باید زیرسیستم های LO, BI., و DT.5 بیشتر مورد توجه باشند.



شکل ۶-۲۶- اهمیت قابلیت دسترسی

۴-۶- قطعات یدکی

مدیریت قطعات یدکی و تدارکات وجهی از مدیریت پشتیبانی محصولات و مؤثر در هزینه چرخه عمر محصول هست. دسترسی به قطعات یدکی به هنگام تقاضا زمان افت سیستم/ماشین را کاهش داده و کارآیی آن را افزایش و در نتیجه سود حاصله از کل پروژه را افزایش خواهد داد. در صورت ذخیره تعداد بهینه قطعات یدکی در انبار، هزینه های چرخه عمر محصول به عنوان تابع هدف را کمینه خواهد کرد. تعداد بهینه قطعات یدکی را نیز می توان با وارد کردن عوامل مختلف مانند تعداد وقوع خرابی، تعداد تجهیزات موجود، حساسیت قطعه، هزینه های خرید قطعه، فاصله بین تولیدکننده تا مصرف کننده، زمان های تأخیر بین تصمیم تا اجزای و در کل تأثیر شرایط محیطی تعیین کرد. تخمین قطعات یدکی مورد نیاز بر اساس ویژگی های شرایط محیطی و رفتار فنی و کارکردی سیستم و اجزای یکی از مؤثرترین راه ها برای بهینه سازی توقفات ناخواسته هست. در این بخش نخست رویکرد پیش بینی قطعات یدکی مورد نیاز بر اساس قابلیت اطمینان پیشنهاد شده و سپس این رویکرد به ازای وارد شدن تأثیر شرایط

محیطی تحت عنوان فاکتورهای ریسک به روزرسانی می‌شود. در هر دو مورد نخست قابلیت اطمینان جزء بر اساس داده‌های خرابی و فاکتورهای ریسک تعیین شده و سپس تعداد قطعات یدکی مورد نیاز، میزان سفارش بهینه و زمان ارسال سفارش بر اساس مصرف سالیانه محاسبه می‌شود.

۶-۴-۱- مدیریت قطعات یدکی بدون تأثیر شرایط محیطی - لاستیک‌های تراک

در روش پیشنهادی برای این قسمت، رویکردی کاربرپسند به منظور بررسی عملکرد اجزای بر اساس قابلیت اطمینان (شاخص عملکردی) و تخمین قطعات یدکی مورد نیاز ارائه شده است. همچنین در مبحث آماری برای انجام آزمون روند داده‌ها رویکردی جدید، کامل‌تر و صحیح‌تر از آنچه تاکنون انجام گرفته پیشنهاد شده است. برای این منظور از داده‌های لاستیک تراک استفاده شده است. فرضیات در نظر گرفته شده برای ارزیابی مطالعه موردی با روش پیشنهادی به شرح زیر است:

- سیستمی متشکل از داده‌های لاستیک (اجزای) ۱۱ تراک ۱۰۰ تنی مدل Komatsu-785 5 و مستقل از هم مد نظر است.
- تنها اجزای تعمیرناپذیر مورد مطالعه قرار گرفته است.
- هر جزء تنها یکی از دو حالت خرابی یا در حال کارکرد خواهد داشت.
- ویژگی‌های مورد نیاز در مورد خرابی‌ها کاملاً مشخص می‌باشند.
- انجام تعمیرات جزء را به حالت نو باز خواهد گرداند.
- تنها محیط معدنی از مجتمع مس سونگون بررسی خواهد شد.

الف- روش پیشنهادی تخمین قطعات یدکی بدون تأثیر شرایط محیطی

در شکل ۶-۲۷ نظریه تحقیق در سه بخش کلی شامل، ۱. تشکیل بانک داده، ۲. تعیین رفتار عملکردی اجزای بر اساس قابلیت اطمینان، ۳. مدیریت قطعات یدکی مشاهده می‌شود. با توجه به تعمیرناپذیری اجزای مورد بررسی در این بخش، داده‌های مورد نیاز از جنس زمان و در قالب TTFs استخراج هستند.

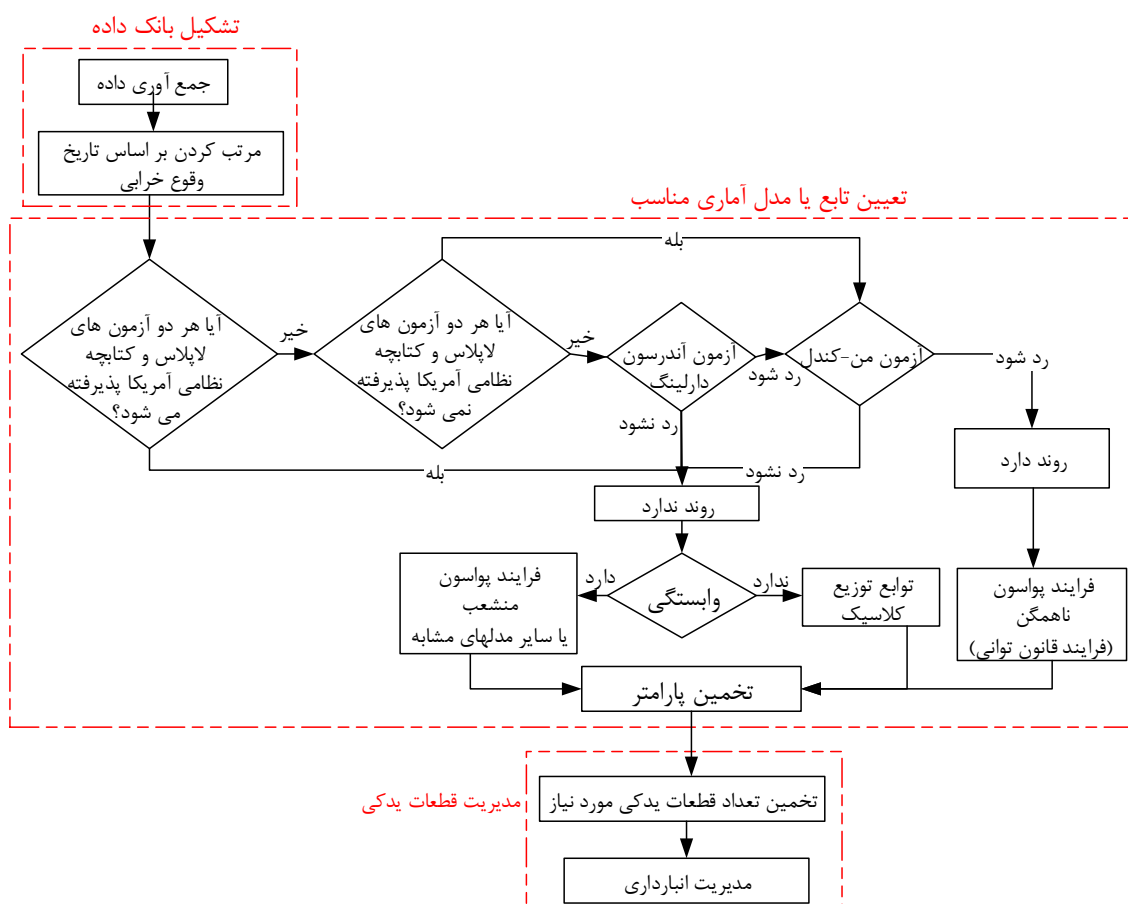
ب- قابلیت اطمینان داده‌های لاستیک تراک‌ها

پس از تشکیل بانک داده مطابق شکل ۶-۲۷ تحلیل‌های آماری با انجام آزمون‌های روند شروع می‌شود. نتایج آزمون‌های T1، T2، T3 و T4 به صورت جدول ۶-۲۵ است. با توجه به نتایج آزمون‌های T1 و T2 در سطح اطمینان ۹۵ درصد حاکی از رد فرض صفر مبتنی بر عدم وجود روند می‌باشند. لذا آزمون T4 برای بررسی وجود یا عدم وجود روند باید انجام پذیرد که نتیجه این آزمون نیز با مقدار آماره ۲۸/۵۹۹

و p-value صفر نشان دهنده وجود روند در داده‌های خرابی لاستیک‌ها بوده و مدل PLP را برای تعیین رفتار خرابی‌ها پیشنهاد می‌دهد.

جدول ۶-۲۵- نتایج آزمون روند برای داده‌های لاستیک‌های تراک‌ها

Mann-Kendell (T4)	Anderson-Darling (T3)	Laplace (T2)	MIL-Hdbk-189 (T1)	آزمون روند
۲۸/۵۹۹	۲/۵۷	۲/۱۱	۶۶۳/۶۳	آماره آزمون
۰	۰/۰۴۵	۰/۰۳۵	۰/۰۶۸	P-Value



شکل ۶-۲۷- تخمین قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان

در جدول ۲۶-۶ مقادیر پارامترهای شکل و مقیاس این مدل به همراه مقادیر بحرانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.

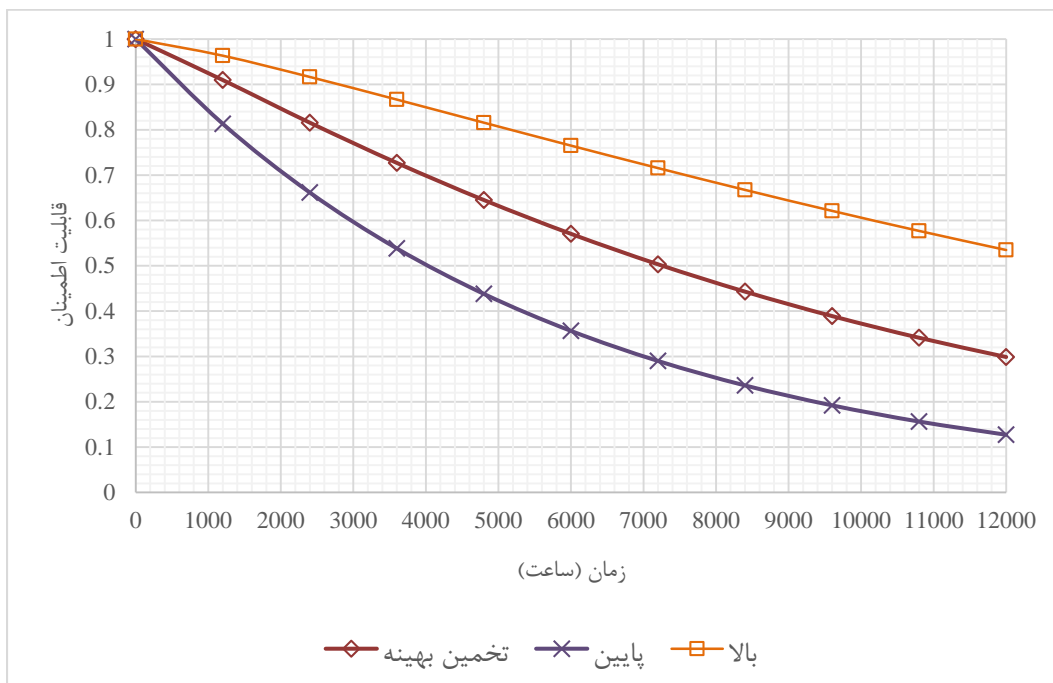
جدول ۲۶-۶- پارامترهای تخمینی برای لاستیک‌های تراک‌ها

پارامترها	تخمین بهینه	خطای استاندارد	مقادیر بحرانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد	
			پایین	بالا
پارامتر شکل (β)	۱/۱۱	۰/۰۶	۱/۰۰	۱/۲۳
پارامتر مقیاس (η)	۱۰۱۱۴/۳۰	۲۸۵۵/۸۹	۵۸۱۵/۵۴	۱۷۵۹۰/۷۰

تابع قابلیت اطمینان لاستیک به ازای پارامترهای تخمینی به صورت رابطه (۴۱-۶) خواهد بود:

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{10114.30}\right)^{1.11}\right) \quad (41-6)$$

در شکل ۲۸-۶ تابع قابلیت اطمینان لاستیک‌های تراک به ازای مقادیر حد بالا، پائینی و تخمین بهینه برای کارکرد ۱۲۰۰۰ ساعته ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان لاستیک تراک بعد از تقریباً ۷۲۰۰ ساعت کارکرد به ۵۰ درصد مقدار اولیه افت خواهد کرد. همچنین بعد ۱۲۰۰۰ ساعت کارکرد احتمال وقوع خرابی در لاستیک ۷۰ درصد است.



شکل ۲۸-۶: قابلیت اطمینان لاستیک تراک‌ها

ج- لاستیک‌های مورد نیاز برای تراک‌ها

کنترل موجودی انبار قطعات یدکی نقش عمده‌ای در مدیریت عملیاتی مدرن داشته و توازن بین این دو بسیار مهم است: در یک سمت موجودی زیاد قطعات یدکی، رکود سرمایه بزرگی به همراه داشته و از سمت دیگر موجودی کم انبار ممکن است خدمات‌رسانی (پشتیبانی) ضعیف برای مشتری یا فعالیت‌های ضروری با هزینه هنگفت را به بار بیاورد. لذا پس از تصمیم‌گیری در مورد نوع و کیفیت قطعات یدکی که باید در انبار نگهداری شود سؤال بعدی، میزان قطعات یدکی نگهداری شده در انبار است.

همچنین تجدید قطعات بر مبنای نرخ مصرف مورد انتظار قطعات یدکی و ریسک اقتصادی مرتبط با تهی بودن انبار در چرخه تجدید انبار، انجام خواهد پذیرفت. در این رساله از روش تخمین قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان استفاده شده که تابع آن مشخص شد. حال برای تعیین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز (N_t) در طول یک سال با کارکرد روزانه متوسط ۲۱/۵ ساعت و ۳۶۵ روز در سال، زمان کارکرد متوسط ۷۶۶۸ ساعت با احتمال کمبود ۵ درصد برای سه حالت تخمینی از پارامترها در جدول ۶-۲۶ به صورت جدول ۶-۲۷ خواهد بود.

جدول ۶-۲۷- تخمین لاستیک مورد نیاز برای حالت‌های مختلف

پارامترها	حد پایین	بهینه	حد بالا
میانگین (T)	۵۸۱۸/۹۵	۹۷۴۱/۹۵	۱۶۴۶۱/۶۵
انحراف معیار ($\sigma(T)$)	۵۸۲۷	۸۸۲۰/۱۰	۱۳۵۰۸/۲۵
ضریب انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌ها (γ)	۱	۰/۹۱	۰/۸۲
تعداد قطعات یدکی مورد نیاز (N_t)	۳/۲	۲	۱/۲

همان‌طور که انتظار می‌رفت با بهتر بودن وضعیت قابلیت اطمینان لاستیک مطابق شکل ۶-۲۸ برای حد بالای پارامترهای بهینه تعداد لاستیک‌های مورد نیاز کمتر (۱/۲ لاستیک) نسبت به سایر حالت‌ها خواهد بود.

برای بیان ساده‌تر با مفهوم فیزیکی قابل فهم‌تر برای اعداد محاسبه شده در ردیف آخر جدول می‌توان به این صورت بیان کرد که اگر انبارداری برای ۵ لاستیک از یک تراک در نظر گرفته شود (۱/۲ ضرب در ۵)، به ازای خرید ۶ عدد لاستیک در حالت حد بالا باید به ترتیب ۱۰ و ۱۶ لاستیک برای حالت بهینه

و پایین خریداری شود. قابل ذکر است که اعداد اعشاری به دست آمده صرفاً برای یک لاستیک محاسبه شده که با توجه به تعداد تراک‌ها و ۶ لاستیک برای هر یک، تعداد کل لاستیک‌ها به دست خواهد آمد که با گرد کردن این عدد به مقدار بیشتر تعداد کل لاستیک مورد نیاز محاسبه خواهد شد. به عنوان مثال در صورت وجود ۱۰ تراک شش چرخ تعداد لاستیک مورد نیاز در طول یک سال برای حد پائین، بهینه و بالا به ترتیب ۱۹۲، ۱۲۰ و ۷۲ خواهد بود. برای مدیریت انبارداری نیز مطابق روابط (۲-۱۷) و (۲-۱۹) دو مقدار EOQ و Rp باید محاسبه شود که اولی برای مقدار سفارش اقتصادی و دومی زمان ارسال لیست سفارش برای خرید به کار می‌رود. برای محاسبه مقادیر EOQ و Rp، تعداد قطعات یدکی مورد نیاز مطابق جدول ۶-۲۷، هزینه سفارش ۱۴۵ دلار، هزینه نگهداری سالانه هر واحد ۹۵۰ دلار، کارکرد سالانه ۷۶۶۸ ساعت، متوسط زمان وقوع خرابی به ترتیب سطر میانگین جدول ۶-۲۷، با مقدار توزیع نرمال در اطمینان ۵ درصد و با زمان تأخیر متوسط ۵ روز هستند. در جدول ۶-۲۸ مقادیر EOQ و Rp به ازای سه تخمین از پارامترها محاسبه شده است. مقدار Rp برای حالت حد پایین نشان می‌دهد که زمانی که موجودی انبار از لاستیک تقریباً به یک عدد رسید باید یک لاستیک دیگر سفارش داده شود.

جدول ۶-۲۸- تخمین مقدار سفارش بهینه و زمان سفارش

پارامترها	حد پایین	بهینه	حد بالا
مقدار سفارش اقتصادی (EOQ)	۱	۰/۸	۰/۶
مقدار ارسال سفارش مجدد (Rp)	۰/۸	۰/۶	۰/۵

۶-۴-۲- مدیریت قطعات یدکی با تأثیر شرایط محیطی

شرایط محیطی تأثیر بسزایی در رفتار ماشین‌آلات معدنی دارد از این رو برای تخمین قطعات یدکی به طور دقیق‌تر و نزدیک‌تر به شرایط واقعی وارد کردن فاکتورهای ریسک امری اجتناب‌ناپذیر است. لذا در ادامه بحث تخمین قطعات یدکی تأثیر شرایط محیطی نیز در تحلیل‌ها وارد شد. مدل‌های رگرسیونی از جمله رویکردهای آماری هستند که قادر به تحلیل تأثیرات چندین پارامتر مستقل بر یک پارامتر وابسته می‌باشند. مدل رگرسیون کاکس (CRM) از جمله روابط رگرسیونی پرکاربرد آماری در مباحث قابلیت اطمینان است که در این بخش برای بسط مدل پیشنهادی تخمین قطعات یدکی و مباحث مرتبط مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بخش نیز مجدداً از داده‌های ۱۱ ساله تراک‌ها و لودر برای ارزیابی رویکرد پیشنهادی استفاده خواهد شد. این برای نخستین بار خواهد بود که مطالعه موردی به این سطح از داده و تعداد فاکتورهای ریسک مورد بررسی قرار گرفته به‌ویژه در زمینه مهندسی معدن

باوجود هزینه‌های سرمسام آور تعمیرات و قطعات یدکی که توجه ناچیزی بدان شده است. همچنین تاکنون رویکردی منسجمی برای این تخمین ارائه نشده است که در این رساله برای نخستین بار رویکرد تخمین قطعات یدکی مبتنی بر شرایط محیطی و قابلیت اطمینان پیشنهاد شده است. در این بخش از داده‌های ۴۴ دستگاه تراک در چهار مدل کوماتسو HD 325-6، HD 465-7، HD 785-5 و کاترپیلار 777 و ۱۲ دستگاه لودر چرخ لاستیکی در سه مدل کاترپیلار ۹۸۸، کوماتسو ۴۷۰ خط ۳ و کوماتسو ۶۰۰ خط ۳ معدن استفاده شده است.

الف- روش پیشنهادی تخمین قطعات یدکی با تأثیر شرایط محیطی

در شکل ۶-۲۹ چارچوب اصلی روش پیشنهادی مشاهده می‌شود که در چهار مرحله کلی تنظیم شده است:

أ. تعیین فرضیات، شناسایی و صورت‌بندی فاکتورهای ریسک و جمع‌آوری داده‌ها (زمانی و شرایط محیطی)

ب. تعیین رویکردی بر تحلیل فاکتورهای ریسک و تخمین میزان تأثیرات آنها بر رفتار عملکردی اجزای

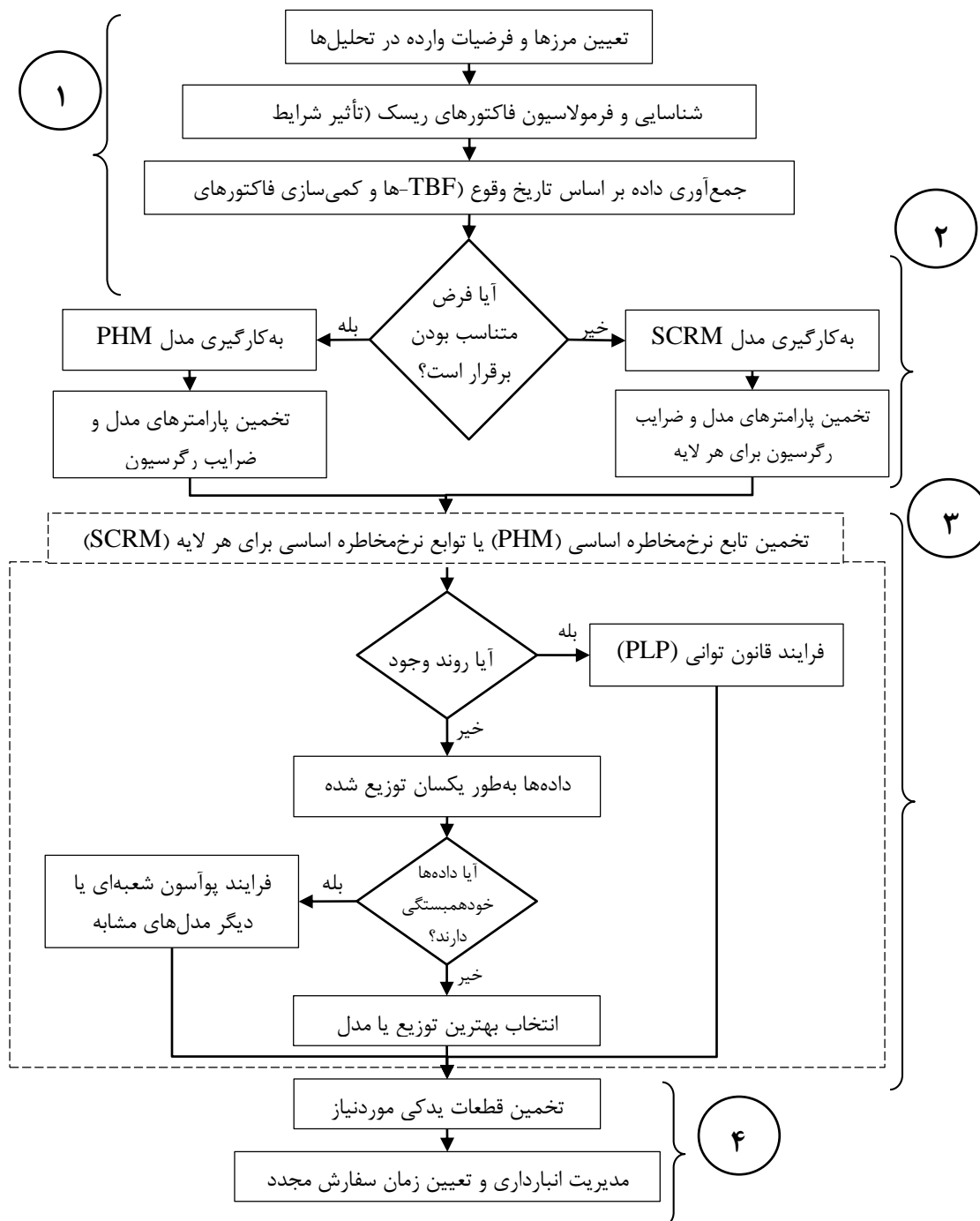
ج. انتخاب بهترین تابع یا مدل برای نرخ مخاطره اساسی (تابع زمان از رگرسیون)

د. تخمین قطعات یدکی، مدیریت انبارداری و مشخص کردن نقطه سفارش‌دهی

برای اجرای روش پیشنهادی نیز فرضیاتی به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود:

- سیستم (تراک) شامل n -جزء (لاستیک) مستقل از هم است.
- تنها زیرسیستم‌های تعمیرپذیر مد نظر است.
- هر جزء در یکی از دو حالت کارگر یا خراب خواهد بود.
- رفتار خرابی اجزای مشخص است.
- تعمیرات انجام گرفته منجر به حالت نو برگشتن جزء خواهد شد.
- تنها فاز عملیاتی و تعمیراتی مورد بررسی قرار گرفته است.
- تنها محیط معدنی و تراک‌های معدن مس سونگون مد نظر است.
- ب- تحلیل قابلیت اطمینان لاستیک
- در این بخش مقدار ضرایب رگرسیون (α) با استفاده از روش پله‌ای بازگشتی محاسبه شده و فاکتورهای ریسک کم‌اهمیت با استفاده از آماره والد و p -value از محاسبات حذف می‌شوند.

مطابق جدول ۶-۲۹ مشخص شد که دو فاکتور ریسک مدل تراک (Z_1) و برند لاستیک (Z_3) دارای تأثیر معنادار در سطح اطمینان ۱۰ درصد می‌باشند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که فاکتورهای ریسک طبقه‌بندی شده مانند مدل تراک با استفاده از متغیرهای باینری کدگذاری شده است.



شکل ۶-۲۹- روش تخمین قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان و شرایط محیطی

معیار حذف این متغیرها، والد یا p-value مربوط به خود فاکتور اصلی یعنی Z_1 با مقدار والد و p-value و $۲۵۴/۷۶۳$ و ۰ در گام چهارم می‌باشد و مقادیر والد و p-value برای فاکتورهای باینری مستخرج از آن یعنی Z_{11}, Z_{12}, Z_{13} به ترتیب $۱۰۰/۳۲۹, ۱۹۶/۱۸۲$ و $۰/۷۱۲$ و مقادیر $۰, ۰/۳۹۹$ و ۰ در گام چهارم ملاک تصمیم‌گیری نمی‌باشند.

جدول ۶-۲۹- تخمین مقادیر فاکتورهای ریسک لاستیک تراک با استفاده از SPSS

Exp(α)	Sig.(p-value)	d.f.	Wald	SE	α		
	۰	۳	۲۲۹/۲۴۲			Z_1	Step 1
۲/۰۸۷	۰	۱	۱۰۲/۲۸۲	۰/۰۷۳	۰/۷۳۶	Z_{11}	
۶۹/۷۵۳	۰	۱	۱۶۶/۴۵۱	۰/۳۲۹	۴/۲۴۵	Z_{12}	
۰/۸۱۶	۰/۴۰۷	۱	۰/۶۸۷	۰/۲۴۵	۰/۲۰۳	Z_{13}	
۱/۱۲۰	۰/۰۹۴	۱	۲/۸۰۶	۰/۰۶۸	۰/۱۱۴	Z_2	
۱/۱۹۰	۰	۱	۳۴/۵۱۹	۰/۰۳۰	۰/۱۷۴	Z_3	
۰/۸۳۶	۰/۱۶۲	۱	۱/۹۵۹	۰/۱۲۸	۰/۱۷۹	Z_4	
۱/۰۰۹	۰/۵۹۷	۱	۰/۲۸۰	۰/۰۱۷	۰/۰۰۹	Z_5	
	۰	۳	۲۵۶/۳۶۸			Z_1	Step 2
۲/۰۹۰	۰	۱	۱۰۲/۸۹۷	۰/۰۷۳	۰/۷۳۷	Z_{11}	
۷۴/۱۹۵	۰	۱	۱۹۲/۱۶۰	۰/۳۰۷	۴/۳۰۷	Z_{12}	
۰/۸۱۴	۰/۴۰۰	۱	۰/۷۰۷	۰/۲۴۵	۰/۲۰۶	Z_{13}	
۱/۱۱۸	۰/۰۹۹	۱	۲/۷۲۶	۰/۰۶۸	۰/۱۱۲	Z_2	
۱/۱۸۹	۰	۱	۳۴/۴۱۷	۰/۰۳۰	۰/۱۷۳	Z_3	
۰/۸۳۸	۰/۱۶۸	۱	۱/۹۰۴	۰/۱۲۸	۰/۱۷۶	Z_4	
	۰	۳	۲۵۶/۴۶۹			Z_1	Step 3
۲/۰۸۵	۰	۱	۱۰۲/۳۵۳	۰/۰۷۳	۰/۷۳۵	Z_{11}	
۷۴/۷۷۶	۰	۱	۱۹۷/۰۰۲	۰/۳۰۷	۴/۳۱۵	Z_{12}	
۰/۸۱۷	۰/۴۰۹	۱	۰/۶۸۳	۰/۲۴۵	۰/۲۰۲	Z_{13}	
۱/۱۱۵	۰/۱۰۸	۱	۲/۵۸۹	۰/۰۶۸	۰/۱۰۹	Z_2	
۱/۱۸۰	۰	۱	۳۲/۳۵۹	۰/۰۲۹	۰/۱۶۶	Z_3	

ادامه جدول ۶-۲۹

	.	۳	۲۵۴/۷۶۳			Z_1	Step 4
۲/۰۶۱	.	۱	۱۰۰/۳۲۹	۰/۰۷۲	۰/۷۲۳	Z_{11}	
۷۳/۷۵۶	.	۱	۱۹۶/۱۸۲	۰/۳۰۷	۴/۳۰۱	Z_{12}	
۰/۸۱۳	۰/۳۹۹	۱	۰/۷۲۱	۰/۲۴۵	۰/۲۰۶	Z_{13}	
۱/۱۹۷	.	۱	۴۱/۸۲۵	۰/۰۲۸	۰/۱۷۹	Z_3	
متغیرهای حذف شده از رابطه در هر مرحله							
Sig.		D.f.		Score			
۰/۵۹۷		۱		۰/۲۸۰		Z_5	Step 2
۰/۱۶۸		۱		۱/۹۰۳		Z_4	Step 3
۰/۶۳۵		۱		۰/۲۲۵		Z_5	
۰/۱۰۷		۱		۲/۵۹۱		Z_2	Step 4
۰/۱۸۴		۱		۱/۷۶۷		Z_4	
۰/۶۹۰		۱		۰/۱۵۹		Z_5	
a. Residual Chi Square = 0.280 with 1 D.f. Sig. = 0.597							
b. Residual Chi Square = 2.186 with 2 D.f. Sig. = 0.335							
b. Residual Chi Square = 4.782 with 2 D.f. Sig. = 0.188							

نتایج تحلیل در جدول ۶-۳۰ برای داده‌های لودر نشان داد که چهار فاکتور ریسک Z_1, Z_3, Z_4 و Z_6 در مرحله سوم و در سطح معناداری ۱۰ درصد مؤثرترین هستند. مطابق رگرسیون کاکس نخست تابع نرخ مخاطره واقعی $(\lambda(t, z))$ و قابلیت اطمینان $(R(t, z))$ لاستیک تراک و لودر بر اساس تأثیر شرایط محیطی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\lambda_{DT.}(t, z) = \lambda_0(t) \exp(z_{11}\alpha_1 + z_{12}\alpha_{12} + z_{13}\alpha_{13} + z_3\alpha_3) \quad (۴۲-۶)$$

$$\lambda_{Lo.}(t, z) = \lambda_0(t) \exp(z_{11}\alpha_1 + z_{12}\alpha_{12} + z_{13}\alpha_{13} + z_3\alpha_3 + z_4\alpha_4 + z_6\alpha_6) \quad (۴۳-۶)$$

$$R_{DT.}(t, z) = (R_0(t))^{exp(z_{11}\alpha_1 + z_{12}\alpha_{12} + z_{13}\alpha_{13} + z_3\alpha_3)} \quad (۴۴-۶)$$

$$R_{Lo.}(t, z) = (R_0(t))^{exp(z_{11}\alpha_1 + z_{12}\alpha_{12} + z_{13}\alpha_{13} + z_3\alpha_3 + z_4\alpha_4 + z_6\alpha_6)} \quad (۴۵-۶)$$

جدول ۶-۳- تخمین مقادیر فاکتورهای ریسک لاستیک لودر با استفاده از SPSS

متغیرهای موجود در رابطه							
Exp(α)	Sig.(p-value)	D.f.	Wald	SE	α		
	۰/۰۴۳	۳	۸/۱۶۸			Z_1	Step 1
۲/۶۲۱	۰/۰۰۷	۱	۷/۲۲۸	۰/۳۵۸	۰/۹۶۳	Z_{11}	
۱/۶۰۴	۱/۱۰۱	۱	۲/۶۸۴	۰/۲۸۸	۰/۴۷۳	Z_{12}	
۱/۳۳۸	۰/۲۶۵	۱	۱/۲۴۰	۰/۲۶۱	۰/۲۹۱	Z_{13}	
۰/۷۹۳	۰/۲۴۱	۱	۱/۳۷۶	۰/۱۹۸	-۰/۲۳۲	Z_2	
۰/۲۴۰	.	۱	۳۶/۷۳۳	۰/۲۳۵	-۱/۴۲۶	Z_3	
۱/۴۴۵	۰/۰۰۱	۱	۱۱/۰۱۴	۰/۱۱۱	۰/۳۶۸	Z_4	
۰/۴۹۵	۰/۳۶۸	۱	۰/۸۱۱	۰/۷۸۰	-۰/۷۰۳	Z_5	
۱/۱۹۶	۰/۰۱۶	۱	۵/۸۳۲	۰/۰۷۴	۰/۱۹۷	Z_6	
	۰/۰۳۵	۳	۸/۶۳۵			Z_1	
۱/۷۱۹	۰/۰۰۵	۱	۷/۸۷۸	۰/۳۵۶	۱	Z_{11}	
۱/۶۱۱	۰/۰۹۷	۱	۲/۷۶۰	۰/۲۸۷	۰/۴۷۷	Z_{12}	
۱/۳۶۷	۰/۲۲۹	۱	۱/۴۴۶	۰/۲۶۰	۰/۳۱۳	Z_{13}	
۰/۸۲۲	۰/۳۰۹	۱	۱/۰۳۵	۰/۱۹۳	-۰/۱۹۷	Z_2	
۰/۲۳۶	.	۱	۳۷/۹۵۶	۰/۲۳۵	-۱/۴۴۶	Z_3	
۱/۴۰۰	۰/۰۱۱	۱	۱۰/۱۳۳	۰/۱۰۶	۰/۳۳۶	Z_4	
۱/۱۹۸	۰/۰۱۷	۱	۵/۷۲۰	۰/۰۷۵	۰/۱۸۰	Z_6	
	۰/۰۲۱	۳	۹/۶۸۳			Z_1	Step 3
۲/۹۰۶	۰/۰۰۲	۱	۹/۲۳۰	۰/۳۵۱	۱/۰۶۷	Z_{11}	
۱/۵۷۶	۰/۱۱۲	۱	۲/۵۲۵	۰/۲۸۶	۰/۴۵۵	Z_{12}	
۱/۳۹۷	۰/۱۹۷	۱	۱/۶۶۶	۰/۲۵۹	۰/۳۳۴	Z_{13}	
۰/۲۲۱	.	۱	۴۴/۷۹۲	۰/۲۲۶	-۱/۵۱۱	Z_3	
۱/۳۹۰	۰/۰۰۲	۱	۹/۸۰۷	۰/۱۰۵	۰/۳۲۹	Z_4	
۱/۱۹۲	۰/۰۲۰	۱	۵/۴۰۶	۰/۰۷۶	۰/۱۷۶	Z_6	

ادامه جدول ۳۰-۶

متغیرهای حذف شده از رابطه				
Sig.	D.f.	Score		
۰/۳۶۹	۱	۰/۸۰۸	Z ₅	Step 2
۰/۳۰۹	۱	۱/۰۳۷	Z ₂	Step 3
۰/۵۰۴	۱	۰/۴۴۶	Z ₅	
a. Residual Chi Square = .808 with 1 D.f. Sig. = .369				
b. Residual Chi Square = 1.835 with 2 D.f. Sig. = .399				

روابط فوق بر اساس نتایج حاصله در جدول ۳۰-۶ به صورت زیر خواهد بود:

$$\lambda_{DT}(t, z) = \lambda_0(t) \exp(0.723z_{11} + 4.301z_{12} - 0.206z_{13} + 0.179z_3) \quad (۴۶-۶)$$

$$\lambda_{Lo}(t, z) = \lambda_0(t) \exp(1.067z_{11} + 0.455z_{12} + 0.334z_{13} - 1.511z_3 + 0.329z_4 + 0.176z_6) \quad (۴۷-۶)$$

$$R_{DT}(t, z) = (R_0(t)) \exp(0.723z_{11} + 4.301z_{12} - 0.206z_{13} + 0.179z_3) \quad (۴۸-۶)$$

$$R_{Lo}(t, z) = (R_0(t)) \exp(1.067z_{11} + 0.455z_{12} + 0.334z_{13} - 1.511z_3 + 0.329z_4 + 0.176z_6) \quad (۴۹-۶)$$

مطابق الگوریتم ارائه شده در شکل ۶-۲۹ باید سراغ آزمون فرض متناسب بودن رفت تا مشخص کرد آیا در بین فاکتورهای ریسک وابستگی به زمان وجود دارد یا خیر. در جدول ۶-۳۱ و جدول ۶-۳۲ مقدار متوسط فاکتورهای ریسک و p-value (P(PH)) مربوطه برای آزمون تحلیلی داده‌های لاستیک لودر و تراک مشاهده می‌شود.

جدول ۶-۳۱- نتایج آزمون تحلیلی ارزیابی فرض متناسب بودن برای داده‌های لودر

P(PH)	Coeff. (Pearson Correlation)	مقادیر متوسط	فاکتورهای ریسک
۰/۴۴۲	۰/۰۶۶	۰/۱۱۶	Z ₁₁
۰/۰۶۵	-۰/۱۵۸	۰/۲۶۸	Z ₁₂
۰/۴۴۷	۰/۰۶۱	۰/۴۶۴	Z ₁₃
۰/۶۸۹	۰/۰۳۴	۰/۶۱۶	Z ₃
۰/۰۹۲	-۰/۱۴۴	۱/۶۵۲	Z ₄
۰/۶۰۶	۰/۰۴۴	۶/۶۷۶	Z ₆
Correlation is significant at the 0.01 level			

در مورد داده‌های لاستیک لودر (جدول ۶-۳۱) مقادیر بالای p-value برای همه فاکتورهای ریسک نشان دهنده برقراری فرض متناسب بودن برای آن‌ها است. لذا برای این داده‌ها از مدل PHM استفاده می‌شود، بنابر این تابع نرخ مخاطره واقعی $(\lambda(t, Z))$ و قابلیت اطمینان $(R(t, Z))$ لاستیک لودر به همان شکل روابط (۶-۴۷) و (۶-۴۹) خواهد بود.

در جدول ۶-۳۲ مقادیر p برای فاکتورهای ریسک Z_{12} و Z_{13} بسیار بالا بوده که نشان‌دهنده برقراری فرض متناسب بودن برای این دو است. برای دو فاکتور Z_{11} و Z_3 با p-value ۰ در سطح معناداری ۰/۰۱ این فرض رد می‌شود پس دو فاکتور ریسک وابسته به زمان بوده و برای کنترل آن‌ها باید سراغ مدل SCRM رفت. در نخستین گام ۱۲ لایه بر اساس این فاکتور تعریف می‌شود که در جدول ۶-۳۳ کدهای مربوطه به لایه‌های جدید تعریف شده است. قابل ذکر است که باوجود ۱۲ لایه هیچ‌یک از آن‌ها به خاطر تعدد داده‌های موجود و گسترده بودن بازه تحلیل نازک نشد.

جدول ۶-۳۲- نتایج آزمون تحلیلی ارزیابی فرض متناسب بودن برای داده‌های تراک

P(PH)	Coeff. (Pearson Correlation)	مقادیر متوسط	فاکتورهای ریسک
۰	-۰/۱۹۶	۰/۶۷۶	Z_{11}
۰/۹۴۸	۰/۰۰۲	۰/۰۱۷	Z_{12}
۰/۷۹۴	-۰/۰۰۸	۰/۰۱۷	Z_{13}
۰	-۰/۱۸۷	۲/۵۸۵	Z_3
Correlation is significant at the 0.01 level			

جدول ۶-۳۳- کدگذاری لایه‌بندی انجام گرفته بر اساس Z_{11} و Z_3 برای لاستیک تراک

مدل تراک (z_1)			
B,C,D	A		
۲	۱	۱	لاستیک (z_3)
۴	۳	۲	
۶	۵	۳	
۸	۷	۴	
۱۰	۹	۵	
۱۲	۱۱	۶	

برای داده‌های تراک پس از لایه‌بندی دو فاکتور وابسته به زمان از فاکتورهای ریسک حذف شده و تحلیل‌ها مجدداً برای بقیه فاکتورهای ریسک انجام می‌گیرد که نتایج در جدول ۶-۳۴ مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که فاکتور ریسک محور، بارندگی و دما از سطح معناداری بالایی برخوردار می‌باشند.

جدول ۶-۳۴- تخمین ضرایب فاکتورهای ریسک مؤثر پس از لایه‌بندی داده‌های تراک

متغیرهای موجود در رابطه						
Exp(α)	Sig.(p-value)	d.f.	Wald	SE	α	
۱/۲۱۷	۰/۰۰۵	۱	۷/۸۷۶	۰/۰۷۰	۰/۱۹۶	Z_2
۱/۲۴۳	۰/۱۰۰	۱	۲/۷۰۶	۰/۱۳۲	۰/۲۱۷	Z_4
۱/۰۳۱	۰/۰۴۶	۱	۳/۹۸۶	۰/۰۱۶	۰/۰۳۱	Z_5

بنابر این تابع نرخ مخاطره واقعی ($\lambda(t, z)$) و قابلیت اطمینان ($R(t, z)$) لاستیک تراک پس از لایه‌بندی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\lambda_{SDT}(t, z) = \lambda_{0s}(t) \exp(0.196z_2 + 0.217z_4 + 0.031z_5) \quad (۵۰-۶)$$

$$R_{SDT}(t, z) = (R_{0s}(t))^{\exp(0.196z_2 + 0.217z_4 + 0.031z_5)} \quad (۵۱-۶)$$

تأثیر فاکتورهای ریسک وابسته به زمان Z_{11} و Z_3 نیز در توابع اساسی نرخ مخاطره یا قابلیت اطمینان نمود پیدا خواهد کرد. در روابط (۶-۵۰) مقدار $\text{Exp}(\alpha)$ نرخ مخاطره است. این نرخ برای فاکتورهای ریسک طبقه‌بندی شده نشان دهنده تغییرات ایجاد شده در ریسک وقوع خرابی به هنگام تغییر در طبقه آن فاکتور بوده و برای فاکتورهای ریسک پیوسته نیز مقدار تغییرات در نرخ مخاطره به ازای واحد تغییرات در فاکتور ریسک را نشان می‌دهد. اگر مقدار $\text{Exp}(\alpha)$ کمتر از ۱ باشد تأثیرات فاکتور مربوطه در راستای کاهش نرخ مخاطره است. مقدار ۱ حاکی از تأثیرات ناچیز فاکتور مربوطه را به دنبال دارد. در این رابطه تأثیرات فاکتورهای Z_2 و Z_5 کمتر از فاکتور ریسک Z_4 است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که نرخ مخاطره لاستیک در محور عقب $1/217$ ($\exp 1/0.67$) برابر بزرگ‌تر از محور جلو است. نتایج آزمون‌های روند برای یک‌لایه PHM لودر و لایه‌های مختلف SCRМ تراک در جدول ۶-۳۵ و جدول ۶-۳۶ مشاهده می‌شود. فرض صفر مبنی بر عدم وجود روند در داده‌های لودر و در لایه‌های ۶ و ۱۰ از داده‌های تراک در سطح معناداری ۵ درصد رد شد.

جدول ۶-۳۵- نتایج آزمون‌های تحلیلی روند برای داده‌های لودر

Anderson-Darling	Laplace's	MIL-Hdbk-189	
۶/۹۹	۲/۶۲	۲۲۶/۰۴	آماره آزمون
۰	۰/۰۰۹	۰/۰۳۱	p-value

جدول ۶-۳۶- نتایج آزمون‌های تحلیلی روند برای داده‌های تراک

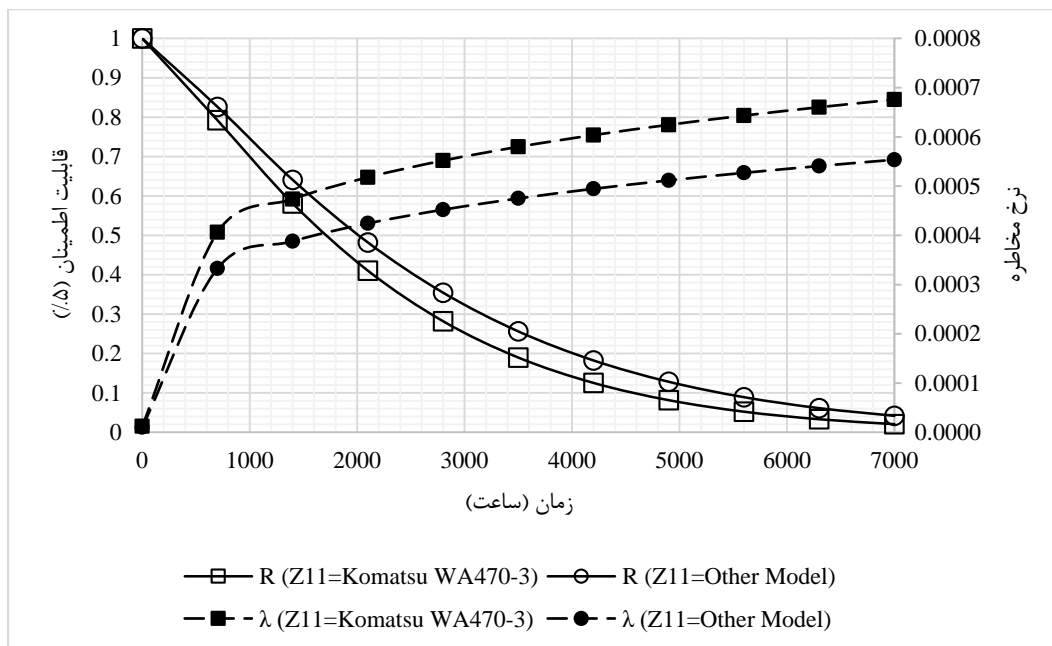
Anderson-Darling	Laplace's	MIL-Hdbk-189	توضیح	لایه
۰/۱۷	۰/۴۲	۲۱۷/۳۷	آماره آزمون	۱
۰/۹۹۷	۰/۶۷۵	۰/۷۰۷	p-value	
۰/۸۸	۱/۱۹	۱۰۱/۹۲	آماره آزمون	۲
۰/۴۲۵	۰/۲۳۴	۰/۲۹۲	p-value	
۰/۱۶	۰/۳۲	۵۴۹/۳۶	آماره آزمون	۳
۰/۹۹۸	۰/۷۴۵	۰/۵۴۹	p-value	
۰/۷۲	۰/۷۱	۳۹۸/۹۱	آماره آزمون	۴
۰/۸۳۱	۰/۴۷۸	۰/۶۲۱	p-value	
۰/۲۱	۰/۴۴	۹۲/۶۴	آماره آزمون	۵
۰/۹۸۷	۰/۶۵۹	۰/۹۴۴	p-value	
۷/۸۶	۳/۳۷	۱۳/۴۹	آماره آزمون	۶
۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	p-value	
۰/۸۶	۱/۱۷	۴۲۰/۷۵	آماره آزمون	۷
۰/۴۴۲	۰/۲۴۱	۰/۱۳۱	p-value	
۰/۲۸	۰/۵۵	۲۰/۵۲	آماره آزمون	۸
۰/۹۴۸	۰/۵۸۳	۰/۴۶۸	p-value	
۰/۴۱	-۰/۱	۲۰/۲۲	آماره آزمون	۹
۰/۸۳۹	۰/۹۲۴	۰/۶۳۱	p-value	
۲/۰۸	۱/۸۹	۲۷/۵۳	آماره آزمون	۱۰
۰/۰۸۳	۰/۰۵۹	۰/۰۴۹	p-value	
۰/۴۱	۰/۲۵	۱۷/۲	آماره آزمون	۱۱
۰/۸۳۴	۰/۸۰۲	۰/۴۹۶	p-value	
۳/۹۲	۲/۳۱	۱۹/۰۴	آماره آزمون	۱۲
۰/۰۱	۰/۰۲۱	۰/۰۶۸	p-value	

لذا فرض توزیع یکسان داده برای این لایه‌ها برقرار نیست. فرض خودهمبستگی برای داده‌ها نیز به صورت ترسیمی (i-امین خرابی در برابر i-1-امین خرابی) انجام گرفته و عدم وجود هرگونه خودهمبستگی برای داده‌ها اثبات شد. بنابر این فرض iid برای داده‌های لودر و لایه‌های ۶ و ۱۰ در تراک برقرار نیست و باید از مدل PLP برای توصیف رفتار خرابی در تابع اساسی این لایه‌ها استفاده شود. مقدار β_0 و η_0 برای داده‌های لودر به ترتیب عبارت‌اند از $1/221$ و 0.15900 ، برای این شکل نهایی تابع نرخ مخاطره واقعی $(\lambda(t, z))$ و قابلیت اطمینان $(R(t, z))$ لاستیک لودر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\lambda_{sLo}(t, z) = \left[\frac{1.221}{15900} \left(\frac{t}{15900} \right)^{0.221} \right] \times [\exp(1.067z_{11} + 0.455z_{12} + 0.334z_{13} - 1.511z_3 + 0.329z_4 + 0.176z_6)] \quad (52-6)$$

$$R_{sLo}(t, z) = \left(\exp\left(-\frac{t}{15900}\right) \right)^{1.221} \exp(1.067z_{11} + 0.455z_{12} + 0.334z_{13} - 1.511z_3 + 0.329z_4 + 0.176z_6) \quad (53-6)$$

طبق روابط فوق برای بهبود قابلیت اطمینان و پیشگیری از وقوع خرابی‌ها باید فاکتورهای ریسک Z_1, Z_3, Z_4, Z_6 مورد توجه قرار گیرند. قابلیت اطمینان و نرخ مخاطره لودر کوماتسو ۴۷۰ خط ۳ در مقایسه با سایر مدل‌ها به ازای مقدار متوسط سایر فاکتورها محاسبه شده و در شکل ۶-۳۰ رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که لاستیک‌ها در این دستگاه سریع‌تر از سایر مدل‌ها فرسوده می‌شوند. همچنین قابلیت اطمینان آن‌ها بعد از ۲۰۰۰ ساعت کارکرد به ۴۲ درصد افت کرده و بعد از ۷۰۰۰ ساعت کارکرد عملاً صفر خواهد شد. از سوی دیگر احتمال کارکرد لاستیک برای ۱۰۰۰ ساعت در لودر ۴۷۰-۳ و سایر لودرها ۷۰ و ۷۵ درصد است.



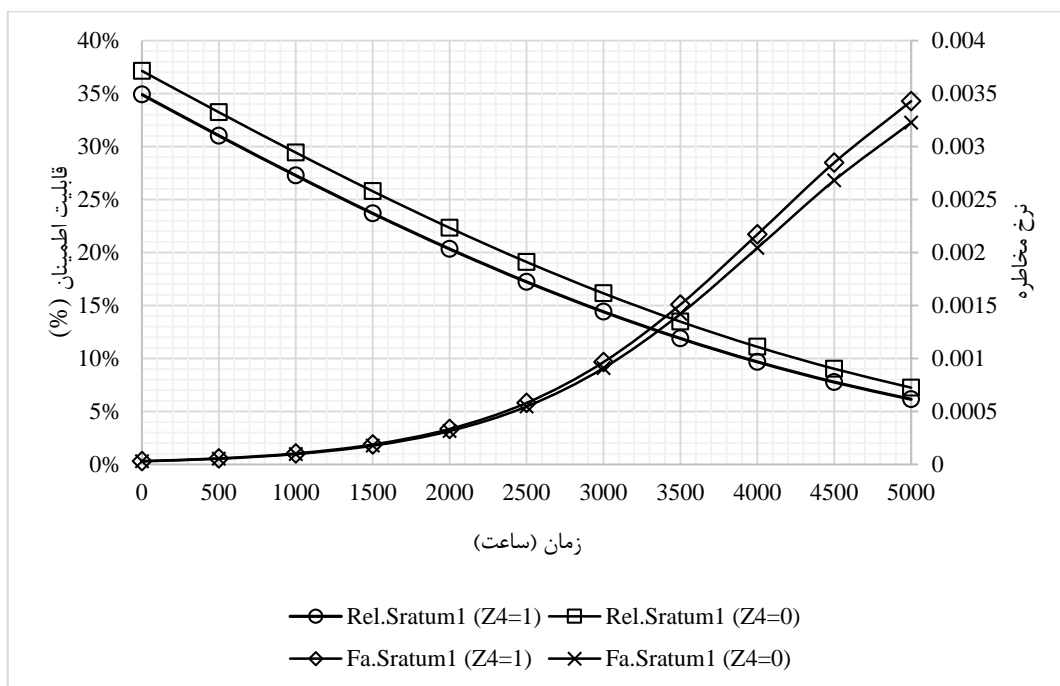
شکل ۶-۳۰- قابلیت اطمینان و نرخ مخاطره لاستیک‌های لودر کوماتسو ۴۷۰-۳ در مقایسه با سایر مدل‌ها

بهترین توزیع برای لایه‌های تراک نیز در جدول ۶-۳۰ مشاهده می‌شود.

جدول ۶-۳۷- بهترین توزیع یا مدل برازش شده برای توابع اساسی هر لایه از داده‌های تراک

پارامترها	بهترین برازش	لایه	پارامترها	بهترین برازش	لایه
Mu: ۴۱۰۶/۱۵۳, Sigma: ۷۳۷/۵۷۱	Logistic-2P	۷	Mu: ۴۰۳۶/۳۱۵, Sigma: ۸۱۶/۵۳۹	Logistic-2P	۱
Mu: ۵۲۵۵/۹۶۰, Sigma: ۷۷۸/۶۳۸	Logistic-2P	۸	Mu: ۵۰۴۶/۲۲۱, Sigma: ۹۰۲/۰۹۴	Logistic-2P	۲
Beta: ۲/۵۲۵, Eta: ۳۹۲۶/۹۷۹,	Weibull-3P	۹	Mu: ۵۵۲۴/۳۰۰, Sigma: ۸۰۰/۳۶۴	Logistic-2P	۳
Beta: ۱/۶۷۱, Eta: ۱۱۵۰۰	PLP	۱۰	Mu: ۶۸۶۶/۸۴۱, Sigma: ۷۷۲/۲۲۵	Logistic-2P	۴
Beta: ۲/۳۹۵, Eta: ۶۷۰۹/۸۱۵,	Weibull-3P	۱۱	Mu: ۲۸۶۱/۴۷۲, Sigma: ۶۶۴/۷۷۳	Logistic-2P	۵
Beta: ۰/۹۴۲, Eta: ۳۶۳۳/۲۵۷,	Weibull-3P	۱۲	Beta: ۲/۶۶۹, Eta: ۱۷۴۰۰	PLP	۶

قابلیت اطمینان و نرخ مخاطره لاستیک‌های تراک برای محورهای جلو و عقب برای لایه ۱ محاسبه شده و در شکل ۶-۳۱ ترسیم شده است.



شکل ۶-۳۱- مقایسه نرخ مخاطره و قابلیت اطمینان برای لاستیک‌ها در محور عقب و جلو از تراک

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان لاستیک‌ها در محور جلو بیشتر از محور عقب است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان برای محور عقب پس از ۵۰۰ ساعت کارکرد تقریباً به ۳۰ درصد افت کرده است. همچنین تنها ۲۰ و ۱۸ درصد احتمال وجود دارد که لاستیک‌ها در محور جلو و عقب برای ۲۵۰۰ ساعت قادر به کار کردن باشند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شرایط محیطی تأثیر بسزایی در کارکرد سیستم خواهد داشت که حتماً باید در فاز طراحی و برنامه‌ریزی مورد توجه قرار گیرد. نتایج این تحلیل‌ها قادر به یاری مهندسین و مدیران در فرایند تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی تولید، تعیین استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات، عقد قراردادهای مختلف، تخمین قطعات یدکی و ... خواهد بود.

ج- تخمین لاستیک مورد نیاز

نتایج تحلیل‌های انجام گرفته برای داده‌های تراک و لودر نشان داد که بهترین برازش برای داده‌ها از سه نوع تابع ویبول دو پارامتری یا PLP، ویبول سه پارامتری و لجستیک تشکیل یافته است. لذا طبق رابطه (۲۸-۲) برای تخمین قطعات یدکی، متوسط زمان تا وقوع خرابی (\bar{T}) و انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌ها ($\sigma(T)$) برای هر لایه باید محاسبه شود. مقادیر این دو پارامتر را می‌توان با استفاده از روابط زیر تعیین نمود:

الف) تابع ویبول دو پارامتری و مدل PLP

ویبول دو پارامتری و PLP از پرکاربردترین و انعطاف‌پذیرترین مدل‌های آماری در مباحث قابلیت اطمینان بوده و از لحاظ ساختاری کاملاً مشابه هستند که مدل ویبول برای داده‌های بدون روند و مدل PLP برای داده‌های رونددار مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ghodrati and Kumar, 2005b; Hoseinie et al., 2012a; Kumar et al., 1992). شکل مدل SCRM با این دو تابع به صورت زیر خواهد بود (Ghodrati, 2005; Ghodrati et al., 2010):

$$\lambda_s(t, z) = \left[\frac{\beta_{0s}}{\eta_{0s}} \left(\frac{t}{\eta_{0s}} \right)^{\beta_{0s}-1} \right] \times \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right] = \left[\frac{\beta_{0s} \times t^{\beta_{0s}-1}}{\eta_{0s}^{\beta_{0s}}} \right] \times \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right] \quad (۵۴-۶)$$

$$\lambda_s(t, z) = \frac{\beta_{0s} \times t^{\beta_{0s}-1}}{\left[\eta_{0s} \times \exp \left(-\frac{1}{\beta_{0s}} \sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right]^{\beta_{0s}}} \quad (۵۵-۶)$$

در این رابطه η_{0s} و β_{0s} پارامترهای شکل و مقیاس تابع اساسی بوده و برای هر لایه در SCRM تعریف می‌شوند (مقدار s برای مدل PHM فقط یک خواهد بود). این روابط را می‌توان با پارامترهای شکل (β_s) و مقیاس (η_s) زیر به ازای وارد کردن تأثیر شرایط محیطی تعریف کرد:

$$\beta_s = \beta_{0s}$$

$$\eta_s = \eta_{0s} \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right]^{-\frac{1}{\beta_{0s}}} \quad (56-6)$$

می‌توان مشاهده کرد که فاکتورهای ریسک در دو مدل ویبول دو پارامتری و PLP تنها پارامتر مقیاس را تغییر داده و پارامتر شکل آن بدون تغییر باقی خواهد ماند (Ghodrati et al., 2010). در نتیجه مقدار $\sigma_s(T)$ و \bar{T}_s برای دو مدل بر اساس پارامترهای رابطه (56-6) به صورت زیر است (Ghodrati, 2005; Ghodrati et al., 2010; Ghodrati and Kumar, 2005b):

$$\bar{T}_s = \eta_s \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta_s} \right) \quad (57-6)$$

$$\sigma_s(T) = \eta_s \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta_s} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta_s} \right)} \quad (58-6)$$

ب) تابع ویبول سه پارامتری

نرخ مخاطره در مدل SCRM با در نظرگیری شرایط محیطی برای تابع ویبول سه پارامتری به صورت زیر خواهد بود:

$$\lambda_s(t, z) = \left[\frac{\beta_{0s} (t - \gamma_{0s})^{\beta_{0s}-1}}{\eta_{0s}} \right] \times \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right] = \left[\frac{\beta_{0s} \times (t - \gamma_{0s})^{\beta_{0s}-1}}{\eta_{0s}^{\beta_{0s}}} \right] \times \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right] \quad (59-6)$$

$$\lambda_s(t, z) = \frac{\beta_{0s} \times (t - \gamma_{0s})^{\beta_{0s}-1}}{\left[\eta_{0s} \times \exp \left(-\frac{1}{\beta_{0s}} \sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right]^{\beta_{0s}}} \quad (60-6)$$

در این رابطه β_{0s} ، η_{0s} و γ_{0s} پارامترهای شکل، مقیاس و محل تابع اساسی بوده و برای هر لایه در SCRM تعریف می‌شوند (مقدار s برای مدل PHM فقط یک خواهد بود). این روابط را می‌توان با پارامترهای شکل (β_s)، مقیاس (η_s) و محل (γ_s) زیر به ازای وارد کردن تأثیر شرایط محیطی تعریف کرد:

$$\beta_s = \beta_{0s}$$

$$\gamma_s = \gamma_{0s}$$

$$\eta_s = \eta_{0s} \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right]^{-\frac{1}{\beta_{0s}}} \quad (61-6)$$

می‌توان مشاهده نمود که فاکتورهای ریسک در مدل ویبول سه پارامتری تنها پارامتر مقیاس را تغییر داده و پارامتر شکل و محل آن بدون تغییر باقی خواهد ماند. در نتیجه مقدار \bar{T}_s و $\sigma_s(T)$ برای این مدل بر اساس پارامترهای رابطه (۶-۶۱) به صورت زیر است:

$$\bar{T}_s = \gamma_s + \eta_s \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_s}\right) \quad (۶۲-۶)$$

$$\sigma_s(T) = \eta_s \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta_s}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta_s}\right)} \quad (۶۳-۶)$$

ج) تابع لجستیک دو پارامتری

این تابع بیشتر برای تحلیل داده‌های انبارداری به کار گرفته می‌شود. ترکیب این مدل با فاکتورهای ریسک در مدل SCRMM به صورت رابطه زیر است (Krishnamoorthy, 2015; O'Connor, 2011):

$$\lambda_s(t, z) = \frac{\exp(y_{0s})}{S_{0s}(1 + \exp(y_{0s}))} \left[\exp\left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \right] \quad (۶۴-۶)$$

که $y_{0s} = \frac{t - \mu_{0s}}{S_{0s}}$ بوده، μ_{0s} و S_{0s} پارامترهای محل و مقیاس نرخ مخاطره اساسی هستند. با جایگذاری y_{0s} در (۶۴-۶) به دست می‌آید:

$$\lambda_s(t, z) = \frac{\exp\left(\frac{t - \mu_{0s}}{S_{0s}}\right)}{\sigma_{0s} \left(1 + \exp\left(\frac{t - \mu_{0s}}{S_{0s}}\right)\right)} \left[\exp\left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \right] \quad (۶۵-۶)$$

$$\lambda_s(t, z) = \left(\frac{1}{S_{0s}} - \frac{1}{S_{0s} \left(1 + \exp\left(\frac{t - \mu_{0s}}{S_{0s}}\right)\right)} \right) \left[\exp\left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \right] \quad (۶۶-۶)$$

$$\lambda_s(t, z) = \left(\frac{\exp(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i)}{S_{0s}} - \frac{\exp(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i)}{S_{0s} \left(1 + \exp\left(\frac{t - \mu_{0s}}{S_{0s}}\right)\right)} \right) \quad (۶۷-۶)$$

از این رابطه می‌توان تابع لجستیک دو پارامتری با پارامتر محل (μ_s) و مقیاس (S_s) زیر را به دست آورد:

$$S_s = S_{0s} \left(\exp\left(-\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \right) \quad (۶۸-۶)$$

$$\mu_s = \left(\mu_{0s} \times \exp\left(-\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \right) + t - \left(t \times \exp\left(-\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \right)$$

مشاهده می‌شود که فاکتورهای ریسک مؤثر بر هر دو پارامتر محل و مقیاس در تابع لجستیک خواهد بود. نتیجه مقدار \bar{T}_s و $\sigma_s(T)$ برای این مدل بر اساس پارامترهای رابطه (۶۸-۶) به صورت زیر است:

$$\bar{T}_s = \mu_s = \left(\mu_{0s} \times \exp\left(-\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \right) + t - \left(t \times \exp\left(-\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \right) \quad (۶۹-۶)$$

$$\sigma_s(T) = S_s \times \pi \times \frac{\sqrt{3}}{3} = S_{0s} \left(\exp\left(-\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right) \right) \times \pi \times \frac{\sqrt{3}}{3} \quad (۷۰-۶)$$

با استفاده از مقادیر \bar{T}_s و $\sigma_s(T)$ ارائه شده در هر یک از مدل‌ها می‌توان تعداد قطعات یدکی مورد نیاز در هر لایه را برای دو سال آینده و برای یک چشم انداز کوتاه پیش‌بینی کرد. در این بخش نخست داده‌های لاستیک لودر مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که در این داده‌ها فاکتور ریسک وابسته به زمان وجود ندارد لذا مدل PHM برای توصیف رفتار خرابی استفاده شده لذا بر اساس مقادیر مختلف از فاکتورهای ریسک می‌توان تعداد قطعات یدکی مورد نیاز در هر سناریو را تعریف کرد. برای این منظور ۱۲ سناریوی مختلف بر اساس دو فاکتور ریسک با تأثیر بیشینه در نرخ خرابی یعنی مدل لودر و برند لاستیک در جدول ۶-۳۸ برای سه سال کارکرد معدن تعریف شد. تخمین لاستیک برای لودر با صرف نظر از تأثیر شرایط محیطی معادل تقریباً ۳ (۳/۰۷) حلقه است. حال آنکه با وارد کردن تأثیر شرایط محیطی در قالب ۱۲ سناریو تأثیر فاکتورهای ریسک مشخص خواهد کرد. در جدول ۶-۳۹ تعداد لاستیک مورد نیاز لودر با احتمال کمبود ۵ درصد نشان داده شده است. محاسبات نشان می‌دهد که در همه ۱۲ سناریو تعداد لاستیک مورد نیاز بیشتر از ۳ حلقه است که این اختلاف در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی بسیار حائز اهمیت خواهد بود. پس مطابق شکل ۶-۳۰ و جدول ۶-۳۹ قابلیت اطمینان پایین‌تر یعنی احتمال وقوع خرابی بالاتر، تعمیرات بیشتر، زمان افت بیشتر و تعداد قطعات یدکی مورد نیاز بیشتر. تعداد لاستیک محاسبه شده برای سناریوی ۱ در مقایسه با سناریوهای ۴، ۷ و ۱۰ یا سناریوی ۲ در مقایسه با سناریوهای ۵، ۸ و ۱۱ یا سناریوی ۳ در مقایسه با سناریوهای ۶، ۹ و ۱۲ تصدیق بر این مطلب می‌باشند. طبق جدول ۶-۳۹ لودر کاترپیلار ۹۸۸ (سناریوهای ۷، ۸ و ۹) بهترین انتخاب از منظر تعداد لاستیک مورد نیاز بوده و لودر کوماتسو ۴۷۰-۳ (سناریوهای ۱، ۲ و ۳) پرهزینه‌ترین لودر از لحاظ مصرف لاستیک خواهد بود.

جدول ۶-۳۸- سناریوهای مختلف برای کارکرد لودر در طول سه سال

فاکتورهای ریسک						توضیح	بند لاستیک	مدل لودر	سناریو
Z_6^*	Z_4	Z_3^*	Z_{13}	Z_{12}	Z_{11}				
۶/۶۷۶	۱	۰/۶۱۶	۰	۰	۱	لودر کوماتسو WA470-3 با لاستیک برجیستون-	۱	A	۱
۶/۶۷۶	۲	۰/۶۱۶	۰	۰	۱	لودر کوماتسو WA470-3 با لاستیک برجیستون یا گودیر	۲	A	۲
۶/۶۷۶	۳	۰/۶۱۶	۰	۰	۱	لودر کوماتسو WA470-3 با سایر نماها	۳	A	۳
۶/۶۷۶	۱	۰/۶۱۶	۰	۱	۰	لودر کوماتسو WA600-3 با لاستیک برجیستون	۱	B	۴
۶/۶۷۶	۲	۰/۶۱۶	۰	۱	۰	لودر کوماتسو WA600-3 با لاستیک برجیستون یا گودیر	۲	B	۵
۶/۶۷۶	۳	۰/۶۱۶	۰	۱	۰	لودر کوماتسو WA600-3 با سایر نماها	۳	B	۶
۶/۶۷۶	۱	۰/۶۱۶	۱	۰	۰	لودر کاترپیلار 988B با لاستیک برجیستون-	۱	C	۷
۶/۶۷۶	۲	۰/۶۱۶	۱	۰	۰	لودر کاترپیلار 988B با لاستیک برجیستون یا گودیر	۲	C	۸
۶/۶۷۶	۳	۰/۶۱۶	۱	۰	۰	لودر کاترپیلار 988B با سایر نماها	۳	C	۹
۶/۶۷۶	۱	۰/۶۱۶	۰	۰	۰	لودر کوماتسو WA600-3 و کاترپیلار 988B با لاستیک برجیستون-	۱	D	۱۰
۶/۶۷۶	۲	۰/۶۱۶	۰	۰	۰	لودر کوماتسو WA600-3 و کاترپیلار 988B با لاستیک برجیستون یا گودیر	۲	D	۱۱
۶/۶۷۶	۳	۰/۶۱۶	۰	۰	۰	لودر کوماتسو WA600-3 و کاترپیلار 988B با سایر نماها	۳	D	۱۲

*: Z_3 and Z_6 = mean value of covariates

جدول ۶-۳۹- تعداد لاستیک مورد نیاز لودر در سناریوهای مختلف برای سه سال

N_t	ζ	$\sigma(T)$	\bar{T}	سناریو	N_t	ζ	$\sigma(T)$	\bar{T}	سناریو
۵/۵۲	۰/۸۲	۵۸۴۲/۱۹	۷۰۹۷/۲۵	۷	۹/۰۴	۰/۸۲	۳۲۰۶/۳۱	۳۸۹۵/۱۲	۱
۶/۸۷	۰/۸۲	۴۴۶۱/۶۷	۵۴۲۰/۱۷	۸	۱۱/۳۴	۰/۸۲	۲۴۴۸/۶۶	۲۹۷۴/۷۰	۲
۸/۵۹	۰/۸۲	۳۴۰۷/۳۸	۴۱۳۹/۳۸	۹	۱۴/۲۷	۰/۸۲	۱۸۷۰/۰۴	۲۲۷۱/۷۸	۳
۴/۴۳	۰/۸۲	۷۶۸۰/۶۱	۹۳۳۰/۶۲	۱۰	۵/۹۸	۰/۸۲	۵۲۹۲/۸۰	۶۴۲۹/۸۴	۴
۵/۵۰	۰/۸۲	۵۸۶۵/۶۸	۷۱۲۵/۷۹	۱۱	۷/۴۵	۰/۸۲	۴۰۴۲/۱۱	۴۹۱۰/۴۷	۵
۶/۸۵	۰/۸۲	۴۴۷۹/۶۲	۵۴۴۱/۹۶	۱۲	۹/۳۳	۰/۸۲	۳۰۸۶/۹۶	۳۷۵۰/۱۲	۶

البته باید توجه کرد که تفاوت آن‌چنانی بین لاستیک مورد نیاز برای لودر کوماتسوی ۶۰۰-۳ (سناریوهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲) و کاترپیلار ۹۸۸ وجود ندارد. همچنین در صورت به‌کارگیری لاستیک با برند برجیستون تعداد کمتری لاستیک مورد نیاز خواهد بود. نمانام‌های ترای‌آنگل، گودیر و سایر نمانام‌ها در رده‌های بعدی قرار دارند.

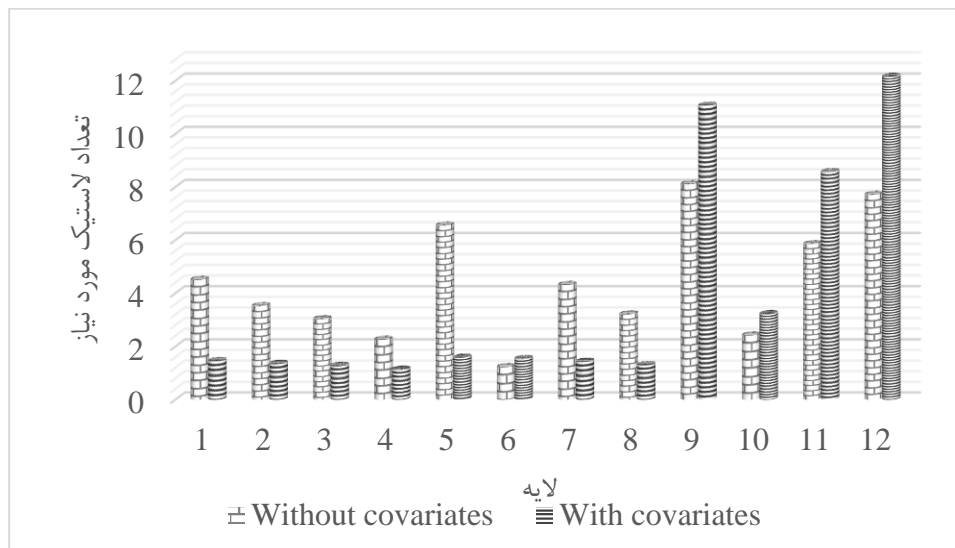
در رابطه با سیستم تراک نیز تعداد لاستیک مورد نیاز (N_{t0}) با صرف نظر و در نظرگیری تأثیر شرایط محیطی برای هر لایه محاسبه شده و در جدول ۶-۴۰ درج شده است. ستون آخر این جدول تعداد لاستیک‌های مورد نیاز برای لایه‌های مختلف به ازای مقادیر متوسط فاکتورهای ریسک ($z_2 = 0.643, z_4 = 1.039$ and $z_4 = 6.345$) در سطح احتمال کمبود ۵ درصد را نشان می‌دهد. اختلاف بین این دو حالت (N_{t1} و N_{t0}) نشان دهنده تأثیر اجتناب‌ناپذیر تأثیر شرایط محیطی در تخمین قطعات یدکی مورد نیاز است.

جدول ۶-۴۰- تعداد لاستیک مورد نیاز برای تراک در دو سال آینده

لايه	بدون در نظرگیری تأثیر شرایط محیطی				با در نظرگیری تأثیر شرایط محیطی			
	N_{t0}	ζ	$\sigma(T)$	\bar{T}	N_{t1}	ζ	$\sigma(T)$	\bar{T}
۱	۴/۵۱	۰/۳۶	۱۴۸۱/۰۴	۴۰۶۳/۳۲	۱/۴۵	۰/۰۹۶	۸۵۵/۶۴	۸۸۲۳/۴۰
۲	۳/۵۲	۰/۳۲	۱۶۳۶/۲۲	۵۰۴۶/۲۲	۱/۳۵	۰/۱	۹۴۵/۲۹	۹۳۹۱/۲۶
۳	۳/۰۳	۰/۲۶	۱۲۵۱/۷۰	۵۵۲۴/۳۰	۱/۲۷	۰/۰۸۷	۸۳۸/۶۹	۹۶۶۷/۴۶
۴	۲/۲۶	۰/۲۰	۱۴۰۰/۶۶	۶۸۶۶/۸۴	۱/۱۳	۰/۰۷۷	۸۰۹/۲۱	۱۰۴۴۳/۰۹
۵	۶/۵۵	۰/۴۲	۱۲۰۵/۷۶	۴۷۲۸۶۱	۱/۵۸	۰/۰۸۶	۶۹۶/۶۱	۸۱۲۹/۰۶
۶	۱/۲۳	۱۰/۴۰	۶۲۴۱/۴۳	۱۵۴۶۷/۶۲	۱/۵۳	۰/۴۰	۵۰۸۱/۸۶	۱۲۵۹۳/۹۶
۷	۴/۳۲	۰/۳۲	۱۳۳۷/۸۱	۴۱۰۶/۱۵	۱/۴۳	۰/۰۸۶	۷۷۲/۸۹	۸۸۴۸/۱۵
۸	۳/۲۱	۰/۲۷	۱۴۱۲/۲۹	۵۲۵۵/۹۶	۱/۳۰	۰/۰۸۷	۸۱۵/۹۳	۸۱۵/۹۳
۹	۸/۱۱	۰/۵۸	۱۴۷۷/۹۷	۲۵۲۷/۷۲	۱۱/۰۶	۰/۶۴	۱۱۸۹/۳۴	۱۸۴۷/۱۳
۱۰	۲/۴۲	۰/۶۱	۶۳۲۰/۰۳	۱۰۲۷۳/۶۱	۱/۲۲	۰/۶۱	۴۵۵۰/۸۴	۷۳۷۹/۶۸
۱۱	۵/۸۵	۰/۶۸	۲۶۴۵/۰۸	۳۹۱۱/۱۳	۸/۵۶	۰/۰۸۷	۲۱۰۳/۴۹	۲۶۹۳/۲۸
۱۲	۷/۷۱	۱/۰۶	۳۹۶۳/۱۹	۳۷۳۳/۸۱	۱۲/۱۵	۱/۰۶	۲۲۱۴/۱۳	۲۰۸۶/۴۰

مطابق این جدول و نتایج محاسبه شده در ستون آخر لایه ۴ (مدل تراک B، C، D و لاستیک با برند ۲) بهترین حالت از لحاظ اقتصادی به علت تعداد لاستیک مورد نیاز و لایه ۱۲ (مدل تراک B، C، D و لاستیک با برند ۶) پرهزینه‌ترین حالت است. همچنین در همه لایه‌ها به جزء لایه ۱۲ تراک مدل A (لایه‌های ۱،۳،۴،۷ و ۹) پرهزینه‌تر از دیگر مدل‌ها است (لایه ۲،۴،۶،۸ و ۱۰).

شکل ۶-۳۲ به مقایسه دو حالت تخمین لاستیک‌های مورد نیاز با و بدون فاکتورهای ریسک برای لایه‌های مختلف پرداخته است. در این شکل تعداد قطعات مورد نیاز در همه لایه‌ها با تابع نرخ مخاطره اساسی ویبول و PLP (لایه‌های ۱۱، ۱۰، ۹، ۶ و ۱۲) به هنگام وارد کردن تأثیرات شرایط محیطی (مقدار متوسط فاکتورهای ریسک) بیشتر از حالتی است که از این تأثیر صرف نظر می‌شود. اگرچه نتایج برای لایه‌ها با تابع نرخ مخاطره اساسی لجستیک (۷، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱ و ۸) برعکس است. این تفاوت در مدیریت قطعات یدکی و انبار قابل توجه خواهد بود.



شکل ۶-۳۲- تعداد لاستیک‌های مورد نیاز با و بدون فاکتورهای ریسک

د- مدیریت انبارداری لاستیک‌های مورد نیاز

برای داده‌های لاستیک لودر مقدار سفارش اقتصادی (EOQ) و نقطه سفارش مجدد (Rep) با توجه به نرخ تقاضای سالیانه در سناریوهای مختلف با فرض هزینه معادل هر لاستیک ۱۰۰۰۰ دلار، هزینه سفارش یا یک بسته ۱۴۵ دلار، هزینه نگهداری سالیانه ۱۰۰۰ دلار (۱۰ درصد یک لاستیک)، متوسط زمان تأخیر در این حالت ۱۰ روز و سطح اطمینان ۹۰ درصد با استفاده از روابط (۲-۱۷)، (۲-۱۹) و در جدول ۶-۴۱ درج شده است. سناریوی ۱ نشان می‌دهد که در صورت رسیدن سطح انبار به ۰/۹۹ حلقه لاستیک باید ۱/۰۴ حلقه لاستیک دیگر سفارش داده شود. برای داده‌های لودر با صرف نظر از تأثیرات شرایط محیطی مقدار EOQ و ReP برابر با ۰/۶۲ و ۰/۵ است.

جدول ۶-۴۱- مقدار سفارش اقتصادی و نقطه سفارش مجدد برای لودر

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
EOQ	۱/۰۴	۱/۱۵	۱/۲۹	۰/۸۵	۰/۹۵	۱/۰۵	۰/۸۲	۰/۹۱	۱/۰۱	۰/۷۴	۰/۸۲	۰/۹۱
ReP	۰/۹۹	۱/۱۴	۱/۳۱	۰/۷۷	۰/۸۸	۱/۰۱	۰/۷۳	۰/۸۴	۰/۹۶	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۸۴

تغییرات مختلف در سناریوهای مختلف نشان دهنده تأثیر شرایط محیطی در پیش‌بینی ما است. مقدار سفارش اقتصادی (EOQ) و نقطه سفارش مجدد (Rep) برای تراک با توجه به نرخ تقاضای سالیانه در لایه‌های مختلف با فرض هزینه معادل هر لاستیک ۱۰۴۰۰۰ دلار، هزینه سفارش یا یک بسته ۱۴۵ دلار، هزینه نگهداری سالیانه ۱۰۴۰۰ دلار (۱۰ درصد یک لاستیک)، متوسط زمان تأخیر در این حالت ۱۰ روز و سطح اطمینان ۹۰ درصد با استفاده از روابط (۱۷-۲) و (۱۹-۲) و در جدول ۶-۴۲ درج شده است.

جدول ۶-۴۲- مقدار سفارش اقتصادی و نقطه سفارش مجدد با و بدون در نظرگیری فاکتورهای ریسک برای تراک

لایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
با فاکتورهای ریسک	EOQ	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۵۶	۰/۳۰	۰/۴۹	۰/۵۸
	ReP	۱/۲۹	۱/۲۵	۱/۲۳	۱/۱۸	۱/۳۵	۱/۰۹	۱/۲۹	۱/۲۴	۳/۰۴	۲/۵۰	۲/۹۱
بدون فاکتورهای ریسک	EOQ	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۴۳	۰/۱۹	۰/۳۰	۰/۴۸	۰/۲۶	۰/۴۰	۰/۴۶
	ReP	۱/۹۷	۱/۷۵	۱/۶۷	۱/۴۸	۲/۳۸	۰/۹۸	۱/۹۶	۱/۷۱	۲/۵۶	۲/۰۴	۲/۱۴

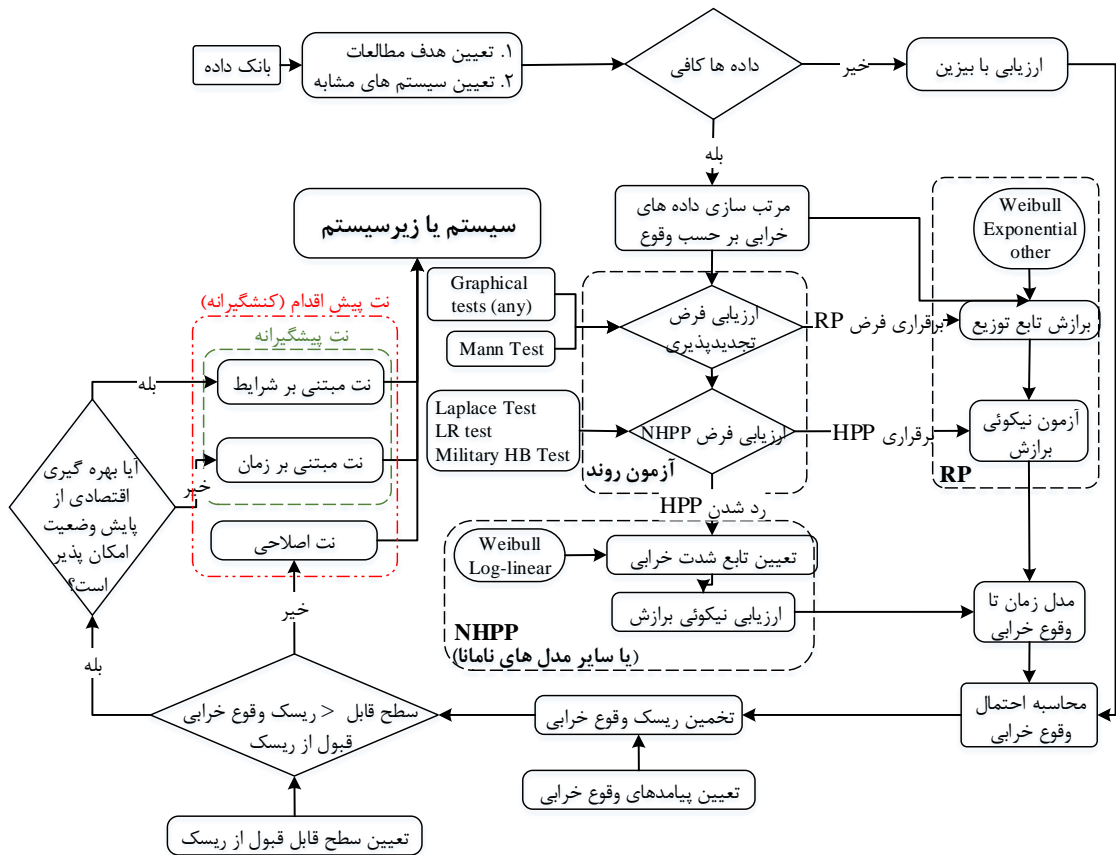
این بدین معنی است که در لایه ۱۲ زمانی که سطح انبار به ۰/۵۸ واحد/لاستیک تراک رسید باید تقریباً سه (۲/۹۱) واحد/لاستیک تراک سفارش داده شود. همچنین در این لایه در صورت نظر از تأثیر شرایط محیطی باید تقریباً ۲ (۲/۱۴) واحد لاستیک در سطح انبار ۰/۴۶ درصد سفارش داد. این یعنی سفارش زودتر و کمتر از حالت واقعی که حکایت از تأثیر شرایط محیطی در مدیریت انبارداری دارد.

۶-۵- تعمیر و نگهداری

در صنعت معدنکاری، نگهداری و تعمیرات (نت) سهم قابل توجهی از کل هزینه‌های عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهد. موفقیت در اجرای یک فناوری نت پیشرفته، نیازمند پایه نظریه قوی و آگاهی کافی نسبت به سخت‌افزار و نرم‌افزارهای مرتبط است. نت یکی از هزینه‌های بزرگ مقیاس اما قابل کنترل صنعت معدنکاری بوده و تقریباً ۳۰ تا ۵۰ درصد هزینه‌های مستقیم معدن را شامل می‌شود. علاوه بر این، تجربه نشان داده است که دامنه تغییرات هزینه‌های نت تجهیزات معدنی ۲۰ تا بیش‌تر از ۳۵ درصد کل هزینه‌های عملیاتی معدن بوده و به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. علی‌رغم تلاش‌های گسترده در تحلیل و بهینه‌سازی فرآیندهای اصلی معدنکاری، توجه اندکی به بهینه‌سازی فرآیندهای نت شده است. این در حالی است که مدیریت بهینه فعالیت‌های نت علاوه بر کاهش چشمگیر در هزینه‌ها و بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات، موجب افزایش عمر مفید تجهیزات شده و در نتیجه نرخ بازگشت هزینه‌های سرمایه‌گذاری را بالا برده و امکان سود زایی بیشتر از سرمایه‌گذاری ثابت را فراهم می‌نماید. لذا شایسته است که شرکت‌های معدنی برای کنترل این هزینه‌ها، فعالیت‌های خود را بر زمینه‌هایی مانند بهینه‌سازی برنامه نت، تعویق در نت غیرضروری، ارتقای کیفیت کارکنان نت، مدیریت و کنترل قطعات یدکی و استفاده از انواع نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای موجود متمرکز نمایند. این در حالی است که همه‌ساله میلیون‌ها دلار در سراسر دنیا صرف مهندسی نت شده و امروزه در صنایع تولیدی غول دنیا همچون صنعت مس و فلزات، صنعت سیمان، خودروسازی و سازمان‌های خدماتی همچون شرکت‌های معدنکاری داخلی یا خارجی نت به‌عنوان عنصر انکارناپذیر مطرح است. مهندسی نت به دنبال پاسخگویی به سؤالاتی چون "چگونه می‌توان سطح ارائه خدمات مورد نیاز برای یک قطعه خاص را تعیین کرد؟" "در طول دوره نت چه کارهایی باید انجام گیرد؟" "بهترین زمان انجام نت چه زمانی است؟" "نت برای یک جزء از تجهیزات چگونه باید انجام گیرد؟" است. در این رساله برای اتخاذ تصمیم در مورد استراتژی کلی (پیشگیرانه، اصلاحی، ...) از الگوریتم ارائه شده در شکل ۶-۳۳ استفاده شد که در مورد معدن مس سونگون با توجه به قابل قبول نبودن ریسک خرابی استراتژی نت باید به صورت پیشگیرانه مبتنی بر زمان انجام شود.

همچنین برای نخستین بار سه پارامتر نحوه عملکرد سیستم، تأثیر شرایط محیطی و نحوه انجام نت بر اساس کمینه، ناقص یا کامل بودن باهم ادغام شده و مناسب‌ترین بازه‌های انجام نت پیشنهاد شد. برای اجرائی کردن نظریه پیشنهادی نیز یک دستگاه تراک کوماتسو HD785-5 از ناوگان انتخاب شد. برای این زیرسیستم پارامتر سنجده عملکرد، قابلیت اطمینان انتخاب شد و تأثیر شرایط محیطی در آن وارد

شد. سپس بازه‌های زمانی نت ناقص و کامل پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان با و بدون تأثیر شرایط محیطی پیشنهاد شد.



شکل ۶-۳۳- فرایند نت مبتنی بر قابلیت اطمینان (برگرفته از Barabady and Kumar, 2008; Hoseinie et al., 2012c; Louit et al., 2009)

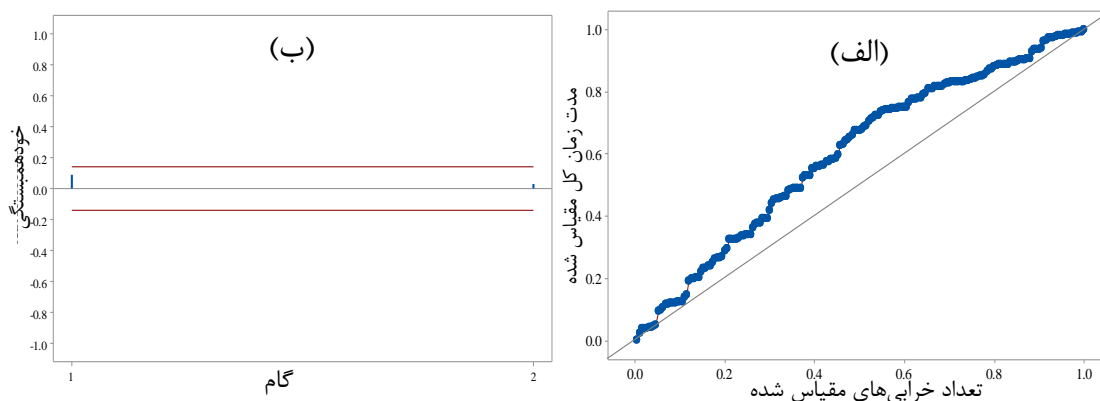
۶-۵-۱- قابلیت اطمینان تراک

در نخستین مرحله به تحلیل قابلیت اطمینان سیستم بدون تأثیر شرایط محیطی پرداخته شد. برای تحلیل فرض iid داده‌ها، همان‌طور که ذکر شد از دو آزمون روند و خودهمبستگی استفاده می‌شود. در این پژوهش، برای انجام آزمون روند از هر دو روش تحلیلی و ترسیمی (TBF-های تجمعی به تعداد وقوع تجمعی خرابی‌ها) و در مورد آزمون خودهمبستگی نیز از روش ترسیمی تابع خودهمبستگی نما (AFC) استفاده شده است. نتیجه روش تحلیلی آزمون روند سیستم در سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ در جدول ۶-۴۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر P -value در سیستم بزرگ‌تر از α بوده، در نتیجه در این سیستم فرضیه صفر عدم وجود روند رد می‌شود.

نمودار آزمون ترسیمی روند سیستم در شکل ۶-۳۴ دیده می‌شود. این نمودار انطباق کامل بین نتایج آزمون‌های تحلیلی و ترسیمی را نشان می‌دهد. برای تصمیم‌گیری درباره رد یا پذیرش فرضیه صفر مبنی بر عدم وجود خودهمبستگی با استفاده از AFC در سطح اطمینان ۹۵ درصد، از نمودارهای خودهمبستگی نما در شکل ۶-۳۴ استفاده شده است.

جدول ۶-۴۳- آزمون‌های آماری تراک

Anderson-Darling	Laplace's	MIL-Hdbk-189	آزمون روند
۱۲/۵۵	۴/۷۷	۲۸۰/۷۲	آماره آزمون
.	.	.	p-value
روند دارد			آزمون‌های تحلیلی و ترسیمی
روند دارد			روند
LBQ	TSTA	ACF	آزمون خودهمبستگی
۱/۶۱۷	۱/۲۶۲	۰/۰۹۲	نتایج آزمون در لاگ-۱
۱/۷۵۴	۰/۳۶۳	۰/۰۲۷	نتایج آزمون در لاگ-۲
خودهمبستگی ندارد			آزمون‌های تحلیلی و ترسیمی
خودهمبستگی ندارد			خودهمبستگی
رد می‌شود (PLP)			فرض iid
پارامترها		PLP	مدل یا تابع
2nd.(Scale)	1st.(Shape)		
۱۵۴/۶۹۹	۱/۳۵۴		



شکل ۶-۳۴- آزمون ترسیمی روند (الف) و نمودار خودهمبستگی نما برای لگ‌های مختلف (ب) سیستم تراک

در این نمودار مقادیر AFC با ستون‌ها و مرز بحرانی اطمینان ۹۵ در صد برای ارزیابی فرضیه صفر با خطوط پرنگ در بالا و پایین نمایش داده شده است. همان‌طوری که دیده می‌شود ستون AFC مربوط به گام ۱ برای سیستم، دارای مقدار ۰/۰۹۲ بوده و در محدوده خطوط پرنگ در بالا و پایین قرار دارد و در نتیجه فرض صفر عدم وجود خودهمبستگی برای آن پذیرفته می‌شود.

با توجه به نتایج آزمون‌های روند و خودهمبستگی فرض iid در مورد TBF-های تراک رد شده و روش NHPP مناسب برای توصیف رفتار متغیر، خرابی‌ها در طول زمان خواهد بود. همان‌طور که اشاره شد، در این رساله از روش PLP که نوع خاصی از روش NHPP است، برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم استفاده می‌شود. پارامترهای مقیاس (θ) و شکل (β) با توجه به جدول ۶-۴۳ عبارت از ۱۴۵/۶۹۹ و ۱/۳۵۴ و تابع نرخ مخاطره و قابلیت اطمینان آن به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\lambda_b(t) = \left[\frac{1.354}{145.699} \left(\frac{t}{145.699} \right)^{0.354} \right] \quad (۷۱-۶)$$

$$R_b(t) = \left(\exp \left(- \frac{t}{145.699} \right)^{1.354} \right) \quad (۷۲-۶)$$

در تعیین تابع قابلیت اطمینان مبتنی بر شرایط محیطی تابع نرخ مخاطره اساسی از تابع PLP با پارامترهای شکل (β) و مقیاس (θ) با مقادیر ۱/۰۱۹ و ۲۹/۵۱۲ پیروی می‌کند. نتایج آزمون تحلیلی فرض متناسب بودن به‌صورت جدول ۶-۴۴ است.

جدول ۶-۴۴- نتایج آزمون تحلیلی ارزیابی فرض متناسب بودن برای داده‌های تراک

P(PH)	Coeff. (Pearson Correlation)	فاکتورهای ریسک
۰/۹۴۰	-۰/۰۰۶	نوبت (Z_{t1})
۰/۳۹۹	۰/۰۶۲	تناسب با بار کننده (Z_{t3})
۰/۹۴۵	-۰/۰۰۵	شیب جاده (Z_{t5})
۰/۵۴۷	۰/۰۴۴	وضعیت جاده (Z_{t9})
۰/۱۹۰	-۰/۰۹۶	فاصله حمل (Z_{t11})

در مورد داده‌های تراک مقادیر بالای p-value (P(PH)) برای همه فاکتورهای ریسک مؤثر نشان دهنده برقراری فرض متناسب بودن برای آن‌ها است. لذا برای این داده‌ها از مدل PHM استفاده می‌شود. جدول ۶-۴۵ ضرایب رگرسیون این مدل را نشان می‌دهد. بنابر این تابع نرخ مخاطره واقعی ($\lambda(t, z)$) و قابلیت اطمینان ($R(t, z)$) لاستیک تراک به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\lambda_c(t, z) = \left[\frac{1.019}{29.512} \left(\frac{t}{29.512} \right)^{0.019} \right] \exp(-0.773z_{t1} - 0.599z_{t3} + 0.768z_{t5} + 0.317z_{t9} + 0.585z_{t11}) \quad (۷۳-۶)$$

$$R_c(t, z) = \left(\exp\left(-\frac{t}{29.512}\right) \right)^{1.019} \exp(-0.773z_{t1} - 0.599z_{t3} + 0.768z_{t5} + 0.317z_{t9} + 0.585z_{t11}) \quad (74-6)$$

جدول ۶-۴۵- تخمین مقادیر فاکتورهای ریسک لاستیک تراک با استفاده از SPSS

متغیرهای موجود در رابطه						
Exp(α)	Sig.(p-value)	d.f.	Wald	SE	α	
۰/۴۶۱	۰/۰۰۱	۱	۱۱/۰۸۲	۰/۲۳۲	-۰/۷۷۳	Z ₁
۰/۵۴۹	.	۱	۱۴/۹۲۸	۰/۱۵۵	-۰/۵۹۹	Z _{t3}
۲/۱۵۵	.	۱	۴۹/۲۳۴	۰/۱۰۹	۰/۷۶۸	Z _{t5}
۱/۳۷۳	۰/۰۶۶	۱	۳/۳۹۱	۰/۱۷۲	۰/۳۱۷	Z _{t9}
۱/۷۹۴	۰/۰۰۱	۱	۱۰/۸۳۹	۰/۱۷۸	۰/۵۸۵	Z _{t11}

۶-۵-۲- برنامه نت پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان برای تراک

در این رساله برای وارد کردن تأثیر شرایط محیطی بر قابلیت اطمینان و ادغام آن نت ناقص از مدل EPHM استفاده شده است. این مدل دارای دو پارامتر a_j و b_j که مقادیر آن‌ها برای سه حالت اساسی، بدتر از حالت اساسی، بهتر از حالت اساسی (ولی نه در حد نو) در جدول ۲-۲ تعریف شده است. لذا برای تابع نرخ مخاطره سیستم بدون تأثیر شرایط محیطی و با در نظرگیری نت ناقص طبق رابطه (۳۰-۲) به صورت زیر خواهد بود:

$$\lambda_d \left(t + \sum_{j=1}^n T_j \right) = A_n \frac{1.354}{145.699} \left(\frac{t + b_n y_n}{145.699} \right)^{0.354} \quad (75-6)$$

در نهایت تابع نرخ مخاطره شامل سه عنصر عملکرد، شرایط محیطی و نت ناقص طبق رابطه (۳۳-۲) به صورت زیر است:

$$\lambda_a \left(t + \sum_{j=1}^n T_j, z \right) = \left[A_n \frac{1.019}{29.512} \left(\frac{t + b_n y_n}{29.512} \right)^{0.019} \right] \exp(-0.773z_{t1} - 0.599z_{t3} + 0.768z_{t5} + 0.317z_{t9} + 0.585z_{t11}) \quad (76-6)$$

که در صورت جایگذاری مقادیر اساسی از a_j و b_j رابطه (۷۶-۶) به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\lambda_a \left(t + \sum_{j=1}^n T_j, z \right) = \left[\prod_{j=1}^n \left(\frac{6j+1}{5j+1} \right) \frac{1.019}{29.512} \left(\frac{t + \left(\frac{n}{2n+1} \right) y_n}{29.512} \right)^{0.019} \right] \exp(-0.773z_{t1} - 0.599z_{t3} + 0.768z_{t5} + 0.317z_{t9} + 0.585z_{t11}) \quad (77-6)$$

بنابر این طبق روابط ذکر شده چهار استراتژی کلی برای نت پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان می‌توان پیشنهاد نمود:

ا. **استراتژی نت پیشگیرانه اول (b):** نت پیشگیرانه که نه شرایط محیطی در آن وارد شده و نه تأثیر نت ناقص که به نرخ مخاطره ($\lambda_b(t)$) آن در رابطه (۶-۷۱) اشاره شد. در این استراتژی تأثیر نت پیشگیرانه به صورت کامل در نظر گرفته شده و سیستم پس از PM به حالت نو باز می‌گردد.

ب. **استراتژی نت پیشگیرانه دوم (c):** نت پیشگیرانه که تأثیر شرایط محیطی در آن وارد شده ولی از تأثیر نت ناقص صرف نظر شده که به نرخ مخاطره ($\lambda_b(t)$) آن در رابطه (۶-۷۳) اشاره شد. در این استراتژی نیز تأثیر نت پیشگیرانه به صورت کامل در نظر گرفته شده و سیستم پس از PM به حالت نو باز می‌گردد و شرایط محیطی مؤثر بر عمر سیستم است.

ج. **استراتژی نت پیشگیرانه سوم (d):** در این استراتژی نت پیشگیرانه تنها بر اساس تأثیر نت ناقص پیشنهاد شده و از تأثیر شرایط محیطی باز صرف نظر می‌شود. نرخ مخاطره ($\lambda_a(t)$) این استراتژی در رابطه (۶-۷۵) مشاهده می‌شود.

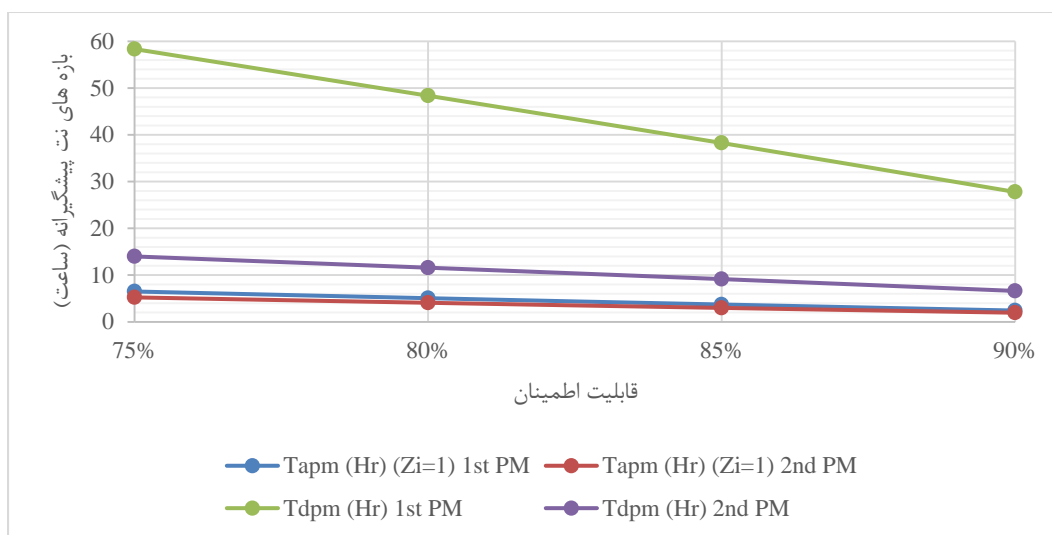
د. **استراتژی نت پیشگیرانه چهارم (a):** این استراتژی کامل‌ترین نوع استراتژی بوده که هم تأثیرات شرایط محیطی در آن وارد شده و هم تأثیرات نت ناقص برای آن در نظر گرفته شده است. نرخ مخاطره ($\lambda_a(t)$) این استراتژی در رابطه (۶-۷۶) بیان شده است.

باید توجه نمود که استراتژی‌های ارائه شده به نوعی تکمیل شده استراتژی‌های قبلی می‌باشند. همچنین با وجود اینکه نوع نت پیشگیرانه پیشنهادی در هر چهار استراتژی مبتنی بر زمان است ولی با این تفاوت که بازه‌های نت پیشنهادی در دو استراتژی نخست برای طول عمر سیستم یا جزء ثابت بوده و نت پیشگیرانه از نوع ادواری است، ولی دو استراتژی سه و چهار نت پیشگیرانه از نوع پریودیک بوده و بازه‌های پیشنهادی در هر دوره بر اساس تأثیر نت تغییر خواهد یافت. در جدول ۶-۴۶ و شکل ۶-۳۵ بازه‌های نت پیشگیرانه به ازای مقادیر بحرانی قابلیت اطمینان برای استراتژی سوم و چهارم به ازای دو فعالیت نت ارائه شده است. در این استراتژی‌ها مقادیر همه فاکتورهای ریسک، یک در نظر گرفته شده است. همان‌طور که اشاره شد استراتژی چهارم تکامل یافته استراتژی دوم است لذا بازه نت پیشنهادی در نخستین فعالیت نت از استراتژی چهارم همان بازه پیشنهادی برای کل طول عمر در استراتژی دوم خواهد بود. این موضوع برای استراتژی سوم و اول نیز صادق است. طبق نمودار ترسیم شده در شکل ۶-۳۵ بازه‌های زمانی PM برای نخستین فعالیت در استراتژی چهارم، برای سطوح ۷۵، ۸۰، ۸۵ و ۹۰ درصد قابلیت اطمینان به ترتیب ۶/۴۹۳، ۵/۰۶، ۳/۷۰۷ و ۲/۴۲۲ ساعت است، که در واقع همان بازه‌های پیشنهادی توسط استراتژی دوم می‌باشند.

جدول ۶-۴۶- بازه‌های نت پیشگیرانه برای استراتژی‌های مختلف به ازای مقادیر بحرانی قابلیت اطمینان

مقدار قابلیت اطمینان بحرانی در هر فعالیت نت پیشگیرانه				شماره فعالیت نت	نوع استراتژی
۹۰٪	۸۵٪	۸۰٪	۷۵٪		
۲/۴۲۲	۳/۷۰۷	۵/۰۶	۶/۴۹۳	1st PM	T_{pm}^a (Hr) (Zi=1)
۱/۹۵۱	۲/۹۸۷	۴/۰۷۸	۵/۲۳۴	2nd PM	
۲۸/۷۸۴	۳۸/۲۶۵	۴۸/۳۶	۵۸/۳۴۱	1st PM	T_{pm}^d (Hr)
۶/۶۱۶	۹/۱۴۵	۱۱/۵۸۱	۱۳/۹۹	2nd PM	

در دومین فعالیت این بازه‌ها برای استراتژی چهارم به ۵/۲۳۴، ۴/۰۷۸، ۲/۹۸۷ و ۱/۹۵۱ افت می‌کند. بازه‌های پیشنهادی توسط استراتژی سوم (و اول برای تمام عمر) نیز برای سطوح ۷۵، ۸۰، ۸۵ و ۹۰ درصد قابلیت اطمینان به ترتیب به ۵۸/۳۴۱، ۴۸/۳۶، ۳۸/۲۶۵ و ۲۷/۷۸۴ است. در اکثر عملیات مهندسی، ۸۰ درصد به‌عنوان بهترین مقدار عملیاتی برای ارزیابی عملکرد و کارآیی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول ۶-۴۷ نیز بازه‌های اجرایی نت پیشگیرانه برای ۴ فعالیت مشخص شده است.



شکل ۶-۳۵- بازه‌های نت پیشگیرانه برای استراتژی‌های مختلف به ازای مقادیر بحرانی قابلیت اطمینان

جدول ۶-۴۷- بازه‌های اجرای نت پیشگیرانه برای حد بحرانی قابلیت اطمینان ۸۰ درصد

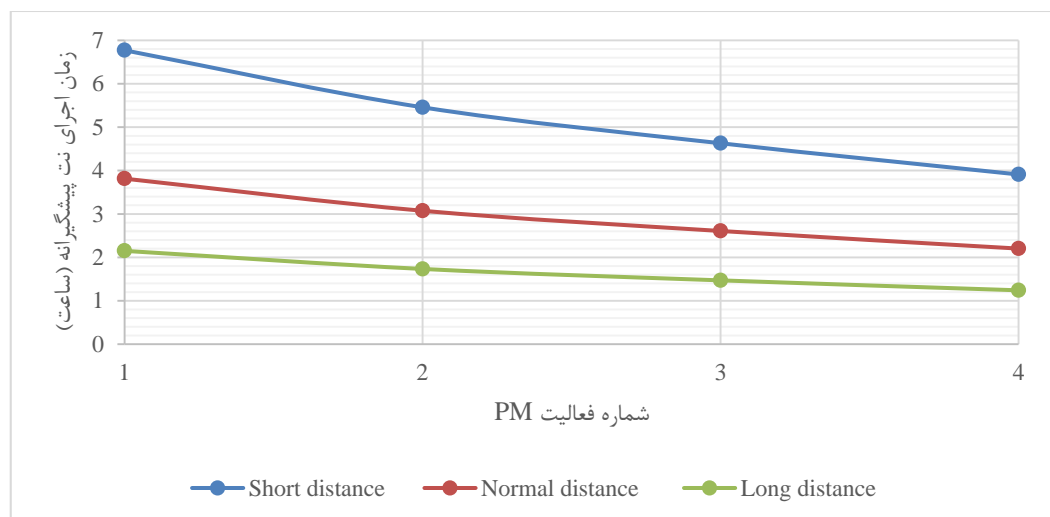
شماره فعالیت‌های PM				استراتژی PM
۴	۳	۲	۱	
۱/۹۲	۳/۴۵۹	۴/۰۷۸	۵/۰۶	T_{pm}^a (Hr) (R=%80)
۹/۰۳۵	۱۰/۲۵۴	۱۱/۵۸۱	۴۸/۳۶	T_{pm}^d (Hr) (R=%80)

زمان‌های فوق نشان می‌دهد که اولین نت پیشگیرانه برای تراک ۵ ساعت پس از کارکرد باید انجام گیرد، دومین فعالیت ۴ ساعت پس از کارکرد و سومین و چهارمین فعالیت باید در ۳/۵ و ۳ ساعت بعدی باید انجام پذیرد تا قابلیت اطمینان سیستم با استراتژی چهارم و به ازای مقدار یک برای فاکتورهای ریسک در سطح ۸۰ درصد حفظ شود.

به‌منظور مشخص کردن تأثیر شرایط محیطی در زمان‌های پیشنهادی توسط دو استراتژی (چهارم و دوم) نت پیشگیرانه که دربرگیرنده این تأثیرات می‌باشند در جدول ۶-۴۸ و شکل ۶-۳۶ زمان‌های اجرای نت برای تغییرات فاکتور ریسک "فاصله حمل" مشخص شده است.

جدول ۶-۴۸- زمان‌های اجرای نت پیشگیرانه در شرایط محیطی مختلف

شماره فعالیت‌های PM				T_{pm}^a (Hr) (R=%80)	
۴	۳	۲	۱	سطح فاکتور ریسک	فاکتور ریسک
۳/۹۱	۴/۶۳	۵/۴۵۸	۶/۷۷۲	فاصله کوتاه	فاصله حمل (Zt11)
۲/۲۰۲	۲/۶۰۸	۳/۰۷۴	۳/۸۱۴	فاصله حمل نرمال	
۱/۲۴۱	۱/۴۷	۱/۷۳۳	۲/۱۵	فاصله حمل طولانی	

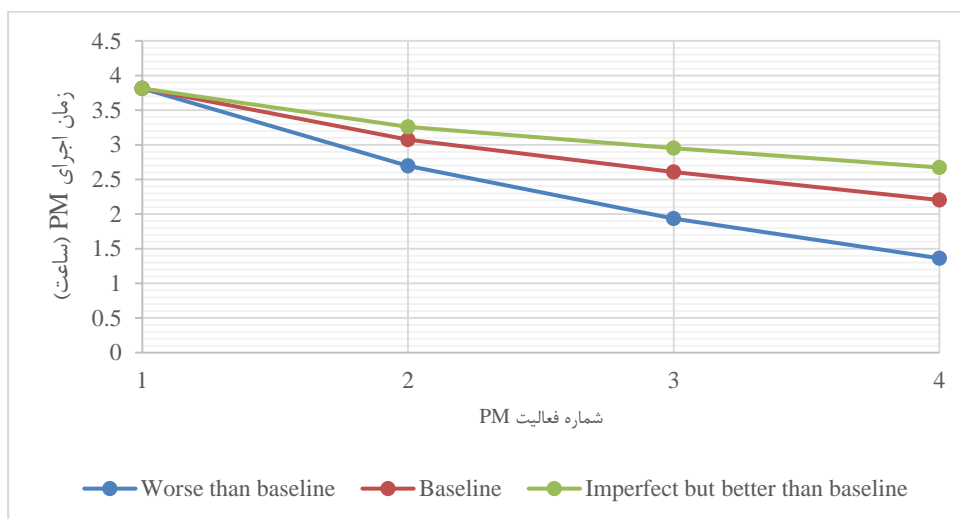


شکل ۶-۳۶- زمان‌های اجرای نت پیشگیرانه در شرایط محیطی مختلف

مقدار بحرانی قابلیت اطمینان ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با سخت‌تر شدن شرایط محیطی از طریق افزایش فاصله حمل احتمال وقوع خرابی‌ها افزایش یافته و بازه‌های نت کوتاه‌تر می‌شوند. همچنین بعد هر PM سیستم افت کرده و بازه کوتاه‌تر می‌شود. در جدول ۴۹-۶ و شکل ۳۷-۶ نیز بازه‌های PM برای تأثیرات مختلف نت ناقص به ازای مقدار بحرانی قابلیت اطمینان ۸۰ درصد برای سه حالت محاسبه و ترسیم شده است.

جدول ۴۹-۶- زمان‌های اجرای PM به ازای تأثیرات مختلف نت ناقص

شماره فعالیت نت				T_{pm}^a (Hr) (R=%80)	
۴	۳	۲	۱	تأثیرات نت ناقص پیشگیرانه	فاکتورهای ریسک
۱/۳۶۲	۱/۹۳۵	۲/۶۹۵	۳/۸۱۴	بدتر از حالت اساسی	فاصله حمل نرمال
۲/۲۰۲	۲/۶۰۸	۳/۰۷۴	۳/۸۱۴	حالت اساسی	
۲/۶۷۱	۲/۹۵۲	۳/۲۵۸	۳/۸۱۴	بهتر از حالت اساسی	



شکل ۳۷-۶- زمان‌های اجرای PM به ازای تأثیرات مختلف نت ناقص

مشخصاً با بدتر شدن وضعیت سیستم پس از اجزای نت، بازه‌های پیشنهادی نیز کوتاه‌تر خواهد بود که این مسئله در مقایسه سه حالت مشهود است.

۶-۶- تحلیل تضمین تولید در شرایط محیطی پویا

در این بخش تأثیرات شرایط محیطی (فاکتور ریسک) پویا بر قابلیت پاسخ‌دهی بررسی و مدل‌سازی شده است. به طور خلاصه نخست تأثیر شرایط محیطی بر شاخص‌های عملکردی زیرسیستم‌ها وارد شده و سپس بر اساس رفتارهای اساسی آن‌ها میزان ظرفیت تولید سیستم با در نظرگیری پیکربندی سیستم

تخمین زده می‌شود. سپس این مقادیر به ازای شرایط محیطی مختلف معدن سونگون روزرسانی می‌شود.

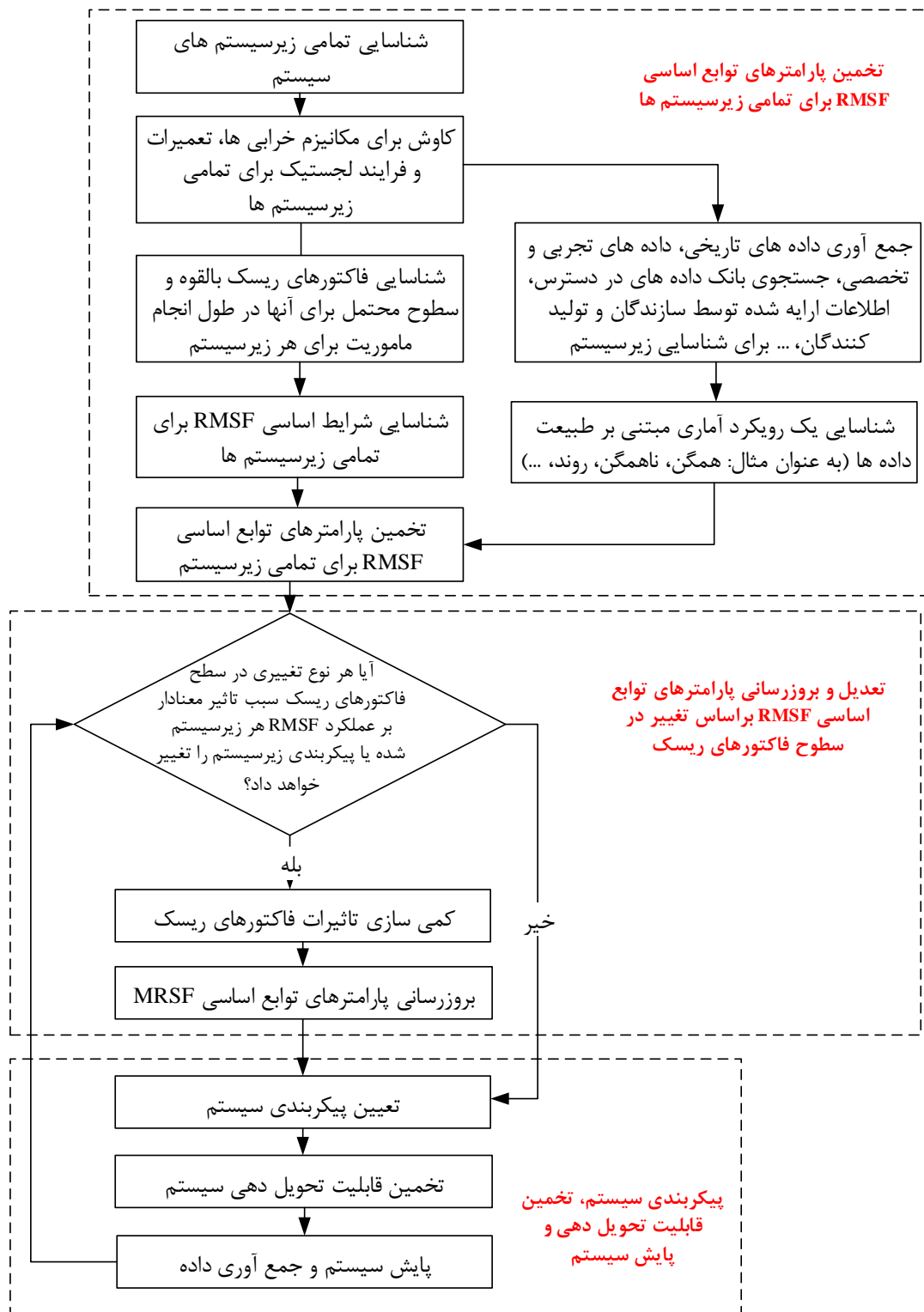
در تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی، مقدار قابلیت پاسخ‌دهی اساسی $(d_0(t, Z_0))$ برای سیستم بر اساس سطح مشخصی از فاکتورهای ریسک وجود دارد که در صورت به روزرسانی فاکتور ریسک (Z_i) بر اساس تغییر شرایط محیطی به صورت رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$d_i(t, Z_i) = d_0(t, Z_0) \cdot \prod_{j=1}^n \pi_j \quad (78-6)$$

در این رابطه $(d_i(t, Z_i))$ قابلیت پاسخ‌دهی سیستم برای مقادیر جدید فاکتورهای ریسک (Z_i) بوده و (π_j) ضریب‌های تعدیل به ازای مقدار جدید j -امین فاکتور ریسک است.

برای تخمین قابلیت پاسخ‌دهی اساسی در نخستین گام قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی و ظرفیت عملیاتی (RMSF) کل سیستم بر اساس زیرسیستم‌های موجود و تحت شرایط محیطی اساسی (Z_0) باید تعیین شود. پس از پیکربندی سیستم قابلیت پاسخ‌دهی قابل محاسبه خواهد بود. در فرایند پیچیده همچون معدنکاری در سونگون با فاکتورهای ریسک و سطوح مختلف تحلیل‌ها بسیار دشوار و پیچیده خواهد بود چرا که در این سیستم تأثیرات فاکتورهای ریسک بر RMSF زیرسیستم‌ها و اجزای یکسان نمی‌باشد. بنابراین فاکتورهای تعدیل یک سیستم برای شرایط محیطی مختلف مقادیر مختلفی خواهد داشت که در این صورت تغییرات موجود در شرایط محیطی باید به‌طور جداگانه در RMSF زیرسیستم‌ها وارد شود. از سوی دیگر باید توجه کرد که تغییر سطح برخی فاکتورهای ریسک منجر به تغییر در ساختار و پیکربندی سیستم خواهد شد، مانند تغییر سطح فاکتور ریسک "نوبت‌کاری" در محاسبات که با تغییر نوبت‌کاری ساختار سیستم در نتیجه تغییر محل کار ماشین‌آلات عوض خواهد شد. به روزرسانی پارامترهای RMSF و پیکربندی سیستم‌های پیچیده کار بسیار دشواری بوده و نیازمند رویکردی سامانمند برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها است. در شکل ۶-۳۸ روش سامانمند برگرفته شده از ایده تضمین تولید، برای حل این مشکل پیشنهاد شده است. این روش را می‌توان به‌طور مختصر در سه مرحله اصلی به شرح زیر بیان کرد:

- أ. تخمین پارامترهای توابع اساسی RMSF برای همه زیرسیستم‌ها
- ب. تعدیل و به روزرسانی پارامترهای توابع اساسی RMSF با تغییرات سطح فاکتورهای ریسک
- ج. پیکربندی سیستم، تخمین قابلیت پاسخ‌دهی و پایش سیستم.



شکل ۶-۳۸- تحلیل قابلیت پاسخ دهی سیستم در شرایط محیطی پویا

در نخستین گام باید همه زیرسیستم و دستگاه های سازنده سیستم شناسایی شود. شناخت دقیق از زیرسیستم ها و محدودیت های سیستم به منظور تعیین ویژگی های RMSF ضروری خواهد بود. لذا همه

فرضیات تحلیل و مرزهای زیرسیستم و سیستم باید در این مرحله تعیین شوند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که تنها خرابی‌های داخل این مرزها ملاک تحلیل‌ها خواهد بود.

پس از شناسایی دستگاه‌های و مرزهای آن باید در مورد مدل‌های خرابی‌ها، مکانیسم خرابی، فرایند تعمیرات و فرایند پشتیبانی برای این خرابی‌ها باید بررسی شود تا امکان شناسایی RMSF فراهم شود. در این مرحله باید همه فاکتورهای ریسک بالقوه و مؤثر در رفتار سیستم شناسایی شود. پس از شناسایی فاکتورهای ریسک RMSF باید توابع اساسی این شاخص‌ها برای هر زیرسیستم تعیین شود. تابع اساسی برای یک زیرسیستم به‌عنوان شرایط محیطی در نظر گرفته می‌شود که اطلاعات کافی در مورد رفتار RMSF برای آن زیرسیستم وجود داشته باشد. شرایط تابع اساسی باید به‌گونه‌ای تعریف شود که زیرسیستم آن را در طول عمر خود بیشتر از دیگر شرایط تجربه کرده باشد. گاهی شرایط محیطی خاص یا تابع مشخص از طرف سازندگان به‌عنوان RMSF اساسی پیشنهاد می‌شود. قابلیت پشتیبانی و تعمیرپذیری به‌طور چشم‌گیری متأثر از وضعیت سازمانی است از این رو برای تعیین تابع نرخ اساسی این شاخص‌ها همکاری مشترکی بین بخش‌های مختلف سازمان برقرار باشد.

پس از تعیین توابع اساسی باید پارامترهای این توابع تخمین زده شوند. در حالت مطلوب پارامترهای RMSF با استفاده از داده‌های عملکردی گردآوری‌شده تخمین زده خواهد شد. در مرحله بعد باید تغییرات سطوح فاکتورهای ریسک در طول زمان آزمون برای سیستم مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس داده‌ها گردآوری‌شده و تحلیل‌های انجام گرفته مشخص می‌شود که آیا تغییر سطوح فاکتورهای ریسک موجب تغییر رفتار RMSF شده یا خیر که در صورت مثبت بودن پاسخ پارامترهای هر تابع باید بر اساس شرایط جدید به روزرسانی شوند. از مدل‌های ریاضی و نظرات متخصصین می‌توان در به روزرسانی و تغییر در توابع اساسی استفاده کرد.

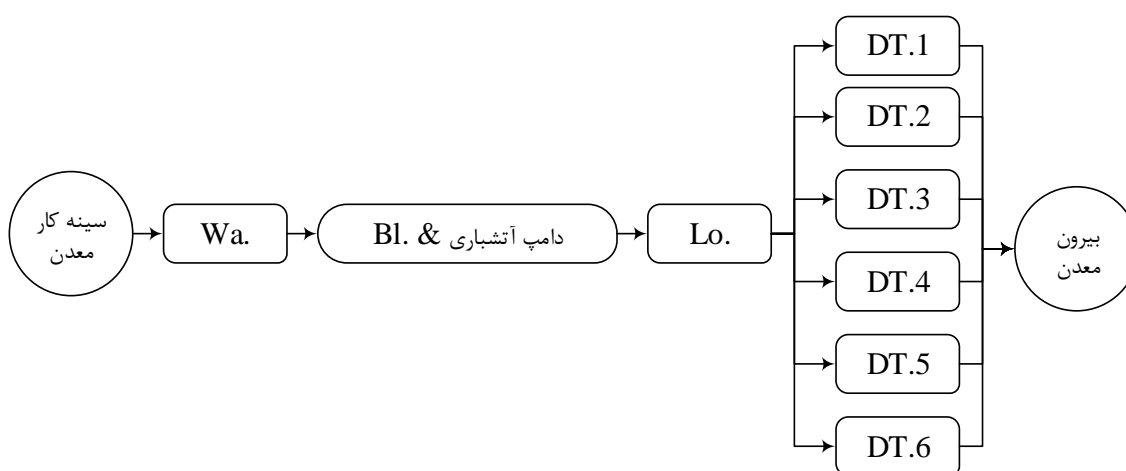
تشکیل و مدل‌سازی ساختار سیستم یکی از مهم‌ترین مراحل تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی سیستم است. مدل بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان RBD یکی از پرکاربردترین روش‌های موجود در این زمینه است. حال می‌توان سراغ تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی سیستم رفت. برای این منظور با توجه به پیچیدگی سیستم می‌توان از روش‌های تحلیلی یا شبیه‌سازی استفاده کرد. شبیه‌سازی یکی از پرهزینه‌ترین و زمان‌برترین روش‌ها است با این وجود این روش از توانایی بالایی در توصیف رفتار پویا سیستم برخوردار است. لذا روش شبیه‌سازی برای تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی سیستم بر اساس تغییرات فاکتورهای ریسک مؤثر انتخاب شد.

در این بخش قسمت دیگری از ناوگان متشکل از یک دستگاه واگن دریل، یک دستگاه بلدوزر، یک دستگاه لودر و شش دستگاه تراک برای تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی مورد استفاده قرار گرفت. در جدول

۵۰-۶ مشخصات این تجهیزات و کدهای مربوطه وارد شده است. در شکل ۳۹-۶ نیز بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان سیستم ترسیم شده است.

جدول ۵۰-۶- مشخصات ناوگان استخراجی معدن

ردیف	تجهیزات معدن	مدل زیرسیستم	کد	متوسط ظرفیت عملیاتی زیرسیستم (m ³ /hr)
۱	دریل واگن	Hasher	Wa.	۳۸۴
۲	بلدوزر	Caterpillar-d11n	Bl.	۲۵۸
۳	لودر	Caterpillar-988b	Lo.	۳۰۰
۴	تراک	Komatsu-785-5	D.T.1	۲۴
۵	تراک	Komatsu-785-5	D.T.2	۲۴
۶	تراک	Komatsu-785-5	D.T.3	۲۴
۷	تراک	Komatsu-785-5	D.T.4	۲۴
۸	تراک	Komatsu-785-5	D.T.5	۲۴
۹	تراک	Komatsu-785-5	D.T.6	۲۴



شکل ۳۹-۶- بلوک دیاگرام ناوگان انتخابی از معدن سونگون

برای اجرای روش پیشنهادی در شکل ۳۸-۶ برای این بخش از ناوگان استخراجی معدن سونگون فرضیاتی چند به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود:

- سیستم استخراجی شامل ۱۰ زیرسیستم مستقل به شرح جدول ۵۰-۶ است.

- از آن جایی داده‌های عملیاتی (خرابی، تعمیرات و پشتیبانی) در سطح ماشین‌آلات معدنی جمع‌آوری شده لذا هر ماشین معدنی به‌عنوان یک زیرسیستم (جزء) در نظر گرفته می‌شود.
- هر یک از زیرسیستم‌های تعریف شده تنها در یکی از دو حالت خرابی (تولید ندارند) یا کارگر (در حال تولید است) خواهند بود.
- خرابی به‌عنوان اتفاقاتی در نظر گرفته شده که منجر به توقف زیرسیستم می‌شوند.
- تنها محیط معدنی و تعمیرگاه به‌عنوان فاکتورهای ریسک در تحلیل‌ها وارد خواهند شد.

۶-۶-۱- تخمین پارامترهای توابع اساسی RMS برای هر زیرسیستم

شرایط محیطی اساسی برای زیرسیستم‌ها بر اساس تجارب متخصصین معدن تعیین شد. برای این منظور ایده تضمین تولید به‌عنوان روش مورد بحث قرار گرفت تا از این طرق یک بینش کلی از فرایند کار در اختیار متخصصین قرار گیرد. در نهایت با همکاری متخصصین معدن، اطلاعات آرشیو موجود، اسناد ثبت شده، مشاهدات مستقیم و ملاقات‌های انجام گرفته با گروه تعمیرات و اپراتورها، فاکتورهای ریسک بالقوه شناسایی و سطح‌بندی شدند. فاکتورهای ریسک قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری برای زیرسیستم‌های مختلف بر اساس سطح‌بندی آن‌ها در جدول ۶-۵۱ و جدول ۶-۵۲ و جدول ۶-۵۳ مرتب شده است. در این بین فاکتورهای ریسک قابلیت اطمینان مانند نوبت کاری، نوع سنگ، افق دید، بارندگی، دما و وضعیت جاده مشترک بین زیرسیستم‌ها می‌باشند. برخی نیز مختص به زیرسیستم خاص می‌باشند مانند عمق حفاری که مختص زیرسیستم دریل واگن بوده و قادر به افزایش نرخ مخاطره آن می‌باشند. همچنین عواملی چون میزان خردایش سنگ پس از آتشباری مشخصاً دارای تأثیر بر قابلیت اطمینان زیرسیستم لودر خواهند بود. فاکتورهای ریسک قابلیت تعمیرپذیری شامل نوبت کاری، افق دید، بارندگی و تعداد کارکنان گروه تعمیر است. در این حالت برای مثال در هر نوبت کاری کارکنان تعمیرات عوض شده و گروه دیگر بامهارت و تجارب دیگر در فرایند تعمیرات وارد می‌شود که این موضوع مشخصاً مؤثر بر قابلیت تعمیرپذیری سیستم خواهد بود. همچنین برای تعمیرات بیرون از کارگاه عوامل چون افق دید و بارندگی به‌عنوان فاکتورهای ریسک بالقوه مطرح خواهند بود. خود فاکتور ریسک افق دید نیز متأثر از مه و گردوغبار است. برخی تعمیرات با توجه به نوع آن قادر به انجام در یک نوبت کاری و با اکیپ مشخص است حال آنکه انجام برخی تعمیرات بیشتر از یک نوبت کاری زمان لازم داشته و متعاقباً تغییراتی در اکیپ تعمیرات وجود خواهد داشت. این موضوع گاهی منجر به عدم برقراری ارتباط مناسب بین دو اکیپ شده و دوباره کاری در مورد موضوع خاصی را به دنبال خواهد داشت که این مسئله نیز بشدت افت قابلیت تعمیرپذیری را به دنبال خواهد داشت از این رو تعداد اکیپ‌های تعمیراتی به‌عنوان یک فاکتور

ریسک در نظر گرفته شد. لذا فاکتورهای ریسک هر زیرسیستم بر اساس برنامه تولید و شرایط عملیاتی مختلف برای هر زیرسیستم از لحاظ وقوع خرابی و تعمیرات انجام گرفته تعیین شد. به طور مثال معدن در سه نوبت صبح (۷ ساعت)، ظهر (۸/۵ ساعت) و شب (۶ ساعت) کار می کند.

جدول ۶-۵۱- فاکتورهای ریسک قابلیت اطمینان لودر و تراک

تراک		لودر	
سطح فاکتور	فاکتور ریسک	سطح فاکتور	فاکتور ریسک
صبح [0]	نوبت کاری (Z_{t1})	صبح [0]	نوبت کاری (Z_{t1})
ظهر [1]		ظهر [1]	
عصر [2]		عصر [2]	
ماده معدنی [2]	نوع سنگ (Z_{t10})	ماده معدنی [2]	نوع سنگ (Z_{t10})
منزونیت [1]		منزونیت [1]	
تراکیت [2]		تراکیت [2]	
آفتابی [0]	افق دید (Z_{t6})	آفتابی [0]	افق دید (Z_{t4});
نیمه ابری [1]		نیمه ابری [1]	
ابری [2]		ابری [2]	
مه غلیظ [3]		مه غلیظ [3]	
فاکتور ریسک پیوسته	بارندگی (Z_{t7})	فاکتور ریسک پیوسته	بارندگی
فاکتور ریسک پیوسته	دما (Z_{t8})	فاکتور ریسک پیوسته	دما (Z_{t5})
نرمال [0]	وضعیت جاده (Z_{t9})	نرمال [0]	وضعیت جاده (Z_{t7})
غیر نرمال [1]		غیر نرمال [1]	
ماده معدنی، اکسید، سولفور و دامپ [0]	خردایش سنگ (Z_{t4})	دامپ [0]	محل کار (Z_{t2})
منزونیت میانی [1]		سینه کار معدنی [1]	
منزونیت شمالی [2]		ماده معدنی، اکسید، سولفور و دامپ	خردایش سنگ (Z_{t9})
تراکیت [3]		منزونیت میانی [1]	
منزونیت جنوبی [4]	منزونیت شمالی [2]		
مسطح [0]	تراکیت [3]		
سربالایی [1]	شیب جاده (Z_{t5})	منزونیت جنوبی [4]	
سرازیری [2]			

ادامهٔ جدول ۵۱-۶

فاصله کوتاه $m[0]$ (0-1350)	فاصله حمل (z_{t11})	مناسب $[0]$ (0-12)	تعداد تراک تخصیص یافته به لودر (z_{l3})
		تا حدودی مناسب $[1]$ (12-20)	
نامناسب $[2]$ (20-100)			
فاصله نرمال $[1]$ (1350-2300)	تعداد سرویس باربری (z_{l3})	مناسب $[0]$ (Truck 30t)	ظرفیت تراک‌های تخصیص یافته (z_{l8})
فاصله طولانی m (2300-8000)		تا حدودی مناسب (Truck 85) مناسب $[1]$	
مناسب $[0]$ (0-13)		نامناسب $[2]$ (Truck 100t)	
تا حدودی مناسب $[1]$ (13-43)	ظرفیت لودر بارگیری (z_{l2})	نامناسب $[2]$ (Truck 100t)	
نامناسب $[2]$ (43-176)			
مناسب $[0]$ (Truck 30t)			
تا حدودی مناسب (Truck 80) مناسب $[1]$	تراک کد (فاکتور ریسک باینری)		
نامناسب $[2]$ (Truck 100t)			
DT.1			
DT.2			
DT.3			
DT.4			
DT.5			
DT.6			

جدول ۵۲-۶- فاکتورهای ریسک قابلیت اطمینان واگن دریل و بلدوزر

بلدوزر		واگن دریل	
سطح فاکتور	فاکتور ریسک	سطح فاکتور	فاکتور ریسک
صبح $[0]$	نوبت کاری* (z_{b1})	صبح $[0]$	نوبت کاری* (z_{d1})
ظهر $[1]$		ظهر $[1]$	
عصر $[2]$		عصر $[2]$	
ماده معدنی $[2]$	نوع سنگ* (z_{b6})	ماده معدنی $[2]$	نوع سنگ (z_{d2})
منزونیت $[1]$		منزونیت $[1]$	
تراکیت $[2]$		تراکیت $[2]$	

ادامه جدول ۶-۵۲

آفتابی [0]	افق دید* (Z_{b2})	آفتابی [0]	افق دید (Z_{d3})
نیمه ابری [1]		نیمه ابری [1]	
ابری [2]		ابری [2]	
مه غلیظ [3]		مه غلیظ [3]	
فاکتور ریسک پیوسته	بارندگی (Z_{b3})	فاکتور ریسک پیوسته	بارندگی (Z_{d4})
فاکتور ریسک پیوسته	دما (Z_{b4}) .	فاکتور ریسک پیوسته	دما (Z_{d5}) .
نرمال [0]	وضعیت جاده (Z_{b5})	نرمال [0]	وضعیت جاده (Z_{d6})
غیر نرمال [1]		غیر نرمال [1]	
مناسب ترین حالت (Same level and Fix in N-S) [0]	جابجایی بلدوزر (Z_{b7})	مناسب [0] (6.5")	اندازه سرمته (Z_{d7})
مناسب (Same level and variable in N-S) [1]		نامناسب (> or < 6.5") [1]	
نامناسب (Variable level and variable in N-S) [2]		مناسب [0] (0-62)m	عمق حفاری (Z_{d8})
دامپ [0]	تا حدودی مناسب -62) (144)m [1]		
سپینه کار معدنی [1]	نامناسب [2] (144-860)m		

جدول ۶-۵۳- فاکتورهای ریسک قابلیت تعمیرپذیری همه زیرسیستمها

سطح فاکتور	فاکتور ریسک
صبح [0]	نوبت کاری (w_{x1})
ظهر [1]	
عصر [2]	
آفتابی [0]	وضعیت آب و هوای (w_{x3})
نیمه ابری [1]	
ابری [2]	
مه غلیظ [3]	
فاکتور ریسک پیوسته	بارندگی (w_{x4})
فاکتور ریسک پیوسته	دما (w_{x5})
یک [0]	تعداد اکیپ تعمیراتی (w_{x2})
بیشتر از یک [1]	

در این بخش ظرفیت عملیاتی برای همه زیرسیستم‌ها متوسط مقدار ظرفیت عملیاتی در طول سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ مطابق جدول ۶-۵۰ در نظر گرفته شد. برای تخمین پارامترهای توابع RMS نیز از داده‌ها جمع‌آوری شده که شرح آن‌ها در بخش جمع‌آوری داده آورده شده استفاده شد. بخشی از داده‌های دریل واگن در جدول ۶-۵۴ و جدول ۶-۵۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۶-۵۴- بخشی از داده‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم دریل واگن

داده‌های قابلیت اطمینان									
TBFs	وضعیت	نوبت کاری	نوع سنگ	افق دید	بارندگی (mm)	دما (oC)	وضعیت جاده	اندازه سرمرته	عمق حفاری
۶۲	۰	۱	۲	۱	۰	۵	۰	۰	۰
۲۴	۱	۰	۲	۱	۰	۱۰	۰	۰	۰
۱۵	۱	۰	۲	۱	۰/۳	۱۱	۰	۰	۰
۱۱	۱	۰	۲	۲	۱/۲	۹	۰	۰	۱
۱	۱	۱	۲	۱	۰	۷	۰	۰	۰
۳۱	۱	۰	۲	۲	۰/۱	۵	۰	۰	۱
۱	۱	۱	۲	۲	۰/۶	۵	۰	۰	۰

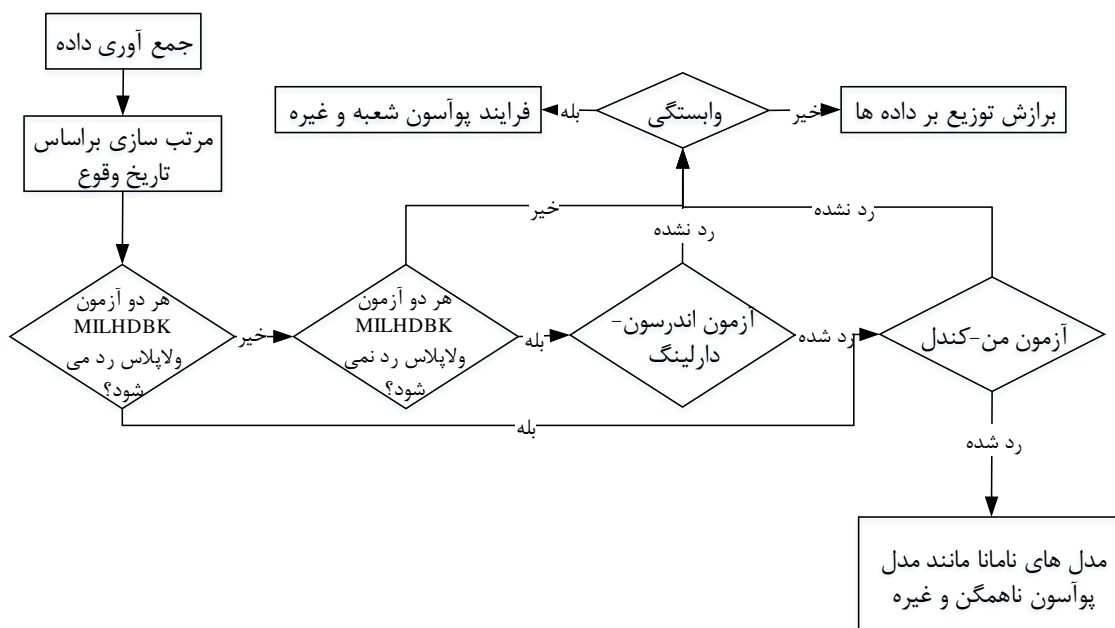
جدول ۶-۵۵- بخشی از داده‌های قابلیت تعمیرپذیری و پشتیبانی زیرسیستم دریل واگن

داده‌های قابلیت پشتیبانی	داده‌های قابلیت تعمیرپذیری						
	TTRs	وضعیت	نوبت کاری	تعداد اکیپ تعمیراتی	وضعیت آب‌وهوایی	بارندگی (mm)	دما (oC)
۳/۲	۶۴	۰	۱	۱	۱	۰/۲	۱
۴/۷	۹۴	۱	۱	۱	۱	۰	۵
۰/۲	۵	۱	۱	۰	۱	۰	۱۱
۰/۳	۵	۱	۱	۰	۱	۰/۳	۱۱
۳/۵	۷۰	۱	۱	۱	۱	۰/۴	۱۱
۰/۷	۱۳	۱	۲	۰	۱	۰	۷
۰/۱	۳	۱	۱	۰	۲	۰/۶	۵

داده‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری ناهمگن بوده و تحت شرایط محیطی مختلف گردآوری شده‌اند. لذا روش‌های کلاسیک آماری مانند تابع ویبول به‌تنهایی قادر به توصیف رفتار عملکردی زیرسیستم‌ها نخواهد بود. لذا از روش‌های رگرسیونی و مبتنی بر شرایط محیطی باید استفاده کرد. قابل ذکر است که در مورد شاخص قابلیت پشتیبانی اطلاعاتی در مورد فاکتورهای ریسک در دسترس نبوده و از روش‌های کلاسیک برای توصیف رفتار آن استفاده می‌شود.

۶-۶-۲- تحلیل قابلیت پشتیبانی با استفاده از مدل فرایند نقطه‌ای

مطابق الگوریتم شکل ۶-۴۰ پس از تعیین توابع مناسب پارامترهای تخمین زده شد.



شکل ۶-۴۰- الگوریتم تحلیل داده‌ها به روش کلاسیک

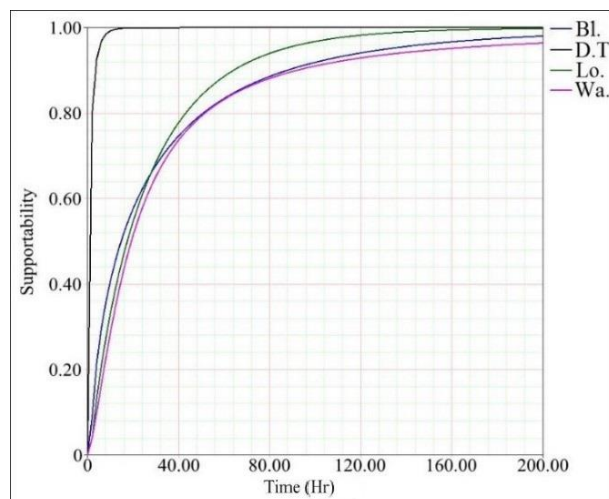
جدول ۶-۵۶ نتایج آزمون روند برای داده‌های قابلیت پشتیبانی هر زیرسیستم را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که همه زیرسیستم‌ها به‌استثنای زیرسیستم تراک بدون روند بوده و وابستگی خاصی بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود. لذا از روش‌های کلاسیک آماری مانند توزیع ویبول برای تخمین قابلیت پشتیبانی این زیرسیستم‌ها استفاده می‌شود. برای زیرسیستم تراک نیز از مدل PLP استفاده می‌شود. در جدول ۶-۵۷ نیز بهترین توزیع‌های برازش شده و تخمین پارامترهای آن‌ها برای هر زیرسیستم مشاهده می‌شود. در شکل ۶-۴۱ نیز نمودار قابلیت پشتیبانی زیرسیستم‌ها به ازای ۲۰۰ ساعت کارکرد ترسیم شده است.

جدول ۶-۵۶- نتایج آزمون‌های تحلیلی روند و خودهمبستگی برای هر زیرسیستم

زیرسیستم	آزمون روند	MIL-Hdbk-189	Laplace's	Mann-Kendall
Wa.	Statistic	۳۸۱/۴۳	۰/۵۸	-
	P-value	۰/۶۱۷	۰/۵۶۱	-
	Result	روند ندارد		
Bl.	Statistic	۳۸/۸۸	-۱/۵۸	-
	P-value	۰/۰۵۶	۰/۱۱۳	-
	Result	روند ندارد		
Lo.	Statistic	۴۲/۱۱	-۰/۶۵	-
	P-value	۰/۸۹۴	۰/۵۱۸	-
	Result	روند ندارد		
Dump trucks	Statistic	-۱۵/۳۳	۱۲۷/۰۱	۵۲/۹۶
	P-value	.	.	.
	Result	روند دارد		

جدول ۶-۵۷- بهترین توزیع برای هر زیرسیستم و پارامترهای آن‌ها

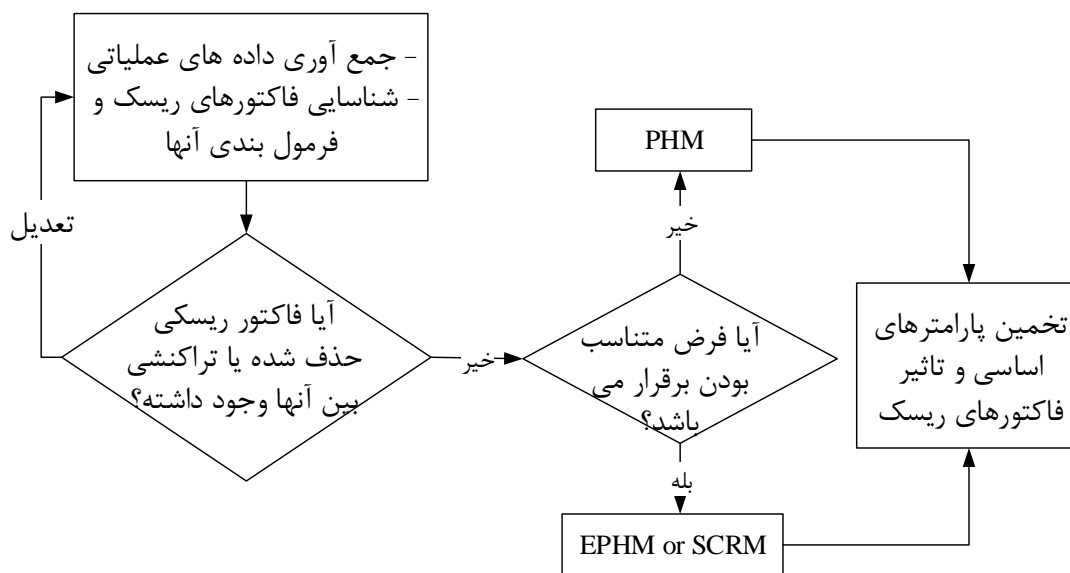
زیرسیستم	بهترین توزیع یا مدل	پارامترها	متوسط زمان تحویل (Min.)	قابلیت پشتیبانی
Wa.	Loglogistic-2P	$\mu = -۱/۱۳۹$, $\sigma = ۰/۷۱۱$	۵۴	$s_{Wa.}(t) = \exp\left(\frac{\ln(t) + 1.139}{0.711}\right) / 1 + \exp\left(\frac{\ln(t) + 1.139}{0.711}\right)$
Bl.	Weibull-3P	$\beta = ۰/۶۴۳$; $\eta = ۰/۳۹۲$, $\gamma = ۰/۰۲۴$	۳۴	$s_{Bl.}(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t - 0.024}{0.392}\right)^{0.643}\right)$
Lo.	Weibull-3P	$\beta = ۰/۸۸۱$, $\eta = ۰/۴۰۵$, $\gamma = ۰/۰۲۳$	۲۷	$s_{Lo.}(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t - 0.023}{0.405}\right)^{0.881}\right)$
تراک‌ها	PLP	$\beta = ۰/۶۹$, $\eta = ۰/۰۱۷$	۲۰	$s_{Bl.}(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{0.017}\right)^{0.696}\right)$



شکل ۶-۴۱- قابلیت پشتیبانی زیرسیستم‌های ناوگان استخراجی

۶-۶-۳- تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

در شکل ۶-۴۲ حالت ساده شده الگوریتم کلی رساله برای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری با استفاده از PHM و بسط‌های آن‌ها مشاهده می‌شود. در این الگوریتم پس از جمع‌آوری داده‌ها، تراکنش بین فاکتورهای ریسک بررسی شده و سپس بر اساس ارزیابی فرض متناسب بودن از مدل PHM یا بسط‌های آن استفاده می‌شود.



شکل ۶-۴۲- تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری با استفاده از PHM و بسط‌های آن

در جدول ۶-۵۸ نتایج آزمون باقیمانده‌های شوئنگلد برای داده‌های زیرسیستم بلدوزر مشاهده می‌شود. در این آزمون فرض صفر عدم برقراری فرض متناسب بودن است p -valueها نشان از رد فرض صفر و برقراری این فرض متناسب بودن دارند. برای سایر زیرسیستم‌ها نیز همین روال تکرار می‌شود.

جدول ۶-۵۸- نتایج آزمون پیرسون برای داده‌های خرابی بلدوزر

فاکتورهای ریسک	همبستگی پیرسون	P-value	نتیجه
نوبت کاری	-۰/۰۰۸	۰/۹۴۶	PH justified
وضعیت جاده	۰/۰۳۴	۰/۷۷۲	PH justified
جابجایی بلدوزر	-۰/۰۵۶	۰/۶۲۶	PH justified

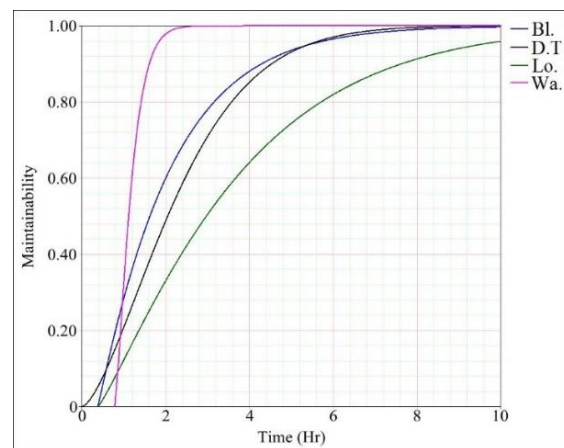
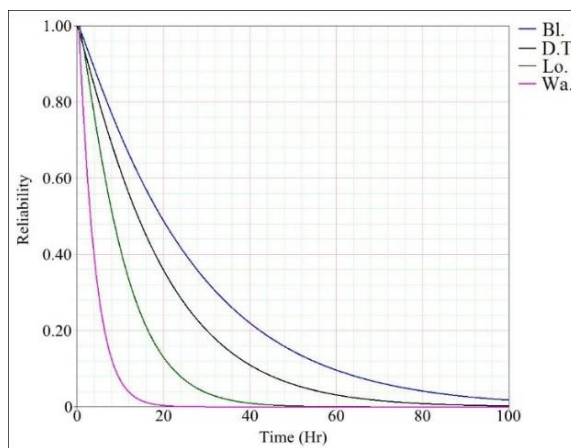
در این مطالعه موردی از مدل PHM-ویبول برای مدل کردن قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری استفاده شده است. برای مثال نرخ تعمیرات یک سیستم به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$\mu(t, \theta) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t - \gamma}{\lambda} \right)^{\beta-1} \exp(\rho\theta) \quad (۷۹-۶)$$

در جدول ۶-۵۹ پارامترهای اساسی قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرسیستم‌ها تخمین زده شده و شکل ۶-۴۳ نمودارهای آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۶-۵۹- پارامترهای توابع قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

پارامترهای تابع قابلیت اطمینان اساسی			پارامترهای تابع قابلیت اطمینان اساسی			زیرسیستم
γ_0	η_0	β_0	γ_0	η_0	β_0	
۰/۷۸۱	۰/۴۳۶	۱/۳۱۵	۰/۳۷۵	۳/۸۲۴	۱/۰۶۲	Wa.
۰/۳۷۵	۱/۷۶۳	۱/۰۴۷	۰/۳۷۵	۲۶/۸۴۵	۱/۰۶۵	Bl.
۰/۳۶۵	۳/۵۴۵	۱/۱۶۶	۰/۵۹۲	۱۰/۵۲۷	۱/۱۶۵	Lo.
	۲/۶۰۴	۱/۵۱۰		۱۹/۵۷۷	۱/۱۰۹	D.T.



شکل ۶-۴۳- نمودار قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرسیستم‌ها

در جدول ۶-۶۰ و جدول ۶-۶۱ فاکتورهای ریسک مؤثر در قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری هر یک از زیرسیستم‌ها مشاهده می‌شود. در این جداول ستون آخر شکل تابع کلی هر زیرسیستم را نشان می‌دهد.

جدول ۶-۶۰- فاکتورهای مؤثر بر قابلیت اطمینان هر زیرسیستم

تابع قابلیت اطمینان هر زیرسیستم	Exp(α)	p-value	Wald	SE	α	فاکتور ریسک	Sub.
$R_{Wa.}(t, z) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.375}{3.824}\right)^{1.062}\right) \times (-0.646z_{d1} - 1.121z_{d2} - 0.586z_{d8})$	۰/۶۲۹	۰/۰۰۳	۸/۶۲۰	۰/۱۵۸	-۰/۶۴۶۰	نوبت کاری (z_{d1})*	Wa.
	۰/۳۲۶	۰	۲۵/۶۲۸	۰/۲۲۲	-۱/۱۲۱	اندازه سرمته (z_{d7})	
	۰/۵۵۷	۰	۱۶/۰۸۲	۰/۱۴۶	-۰/۵۸۶	عمق حفاری (z_{d8})	
$R_{Bl.}(t, z) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.375}{26.845}\right)^{1.065}\right) \times (-0.409z_{b1} + 1.429z_{b5} + 0.395z_{b7})$	۰/۶۶۴	۰/۰۶۰	۳/۵۵۰	۰/۲۷۱	-۰/۴۰۹	ویت کاری (z_{b1})*	Bl.
	۴/۱۷۴	۰	۲۴/۸۸۸	۰/۲۸۶	۱/۴۲۹	وضعیت جاده (z_{d6})	
	۱/۴۸۵	۰/۰۴۹	۳/۳۸۷۲	۰/۲۰۱	۰/۳۹۵	جابجایی بلدوزر (z_{b7})	
$R_{Lo.}(t, z) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.592}{10.527}\right)^{1.165}\right) \times (-0.505z_{l1} - 0.489z_{l2} + 0.260z_{l4} - 0.086z_{l5})$	۰/۶۰۳	۰/۰۰۷	۷/۳۲۱	۰/۱۸۸	-۰/۵۰۵	نوبت کاری (z_{l1})	Lo.
	۰/۶۱۳	۰/۰۰۴	۸/۴۲۹	۰/۱۶۸	-۰/۴۸۹	محل کار (z_{l2})	
	۰/۲۹۷	۰/۰۰۷	۷/۳۶۷	۰/۰۹۶	۰/۲۶۰	افق دید (z_{l4})	
	۰/۹۱۸	۰/۰۲۰	۵/۴۱۳	۰/۰۳۷	-۰/۰۸۶	بارندگی (z_{l5})	
$R_{Dt.}(t, z) = \exp\left(-\left(\frac{t}{19.577}\right)^{1.109}\right) \times (-0.312z_{t1} - 0.457z_{t3} + 0.071z_{t4} + 0.430z_{t5} + 0.083z_{t6} + 0.224z_{t9} - 0.624z_{t10} + 0.640z_{t11} + \alpha z_{t-dummy})$	۰/۷۳۲	۰	۳۶/۴۱۹	۰/۰۵۲	-۰/۳۱۲	نوبت کاری (z_{t1})	DT.
	۰/۶۳۳	۰	۶۲/۴۵۸	۰/۰۵۸	-۰/۴۵۷	تعداد سرویس بارگیری شده (z_{t3})	
	۱/۰۷۳	۰/۰۵۲	۳/۷۸۱	۰/۰۳۶	۰/۰۷۱	خردایش (z_{t4})	
	۱/۵۳۸	۰	۱۰۴/۱۶۹	۰/۰۴۲	۰/۴۳۰	شیب جاده (z_{t5})	
	۱/۰۸۷	۰/۰۰۶	۷/۴۳۳	۰/۰۳۱	۰/۰۸۳	افق دید (z_{t6})	
	۱/۲۵۱	۰/۰۰۱	۱۰/۹۲۸	۰/۰۶۸	۰/۲۲۴	وضعیت جاده (z_{t9})	
	۰/۵۳۶	۰	۲۴/۲۸۵	۰/۱۲۷	-۰/۶۲۴	نوع سنگ z_{t10}	
	۱/۸۹۷	۰	۴۰/۴۶۱	۰/۱۰۱	۰/۶۴۰	فاصله حمل (z_{t11})	
	۰/۰۷۵	۱۰/۰۰۶			کد تراک (z_{tdummy})		

جدول ۶-۶۱- فاکتورهای مؤثر بر قابلیت تعمیرپذیری هر زیرسیستم

Sub.	فاکتورهای ریسک	β	SE	Wald	p-value	Exp(β)	تابع قابلیت تعمیرپذیری هر زیرسیستم
Wa.	نوبت کاری t (w_{d1})*	-۲/۳۶۶	۰/۳۱۰	۵۸/۱۰۲	۰	۰/۰۹۴	$M_{Wa.}(t,w) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.781}{0.436}\right)^{1.315}\right) \times (-2.366w_{d1} - 3.391w_{d2})$
	تعداد آکیپ تعمیراتی (w_{d1})*	-۳/۳۹۱	۰/۲۸۸	۱۳۹/۰۲۱	۰	۰/۰۳۴	
Bl.	نوبت کاری t (w_{b1})*	-۰/۵۵۱	۰/۱۹۷	۷/۸۵۱	۰/۰۰۵	۰/۵۷۶	$M_{Bl.}(t,w) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.375}{1.763}\right)^{1.047}\right) \times (-0.55w_{d1} - 2.250w_{d2})$
	تعداد آکیپ تعمیراتی (w_{b2})*	-۲/۲۵۰	۰/۳۵۲	۴۰/۸۳۲	۰	۰/۱۰۵	
Lo.	تعداد آکیپ تعمیراتی (w_{l2})*	-۲/۰۶	۰/۳۰۷	۴۵/۰۲۹	۰	۰/۱۲۷	$M_{Lo.}(t,w) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.375}{3.114}\right)^{1.230}\right) \times (-2.06w_{l2} - 0.261z_{lB})$
	وضعیت آب و هوای (w_{l3})*	-۰/۲۶۱	۰/۰۷۷	۱۱/۴۸۳	۰/۰۰۱	۰/۷۷۱	
DT.	تعداد آکیپ تعمیراتی (w_{dt})*	-۳/۱۷۶	۰/۱۳۹	۵۲۲/۳۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۴۱	$M_{DT.}(t,w) = \exp\left(-\left(\frac{t}{2.604}\right)^{1.510}\right) \times (-3.176w_{l2} - 0.099w_{l3} - \beta z_{t-dummy})$
	وضعیت آب و هوای (w_{l3})*	-۰/۰۹۹	۰/۰۳۰	۱۱/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۹۰۵	
	نوع تراک (w_{l6})*			۱۵/۸۸۱	۰/۰۰۷		

۶-۶-۴- به روزرسانی پارامترهای توابع اساسی RMSF بر اساس تأثیرات فاکتورهای ریسک

پس از محاسبه پارامترهای توابع اساسی سؤال اصلی این است که آیا امکان پاسخگویی به تغییرات فاکتورهای ریسک در طول بازه تحلیل وجود دارد یا خیر؟ طبق برنامه تولید معدن باید ۷۰۰۵۵۱۰ تن ماده معدنی در انتهای سال تحویل داده شود. سیستم انتخابی نیز به مدت ۵ ماه (از ابتدای مارس تا اوت) باید در منزونیت، به مدت دو ماه در ماده معدنی (از اوت تا اکتبر) و در نهایت به مدت پنج ماه دیگر در منزونیت کار کند. سیستم سه نوبت در روز و ۳۶۴ روز در طول سال کار می‌کند. این یعنی سیستم در طول کارکرد سطوح مختلف فاکتورهای ریسک را تجربه خواهد کرد. به عنوان مثال جابجایی بلدوزر بین پله‌های معدنی احتمال وقوع خرابی برای این زیرسیستم را افزایش خواهد داد.

طبق جدول ۶-۶۰ نرخ مخاطره بلدوزر با ضریب $\exp(\alpha_{b7}) = \exp(0.395) = 1.485$ تغییر خواهد کرد. همچنین سیستم انتخابی در طول یک روز نیز سطوح مختلف از فاکتورهای ریسک را تجربه می‌کند. به عنوان مثال نرخ خرابی در طول شب متفاوت از نرخ خرابی در روز است این نرخ با ضریب $\exp(\alpha_{d1}) = \exp(-0.646) = 0.629$ تغییر می‌کند. بنابراین به روزرسانی قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری باید انجام پذیرد. برای این منظور بازه تحلیلی ما در طول سال به سه فاز مختلف بر اساس نوع سنگ محل کار تقسیم شد در جدول ۶-۶۲ مقادیر فاکتورهای ریسک در طول بازه کارکرد مشاهده می‌شود. برای به روزرسانی نیز از روابط (۶-۵۵) و (۶-۵۶) استفاده شده و نتایج تحلیل در جدول ۶-۶۳ درج شد. در شکل ۶-۴۴ نیز توابع اساسی و به روزرسانی شده نرخ مخاطره و تعمیرات برای زیرسیستم‌های لودر و بلدوزر برای فازهای مختلف در طول نوبت صبح ترسیم شده است.

۶-۶-۵- تشکیل پیکربندی سیستم، تخمین قابلیت پاسخ‌دهی و پایش سیستم

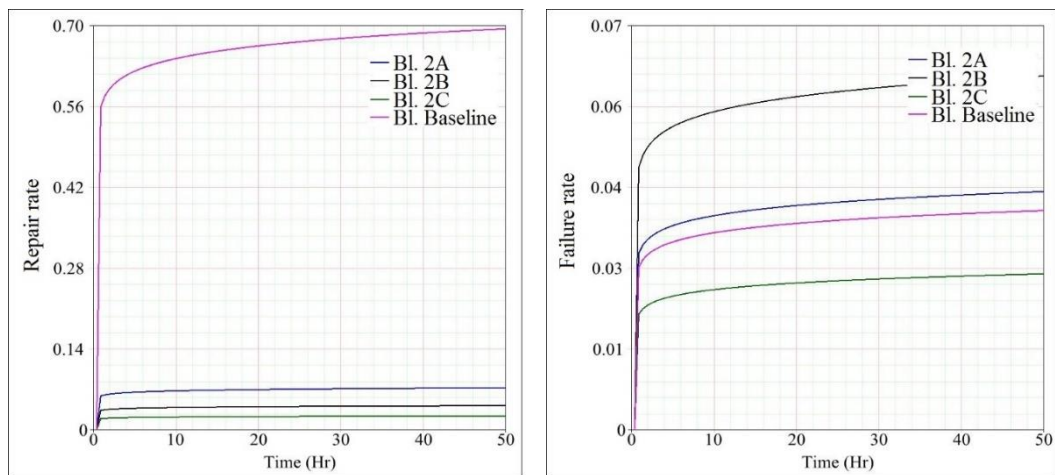
از آن جایی که زیرسیستم در طول روز نیز به علت تغییر نوبت کاری رفتار پویا بروز می‌دهد لذا مدل انتخابی برای توصیف رفتار سیستم باید قادر به پوشش این مسئله نیز باشد. دیاگرام فاز قابلیت اطمینان یک رویکردی عملی و مناسب برای حل این نوع مسائل در رفتار سیستم است.

جدول ۶-۶۲- فاکتورهای ریسک و مقادیر مورد نظر برای فازهای مختلف

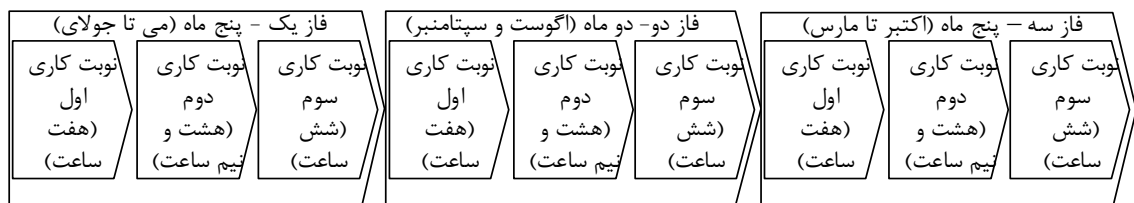
Phase 3 (From Oct till Mar)		Phase 2 (From Aug till Sep.)		Phase 1 (From May till Jul.)		زیرسیستم
فاکتورهای ریسک قابلیت تعمیرپذیری	فاکتورهای ریسک قابلیت اطمینان	فاکتورهای ریسک قابلیت تعمیرپذیری	فاکتورهای ریسک قابلیت اطمینان	فاکتورهای ریسک قابلیت تعمیرپذیری	فاکتورهای ریسک قابلیت اطمینان	
$(w_{d1} = 0, 1, 2)$ $(w_{d2} = 1, 1, 1)$	$(z_{d1} = 0, 1, 2)$ $(z_{d7} = 1, 1, 1)$ $(z_{d8} = 1, 1, 1)$	$(w_{d1} = 0, 1, 2)$ $(w_{d2} = 1, 1, 1)$	$(z_{d1} = 0, 1, 2)$ $(z_{d7} = 0, 0, 0)$ $(z_{d8} = 1, 1, 1)$	$(w_{d1} = 0, 1, 2)$ $(w_{d2} = 0, 0, 0)$	$(z_{d1} = 0, 1, 2)$ $(z_{d7} = 1, 1, 1)$ $(z_{d8} = 1, 1, 1)$	Wa.
$(w_{b1} = 0, 1, 2)$ $(w_{b2} = 1, 1, 1)$	$(z_{b1} = 0, 1, 2)$ $(z_{b5} = 1, 1, 1)$ $(z_{b7} = 1, 1, 1)$	$(w_{b1} = 0, 1, 2)$ $(w_{b2} = 1, 1, 1)$	$(z_{b1} = 0, 1, 2)$ $(z_{b5} = 0, 0, 0)$ $(z_{b7} = 1, 1, 1)$	$(w_{b1} = 0, 1, 2)$ $(w_{b2} = 0, 0, 0)$	$(z_{b1} = 0, 1, 2)$ $(z_{b5} = 0, 0, 0)$ $(z_{b7} = 0, 0, 0)$	Bl.
$(w_{l2} = 0, 0, 0)$ $(w_{l3} = 3, 3, 3)$	$(z_{l1} = 0, 1, 2)$ $(z_{l2} = 2, 2, 2)$ $(z_{l14} = 3, 3, 3)$ $(z_{l5} = 1, 1, 1)$	$(w_{l2} = 0, 0, 0)$ $(w_{l3} = 2, 2, 2)$	$(z_{l1} = 0, 1, 2)$ $(z_{l2} = 1, 1, 1)$ $(z_{l14} = 2, 2, 2)$ $(z_{l5} = 0, 1, 0, 1, 0, 1)$	$(w_{l2} = 0, 0, 0)$ $(w_{l3} = 0, 0, 0)$	$(z_{l1} = 0, 1, 2)$ $(z_{l2} = 0, 0, 0)$ $(z_{l14} = 0, 0, 0)$ $(z_{l5} = 1, 4, 1, 4, 1, 4)$	Lo.
$(w_{t2} = 0, 0, 0)$ $(w_{t3} = 3, 3, 3)$ $(w_{t-dummy} = 1, 1, 1)$	$(z_{t1} = 0, 1, 2)(z_{t3} = 0, 0, 0)$ $(z_{t4} = 2, 2, 2)(z_{t5} = 0, 0, 0)$ $(z_{t6} = 3, 3, 3)(z_{t9} = 0, 0, 0)$ $(z_{t10} = 0, 0, 0)(z_{t11} = 0, 0, 0)$ $(z_{t-dummy} = 1, 1, 1)$	$(w_{t2} = 0, 0, 0)$ $(w_{t3} = 2, 2, 2)$ $(w_{t-dummy} = 1, 1, 1)$	$(z_{t1} = 0, 1, 2)(z_{t3} = 1, 1, 1)$ $(z_{t4} = 1, 1, 1)(z_{t5} = 0, 0, 0)$ $(z_{t6} = 2, 2, 2)(z_{t9} = 0, 0, 0)$ $(z_{t10} = 1, 1, 1)(z_{t11} = 0, 0, 0)$ $(z_{t-dummy} = 1, 1, 1)$	$(w_{t2} = 0, 0, 0)$ $(w_{t3} = 0, 0, 0)$ $(w_{t-dummy} = 1, 1, 1)$	$(z_{t1} = 0, 1, 2)(z_{t3} = 0, 0, 0)$ $(z_{t4} = 0, 0, 0)(z_{t5} = 0, 0, 0)$ $(z_{t6} = 0, 0, 0)(z_{t9} = 0, 0, 0)$ $(z_{t10} = 0, 0, 0)(z_{t11} = 0, 0, 0)$ $(z_{t-dummy} = 1, 1, 1)$	DT. 1

جدول ۶-۶- به روزرسانی پارامترهای قابلیت اطمینان در فازهای تعریف شده و در نوبت صبح

Phase 3 (2 Months)			Phase 2 (2 Months)			Phase 1 (5 Months)			وسیله
۰/۳۷۵	۱۹/۰۹۰	۱/۰۶۲	۰/۳۷۵	۶/۶۳۹	۱/۰۶۲	۰/۳۷۵	۱۹,۰۹۰	۱/۰۶۲	Wa.
۰/۳۷۵	۴/۸۳۹	۱/۰۶۵	۰/۳۷۵	۱۸/۵۲۱	۱/۰۶۵	۰/۳۷۵	۲۶/۸۴۵	۱/۰۶۵	Bl.
۰/۵۹۲	۱۳/۴۳۸	۱/۱۶۵	۰/۵۹۲	۱۰/۳۳۱	۱/۱۶۵	۰/۵۹۲	۱۱/۶۶۸	۱/۱۶۵	Lo.
	۱۵/۰۹۴	۱/۱۰۹		۴۵/۹۷۷	۱/۱۰۹		۲۱/۴۸۸	۱/۱۰۹	D.T.1
	۱۴/۹۵۵	۱/۱۰۹		۴۵/۵۵۲	۱/۱۰۹		۲۱/۲۸۹	۱/۱۰۹	D.T.2
	۱۲/۰۱۲	۱/۱۰۹		۳۶/۵۸۸	۱/۱۰۹		۱۷/۱۰۰	۱/۱۰۹	D.T.3
	۱۲/۵۳۲	۱/۱۰۹		۳۸/۱۷۲	۱/۱۰۹		۱۷/۸۴۰	۱/۱۰۹	D.T.4
	۱۳/۴۰۹	۱/۱۰۹		۴۰/۸۴۳	۱/۱۰۹		۱۹/۰۸۹	۱/۱۰۹	D.T.5
	۱۳/۷۵۲	۱/۱۰۹		۴۱/۸۸۷	۱/۱۰۹		۱۹/۵۷۷	۱/۱۰۹	D.T.6



شکل ۶-۴۴- نرخ مخاطره و تعمیر اساسی به روزرسانی شده برای بلدوزر در فاز ۲ برای نوبت کاری مختلف در شکل ۶-۴۵- دیاگرام بلوکی قابلیت اطمینان برای سه فاز مشخص شده است. معدن در طول یک شبانه روز در سه نوبت جدا با ترکیب یکسان در حال فعالیت است که این سه نوبت با عناوین: نوبت A (۷ ساعت)، نوبت B (۸/۵ ساعت) و نوبت C (۶ ساعت) مشخص شده است.



شکل ۶-۴۵- دیاگرام فاز قابلیت اطمینان سیستم استخراجی

در واقع به طور ساده تر سیستم در دو حالت رفتار پویا دارد نخست در طول شبانه روز که نوبت‌ها عوض می‌شوند و بعدی در طول سال که با تغییرات جنس سنگ استخراجی اتفاق می‌افتد. در نهایت پس از پیکربندی سیستم قابلیت پاسخ‌دهی سیستم برای یک سال از فرایند تولید (۱۲ ماه) شبیه‌سازی شد. در جدول ۶-۶۴ نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود.

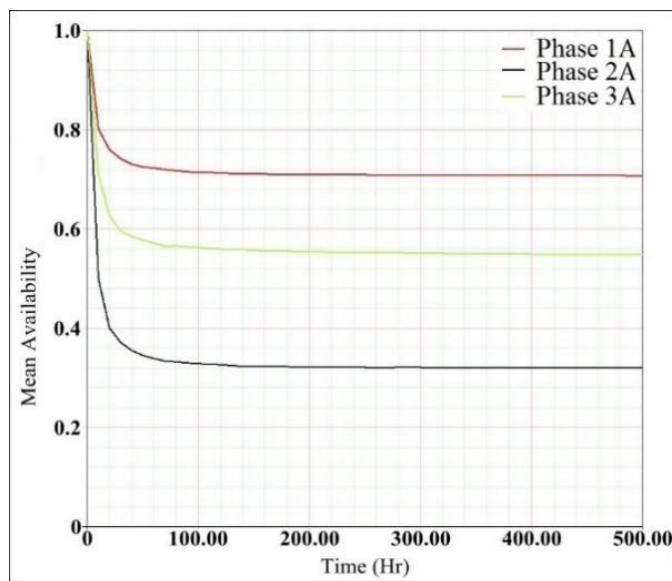
در این جدول ظرفیت عملیاتی زیرسیستم مقدار کل تولید / فراورده ماده معدنی توسط آن در طول زمان تحلیل که برای این مطالعه موردی یک سال در نظر گرفته شده است. ظرفیت اضافی مقدار اضافی که یک زیرسیستم در طول زمان کارکرد یا سرپا بودن توانایی تولید / فراورده آن را دارد. این حالت زمانی پیش می‌آید که یک زیرسیستم به علت وقوع خرابی در دیگر زیرسیستم‌ها و توقف سیستم قادر به تولید نباشد. به طور مثال اضافه تولید لودر می‌تواند ناشی از خرابی در تراک‌ها یا دریل واگن باشد. قابلیت دسترسی متوسط ($A_{mean}(t)$) نسبتی از زمان در طول انجام یک مأموریت است که سیستم برای کاربری در دسترس قرار دارد. این شاخص نشان دهنده مقدار متوسط تابع قابلیت دسترسی آنی ($A(u)$) در طول یک بازه مشخص $(0, T]$ است که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$A_{mean}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t A(u) du \quad (۸۰-۶)$$

تابع قابلیت دسترسی احتمال در حال کار بودن هر زیرسیستم در هر زمان تصادفی t است که به صورت رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-u)m(u)du \quad (۸۱-۶)$$

در این رابطه $R(t)$ قابلیت اطمینان سیستم و $m(u)$ تابع چگالی تجدید سیستم و $\int_0^t R(t-u)m(u)du$ احتمال کارکرد سیستم به طور مناسب از 0 تا t است بطوریکه آخرین تعمیر در زمان u ، $0 < u < t$ انجام گرفته باشد. شکل ۶-۴۶ متوسط قابلیت دسترسی زیرسیستم در طول فازهای مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص است قابلیت دسترسی متوسط سیستم در طول فاز ۳، برای فصل سخت زمستان، بسیار پایین تر از فاز ۱ و فاز ۲ است. در نهایت برای تعیین زیرسیستم بحرانی از شاخص خرابی بحرانی (FCI) استفاده شد که به عنوان درصدی از زمان تعریف می‌شود که یک خرابی از زیرسیستم خاص سبب خرابی سیستم می‌شود. همان طور که در جدول ۶-۶۴ مشاهده می‌شود در فاز ۱، لودر با FCI ۲۹ درصد و در فاز ۲، واگن دریل با FCI ۳۱ درصد خرابی سیستم را سبب شده و بحرانی ترین زیرسیستم می‌باشند. در فاز سوم نیز باز لودر با FCI ۴۳ درصد بحرانی ترین زیرسیستم است.



شکل ۶-۴۶- متوسط قابلیت دسترسی سیستم استخراجی در طول نوبت کاری A برای سه فاز

۶-۷- جمع بندی

در این فصل تحلیل‌های اصلی مطالعه مورد مطابق با الگوریتم اجرایی انجام گرفت. در این فصل به تحلیل رفتاری زیرسیستم و سیستم از منظر قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و دسترسی با و بدون تأثیر شرایط محیطی پرداخته شد. سپس به منظور اولویت‌بندی زیرسیستم‌ها و سیستم با توجه به نحوه کارکرد زیرسیستم و پیکربندی سیستم از ایده سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بدون تأثیر شرایط محیطی استفاده شد. در مرحله بعد نیز سنجش اهمیت قابلیت اطمینان و دسترسی با تأثیر شرایط محیطی مورد بررسی قرار گرفت. سپس دو شاخه اصلی از قابلیت پشتیبانی یعنی تخمین قطعات یدکی و تعمیر و نگهداری انجام گرفت. در تخمین قطعات یدکی مورد نیاز از داده‌های ۱۱ ساله لاستیک استفاده شده و تخمین برای حالت بدون تأثیر شرایط محیطی و با تأثیر شرایط محیطی انجام پذیرفت. سپس استراتژی نت پیشگیرانه برای یک زیرسیستم برای چهار حالت مختلف بررسی شده و برای هر یک بازه‌های مختلف نت پیشگیرانه پیشنهاد شد. در آخرین گام نیز تضمین تولید سیستم برای یک محیط پویا و ساختار سیستم پویا در طول انجام عملیات تحلیل شد. در فصل بعدی نتایج حاصل در این فصل به تشریح بررسی شده و پیشنهادات برای کارهای آتی ارائه می‌شود.

جدول ۶-۶-۶- تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی فاز برای سیستم استخراجی

نوبت کاری C					نوبت کاری B					نوبت کاری A					زیرسیستم	فاز
ظرفیت اضافی (تن)	ظرفیت عملیاتی (تن)	متوسط قابلیت دسترسی (%)	زمان کارکرد (Hr)	زمان افت (Hr)	ظرفیت اضافی (تن)	ظرفیت عملیاتی (تن)	متوسط قابلیت دسترسی (%)	زمان کارکرد (Hr)	زمان افت (Hr)	ظرفیت اضافی (تن)	ظرفیت عملیاتی (تن)	متوسط قابلیت دسترسی (%)	زمان کارکرد (Hr)	زمان افت (Hr)		
۲۹۷۸۲	۱۸۶۶۵۷	۶۱	۵۶۴	۳۶۶	۸۲۸۶۹	۳۵۹۸۷۳	۸۸	۱۱۵۳	۱۶۵	۱۰۳۷۶۱	۲۷۸۹۱۰	۹۲	۹۹۷	۸۸	Wa.	
۱۶۴۳۵	۱۶۷۳۸	۹۴	۸۷۳	۵۷	۱۳۸۲۴	۳۲۵۹۵	۹۳	۱۲۲۲	۹۶	۱۲۹۸۶	۲۵۳۳۲	۹۳	۱۰۰۸	۷۷	Bl.	
۱۰۹۹۰۷	۱۴۵۸۲۶	۹۲	۸۵۲	۷۸	۴۹۳۵۸	۲۸۱۱۵۱	۸۴	۱۱۰۲	۲۱۶	۲۶۵۳۹	۲۱۷۸۹۸	۷۵	۸۱۵	۲۷۰	Lo.	
۱۶۹۵	۱۸۹۸۳	۹۳	۸۶۲	۶۸	۵۱۴	۲۸۲۷۴	۹۱	۱۲۰۰	۱۱۸	۲۶۲	۲۲۷۲۳	۸۸	۹۵۸	۱۲۷	DT.1	
۱۶۹۹	۱۹۲۳۶	۹۴	۸۷۲	۵۸	۵۲۱	۲۸۶۹۷	۹۲	۱۲۱۷	۱۰۰	۲۶۴	۲۳۱۹۵	۹۰	۹۷۷	۱۰۸	DT.2	
۱۶۷۴	۱۸۶۶۰	۹۱	۸۴۷	۸۳	۵۰۵	۲۷۷۵۶	۸۹	۱۱۷۸	۱۴۰	۲۵۴	۲۲۱۶۷	۸۶	۹۳۴	۱۵۱	DT.3	
۱۶۵۵	۱۸۵۵۳	۹۱	۸۴۲	۸۸	۵۰۰	۲۷۵۱۱	۸۹	۱۱۶۷	۱۵۰	۲۵۴	۲۱۹۲۰	۸۵	۹۲۴	۱۶۱	DT.4	
۱۶۹۰	۱۸۹۱۹	۹۲	۸۵۹	۷۱	۵۱۲	۲۸۱۴۴	۹۱	۱۱۹۴	۱۲۳	۲۶۱	۲۲۵۹۴	۸۸	۹۵۲	۱۳۳	DT.5	
۱۶۹۶	۱۸۹۸۵	۹۳	۸۶۲	۶۸	۵۱۳	۲۸۲۲۷	۹۱	۱۱۹۸	۱۲۰	۲۵۹	۲۲۶۷۲	۸۸	۹۵۵	۱۳۰	DT.6	

ادامة جدول ٤٤-٤

٣٧٤٤٢	٤٤٤٤	٤٧	١١٠	١٢٤	٤٤٤٥٨	١٣٣٨٠	٤٤	١٥١	١٨٩	٧٩١٩	١٣٨٤٠	٢٠	٥٧	٢٢٣	Wa.	٢:٩
٨١٠٥	٣٨٩	٩٤	٢٢٤	١٠	١٠٧٢٤	١٠٨٠	٩١	٣١١	٢٩	٨٢٥٤٢	٥٣٢٥	٩١	٢٥٤	٢٤	Bl.	
٣٧٣١٩	٣٤٧٣	٥٨	١٣٤	٩٨	٥٤٤٥٨	١٠٤٥٣	٤٤	٢٢٤	١١٤	٤٤٩٨٥	١٠٨٢٨	٩٣	٢٥٩	٢١	Lo.	
٤٨٥٠	٥٧٤	٩٧	٢٢٤	٨	٤٠٩٨	١٧٢٢	٩٤	٣٢٤	١٤	٤٥٤٨	١٧٧٩	٩٤	٢٤٤	١٤	DT.1	
٤٨٨٠	٥٧٧	٩٧	٢٢٧	٧	٤١٤٤	١٧٢٨	٩٤	٣٢٨	١٢	٤٤١٤	١٧٩٠	٩٥	٢٤٧	١٣	DT.2	
٤٨٢١	٥٧٠	٩٤	٢٢٥	٩	٤٠٣٤	١٧٠٧	٩٥	٣٢٣	١٧	٤٥٢١	١٧٤٩	٩٣	٢٤١	١٩	DT.3	
٤٧٩٠	٥٧٠	٩٥	٢٢٣	١١	٤٠١٣	١٤٨٩	٩٤	٣٢١	١٩	٤٤٩٢	١٧٣٨	٩٣	٢٤٠	٢٠	DT.4	
٤٨٣٩	٥٧٧	٩٤	٢٢٤	٨	٤٠٨٧	١٧١٤	٩٤	٣٢٥	١٥	٤٥٥٨	١٧٧٨	٩٤	٢٤٤	١٤	DT.5	
٤٨٥٥	٥٧٢	٩٧	٢٢٤	٨	٤٠٩٩	١٧١٧	٩٤	٣٢٤	١٤	٤٥٤٩	١٧٧١	٩٤	٢٤٤	١٤	DT.6	
١٧٠٠٩٣	١٧٧٢٤	٥٤	٤٨٩	٤١١	٢٠٠٢٠١	٨٤٢٤٢	٥٩	٧٤٤	٥٢٩	١١٢٤٥١	١٨٩٢٧٠	٧٥	٧٨٤	٢٤٤	Wa.	٢:١٠
٢٩٤٣٩	٧٥٣	٨٨	٧٩٥	١٠٥	٣٠٨١٤	٣٣٣٠	٧٠	٨٩٩	٣٧٤	١١٠٥٣	٤٠٨٨	٤٣	٤٥١	٥٩٩	Bl.	
١٢٣٢٤٨	١٣٨٤٧	٥١	٤٥٧	٤٤٣	١٥٨٧١٤	٤٧٣٧٧	٥٩	٧٥٤	٥٢١	٧٩٢٨٣	١٤٧٨٤٨	٧٢	٧٥٧	٢٩٣	Lo.	
١٧٢٥٢	٢٣٠٣	٩١	٨١٥	٨٥	١٥٩٤١	١١١٣٧	٨٩	١١٢٩	١٤٤	٩٥٩	٢٠٤٩٩	٨٥	٨٩٤	١٥٤	DT.1	
١٧٥١٣	٢٣٥٢	٩٢	٨٢٨	٧٢	١٤١٤٧	١١٤١٥	٩٠	١١٤٩	١٢٤	٩٤٣	٢١٠١٠	٨٧	٩١٤	١٣٤	DT.2	
١٤٩٠٥	٢٢٥٤	٨٩	٧٩٨	١٠٢	١٥٤٠١	١٠٨٣٤	٨٤	١١٠٢	١٧٣	٩٤٨	١٩٨٤٠	٨٢	٨٤٤	١٨٤	DT.3	
١٤٧٣٨	٢٢٣٤	٨٨	٧٩٠	١١٠	١٥٤١٤	١٠٧٠٥	٨٥	١٠٨٨	١٨٧	٩٢٥	١٩٥٥٤	٨١	٨٥٣	١٩٧	DT.4	
١٧١٩٤	٢٢٨٤	٩٠	٨١٢	٨٨	١٥٨٢٢	١١٠٩٠	٨٨	١١٢١	١٥٤	٩٥٩	٢٠٣٢٤	٨٤	٨٨٧	١٤٣	DT.5	
١٧٢٥٣	٢٢٨٩	٩٠	٨١٤	٨٤	١٥٨٨٢	١١١٠٧	٨٨	١١٢٥	١٥٠	٩٨٣	٢٠٣٨٤	٨٥	٨٩٠	١٤٠	DT.6	

فصل هفتم
نتیجه‌گیری



۷-۱- نتیجه‌گیری

این رساله در راستای گسترش دانش تحلیل عملکرد سیستم با شاخص‌های چون قابلیت اطمینان، دسترسی، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RAMS) تهیه شده و با وارد کردن تأثیر شرایط محیطی بر این شاخص‌ها یک گام فراتر گذاشته شد. همچنین چالش‌های عملیاتی و فناوریانه برای ارتقای ظرفیت عملیاتی و قابلیت پاسخ‌دهی سیستم از دیدگاه RMS مرور شده و یافته‌های مطالعاتی در حوزه مهندسی معدن به کار گمارده شد. بدین منظور یک روش منسجم با خروجی چندگانه ارائه شد که شروع آن با تحلیل عملکرد سیستم است. در واقع نخستین مرحله اقدام به تعیین رفتار زیرسیستم‌ها بر اساس شاخص‌های عملکردی RAMS می‌باشد. سپس با استفاده از این شاخص‌ها مباحث سنجش اهمیت (در سطح سیستم و زیرسیستم)، تخمین قطعات یدکی (در سطح جزء)، نگهداری و تعمیرات (در سطح زیرسیستم) و قابلیت پاسخ‌دهی (در سطح سیستم و زیرسیستم) مورد بررسی قرار گرفت. مراحل اجرای این رویکرد را به طور خلاصه می‌توان در سه مرحله کلی تقسیم‌بندی نمود:

- جمع‌آوری داده‌های عملیاتی و به‌کارگیری اطلاعات موجود برای دستیابی به فاکتورهای ریسک
- گزینش یک رویکرد آماری مناسب برای تحلیل RAMS
- ادغام یافته‌ها با موضوعات تجاری و فنی

همان‌طور که اشاره شد برای تعیین رفتار جزء/زیرسیستم در این رویکرد علاوه بر داده‌های زمانی (تاریخی)، تأثیر شرایط محیطی در قالب فاکتورهای ریسک نیز در محاسبات وارد می‌شود. امروزه در صنعت با محیط بشدت پویا و متغیر پرداختن به مسائل رفتاری ماشین‌آلات و تجهیزات امری دشوار ولی ضروری است. شرایط محیطی تأثیر انکارناپذیری بر عملکرد سیستم و شاخص‌های عملکردی آن (RAMS) دارد. از آنجایی که تأثیر فاکتورهای ریسک برای سیستم‌های مختلف متفاوت است لذا انتخاب این فاکتورها بایستی پس از مطالعات و بررسی‌های دقیق محیط کاربری انتخاب شوند. این عوامل بشدت بر رفتار سیستم مؤثر بوده و برای دستیابی به محاسبات واقعی RAMS حتماً باید مد نظر قرار گیرند چرا که آن‌ها قادر بهبود یا تنزل نرخ مخاطره هستند که این مسئله افت قابلیت اطمینان، افزایش قابلیت تعمیرپذیری، افزایش تعدد اجرای نت و یا افزایش مصرف قطعات یدکی به دنبال خواهد داشت. تأثیر شرایط محیطی بر شاخص‌های عملکردی از دو وجهه مختلف قابل بررسی است: وجه نخست تأثیر بر عملکرد سیستم و وجه دوم تأثیر بر عملکرد افراد.

به‌منظور کاربردی و عملیاتی کردن روش‌های پیشنهاد شده و دستیابی به خروجی‌های واقعی در سر زمین از ماشین‌آلات‌های مختلف سیستم استخراج دن مس سونگون (مس سونگون) استفاده شد.

سیستم استخراجی معدن با توجه به روش استخراجی آن متشکل از دستگاه‌های حفاری (واگن دریل)، بارکننده‌ها (لودر، بیل مکانیکی و شاول)، بلدوزر و بابرها (تراک) است. در ادامه نتایج به دست آمده بر اساس الگوریتم اجرائی ارائه شده و مطالعات انجام گرفته برای هر سیستم (با زیرسیستم‌های مربوطه) به شرح ذیل بیان می‌شود:

✓ **قابلیت دسترسی:** در اولین مرحله از الگوریتم قابلیت دسترسی زیرسیستم بر اساس دو شاخص اصلی آن یعنی قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری برای سیستم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل برای این سیستم نشان داد که قابلیت اطمینان زیرسیستم لودر رو به تنزل است و عملاً پس از سپری کردن ۱۰۰ ساعت کاری به صفر می‌رسد که این به معنای افزایش فراوانی خرابی و کاهش زمان فعال دستگاه است. از سوی دیگر هم‌زمان با افزایش فراوانی خرابی‌ها، فراوانی تعمیرات نیز افزایش می‌یابد. با این وجود قابلیت اطمینان این زیرسیستم در مقایسه با دو زیرسیستم بلدوزر و تراک بالاتر است. تحلیل قابلیت تعمیرپذیری برای زیرسیستم لودر در مقایسه با دو زیرسیستم بلدوزر و تراک نیز نشان داد که با وجود بهبود مختصر در این شاخص برای لودر، زمان تلف شده برای تعمیرات آن به شدت بالا بوده و همین امر سبب افت شدید قابلیت دسترسی لودر شده است. لذا پیشنهاد می‌شود فعالیت‌های اجرایی برای ارتقای قابلیت دسترسی سیستم بر اساس شاخص قابلیت دسترسی اولویت‌بندی شده و تمرکز اصلی بر پارامتر قابلیت تعمیرپذیری لودر باشد. از جمله فعالیت‌هایی که می‌توان برای افزایش تعمیرپذیری انجام داد: بهبود وضعیت انبارداری، پیش‌بینی دقیق از تعداد قطعات یدکی مورد نیاز، افزایش دانش فنی اکیپ تعمیرات، افزایش کارکنان تعمیرگاه، دسترسی آسان‌تر به محل تعمیرگاه و بهبود لوازم و ابزارآلات مورد استفاده برای تعمیرات اشاره کرد.

✓ **تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر شرایط محیطی:** در این بخش با توجه به تعمیرپذیری و وجود روند از فرایند قانون توانی (PLP) استفاده شد. نتایج حاصل از این مدل‌ها به علت یک بعدی بودن یعنی تحلیل عملکرد تنها با داده‌های زمان و صرف نظر از تأثیر شرایط محیطی (فاکتورهای ریسک) دورتر از حالت واقعی می‌باشند. در گذشته معمول‌ترین رویکردها در مواجهه با فاکتورهای ریسک حذف آن‌ها از محاسبات یا تقسیم داده‌ها بر اساس این فاکتورها بود. تقسیم داده‌ها امکان بروز مشکلاتی مانند عدم وجود تعداد کافی داده برای انجام تحلیل‌های معنادار در برخی گروه‌ها یا تشابه بین گروه‌ها را به همراه داشته که صرف نظر از تحلیل‌ها را سبب می‌شود. به منظور پیشگیری از بروز این مشکلات در این رساله، مدل نرخ مخاطرات متناسب (PHM) با توانایی تحلیل هم‌زمان داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک برای تحلیل قابلیت اطمینان زیرسیستم لودر به کار گرفته شد. نتایج تحلیل حاکی از اختلاف سه برابری بهره‌وری در صورت وارد کردن فاکتورهای ریسک در مقایسه

باحالتی است که از آن‌ها صرف نظر می‌شود. تابع قابلیت اطمینان به دست آمده در این مرحله سرآغاز تحلیل‌های گسترده در مورد عملکرد ماشین می‌باشد. تابع قابلیت اطمینان در واقع بیانگر رفتار زمان‌های سرپایی دستگاه است که می‌توان در پیشنهاد برنامه نگهداری و تعمیرات مناسب، تخصیص قابلیت اطمینان مناسب در سیستم‌های پیچیده، تحلیل ظرفیت عملیاتی، تحلیل قابلیت دسترسی و حتی برای برنامه‌ریزی عملیات پشتیبانی و لجستیک از آن استفاده کرد.

✓ تحلیل قابلیت تعمیرپذیری مبتنی بر شرایط محیطی: هر زیرسیستم در طول عمر مفید خود یا در حال کارکرد است یا فعال و یا تعمیرات که تعمیرپذیری شاخه آخر یعنی وضعیت تعمیرات را مورد بررسی قرار می‌دهد. بنابراین استفاده بهینه از زیرسیستم منوط به حصول اطمینان از اجرای مناسب نت و بازگشت سریع هر یک از زیرسیستم‌ها و در نتیجه سیستم می‌باشد. از سوی دیگر شرایط محیطی معدن به شدت پویا بوده و عمر عملیاتی سیستم به عوامل گسترده‌ای وابسته است. تجربه اپراتور، تقاضای تولید متغیر، تغییرات ناشی از عوض شدن جنس سنگ، ... همه مؤثر بر تعمیرات و ویژگی‌های نت اجرائی می‌باشند، بنابراین تحلیل این شاخص باید به صورت چندجانبه انجام شود. شاخص ارائه شده در این رساله برای تحلیل قابلیت تعمیرپذیری متشکل از دو عنصر اصلی شامل ویژگی عملکردی که از داده‌های تاریخی (زمان انجام تعمیرات) به دست آمده و تأثیر شرایط محیطی که از طریق فاکتورهای ریسک در محاسبات وارد می‌شود. مطالعه سیستمی متشکل از یک زیرسیستم لودر، یک زیرسیستم بلدوزر و دو زیرسیستم تراک نشان داد که قابلیت تعمیرپذیری برای شرایط محیطی متفاوت مقادیر مختلفی دارد. از این رو استفاده از روش‌های ایستا و کلاسیک آماری که قادر به دربرگیری تأثیر شرایط محیطی نمی‌باشند سبب گمراهی مدیران و طراحان در رویارویی با شرایط محیطی و مقادیر پویا خواهد می‌شوند. نتایج تحلیل نشان داد که احتمال انجام تعمیرات جزئی (لایه ۱) و تعمیرات اساسی (لایه ۲) در ۸ ساعت برای زیرسیستم لودر به ترتیب تقریباً برابر ۲۵ و ۸۰ درصد است. درحالی‌که این احتمال (تعمیرپذیری) برای تابع اساسی با صرف نظر از تأثیر فاکتورهای ریسک تقریباً ۳۰ درصد است. یعنی شرایط محیطی مانند تعمیرات اساسی باعث تضعیف شدن اجرای عملیات نت می‌گردد و تعمیرات در زمانی بیشتر از نت جزئی یا شرایط اساسی انجام می‌گیرد. نتایج نشان داد که مؤثرترین راه برای افزایش قابلیت تعمیرپذیری این سیستم به ترتیب بهبود تعمیرپذیری لودر، تراک ۱ و تراک ۲ می‌باشد. برخی از راهکارهای بهبود قابلیت تعمیرپذیری (افزایش نرخ تعمیر یا کاهش زمان‌های بین تعمیرات) در سیستم‌های تعمیرپذیر را به این صورت می‌توان ارائه کرد: حفظ بار وارده بر سیستم در حد نرمال در طول بازه کارکرد،

کمینه‌سازی احتمال عدم دستیابی به قطعات یدکی در زمان نیاز، به‌کارگیری گروه نت متخصص و بهره‌گیری از ابزارآلات و روش‌های نوین در اجرای نت.

✓ **سنجش اهمیت قابلیت دسترسی بدون تأثیر شرایط محیطی:** برای اولویت‌بندی زیرسیستم ایده سنجش اهمیت قابلیت دسترسی سیستم ارائه شد و اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس نرخ مخاطره و نرخ تعمیرات اصلاح شده و به عنوان بسط‌هایی از آن معرفی شدند. در مرحله بعد اهمیت قابلیت دسترسی نرمالیزه برای نخستین بار تعریف شد. سیستم مورد تحلیل برای این ایده نیز شامل یک زیرسیستم واگن دریل، یک زیرسیستم لودر، یک زیرسیستم بلدوزر و پنج زیرسیستم تراک انتخاب گردید. سپس برای تحلیل قابلیت دسترسی سیستم پیکربندی آن در یک شبکه سری-موازی با حالت اول (کارکرد زیرسیستم‌های بدون خرابی در صورت وقوع خرابی در یک زیرسیستم) قرار گرفته و اولویت‌بندی زیرسیستم‌ها برای ارتقای قابلیت دسترسی بر اساس اهمیت انجام شد. طبق نتایج به دست آمده برای این شاخص در سیستم استخراجی ارتقای قابلیت دسترسی سیستم مستلزم بهبود قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های واگن دریل می‌باشد. همچنین برای زیرسیستم لودر ارتقای قابلیت اطمینان در مقایسه با قابلیت تعمیرپذیری در اولویت بالاتری قرار گرفت. در کل سیستم نیز، قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم واگن دریل در وضعیت بحرانی قرار داشته و مستلزم توسعه است. البته در حالت کلی توجه به وضعیت خرابی در زیرسیستم‌ها، به‌استثنای زیرسیستم واگن دریل، برای بهبود قابلیت دسترسی در اولویت قرار دارد. سنجش اهمیت قابلیت دسترسی سیستم دارای دو خروجی عمده است، نخست اینکه زیرسیستم‌ها را براساس قابلیت دسترسی اولویت‌بندی نموده و نحوه بهبود قابلیت دسترسی سیستم را نشان می‌دهد و دوم اینکه برای هر زیرسیستم نحوه ارتقای قابلیت دسترسی را مشخص می‌کند یعنی بهبود قابلیت دسترسی مستلزم بهبود قابلیت اطمینان یا قابلیت تعمیرپذیری است.

✓ **سنجش اهمیت قابلیت اطمینان با تأثیر شرایط محیطی:** برای بسط موضوع سنجش اهمیت در گام بعدی اهمیت قابلیت اطمینان با وارد کردن تأثیر شرایط محیطی معدن در تحلیل مطرح شد. این شاخص یک رویکرد عام بوده و مختص محیط معدن یا سیستم‌های معدنی نمی‌باشد. در این رویکرد پس از محاسبه قابلیت اطمینان سیستم از ایده سنجش اهمیت برای تخصیص منابع و اولویت‌بندی فعالیت‌ها برای سیستم و زیرسیستم استفاده می‌شود. این شاخص شامل ویژگی‌های عملکردی، شرایط محیطی عملیات و تغییرات آن‌ها در طول زمان است. در این بخش سنجش اهمیت سیستم استخراجی متشکل از دو زیرسیستم لودر و هشت زیرسیستم تراک در یک ساختار سری-موازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل حاکی از آن بود که بهترین گزینه برای ارتقای قابلیت اطمینان

کل سیستم بهبود قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های لودر است. برای این امر می‌توان از نت پیشگیرانه، کنترل شرایط محیطی مانند پیشگیری از وارد شدن تنش‌های بالا به سیستم یا انجام تعمیرات سیستم تحت تنش‌های نرمال استفاده کرد.

✓ **سنجش اهمیت قابلیت دسترسی مبتنی بر تأثیر شرایط محیطی:** برای ادغام تأثیرات عملکرد (زمان‌های فعال و غیرفعال) و شرایط محیطی در یک شاخص برای نخستین بار، اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس تأثیر شرایط محیطی ارائه شد. این شاخص به‌نوعی کامل‌تر از دو شاخص قبلی می‌باشند چرا که هم ویژگی‌های عملکردی را با دو شاخص قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری در قالب قابلیت دسترسی در نظر گرفته، هم تأثیر شرایط محیطی را با فاکتورهای ریسک بر آن‌ها وارد شده و هم ساختار سیستم و محل قرارگیری زیرسیستم‌ها را در نظر می‌گیرد. این شاخص برای ارزیابی سیستم استخراجی متشکل از یک زیرسیستم واگن دریل، یک زیرسیستم لودر، یک زیرسیستم بلدوزر و پنج زیرسیستم تراک به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که افزایش قابلیت دسترسی سیستم درگرو افزایش قابلیت دسترسی دو زیرسیستم لودر و بلدوزر است. برای دستیابی به این ارتقا در قابلیت دسترسی سیستم نیز بایستی بهبود نرخ مخاطره این زیرسیستم‌ها بیشتر از نرخ تعمیرات آن‌ها مورد توجه قرار گیرد، چرا که تأثیر $MTTF$ آن‌ها بر قابلیت دسترسی سیستم به ترتیب تقریباً ۷ و ۴ برابر بیشتر از تأثیر $MTTR$ دو زیرسیستم مذکور است. برای بهبود قابلیت اطمینان (کاهش نرخ مخاطره یا افزایش $MRRF$) نیز می‌توان از طریق بهبود سیستم نت، کمینه‌سازی احتمال عدم دسترسی به قطعات یدکی یا افزایش کیفیت آلیاژ تجهیزات اقدام کرد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که اهمیت یک زیرسیستم یا اولویت آن در سیستم جدای از ویژگی‌های عملکردی و تأثیر شرایط محیطی وابسته به هزینه‌های مختلف همچون هزینه‌های بهبود قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری، هزینه‌های ناشی از خرابی اجزای، هزینه‌های تعمیرات و ... است. لذا وارد کردن آن‌ها در سنجش اهمیت سیستم ما را به سمت پاسخ‌های صحیح‌تر و حقیقی‌تر سوق خواهد داد.

✓ **مدیریت قطعات یدکی بدون تأثیر شرایط محیطی:** برای دستیابی به اهداف یک برنامه مؤثر مدیریت قطعات یدکی، یک روند منسجم با بینش چندگانه باید انجام گیرد. از این رو الگوریتمی مرکب از وضعیت عملکردی سیستم در قالب قابلیت اطمینان و روش‌های مدیریت برای پیش‌بینی قطعات یدکی مورد نیاز ارائه شد. روش تخمین قطعات یدکی مورد نیاز مبتنی بر قابلیت اطمینان از جمله رویکردهای کاربرپسند که از آن برای تخمین تعداد لاستیک‌های مورد نیاز برای تراک‌های صد تنی معدن استفاده شد. تعداد لاستیک‌های مورد نیاز به ازای سه تخمین حدپائین، بهینه و بالا از پارامترهای قابلیت اطمینان محاسبه شد. این محاسبات نشان داد که هر چه میزان قابلیت اطمینان

جزء بالاتر وضعیت کارکرد آن بهتر، تعداد خرابی کمتر و لذا تعداد لاستیک مورد نیاز کمتر است. این موضوع را می‌توان در مورد مقادیر $\frac{3}{2}$ ، ۲ و $\frac{1}{2}$ عدد لاستیک مورد نیاز در طول یک سال برای حد پائین، بهینه و بالای تخمین زده مشاهده کرد. همچنین نتایج تحلیل برای زمان سفارش لاستیک یدکی نشان داده که در حالت تخمین بهینه از پارامترهای قابلیت اطمینان، زمانی که تعداد لاستیک یدکی در انبار تقریباً به یک عدد رسید باید ۲ عدد لاستیک سفارش داده شود.

✓ مدیریت قطعات یدکی با تأثیر شرایط محیطی: پیش‌بینی قطعات یدکی مورد نیاز و پشتیبانی محصول بر اساس ویژگی‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری اجزای و زیرسیستم‌ها در ادغام با تأثیر شرایط محیطی یکی از مؤثرترین استراتژی‌های پیشگیری از توقفات ناخواسته است. نتایج مطالعات انجام گرفته در رابطه با تعداد لاستیک‌های مورد نیاز تأثیر چشمگیر و بارز شرایط محیطی در تحلیل‌های قطعات یدکی را نشان داد. در این مطالعه ویژگی‌های عملکردی و لجستیک لاستیک‌ها برای داده‌های ۱۱ ساله و فاکتورهای ریسک لاستیک‌ها با مدل‌های رگرسیونی PHM و SCRM مورد بررسی قرار گرفت. وجود فاکتورهای ریسک وابسته به زمان (مدل تراک و برند لاستیک) باعث شد تا داده‌های لاستیک تراک در ۱۲ لایه تقسیم شوند. برازش مدل SCRM نشان داد که فاکتورهای ریسک محور، بارندگی و دما به ترتیب مؤثرترین عوامل در رفتار خرابی‌های لاستیک تراک می‌باشند و لذا تعداد قطعات یدکی مورد نیاز را به شدت تحت تأثیر قرار خواهند داد. نتایج تحلیل قابلیت اطمینان با مدل PHM برای لاستیک لودر نیز نشان داد که نرخ مخاطره لاستیک در لودر کوماتسو ۴۷۰ تقریباً $\frac{2}{91}$ برابر بیشتر از سایر مدل‌های لودر است. همچنین فاکتورهای ریسک مدل لودر، برند لاستیک، دما و عمق آج لاستیک مؤثرترین فاکتورهای ریسک در رفتار خرابی‌های لودر و بالأخص در تعداد لاستیک مورد نیاز است. در رابطه با مدیریت انبارداری قطعات یدکی که بر هزینه‌های چرخه تولید محصول تأثیر دارد باید پس از تعیین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز، مدیریت انبارداری بر اساس هزینه‌های قطعات یدکی، هزینه‌های سفارش‌دهی، هزینه‌های انبارداری انجام می‌پذیرفت. که در این مرحله از مطالعه نیز اختلاف بارز بین زمان سفارش و سطح انبار در دو حالت با و بدون در نظرگیری تأثیر شرایط محیطی برای لودر (حدود ۵۰ درصد) و تراک نشان دهنده تأثیر انکارناپذیر شرایط محیطی در مقوله انبارداری قطعات می‌باشد.

✓ نگهداری و تعمیرات: در نخستین گام از این بخش برنامه زمانی مناسب اجرای نت پیشگیرانه برای زیرسیستم با استفاده از رفتار خرابی و تأثیر شرایط محیطی بر آن ارائه شد. سپس تأثیرات اجرای نت از منظر نت ناقص (نزدیک‌ترین حالت به شرایط واقعی) در مطالعات وارد شده و مدل تکمیل‌تر شد. در واقع ترکیبی از شرایط محیطی و نحوه اجرای نت مؤثر بر استراتژی ارائه شده می‌باشد. یا

به طور ساده ترکیبی از اجرای نت پیشگیرانه بد با شرایط محیطی خوب برابر با اجرای نت پیشگیرانه خوب و شرایط محیطی بد خواهد بود. در این رساله حفظ قابلیت اطمینان یک زیرسیستم تراک کوماتسو HD785-5 در سطح ۸۰ درصد به عنوان هدف استراتژی نت در نظر گرفته شد و در نهایت بازه‌های نت پیشگیرانه پیشنهادی از نوع "محدود به قابلیت اطمینان" قلمداد شد. تحلیل‌های قابلیت اطمینان برای این زیرسیستم طی چهار نوع تابع قابلیت اطمینان انجام گرفته و چهار نوع استراتژی نت پیشگیرانه پیشنهاد شد. در استراتژی اول نه شرایط محیطی و نه تأثیر نت ناقص در آن وارد شد، در استراتژی دوم تأثیر شرایط محیطی وارد شده ولی از تأثیر نت ناقص صرف نظر شد، استراتژی سوم تنها بر اساس تأثیر نت ناقص پیشنهاد شده و از تأثیر شرایط محیطی صرف نظر شد و در استراتژی چهارم که کامل‌ترین استراتژی است، هم تأثیرات شرایط محیطی وارد شده و هم تأثیرات نت ناقص در نظر گرفته شد. سپس با در نظر گرفتن تابع قابلیت اطمینان برای هر استراتژی، زمان مناسب انجام تعمیرات محاسبه شد. بایستی توجه نمود که بازه نت پیشگیرانه پیشنهادی در دو استراتژی نخست از نوع ادواری بوده یعنی در طول اجرا همیشه ثابت است ولی بازه‌های ارائه شده در دو استراتژی سوم و چهارم از نوع پریودیک است یعنی در هر اجرای نت بازه پیشنهادی بر اساس تأثیرات نت اجرائی به روزرسانی می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که اولین نت پیشگیرانه برای تراک ۵ ساعت پس از کارکرد، دومین فعالیت ۴ ساعت پس از کارکرد و سومین و چهارمین فعالیت باید در ۳/۵ و ۳ ساعت بعدی باید انجام پذیرد تا قابلیت اطمینان سیستم با استراتژی چهارم و به ازای مقدار یک برای فاکتورهای ریسک در سطح ۸۰ درصد حفظ شود. در واقع اختلاف بازه‌های پیشنهادی در این روش نشان دهنده تأثیرات نت ناقص است که در صورت صرف نظر از آن استراتژی دوم با زمان پیشنهادی ثابت ۵ ساعت اجرا خواهد شد. در رابطه با تأثیر شرایط محیطی بر استراتژی نت نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها نشان داد که به ازای مقادیر مختلف برای فاکتور ریسک "فاصله حمل" بازه‌های مختلف نت ارائه خواهد شد که این به معنای تأثیر انکارناپذیر شرایط محیطی بر استراتژی نت است. همچنین تحلیل‌ها به ازای تأثیرات مختلف نت پیشگیرانه در قالب نت ناقص (حالت اساسی، بدتر از حالت اساسی و بهتر از حالت اساسی) تکرار شد که در این حالت نیز بازه‌های گوناگونی به دست آمد. به طور کلی می‌توان بیان داشت که در ارائه بازه نت پیشگیرانه واقعی حتماً باید استراتژی متشکل از سه عنصر اصلی یعنی شاخص عملکرد سیستم (قابلیت اطمینان)، تأثیر شرایط محیطی (فاکتورهای ریسک) و تأثیرات اجرای نت پیشگیرانه (نت ناقص) در نظر گرفته شود که استراتژی نت پیشگیرانه ارائه شده برای زیرسیستم تراک از این نوع بود. با توجه به اینکه تاکنون

برنامه نت مشابهی برای سیستم‌های معدنی ارائه نشده، رهیافت ارائه شده می‌تواند به‌عنوان یک الگو مبنای تصمیم‌گیری‌های آینده برای سایر سیستم‌های معدنی مطرح باشد.

✓ تضمین تولید در شرایط محیطی پویا: در دنیای واقعی مهندسين و مدیران با مشکلات عدیده‌ای در فرایند تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی یک سیستم در شرایط محیطی پویا روبرو می‌باشند. شرایط محیطی پویا جدای از تغییر ویژگی‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، پشتیبانی و ظرفیت عملیاتی (RMSF) زیرسیستم‌ها قادر به تغییر پیکربندی سیستم نیز می‌باشند. این تأثیرات قابلیت دسترسی سیستم را به‌طور پیچیده‌ای تحت تأثیر قرار داد و تحلیل قابلیت پاسخ‌دهی را با مشکل مواجه خواهد کرد. در این رساله رویکردی سامانمند برای تحلیل کمی تأثیرات شرایط محیطی پویا بر قابلیت پاسخ‌دهی سیستم توسعه داده شد. این مدل در نخستین گام شرایط محیطی اساسی را برای همه زیرسیستم‌ها را تعریف کرده و سپس ویژگی‌های RMSF زیرسیستم‌ها تحت شرایط محیطی اساسی را کمی‌سازی می‌کند. در صورت تغییر شرایط محیطی پارامترهای RMSF نیز به روزرسانی شده و تغییر خواهد کرد. این به روزرسانی کاری است بس دشوار و نیازمند داده‌ها و اطلاعات دقیق درباره مکانیسم خرابی، تعمیرات و فرایندهای لجستیک و به همین اندازه نیازمند اطلاعات در مورد شرایط محیطی جدید برای سیستم نیز است. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن بود که قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری تجهیزات معدن بشدت متأثر از شرایط محیطی پویا معدن است. این پویایی می‌تواند در طول نوبت کاری یا تغییرات برنامه تولید در طول عمر معدن اتفاق بیفتد. از این رو از مدل دیاگرام فازی قابلیت اطمینان برای مدل‌سازی این سیستم با RMSF پویا استفاده شد. در مطالعه موردی این بخش از PHM برای تخمین پارامترها و به روزرسانی آن‌ها استفاده شد. در نتیجه تحلیل‌ها زیرسیستم‌های لودر و واگن دریل معدن به‌عنوان دستگاه‌های بحرانی تعیین شدند. لذا برای ارتقای قابلیت دسترسی سیستم، بهبود قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری این دو زیرسیستم در اولویت خواهد بود. علاوه بر این زیرسیستم‌های لودر و واگن دریل از ظرفیت اضافی زیادی برخوردار می‌باشند که این به معنای امکان افزایش تعداد بیشتری تراک برای بهبود قابلیت پاسخ‌دهی سیستم است.

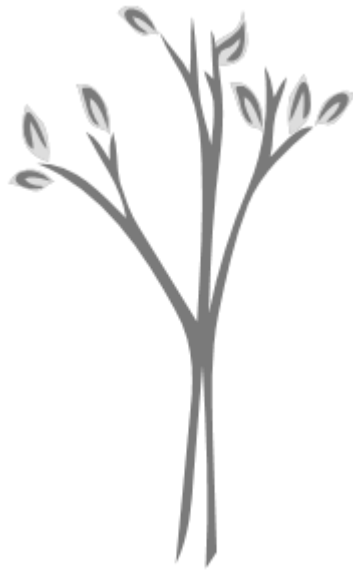
۲-۷- پیشنهادها

- با توجه به محدودیت زمانی در انجام رساله دکتری، در بخش‌های مختلف سیستم، زیرسیستم یا جزء به صورت گزینشی مورد بررسی قرار گرفتند. پیشنهاد می‌شود تحلیل کل ناوگان استخراجی در قالب یک پروژه صنعتی با سرمایه‌گذاری مناسب، نیروی کار حرفه‌ای و در مدت

زمان کافی انجام پذیرد. این کار به راحتی با گسترش رویکردهای پیشنهادی در این رساله امکان پذیر می باشد.

- گسترش موضوع ارزیابی شاخص های عملکردی (RAMS) به سمت سیستم های چند جزئی و تعیین یک تابع مشخص برای تعیین رفتار اجزای یا زیرسیستم های مشابه
- توجه هر چه بیشتر به شاخص عملکردی قابلیت پشتیبانی
- تحلیل سنجش اهمیت قابلیت دسترسی سیستم با حالت دوم: در طول تعمیرات اجزای خراب بقیه اجزای نیز قادر به کار نیستند.
- وارد نمود تأثیرات شرایط محیطی در تحلیل شاخص های عملکردی سیستم های چند جزئی
- پیشنهاد سنجش اهمیت تکمیل تر برای ارزیابی قابلیت تعمیرپذیری و پشتیبانی
- افزودن فاکتور هزینه در مبحث سنجش اهمیت و تکامل بخشیدن به ایده سنجش اهمیت
- استفاده از رویکردهای دیگر همچون نمودار جک-نایف در اولویت بندی زیرسیستم ها
- وارد کردن تأثیرات فاکتورهای ریسک درونی در تحلیل رفتارهای عملکردی سیستم
- افزودن مباحث تحلیل حساسیت بر تخمین پارامترهای توابع اساسی یا ضرایب رگرسیون
- بسط تحقیق در مورد ارزیابی ریسک به روش های مختلف و ترکیب تحلیل ها با شدت خرابی در حوزه قابلیت اطمینان در مهندسی معدن
- پیشنهاد رویکردی نوین برای تخمین قطعات یدکی و مدیریت آنها برای قطعات تعمیرپذیر و در مرحله بعد ادغام رویکرد پیشنهادی با تأثیر شرایط محیطی
- استفاده از شاخص قابلیت دسترسی در تخمین قطعات یدکی مورد نیاز برای اجزای تعمیرپذیر
- وسعت بخشیدن به رویکرد پیشنهادی برای استراتژی نت پیشگیرانه از طریق ارائه رویکردی برای بهینه سازی این روش.
- ارائه استراتژی نت پیشگیرانه مبتنی بر شرایط محیطی و تأثیر نت ناقص برای سیستم های چند جزئی و تعدیل آن با دخیل کردن مسائل هزینه ای و اقتصادی بین اجزای
- ارائه استراتژی نت پیشگیرانه بر اساس سایر شاخص های عملکردی همچون قابلیت دسترسی یا نرخ مخاطره سیستم

منابع و مراجع



Ahmadi, A. (2010), “*Aircraft Scheduled Maintenance Programme Development Decision Support Methodologies and Tools*”, Phd Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

Ahmadi, A., Karim, R. and Barabady, J. (2010), “*Prerequisites for a business-oriented fleet availability assurance program in aviation*”, presented at the International Workshop and Congress on eMaintenance : 22/06/2010 - 24/06/2010, Luleå tekniska universitet, pp. 168–175.

Al'tshuler, V. (1969), “*A method of constructing a mathematical model to study the reliability of mine transportation systems*”, Journal of Mining Science, Vol. 5 No. 1, pp. 72–76.

Andrews, J., Poole, J. and Chen, W. (2013), “*Fast Mission Reliability Prediction for Unmanned Aerial Vehicles*”, Reliability Engineering & System Safety.

“Asremes”. (2016), Asremes Online, available at: <http://asremesonline.ir/news/?Id=10419> (accessed 14 December 2016).

Barabadi, A. (2011), “*Production Performance Analysis: Reliability, Maintainability and Operational Conditions*”, University of Stavanger, Stavanger NORWAY, available at: http://brage.bibsys.no/uis/handle/URN:NBN:no-bibsys_brage_25901.

Barabadi, A., Barabady, J. and Markeset, T. (2010), “*Application of accelerated failure model for the oil and gas industry in Arctic region*”, presented at the Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2010 IEEE International Conference on, IEEE, pp. 2244–2248.

Barabadi, A., Barabady, J. and Markeset, T. (2011a), “*A methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment condition*”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 96 No. 12, pp. 1637–1646.

Barabadi, A., Barabady, J. and Markeset, T. (2011b), “*Maintainability analysis considering time-dependent and time-independent covariates*”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 96 No. 1, pp. 210–217.

Barabadi, A. and Markeset, T. (2011), “*Reliability and maintainability performance under Arctic conditions*”, International Journal of System Assurance Engineering and Management, Vol. 2 No. 3, pp. 205–217.

Barabady, J. (2005), “*Reliability and maintainability analysis of crushing plants in Jajarm Bauxite Mine of Iran*”, presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings. Annual, IEEE, pp. 109–115.

Barabady, J. (2007), “*Production Assurance(Concept, Implementation and Improvement)*”, Luleå University of Technology(Division of Operation and Maintenance Engineering), Universitetsområdet, Porsön, Luleå, Sweden, November.

Barabady, J. and Aven, T. (2008), “*A methodology for the implementation of production assurance programmes in production plants*”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, Vol. 222 No. 3, pp. 283–290.

Barabady, J. and Kumar, U. (2007), “*Availability allocation through importance measures*”, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 24 No. 6, pp. 643–657.

Barabady, J. and 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, Vol. 93 No. 4, pp. 647–653.

Barabady, J., Markeset, T. and Kumar, U. (2010), “*Review and discussion of production assurance program*”, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 27 No. 6, pp. 702–720.

Barabady, Javad, K., Uday. (2005), “*Maintenance schedule by using reliability analysis: a case study at Jajram bauxite mine of Iran*”, Vol. 2, presented at the 20th World Mining Congress, World Mining Congress, Tehran, Iran, pp. 831–838.

Barlow, R.E. and Proschan, F. (1996), “*Mathematical Theory of Reliability*”, Society for Industrial and Applied Mathematics.

Beeson, S. and Andrews, J.D. (2003), “*Importance measures for noncoherent-system analysis*”, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 52 No. 3, pp. 301–310.

“*BlockSim 8 Online Help*”. (2012), , 21 August, available at: <http://help.synthesis8.com/blocksim8/index.htm> (accessed 21 August 2012).

Bondar’, S. and Mernov, V. (1979), “*Operational reliability of conveyer lines with intermediate storage capacity*”, Journal of Mining Science, Vol. 15 No. 3, pp. 268–270.

Clauset, A. (2011), “*Models and Simulation for Complex Systems*”, 23 August.

Cox, D.R. (1972), “*Regression models and life-tables*”, Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), pp. 187–220.

Cui, L. (2008), “*Maintenance Models and Optimization*”, in Misra, K.B. (Ed.), Handbook of Performability Engineering, Springer London, pp. 789–805.

Dhillon, B.S. (1986), “*Bibliography of literature on mining equipment reliability*”, Microelectronics Reliability, Vol. 26 No. 6, pp. 1131–1138.

Dhillon, B.S. (2008), “*Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety*”, Springer.

- Diallo, C., Ait-Kadi, D. and Chelbi, A. (2012), “*An Integrated Approach for Spare Parts Provisioning*”, *Frontiers in Science and Engineering*, Vol. 2 No. 1.
- Distefano, S. (2005), “*System dependability and performances: Techniques, methodologies and tools*” Doctoral dissertation, faculty of Engineering, University of Messina, Italy.
- Distefano, S. and Puliafito, A. (2007), “*Dynamic reliability block diagrams vs dynamic fault trees*”, presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2007. RAMS’07. Annual, IEEE, pp. 71–76.
- Distefano, S. and Puliafito, A. (2009), “*Reliability and availability analysis of dependent–dynamic systems with DRBDs*”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94 No. 9, pp. 1381–1393.
- Distefano, S., Scarpa, M. and Puliafito, A. (2006), “*Modeling distributed computing system reliability with DRBD*”, presented at the Reliable Distributed Systems, 2006. SRDS’06. 25th IEEE Symposium on, IEEE, pp. 106–118.
- Distefano, S. and Xing, L. (2006), “*A new approach to modeling the system reliability: dynamic reliability block diagrams*”, presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2006. RAMS’06. Annual, IEEE, pp. 189–195.
- Elevli, S., Uzgoren, N. and Taksuk, M. (2008), “*Maintainability analysis of mechanical systems of electric cable shovels*”, *Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 67 No. 4, pp. 267–271.
- El-Ferik, S. and Ben-Daya, M. (2006), “*Age-based hybrid model for imperfect preventive maintenance*”, *IIE Transactions*, Vol. 38 No. 4, pp. 365–375.
- Freidina, E., Kovalenko, A. and Rudenko, O. (1975), “*Effect of mine-transport-equipment reliability on the productivity of a quarry system*”, *Journal of Mining Science*, Vol. 11 No. 1, pp. 50–54.
- Gao, X., Barabady, J. and Markeset, T. (2010a), “*An approach for prediction of petroleum production facility performance considering Arctic influence factors*”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 95 No. 8, pp. 837–846.
- Gao, X., Barabady, J. and Markeset, T. (2010b), “*Criticality analysis of a production facility using cost importance measures*”, *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, Vol. 1 No. 1, pp. 17–23.
- Garakavi, A., Manevich, I. and Merkin, V. (1984), “*Technological reliability and its safeguards in mining operations*”, *Journal of Mining Science*, Vol. 20 No. 6, pp. 456–462.
- Garmabaki, A., Ahmadi, A., Block, J., Pham, H. and Kumar, U. (2016), “*A reliability decision framework for multiple repairable units*”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 150, pp. 78–88.

Garmabaki, A., Ahmadi, A., Mahmood, Y.A. and Barabadi, A. (2015), “*Reliability modelling of multiple repairable units*”, *Quality and Reliability Engineering International*.

Ghodrati, B. (2005), “*Reliability and Operating Environment Based Spare Parts Planning*”, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.

Ghodrati, B. (2006), “*Weibull and Exponential Renewal Models in Spare Parts Estimation: A Comparison*”, *International Journal of Performability Engineering*, Vol. 2 No. 2, p. 135.

Ghodrati, B., Akersten, P.-A. and Kumar, U. (2007), “*Spare parts estimation and risk assessment conducted at Choghart Iron Ore Mine: A case study*”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13 No. 4, pp. 353–363.

Ghodrati, B., Banjevic, D. and Jardine, A. (2010), “*Developing effective spare parts estimations results in improved system availability*”, presented at the Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual, IEEE, pp. 1–6.

Ghodrati, B., Benjevic, D. and Jardine, A. (2012), “*Product support improvement by considering system operating environment: A case study on spare parts procurement*”, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 29 No. 4, pp. 436–450.

Ghodrati, B. and Kumar, U. (2005a), “*Operating environment-based spare parts forecasting and logistics: a case study*”, *International Journal of Logistics Research and Applications*, Vol. 8 No. 2, pp. 95–105.

Ghodrati, B. and Kumar, U. (2005b), “*Reliability and operating environment-based spare parts estimation approach: a case study in Kiruna Mine, Sweden*”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 11 No. 2, pp. 169–184.

Ghodrati, B., Kumar, U. and Kumar, D. (2003), “*Product support logistics based on product design characteristics and operating environment*”, presented at the 38th Annual International Logistics Conference and Exhibition: SOLE 2003, Society of Logistics Engineers, Huntsville, United States, p. 21.

Goodman, G.V.R. (1988), “*An assessment of coal mine escapeway reliability using fault tree analysis*”, *Mining Science and Technology*, Vol. 7 No. 2, pp. 205–215.

Gorjian Jolfaei, N. (2012), “*Asset Health Prediction Using the Explicit Hazard Model*”, Doctoral Thesis, Queensland University of Thechnology.

Gorjian, N., Ma, L., Mittinty, M., Yarlagadda, P. and Sun, Y. (2010), “*The explicit hazard model-part 1: theoretical development*”, presented at the Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM’10., IEEE, pp. 1–10.

Gorjian, N., Mittinty, M., Ma, L., Yarlagadda, P. and Sun, Y. (2010), “*The explicit hazard model-part 2: applications*”, presented at the Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM’10., IEEE, pp. 1–7.

Gustafson, A., Schunnesson, H. and Kumar, U. (2013), “*Reliability Analysis and Comparison Between Automatic and Manual Load Haul Dump Machines*”, Quality and Reliability Engineering International.

Hall, R.A. and Daneshmend, L.K. (2003a), “*Reliability Modelling of Surface Mining Equipment: Data Gathering and Analysis Methodologies*”, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 17 No. 3, pp. 139–155.

Hall, R.A. and Daneshmend, L.K. (2003b), “*Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment*”, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) Bulletin, Vol. 96 No. 1072, pp. 159–165.

Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B. and Kumar, U. (2012a), “*Reliability analysis of the cable system of drum shearer using the power law process model*”, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, pp. 1–15.

Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B. and Kumar, U. (2012b), “*Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines*”, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 18 No. 1, pp. 98–119.

Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B. and Kumar, U. (2012c), “*Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines*”, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 18 No. 1, pp. 98–119.

Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R. and Kumar, U. (2011a), “*Reliability modeling of hydraulic system of drum shearer machine*”, Journal of Coal Science and Engineering (China), Vol. 17 No. 4, pp. 450–456.

Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R. and Kumar, U. (2011b), “*Reliability and maintainability analysis of electrical system of drum shearers*”, Journal of Coal Science and Engineering (China), Vol. 17 No. 2, pp. 192–197.

“*IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-02-03: ‘dependability’*”. (2014), 24 January, available at: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-02-03> (accessed 24 January 2014).

“*IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-02-05: ‘availability (performance)’*”. (2014), 24 January, available at: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-02-05> (accessed 24 January 2014).

“*IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-02-06: ‘reliability (performance)’*”. (2014), 24 January, available at: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-02-06> (accessed 24 January 2014).

“*IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-02-08: ‘maintenance support performance’*”. (2014), 24 January, available at: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-02-08> (accessed 24 January 2014).

“IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-04-01: ‘failure’”. (2014), 24 January, available at: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-04-01> (accessed 24 January 2014).

“IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-07-01: ‘maintenance’”. (2014), 24 January, available at: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-07-01> (accessed 24 January 2014).

“IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-07-07: ‘preventive maintenance’”. (2014), 24 January, available at: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-07-07> (accessed 24 January 2014).

“IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-07-08: ‘corrective maintenance’”. (2014), 24 January, available at: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-07-08> (accessed 24 January 2014).

Ivko, V., Ovchinnikova, L. and Plotnikova, V. (1973), “A method of estimating the operational reliability of kinematic mechanized support systems”, *Journal of Mining Science*, Vol. 9 No. 3, pp. 333–335.

Jafarri, R. (2013), “Numerical Modeling of Water Enterance to Open Pit Mines; Case Study: Sungun Copper Mine”, Faculty of Mining Engineering.

Khatab, A. (2013), “Hybrid hazard rate model for imperfect preventive maintenance of systems subject to random deterioration”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1–8.

Kim, S. and Frangopol, D.M. (2010), “Optimal planning of structural performance monitoring based on reliability importance assessment”, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 25 No. 1, pp. 86–98.

Kleinbaum, D.G. (2011), “*Survival Analysis*”, Springer.

Kleinbaum, D.G. and Klein, M. (2012), “*Survival Analysis: A Self-Learning Text*”, Springer Science & Business Media.

Kohda, T., Matsumoto, S. and Nakagawa, M. (2008), “Risk analysis of phased-mission systems with multiple failure modes”, presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2008. RAMS 2008. Annual, IEEE, pp. 15–20.

Krishnamoorthy, K. (2015), “*Handbook of Statistical Distributions with Applications*”, Chemical Rubber Company (CRC) Press.

Kumar, D. (1995), “Proportional hazards modelling of repairable systems”, *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 11 No. 5, pp. 361–369.

Kumar, D. and Klefsjö, B. (1994a), “Proportional hazards model: a review”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 44 No. 2, pp. 177–188.

- Kumar, D. and Klefsjö, B. (1994b), “*Proportional hazards model an application to power supply cables of electric mine loaders*”, International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 1 No. 03, pp. 337–352.
- Kumar, D., Klefsjö, B. and Kumar, U. (1992), “*Reliability analysis of power transmission cables of electric mine loaders using the proportional hazards model*”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 37 No. 3, pp. 217–222.
- Kumar, D. and Westberg, U. (1996), “*Proportional hazards modeling of time-dependent covariates using linear regression: a case study [mine power cable reliability]*”, Reliability, IEEE Transactions on, Vol. 45 No. 3, pp. 386–392.
- Kumar, U. (1990), “*Reliability Analysis of Load-Haul-Dump Machines*”, Phd Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Kumar, U. (2003), “*Service delivery strategy for mining systems*”, Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries. South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 43–48.
- Kumar, U. and Akersten, P.A. (2008), “*Availability and Maintainability*”, Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment.
- Kumar, U. and Huang, Y. (1993), “*Reliability analysis of a mine production system-a case study*”, In Reliability and Maintainability Symposium, Annual IEEE, pp. 167–172.
- Kumar, U. and Klefsjö, B. (1992), “*Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model*”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 35 No. 3, pp. 217–224.
- Kumar, U., Klefsjö, B. and Granholm, S. (1989), “*Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a Swedish mine*”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 26 No. 4, pp. 341–361.
- Kuo, W. and Zhu, X. (2012a), “*Some recent advances on importance measures in reliability*”, Reliability, IEEE Transactions on, Vol. 61 No. 2, pp. 344–360.
- Kuo, W. and Zhu, X. (2012b), “*Importance Measures in Reliability, Risk, and Optimization: Principles and Applications*”, John Wiley & Sons.
- Lakshmi, S. and Sundari, P.G. (2012), “*A new mathematical model in weibull proportional hazards regression using GABAA*”, Bulletin of Pure & Applied Sciences-Mathematics and Statistics, Vol. 31 No. 1, pp. 101–107.
- Levkovich, P. and Chalenko, N. (1969), “*Use of reliability theory to calculate the required number of reserve longwall faces*”, Journal of Mining Science, Vol. 5 No. 2, pp. 160–165.
- Liu, T.B., Kang, J.S., Luo, G.K., Lv, Y. and Wang, Y. (2012), “*The hybrid imperfect maintenance model based on improvement factor of hazard rate and effective age*”, presented at the Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE), 2012 International Conference on, IEEE, pp. 536–539.

Louit, D.M., Pascual, R. and Jardine, A.K. (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, Vol. 94 No. 10, pp. 1618–1628.

Ma, Y. and Trivedi, K. (1999), “*An algorithm for reliability analysis of phased-mission systems*”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 66 No. 2, pp. 157–170.

Ma, Z. (2008), “*Survival analysis approach to reliability, survivability and prognostics and health management (phm)*”, presented at the Aerospace Conference, 2008 IEEE, IEEE, pp. 1–20.

Markeset, T. and Kumar, U. (2003), “*Integration of RAMS and risk analysis in product design and development work processes: a case study*”, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 9 No. 4, pp. 393–410.

Martorell, S., Sanchez, A. and Serradell, V. (1999), “*Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions*”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 64 No. 1, pp. 19–31.

“*Minitab® 16.2.0, Help*”. (210AD), , Minitab, available at: <http://www.minitab.com>.

Misra, K.B. (2008), “*Reliability Engineering: A Perspective*”, Handbook of Performability Engineering, Springer, pp. 253–289.

Nakagawa, T. (1988), “*Sequential imperfect preventive maintenance policies*”, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 37 No. 3, pp. 295–298.

Nan, M.S., Nicolescu, C., Jula, D., Bolovan, C., Voicu, G.V. and Petre, G. (2011), “*Practical aspects regarding spare parts reliability evaluation within an integrated management system*”, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Vol. 5 No. 2, pp. 238–246.

O’Connor, A.N. (2011), “*Probability Distributions Used in Reliability Engineering*”, Reliability Information Analysis Center (RiAC).

Pham, H. (2003), “*Commentary: steady-state series-system availability*”, Reliability, IEEE Transactions on, Vol. 52 No. 2, pp. 146–147.

Pham, H. (2006), System Software Reliability, Springer.

Pham, H. and Wang, H. (1996), “*Imperfect maintenance*”, European Journal of Operational Research, Vol. 94 No. 3, pp. 425–438.

Pijnenburg, M. (1991), “*Additive hazards models in repairable systems reliability*”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 31 No. 3, pp. 369–390.

Prasad, P. and Rao, K. (2002), “*Reliability models of repairable systems considering the effect of operating conditions*”, presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2002. Proceedings. Annual, IEEE, pp. 503–510.

- Rahadiyan Wijaya, A. (2012), “*Methods for Availability Improvements of a Scaling Machine System*”, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- Rausand, M. and Høyland, A. (2003), “*System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*”, Vol. 396, Wiley-Interscience.
- Remenyte-Prescott, R., Andrews, J. and Chung, P. (2010), “*An efficient phased mission reliability analysis for autonomous vehicles*”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 95 No. 3, pp. 226–235.
- Samanta, B., Sarkar, B. and Mukherjee, S. (2004), “*Reliability modelling and performance analyses of an LHD system in mining*”, South African Institute Mining And Metallurgy, Vol. 104, pp. 1–8.
- Sherwin, D.J. (2000), “*Steady-state desires availability*”, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 49 No. 2, pp. 131–132.
- Sherwin, D.J. and Bossche, A. (2012), “*The Reliability, Availability and Productiveness of Systems*”, Springer Science & Business Media.
- Standard, N. (1998), “*Regularity management & reliability technology*”, Norwegian Technology Standards Institution, Oslo, Norway, Vol. Z-016, available at: <http://www.nts.no/norsok>.
- Stapelberg, R.F. (2009), “*Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*”, Springer Science & Business Media.
- Vagenas, N., Kazakidis, V., Scoble, M. and Espley, S. (2003), “*Applying a maintenance methodology for excavation reliability*”, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 17 No. 1, pp. 4–19.
- Vagenas, N., Runciman, N. and Clément, S.R. (1997), “*A methodology for maintenance analysis of mining equipment*”, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 11 No. 1, pp. 33–40.
- Vayenas, N. and Wu, X. (2009), “*Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine*”, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Vol. 23 No. 3, pp. 227–238.
- Wang, W., Loman, J. and Vassiliou, P. (2004), “*Reliability importance of components in a complex system*”, presented at the Reliability and Maintainability, 2004 Annual Symposium-RAMS, IEEE, pp. 6–11.
- Wijaya, A.R., Lundberg, J. and Kumar, U. (2012), “*Downtime analysis of a scaling machine*”, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Vol. 26 No. 3, pp. 244–260.
- Xing, L. and Amari, S.V. (2008), “*Reliability of phased-mission systems*”, Handbook of Performability Engineering, Springer, pp. 349–368.

Yin, R.K. (2008), *“Case Study Research: Design and Methods”*, Vol. 5, SAGE Publications, Incorporated.

You, M.-Y., Li, H. and Meng, G. (2011), *“Control-limit preventive maintenance policies for components subject to imperfect preventive maintenance and variable operational conditions”*, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 96 No. 5, pp. 590–598.

پیوست



پیوست الف - داده‌های خرابی لودر

Row	TBFs (Hr)	Status	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Whether Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentaion (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
1	29	0	B	2	1	1	0.2	4	1	3	4	3	
2	30.25	1	B	2	1	2	0.3	-2.8	1	2	2	2	
3	5.5	1	A	1	1	3	8.1	-1.3	2	2	1	2	
4	27.5	1	B	2	1	4	6	-0.1	2	2	4	3	
5	13	1	B	1	1	3	0.6	1.6	1	2	1	2	
6	38.75	1	B	2	1	2	0.1	0.8	1	2	3	3	
7	42	1	B	2	1	2	0	6.8	1	2	3	2	
8	5.5	1	A	2	1	1	0	12.5	1	2	4	3	
9	33.5	1	B	2	1	1	1.3	10	1	2	3	2	
10	5	1	A	1	1	1	0	8	1	2	4	2	
11	29	1	B	2	1	1	0	7.6	1	2	4	2	
12	11	1	A	2	1	2	0	8.3	2	2	3	2	
13	21.5	1	B	2	1	3	0	9.3	3	2	4	2	
14	66.5	1	B	2	1	3	0.9	6.4	3	2	4	3	
15	14.25	1	A	2	1	2	4.6	10.6	2	2	2	2	
16	13.5	1	A	1	1	2	0.2	10.2	2	2	2	2	
17	13	1	B	2	1	3	1.1	7.8	3	2	2	2	
18	14.5	1	B	2	1	2	0	8.9	2	1	2	2	
19	45.75	1	B	2	1	3	1.3	7.3	3	2	3	2	
20	25	1	B	1	2	3	8.4	6.1	3	2	2	2	
21	30	1	B	2	1	3	4	4.9	3	2	2	2	
22	7.5	1	B	1	1	2	0.1	10.3	2	2	1	2	
23	42.5	1	B	1	1	3	10.8	12.1	3	2	3	2	
24	13	1	B	2	1	3	8.8	8.2	3	2	3	2	
25	36.25	1	B	2	1	3	9.9	7.7	3	2	3	2	

Row	TBFs (Hr)	Status	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Whether Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentaion (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
26	2.5	1	A	1	1	1	0	15.4	1	2	4		2
27	20.5	1	B	2	1	1	0	13.7	1	2	3		2
28	11.75	1	B	2	1	1	0	13.5	1	2	5		3
29	14	1	A	2	1	2	6.9	11.6	1	2	3		2
30	25.5	1	B	1	1	1	8.7	8.2	1	2	4		3
31	13	1	B	1	1	1	0	11.9	1	2	1		2
32	2	1	A	1	1	1	0	13.2	1	2	1		2
33	23.25	1	B	1	2	3	4.1	13.6	1	2	4		3
34	4.5	1	B	1	1	2	6.7	13	1	2	4		2
35	6.5	1	A	1	1	3	0.6	12.4	1	2	4		2
36	6	1	B	2	2	3	0.4	12.1	1	2	4		2
37	6.5	1	A	1	1	1	0	12.8	1	2	4		2
38	5.5	1	B	1	1	4	0.5	10.7	1	2	1		2
39	33	1	B	1	1	3	0.1	12.6	1	2	3		2
40	7	1	C	1	1	3	0	9.3	1	2	1		2
41	5.5	1	B	2	1	3	0	9.3	1	3	2		2
42	22.75	1	B	1	1	3	0	11.3	1	2	2		2
43	4	1	C	2	1	4	0.1	12.6	1	1	3		2
44	5	1	B	1	1	4	0.1	12.6	1	2	4		2
45	4.5	1	B	1	1	4	0.1	12.6	1	2	1		2
46	13.75	1	B	1	1	1	0	13.8	1	2	4		3
47	12.75	1	B	1	1	3	0.4	10.9	1	2	1		2
48	32.5	1	B	1	1	1	0	12.8	1	2	1		2
49	3.5	1	B	1	1	2	0.3	11.7	1	2	1		2
50	8	1	B	2	2	2	0.3	11.7	1	2	4		2
51	1	1	B	1	1	1	0	12	1	2	4		2
52	24.5	1	B	2	1	1	0	14	1	2	4		2
53	20.5	1	B	2	1	2	0	13	1	2	1		2
54	3	1	B	2	1	1	0	14.3	1	2	2		2

Row	TBFs (Hr)	Status	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Whether Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentation (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
55	4	1	A	2	1	1	0	14.7	1	2	3	2	2
56	6	1	B	2	1	1	0	14.7	1	2	3	2	2
57	7	1	A	2	1	1	0	15.9	1	2	3	2	2
58	6.5	1	A	1	1	1	0	12.4	1	2	4	2	2
59	6	1	C	1	1	1	0	12.4	1	2	4	2	2
60	92.25	1	B	2	1	1	0	14.7	1	2	3	2	2
61	14.5	1	B	2	1	1	0	11.6	1	2	1	2	1
62	20.5	1	B	2	1	1	0	14.2	1	2	3	2	1
63	5.75	1	C	1	1	1	0	19.6	1	2	1	2	2
64	1	1	A	2	1	1	0	17.5	1	2	1	1	1
65	9.5	1	A	2	1	1	0	17.5	1	2	2	2	2
66	27.25	1	B	2	1	1	0	13.3	1	2	3	2	3
67	6	1	C	1	1	1	0	16.1	1	2	1	2	2
68	31	1	B	2	1	1	0	13.1	1	2	4	2	2
69	49.5	1	B	2	1	2	0.2	9.4	2	2	3	2	2
70	8	1	B	2	1	4	0.3	9.9	4	2	1	2	1
71	14	1	B	1	1	1	0	14	1	1	2	2	2
72	36	1	B	2	1	1	0	17.1	1	2	2	2	2
73	43.25	1	B	2	1	1	0	15.5	1	2	2	2	2
74	17.5	1	B	2	1	1	0	15.1	1	2	1	2	1
75	57.25	1	B	2	1	1	0	14.7	1	2	2	2	2
76	6.75	1	B	2	1	2	0	12.5	2	2	3	2	2
77	4	1	B	1	1	1	0	14.5	1	1	1	2	2
78	6	1	C	1	1	1	0	14.5	1	1	1	2	2
79	0.75	1	A	2	1	2	0	12.5	2	2	4	1	3
80	3.5	1	A	1	1	1	0	12.5	2	1	1	2	2
81	8	1	B	2	1	2	0	12.5	2	2	4	3	3
82	4.5	1	B	2	1	1	0	12.5	1	2	5	2	2
83	47	1	A	2	1	1	0	14.2	1	2	2	2	2

Row	TBFs (Hr)	Status	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Whether Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentaion (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
84	4	1	A	1	1	1	0	14	1	2	1	2	2
85	4	1	C	1	1	1	0	14	1	2	1	2	2
86	2.25	1	A	2	1	1	0	5.3	1	2	1	3	2
87	1.75	1	A	1	1	1	0	5.3	1	2	1	1	2
88	37.25	1	B	2	1	2	0.7	-1.5	2	2	2	3	2
89	107	1	B	2	1	2	0	4.8	1	2	1	2	2
90	7	1	B	2	1	2	0	3.8	1	3	1	4	3
91	12.5	1	B	2	1	2	0	4.5	1	3	1	4	3
92	11	1	B	1	1	1	0	2.6	2	2	1	1	2
93	63	1	B	2	1	2	0	3.2	2	2	1	2	2
94	17	1	B	2	1	2	0	1.4	1	2	1	3	2
95	47.5	1	B	2	1	2	12.6	1.8	2	2	2	3	2
96	13.5	1	A	1	1	1	0	6.5	1	2	1	1	2
97	19.5	1	B	2	1	2	0	4.9	1	2	1	3	2
98	1.75	1	A	1	1	1	0	1.7	3	2	1	1	1
99	14	1	B	2	1	2	0	1.4	3	2	1	2	2
100	35	1	B	1	1	1	0	3.6	1	2	1	1	2
101	32	1	B	1	1	1	0	7.7	1	2	1	2	2
102	6	1	C	1	1	1	0	7.5	2	2	1	4	2
103	12.5	1	B	1	1	1	0.3	7	3	2	1	1	2
104	3.5	1	A	2	1	2	9.5	1.8	4	1	2	1	1
105	6.25	1	A	1	1	1	3.3	3.3	3	2	2	4	2
106	12.5	1	A	1	1	1	5.2	4.1	3	2	2	2	2
107	3.5	1	B	1	1	1	0	4.2	3	2	2	4	2
108	6	1	C	1	1	1	0	4.2	3	2	2	1	2
109	22.25	1	C	1	2	1	1.2	2.7	2	3	2	5	3
110	25	1	B	1	1	1	2.1	2.4	2	2	2	2	2
111	15	1	B	1	1	1	2.1	0.7	2	2	2	2	2
112	20.5	1	B	1	1	1	0	1.8	2	2	2	3	3

Row	TBFs (Hr)	Status	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Whether Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentation (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
2	113	1	A	1	1	4	0	0	2	2	1	2	2
2	114	1	A	1	1	3	7.9	-3.6	2	2	1	2	2
2	115	1	B	1	1	3	0.4	-2	2	2	1	2	2
3	116	1	B	2	1	1	0	4.2	2	2	5	2	3
2	117	1	A	2	1	2	0	4.1	2	2	2	2	2
2	118	1	A	1	1	2	0	5.5	2	2	1	2	2
2	119	1	A	1	1	3	2.2	2.8	2	2	1	2	2
2	120	1	A	2	1	3	0.5	2.4	2	1	5	2	2
2	121	1	A	1	1	2	1.8	1.5	2	2	2	2	2
2	122	1	A	1	1	2	0	0.1	2	2	4	2	2
2	123	1	B	1	1	2	0	0.1	2	2	1	2	2
2	124	1	A	1	1	3	0	5.3	1	2	1	2	2
2	125	1	B	1	1	3	0.3	4.1	1	2	2	2	2
3	126	1	B	2	1	3	0.9	1.8	1	2	4	2	3
2	127	1	B	2	1	3	0.4	-3.8	2	2	2	2	2
2	128	1	B	1	1	1	0	2.9	2	2	1	2	2
2	129	1	C	2	1	1	0	2.9	2	3	5	2	2
2	130	1	B	1	1	1	0	0.7	2	2	1	2	2
2	131	1	B	1	1	1	0	1.7	1	2	1	2	2
2	132	1	A	1	1	2	0	0.1	1	2	1	2	2
1	133	1	C	2	1	2	0	-2.9	1	2	1	2	1
1	134	1	B	2	1	2	0.6	5.4	1	2	1	2	1
1	135	1	A	1	1	3	0.2	2.8	1	2	1	2	1
1	136	1	C	2	1	3	0	4.9	1	2	1	2	1
2	137	1	A	1	1	2	0.1	9.5	1	2	1	2	2
2	138	1	B	1	1	2	0.1	9.5	1	2	1	2	2
2	139	1	A	1	1	3	0	11.4	1	2	1	2	2
3	140	1	B	2	1	3	0	11.4	1	3	4	2	3
3	141	1	B	2	1	3	0.1	8.7	1	3	4	2	3

Row	TBFs (Hr)	Status	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Whether Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentaion (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
142	14.25	1	B	2	1	2	1	14.7	1	3	4	3	3
143	14.5	1	A	2	1	2	8	11.8	1	3	4	3	3
144	6	1	C	2	1	1	3.2	13.6	1	2	1	1	1
145	14	1	B	2	1	2	0	12.5	1	2	1	1	1
146	6.5	1	A	2	1	2	0.2	11.6	1	3	1	1	1
147	5.5	1	B	1	1	3	1	13.1	1	2	1	2	2
148	2.5	1	A	2	1	4	1.3	8.5	1	2	4	3	3
149	4	1	B	2	1	4	1.3	8.5	1	2	4	3	3
150	50.75	1	B	2	1	3	2.2	8.3	1	2	4	3	3
151	6.25	1	C	2	1	2	1.4	11.9	1	3	4	3	3
152	46	1	B	2	1	1	0	15.4	1	2	3	2	2
153	130	1	B	1	1	1	0.7	13.5	1	2	2	2	2
154	81.25	1	B	1	1	1	1.2	13.3	1	2	2	2	2
155	32.75	0	B	1	1	1	0	17.9	1	2	2	2	2

پیوست ب - داده‌های تعمیرات لودر

Row	TBFs (Hr)	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Sky Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentaion (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
1	4	3	2	3	1	13.9	8	2	2	5	0	3
2	1	2	2	3	4	0	13.7	2	3	4	0	2
3	5	1	2	3	4	0	13.7	2	3	3	0	2
4	1.75	3	1	3	4	0	15.2	2	2	0	0	0
5	50	2	2	3	3	0	13.2	2	3	3	0	2
6	94.25	2	2	3	4	0	14.5	2	2	5	0	3
7	53.75	3	2	3	4	0	18.2	2	2	3	0	2
8	100.333	0	1	3	4	0	14.3	2	2	0	0	0
9	13	1	2	3	3	0	15.3	2	1	5	0	3
10	227.75	2	2	3	4	0	14.7	2	1	3	0	2
11	3.5	3	2	3	4	0	14	2	1	3	0	2
12	57.75	2	2	1	2	0.3	11	2	3	1	0	2
13	3.5	3	2	3	2	0.2	12.4	2	2	5	0	3
14	44.25	0	2	3	2	0	9.3	2	1	3	0	2
15	26.0833	3	2	1	1	0	11.8	2	3	1	0	2
16	42.75	2	1	3	2	0.4	10.9	2	2	5	0	0
17	84.5	3	2	2	3	0	13	2	3	5	0	3
18	22	3	2	3	3	0.1	12.9	2	2	5	0	3
19	50.25	2	2	3	4	0	14.3	2	2	5	0	3
20	2.5	3	2	3	4	0	14.7	2	2	3	0	2
21	25.5	3	2	3	4	0	15.9	2	3	5	0	3
22	64.25	2	2	2	4	1	11.7	2	2	3	0	2
23	154	3	2	1	4	0	11.6	2	2	5	0	3
24	6.5	2	2	3	4	0	11.6	2	1	3	0	2
25	10.5	1	2	1	4	0	14.2	2	2	1	0	2
26	28.5	1	2	1	4	0	18.7	2	2	1	0	2
27	54	2	2	2	4	0	19.6	2	2	3	0	2

Row	TBFs (Hr)	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Sky Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentaion (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
28	3	2	2	1	4	0	19.6	2	2	1	0	2
29	14	1	2	3	4	0	17.5	2	1	4	0	2
30	1.75	3	1	3	4	0	16.1	2	2	0	0	0
31	68	2	2	1	3	0	9.3	2	3	5	0	3
32	45	2	2	1	4	0	14	2	3	1	0	2
33	14	1	2	2	4	0	15.6	2	1	1	0	2
34	12.5	2	2	1	4	0	15.7	2	3	1	0	2
35	14.5	2	2	3	4	0	15.5	2	3	5	0	3
36	146	2	2	2	3	0	10	2	2	5	0	3
37	50.5	3	2	3	4	0	14.5	2	2	1	0	2
38	56.25	1	2	1	4	0	12.5	2	2	2	0	1
39	47	2	2	1	4	0	14.7	2	3	5	0	3
40	20.5	2	2	1	4	0	14	2	2	4	0	2
41	0.75	3	2	3	4	0	5.3	2	3	5	0	3
42	14	2	2	2	1	0.4	-1.1	2	1	4	0	2
43	9.25	2	2	1	2	0.9	-1.7	1	3	5	0	3
44	1.5	0	1	3	2	0.9	-1.7	1	2	0	0	0
45	5.5	3	2	3	4	0	7.9	2	2	2	0	1
46	54	1	2	1	3	0	3.8	2	3	4	0	2
47	11.5	2	2	2	3	0	5.2	2	3	3	0	2
48	14	2	2	1	3	0	9.6	2	2	5	0	3
49	7	2	2	1	4	0	10.7	2	2	3	0	2
50	6	1	2	1	4	0	10.7	2	2	4	0	2
51	114.75	3	2	3	4	0	5.9	2	2	3	0	2
52	87	2	2	2	4	0	3	1	2	4	0	2
53	34.5	2	2	1	3	0	4.8	2	1	2	0	1
54	41.5	2	2	1	4	0	4.9	2	2	5	0	3
55	20.5	1	2	1	2	0	1.7	2	2	2	0	1
56	13.75	2	2	3	3	0	0.3	2	1	2	0	1

Row	TBFs (Hr)	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Sky Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentation (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
57	20.5	2	1	3	4	0	5.5	2	2	5	0	2
58	72.25	3	2	1	2	0.3	7	2	2	5	0	3
59	1.5	2	2	1	2	0.3	7	2	3	1	0	2
60	11.5	1	2	3	2	0.3	7	2	2	1	0	2
61	2.5	3	2	3	2	3.3	3.3	1	2	5	0	3
62	21.5	3	2	1	1	6.2	-0.2	1	3	5	0	3
63	1	2	2	1	1	6.2	-0.2	1	3	5	0	3
64	0.5	2	1	3	1	6.2	-0.2	1	2	0	0	0
65	1.5	1	2	3	1	6.2	-0.2	1	3	4	0	2
66	4.5	3	2	3	4	0	1.1	1	2	4	0	2
67	207	2	2	1	3	0	5.5	1	2	2	0	1
68	1.5	2	2	1	2	2.2	2.8	1	3	2	0	1
69	13.5	2	1	3	2	0.5	2.4	1	2	0	0	0
70	26.5	3	2	3	3	0	0.1	1	3	1	0	2
71	119	2	2	1	4	0	-2	1	3	4	0	2
72	26	3	2	1	2	3.6	-10.2	1	2	3	0	2
73	15	1	1	3	2	21.6	-12.1	1	2	0	0	0
74	13	2	2	3	2	5	-5.6	1	3	4	0	2
75	19.5	1	2	3	4	0.6	-8.4	1	2	4	0	2
76	130.5	3	2	3	4	0	-1.8	1	1	3	0	2
77	120	3	2	3	4	0	0.4	1	2	5	0	3
78	8	2	2	3	4	0	1.7	2	1	5	0	3
79	2.5	2	2	2	3	0	-2.9	2	3	4	0	2
80	10.5	1	2	1	3	0	-2.9	2	2	1	0	2
81	182.5	2	2	3	2	0	-0.3	2	1	5	0	3
82	120.75	2	2	3	4	0	-2.6	2	2	3	0	2
83	1.75	2	2	3	2	0	-1.6	2	2	1	0	2
84	6	1	1	3	2	0	-1.6	2	2	5	0	2
85	65.75	3	2	3	3	0	0.9	2	1	3	0	2

Row	TBFs (Hr)	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Sky Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentaion (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
2	0	3	1	2	0.9	0	3	3	2	2	4.5	86
3	0	5	2	2	-2	0	3	3	2	3	75.75	87
2	0	4	2	2	0.4	0	2	3	2	1	14	88
3	0	5	2	1	-2.2	3.7	4	3	2	3	47	89
2	0	3	3	1	-2.2	3.7	4	3	2	2	1	90
3	0	5	2	1	-8.4	1.8	3	3	2	3	2.5	91
2	0	3	2	1	-8.4	1.8	3	3	2	2	4	92
3	0	5	1	1	-16.8	0	2	3	1	1	26	93
2	0	4	1	1	-10	0	4	3	2	3	66.75	94
2	0	3	2	1	-5.1	0	4	2	2	2	5	95
2	0	3	1	1	-5.1	0	4	3	2	1	8	96
2	0	3	2	1	-4.3	0	4	2	2	3	5.5	97
2	0	3	1	1	-4.3	0	4	3	2	2	7	98
2	0	3	2	1	-4.3	0	4	3	2	1	2	99
3	0	5	2	1	-3.4	0	4	1	2	3	8.5	100
2	0	3	2	1	-2.3	0	4	3	2	3	18.5	101
3	0	5	3	1	-3.2	0	4	1	2	3	41	102
3	0	5	2	1	-3.2	0	4	3	1	2	4.75	103
2	0	4	2	2	-1.8	0	4	1	2	2	23.75	104
3	0	5	3	2	-1.1	0.1	2	3	2	3	95.75	105
2	0	1	2	2	-1.3	0	2	1	2	2	2.75	106
2	0	1	3	2	-1.3	0	2	1	2	2	2.25	107
2	0	1	3	2	0.3	0	3	3	2	2	3.25	108
2	0	1	2	2	0.3	0	3	3	2	1	8	109
2	0	1	2	2	1.3	0	4	3	2	1	18	110
3	0	5	1	2	-1	0	4	2	2	3	22.75	111
2	0	4	2	1	1	0	3	3	2	3	123	112
2	0	3	1	1	3.7	2.8	2	2	2	2	40.75	113
3	0	5	2	1	4.9	0	3	3	2	3	36	114

Row	TBFs (Hr)	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Sky Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentation (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
115	12.5	2	2	3	1	0	0.8	1	2	4	0	2
116	34	2	2	3	3	4.6	6.8	2	2	1	0	2
117	9.5	3	2	3	3	4.6	6.8	2	2	5	0	3
118	105.5	3	2	3	3	0	0.3	1	2	4	0	2
119	39.75	3	2	3	2	2.7	0.1	1	2	1	0	2
120	159.75	1	2	1	2	1.4	3.3	2	3	3	0	2
121	2	1	2	3	2	1.4	3.3	2	2	1	0	2
122	36.5	1	1	3	2	4.2	-10.8	2	2	0	0	0
123	14	1	2	3	4	0	-6.7	1	2	3	0	2
124	231.5	2	2	3	2	1	6.3	2	1	5	0	3
125	38.5	2	2	3	2	0.5	5.3	2	1	3	0	2
126	72.5	3	2	1	3	0	11.9	2	2	5	0	3
127	0.75	2	2	3	3	0	12.2	2	3	2	0	1
128	12	1	2	3	3	0	12.2	2	1	3	0	2
129	5.5	3	2	3	3	0	11.5	2	2	3	0	2
130	45.5	2	2	3	2	0	10.2	2	1	3	0	2
131	1.5	0	1	3	2	0	10.2	2	2	0	0	0
132	4	3	2	3	3	0	9	2	2	5	0	3
133	75.5	3	2	3	2	0.1	8.7	2	2	3	0	2
134	155	1	2	3	2	0	8.9	2	1	3	0	2
135	171.5	2	2	2	2	3.1	12.3	2	2	3	0	2
136	115	3	2	3	3	0	13.7	2	1	5	0	3
137	14	1	2	3	2	1.4	14.7	2	2	2	0	1
138	66.25	2	2	1	4	0	9.9	2	2	5	0	3
139	14	3	2	2	3	1.4	11.9	2	2	5	0	3
140	19	3	2	3	4	0	15	2	3	5	0	3
141	27	2	2	1	4	0	15.5	2	2	5	0	3
142	114.75	3	2	3	4	0	10.9	2	2	4	0	2
143	15	1	2	1	4	0	10.9	2	2	5	0	3

Row	TBFs (Hr)	Shift	Working Place	Proportionality of truck	Sky Condition	Precipitation (mm)	Temperature (oC)	Road condition	No. Service	Rock Fragmentaion (Blasting)	Crawler Loader Displacement	Rock kind
144	14	1	2	3	3	5	12.6	2	1	4	0	2
145	53.5	2	2	3	4	0	15	2	2	5	0	3
146	9	3	2	3	4	0	15.6	2	3	3	0	2

پیوست ج - داده‌های لاستیک لودر

Frequency	TTFs (Hr)	Status	Loader Model	Axle	Tread Depth	Tire Brand	Rain (mm)	Temperature (C)
1	12870	1	C	F	1	1	0.987	5.539
2	6050	1	C	F	0	3	1.080	6.984
3	7700	1	C	F	1	3	1.066	6.131
4	9000	1	C	F	1	1	1.003	6.187
5	9000	1	C	F	1	1	1.003	6.187
6	6543	1	B	B	1	3	0.991	6.191
7	10736	1	D	B	1	3	0.939	6.042
8	11893	1	C	B	1	3	1.015	6.645
9	13103	1	D	B	1	3	1.153	5.874
10	10816	1	D	F	1	3	1.060	5.902
11	10127	1	C	B	1	3	1.035	6.447
12	8706	1	C	B	1	3	1.081	7.333
13	12171	1	B	B	1	3	1.130	5.462
14	6578	1	B	F	1	3	1.327	6.256
15	1891	1	A	B	1	2	1.087	6.576
16	4261	1	A	F	1	2	1.132	6.689
17	4091	1	A	B	1	1	1.558	7.876
18	3696	1	C	F	0	3	1.169	6.702
19	10213	1	D	F	1	1	1.129	7.051
20	13020	1	B	F	1	1	1.129	7.051
21	898	1	A	B	1	1	1.148	7.540
22	6241	1	A	B	1	1	1.046	6.559
23	7177	1	C	B	1	1	1.081	7.414
24	10667	1	C	B	1	1	1.068	5.677
25	547	1	C	B	0	1	0.748	3.427
26	4474	1	C	B	1	3	1.299	7.156
27	5836	1	B	B	1	3	1.110	5.094
28	5765	1	B	B	1	3	1.299	7.156

Temperature (C)	Rain (mm)	Tire Brand	Tread Depth	Axle	Loader Model	Status	TTFs (Hr)	Frequency
5.617	1.069	3	1	B	D	1	5786	29
5.096	1.071	1	1	B	C	1	6547	30
6.774	1.050	3	1	F	D	1	4536	31
5.943	1.088	3	1	B	C	1	7262	32
6.251	1.077	1	1	B	C	1	8772	33
6.918	1.060	1	1	B	D	1	10152	34
6.168	1.065	1	1	B	C	1	9196	35
6.168	1.065	1	1	B	C	1	8985	36
7.180	1.077	1	1	B	D	1	7515	37
7.130	1.018	1	1	B	D	1	10973	38
8.688	1.165	3	1	B	C	1	6526	39
8.184	0.822	1	0	B	B	1	8864	40
7.313	0.872	1	1	B	B	1	7333	41
9.319	0.783	2	1	B	A	1	4651	42
7.651	0.401	3	1	B	C	1	3579	43
7.032	0.874	1	1	B	C	1	10227	44
6.220	0.758	1	1	B	C	1	5061	45
6.762	0.756	1	1	B	C	1	5086	46
16.373	0.258	1	0	F	A	1	232	47
15.235	0.321	1	1	B	B	1	196	48
7.456	0.791	1	1	B	B	1	5398	49
8.063	0.827	1	0	B	B	1	5136	50
12.285	0.255	3	1	B	D	1	822	51
5.820	0.824	3	1	B	C	1	7730	52
5.339	0.376	3	0	F	C	1	3174	53
6.602	0.905	1	1	B	A	1	9973	54
6.741	0.897	1	1	F	A	1	7898	55
6.565	0.907	1	0	B	B	1	4576	56
7.355	0.827	3	0	F	C	1	4220	57
6.866	0.930	3	1	B	C	1	5276	58
6.866	0.930	3	1	F	D	1	5180	59

Temperature (C)	Rain (mm)	Tire Brnad	Tread Depth	Axle	Loader Model	Status	TTFs (Hr)	Frequency
5.032	0.918	1	1	B	B	1	8779	60
5.358	0.902	1	1	B	B	1	9245	61
6.011	1.007	1	1	F	D	1	9559	62
5.487	0.934	1	0	F	C	1	7090	63
6.060	1.025	1	1	B	C	1	12389	64
6.033	0.988	1	1	B	C	1	10314	65
6.758	0.986	1	1	B	B	1	8219	66
6.215	0.931	1	1	B	A	1	7115	67
4.928	0.935	1	1	B	C	1	10924	68
5.648	0.949	1	1	B	C	1	11584	69
5.789	0.974	1	1	F	C	1	8476	70
5.474	0.993	1	1	F	C	1	8210	71
4.928	0.935	1	1	B	D	1	10690	72
3.535	1.030	1	1	B	B	1	4692	73
5.904	0.968	2	1	F	A	1	10007	74
5.904	0.968	2	0	F	A	1	6403	75
5.045	0.994	1	1	B	D	1	10423	76
4.565	0.957	1	1	B	B	1	13326	77
-2.694	0.837	1	1	B	C	1	2384	78
5.425	0.965	1	1	B	C	1	13300	79
5.634	0.979	1	1	F	C	1	11875	80
5.769	0.928	1	0	B	B	1	7455	81
5.488	0.959	1	1	F	C	1	10037	82
6.298	0.955	1	1	F	C	1	12576	83
5.713	0.967	1	1	F	C	1	9842	84
6.106	0.962	1	1	B	D	1	11044	85
7.148	1.195	1	0	F	B	1	5444	86
7.465	0.993	1	1	B	B	1	11356	87
7.052	0.989	1	0	B	C	1	6465	88
7.052	0.989	1	0	B	C	1	3408	89
7.156	0.979	1	1	B	D	1	12156	90

Temperature (C)	Rain (mm)	Tire Brand	Tread Depth	Axle	Loader Model	Status	TTFs (Hr)	Frequency
7.216	0.942	1	1	B	B	1	8376	91
6.513	1.003	1	0	F	D	1	8428	92
6.589	0.917	1	0	F	C	1	4638	93
6.588	0.986	1	0	F	C	1	8354	94
6.176	0.928	1	1	F	B	1	6113	95
4.718	0.934	1	1	F	B	1	5465	96
6.392	1.019	1	0	F	C	1	9241	97
6.223	0.956	1	0	F	C	1	3054	98
5.979	1.000	1	1	B	D	1	9481	99
6.402	1.023	1	0	B	D	1	7561	100
5.285	1.031	1	1	F	A	1	5857	101
5.285	1.031	1	1	F	A	1	5857	102
6.078	1.030	1	1	F	C	1	8900	103
7.838	0.946	1	0	F	C	1	5639	104
7.283	0.941	1	0	F	B	1	4987	105
7.440	0.926	1	0	B	B	1	7105	106
6.535	1.015	1	1	F	C	1	5897	107
6.535	1.015	1	0	F	C	1	7654	108
5.932	0.803	1	0	F	B	1	3261	109
6.780	0.984	1	1	B	B	1	9874	110
7.434	1.022	2	1	B	C	1	7482	111
7.434	1.022	2	0	B	C	1	7737	112
7.997	0.915	2	0	F	B	1	3153	113
8.158	1.012	2	0	F	B	1	3664	114
7.747	1.049	2	0	B	C	1	5134	115
7.747	1.049	2	0	F	C	1	4990	116
7.747	1.049	2	0	F	B	1	3906	117
6.561	1.029	2	0	B	B	1	2581	118
1.144	1.103	2	0	F	C	1	1247	119
6.463	1.160	2	0	F	C	1	3521	120
6.656	1.102	3	0	F	D	1	3370	121

Temperature (C)	Rain (mm)	Tire Brand	Tread Depth	Axle	Loader Model	Status	TTFs (Hr)	Frequency
2.668	1.232	3	0	F	D	1	2937	122
6.656	1.102	3	0	B	C	1	2065	123
-2.526	0.452	1	0	B	C	1	249	124
4.467	1.357	2	0	F	B	1	1878	125
4.467	1.357	3	0	F	B	1	1788	126
9.418	1.191	2	0	F	C	1	1945	127
9.418	1.191	2	0	F	C	1	1945	128
10.785	1.156	2	0	F	C	1	1953	129
3.071	1.971	2	0	F	C	1	130	130
10.785	1.156	3	0	F	A	1	2232	131
10.785	1.156	3	0	F	A	1	2232	132
12.562	0.909	2	0	F	C	1	1440	133
12.562	0.909	2	0	F	C	1	1440	134
11.305	1.108	2	0	F	B	1	854	135
11.305	1.108	2	0	F	B	1	854	136
6.640	1.232	2	0	F	B	1	511	137
6.640	1.232	2	0	F	B	1	510	138

لغت نامه

الف

Non-failed	اجزای سالم
Scoop	اسکوپ (خاک انداز) معدنی
Economic ordering quantities	اندازه سفارش اقتصادی
Cumulative hazard concept	ایده مخاطرات تجمعی
Ljung-Box Q statistic (LBQ)	آزمون LBQ
Unit root test	آزمون ریشه واحد
Autocorrelation function	آزمون های تابع خودهمبستگی نما
Serial correlation test	آزمون خودهمبستگی
Mil-Hdbk-189	آماره کتابچه نظامی آمریکا
Goodness of fit test	آزمون نیکوئی برازش
Wald statistic	آماره والد

ب

Rain	بارندگی
Schoenfeld residuals	باقیمانده های شوئنفلد
Take-off	برخاستن
Reliability block diagram (RBD)	بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان
As bad as old (BAO)	به بدی سیستم قدیم
As good as new (GAN)	به خوبی سیستم جدید
Worst repair or maintenance	بدترین تعمیرات یا نت

پ

Product support	پشتیبانی از محصول
External support	پشتیبانی خارجی
Non-homogeneous Poisson process (NHPP)	پوآسون ناهمگن

ت

Link function	تابع پیوند
Cumulative Distribution Function (DCF)	تابع توزیع تجمعی
Failure distribution density function	تابع چگالی احتمال توزیع خرابی
Baseline maintainability function	تابع قابلیت تعمیرپذیری اساسی
Hazard function	تابع مخاطره
Failure rate function	تابع نرخ خرابی
Renewal density function	تابع چگالی تجدید سیستم

Instantaneous availability function	تابع قابلیت دسترسی آنی
Date	تاریخ
Joint effect	تأثیر نقطه‌ای
Replenishment cycle	تجدید تدارکات قطعات یدکی
Part replenishment	تجدید قطعات یدکی
Fault tree analysis (FTA)	تحلیل درخت خرابی
Throughput capacity analysis (TCA)	تحلیل ظرفیت عملیاتی
Spare parts provisioning (SPP)	تخمین تعداد قطعات یدکی
Logistics	تدارکات
Production assurance	تضمین تولید
Degradation	تنزل
Worse repair or maintenance	تعمیرات بد یا نت بد
Processed	تولید / فرآورده
ج	
Pivot table	جداول محوری
Component	جزء
Jump	جهش
چ	
Replenishment cycle	چرخه تجدید تدارکات قطعات یدکی
ح	
Taxi	حرکت روی چرخ
خ	
Shear loading failure	خرابی بارگذاری برشی
Material flaw failure	خرابی ترک خوردگی مواد تشکیل دهنده
Stress concentration failure	خرابی تمرکز تنش
Creep or rupture failure	خرابی خزش یا گسیختگی
Fatigue failure	خرابی خستگی
Bending failure	خرابی خمشی
Compressive failure	خرابی فشاری
Bearing failure	خرابی لهیدگی
Metallurgical failure	خرابی متالورژیکی
Tensile-yield-strength failure	خرابی مقاومت کششی تسلیم
Ultimate tensile-strength failure	خرابی مقاومت کششی نهایی
Instability failure	خرابی ناپایداری
Autocorrelogram	خودهمبستگی

د

Truncated data	داده بریده شده
Suspended data	داده تعلیقی
Complete failure data	داده خرابی کامل
Censored data	داده سانسور شده
Operational historical data	داده‌های از جنس زمان
Temperature	دما

ذ

Inherent	ذاتی
----------	------

ر

Relative Humidity	رطوبت نسبی
Backward stepwise method (BSTEP)	روش بازگشتی
Failure mode and effects analysis (FMEA)	روش تجزیه و تحلیل خرابی
Event tree analysis (ETA)	روش درخت رویداد
Maximum likelihood estimation (MLE)	روش درست‌نمایی بیشینه
Phased mission system (PMS or RPD)	روش دیاگرام فازی قابلیت اطمینان
Graphical procedure	روش‌های نموداری
Time-dependent variables procedure	روشی مبتنی بر متغیرهای وابسته به زمان
Trend	روند
Primary events	رویدادهای (خرابی) اولیه
Subsidiary events	رویدادهای تابعه

ز

Time to repair (TTRs)	زمان انجام تعمیرات
Time between maintenance (TBM)	زمان بین تعمیرات
Time between failure (TBFs)	زمان بین خرابی‌ها
Time between orders (TBO)	زمان بین سفارش‌ها
Delivery time (DT)	زمان پاسخ‌دهی
Time to delivery (TTD)	زمان پاسخ‌دهی
Time to failure (TTFs)	زمان تا وقوع خرابی
Lead time	زمان‌های تأخیر بین تصمیم تا اجرا
Total time to failures	زمان تجمعی تا وقوع خرابی‌ها

س

Systems breakdown structuring	ساختار شکست سیستم
Importance measurement	سنجش اهمیت
Availability importance measurement	سنجش اهمیت قابلیت دسترسی

Time-dependent normalized availability importance factor	سنجش اهمیت قابلیت دسترسی نرمالیزه
Control-limit PM policies	سیاست PM کنترلی با محدودیت
Periodic policy	سیاست ادواری
Periodic review system (P)	سیستم بازبینی ادواری
Continuous review system (Q system)	سیستم بازبینی پیوسته
Reorder point (Rp)	سفارش مجدد
ش	
Failure criticality index (FCI)	شاخص خرابی بحرانی
Success-oriented network	شبکه‌ی موفقیت‌گرا
Operating environment	شرایط عملیاتی
Environmental conditions	شرایط محیطی
ص	
Norwegian Oil and Gas industries	صنایع نفت و گاز نروژ
ض	
Time-dependent normalized reliability importance factor	ضریب اهمیت قابلیت اطمینان نرمالیزه
Age reduction factor (ARF)	ضریب کاهش عمر
Modification factor	ضریب‌های تعدیل
ظ	
Capacity performance	ظرفیت
Throughput capacity (TC)	ظرفیت عملیاتی
Physical throughput	ظرفیت فیزیکی
Excess capacity	ظرفیت اضافی
ع	
Production performance	عملکرد تولید
ف	
Phase	فاز
Hazard rate increase factor (HRIF)	فاکتور افزایش نرخ مخاطره
Covariates or risk factors	فاکتور ریسک
Goodness-of-fit testing procedure	فرآیند آزمون نیکویی برازش
Branching Poisson process (BPP)	فرآیند پواسون منشعب
Homogeneous Poisson process (HPP)	فرآیند پواسون همگن
Renewal process (RP)	فرآیند تجدید پذیر
Superimposed renewal process (SRP)	فرآیند تجدیدپذیر مازاد
Branching renewal process (BRP)	فرآیند تجدیدپذیر منشعب
Power law process model (PLP)	فرآیند قانون توان

Markov process (MP)	فرآیند مارکوف
Semi-Markov process (SMP)	فرآیند نیمه مارکوف
independent and identically distributed (iid)	فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها
Proportional hazards (PH) assumption	فرض متناسب بودن
Landing	فرود آمدن
Surveillance activities	فعالیت‌های نت و حیات‌بخشی

ق

Reliability R)	قابلیت اطمینان
Dependability (De)	قابلیت اعتماد
Functional performance	قابلیت اعتماد و کارکرد وظیفه‌ای
Deliverability	قابلیت پاسخ‌دهی
Baseline deliverability	قابلیت پاسخ‌دهی اساسی
Supportability (S)	قابلیت پشتیبانی
Maintainability (M)	قابلیت تعمیرپذیری
Availability (A)	قابلیت دسترسی
Production availability	قابلیت دسترسی تولید
Steady-state availability	قابلیت دسترسی وضعیت پایا
Spare part	قطعات یدکی

ک

Kolmogorov-Smirnov test	کلموگروف-اسمیرنوف
International Electrotechnical Commission	کمیسیون بین‌المللی الکترونیک

گ

Cruising	گشت زدن
----------	---------

ل

Stratum	لایه
---------	------

م

Phased mission	مأموریت فازبندی شده
Response variable	متغیر پاسخ
Dummy variable	متغیرهای باینری
Mean time to repair (MTTR)	متوسط زمان انجام تعمیرات
Mean time to failure (MTBF)	متوسط زمان تا وقوع خرابی
Sojourn time	مدت زمان توقف
Stratified Cox regression model (SCRM)	مدل رگرسیون لایه‌بندی شده کاکس
Proportional repair model (PRM)	مدل نرخ تعمیرات متناسب
Proportional hazard model (PHM)	مدل نرخ مخاطرات متناسب

Extended proportional hazards model (EPHM)	مدل نرخ مخاطرات متناسب توسعه یافته
Semi-parametric proportional hazard model	مدل مخاطرات متناسب نیمه-پارامتریک
Weibull proportional hazard model (WPHM)	مدل نرخ مخاطرات متناسب-ویبول
Lognormal proportional hazard model (LPHM)	مدل نرخ مخاطرات متناسب-لاگ نرمال
Exponential proportional hazard model (EPHM)	مدل نرخ مخاطرات متناسب-نمایی
Accelerated failure time model (AFTM)	مدل زمان خرابی شتاب یافته
Proportional odds model (POM)	مدل بخت‌های متناسب
Additive hazard model (AHM)	مدل مخاطرات افزودنی
Aalen linear regression model (ALRM)	مدل رگرسیون خطی آلن
Mixed model or additive multiplicative	مدل مرکب
Proportional covariate model	مدل فاکتورهای ریسک متناسب
Point process model	مدل فرایند نقطه‌ای
Proportional intensity model (PIM)	مدل شدت متناسب
Hybrid imperfect PM model (HIPM)	مدل هیبریدی PM ناقص
Boundaries	مرزها
Significance	معناداری
Economic order quantity (EOQ)	مقدار سفارش اقتصادی
Safety stock	موجودی ایمن
Rate	میزان
Maintenance quality/effect	میزان تأثیر نت
ن	
Thins out	نازک تر شدن
Sequential preventive maintenance	نت پیشگیرانه از نوع ادواری
Periodic preventive maintenance	نت پیشگیرانه از نوع پریودیک
Perfect preventive maintenance	نت پیشگیرانه کامل
Minimal repair or minimal maintenance	نت پیشگیرانه کمینه
Imperfect maintenance or imperfect repair	نت پیشگیرانه ناقص
Hazard ratio	نرخ مخاطره
Baseline hazard rate	نرخ مخاطره پایه
Usage rate	نرخ مصرف
Usage rate	نرخ مصرف
Water oil ratio	نسبت نفت به آب
Gas oil ratio	نسبت نفت به گاز
Reorder point system (ROP)	نقطه سفارش مجدد
Maintenance	نگهداری و تعمیرات (نت)
Scatter plots	نمودارهای پراکنش

Type

نوع

و

Item

وسيله

Sky Condition

وضعیت جوی

Abstract

For requirements of buyers to be met, manufacturers are urged to deliver products in accordance with specifications sought by customers. The theme of 'production assurance' has been proposed in a bid to cope with this demand as it analyzes system behavior and boosts its performance by integrating various operation indices ranging from availability, reliability, maintainability as well as supportability. Identifying functional behavior of these systems on the basis of failures, operation conditions as well as their share in undertaking the task of production plays a vital role in reducing the overall costs of production and would provide the possibility to compete in global markets.

In the present study, parts of mining fleet of Sungun copper mine complex was chosen for development of operational production capacity using idea of production assurance. Sungun marks Iran's second largest copper producer and is situated in Varzeghan in East Azerbaijan province.

Production assurance remains as a function of system performance and is controlled by failures. Failures, in turn, comprise two major parameters including functional properties and environmental conditions. Required information for the first parameter was collected via up-time and down-time data of systems. Information for the second parameter was however obtained from operating environment conditions like surroundings, vibration and pressure not to mention operator skills which entered the analysis through risk factors or covariates.

As the first step following collection of necessary data, functional behaviors of bulldozer, loader and dump truck subsystems were investigated in view of availability index without taking into account impact of environmental conditions and results revealed that repair status of loader subsystem was in critical conditions.

Afterwards, reliability of a loader subsystem was evaluated in view of impact of conditions under investigation and the threefold difference in productivity, as compared to the case when impacts were ignored, revealed the undeniable effect of environmental conditions on the index. Furthermore, in order to investigate effects of risk factors on maintainability, a different part of the fleet was studied within the framework of a system which consisted of a loader and a bulldozer as well as two dump truck subsystems. Results indicated that possibility of minor and major overhauls for loader subsystems stood at 25 and 80 percent respectively while the figure would be 30 percent if impact of environmental conditions are ignored.

In the next step, the notion of importance measurement was exploited to determine critical subsystems for the two broad cases of with and without considering impact of environmental conditions. For the case in which influence ambient conditions were ignored, a part of the fleet was selected within a fleet comprising a wagon drill, a loader, a bulldozer subsystem in addition to five dump truck subsystems. As the results reveal, enhancement of system availability requires improvement in accessibility of subsystems. Also for loader subsystem, upgrading of system reliability enjoys a higher priority as compared with its reparability. For the second case, that is importance measured while considering impact of environmental conditions, system reliability of a mining fleet was considered which consisted of two loader and eight dump truck subsystems. Results stated that the best option for improving reliability of the system was to promote that of loader subsystems. In the last part of importance measurement, availability of a system, comprising a wagon drill, a loader, a bulldozer and five dump truck subsystems, were investigated

and results showed that any rise in system availability was subject to an upsurge in availability of loader and bulldozer subsystems.

Then, the concept of spare part prediction as the main branch of supportability for tires were analyzed. To this end, an algorithm for predicting number of tires required for 100-ton dump trucks was offered which entailed system performance within framework of reliability without considering impact of environmental conditions. Calculations revealed that the higher the reliability of subsystem and the better its performance, the fewer tires will be needed. The issue can be seen in 3.2, 2 and 1.2 values of required number of tires per year for the lower, optimum and upper estimated limits, respectively. By entering impact of environmental conditions, time-dependent risk factors (dump truck modern and tire trademark) of dump truck tire data were divided into 12 layers and stratified Cox regression model was used. In these model axial, rainfall and temperature risk factors were found to be the most effective factors on behavior of dump truck tire failures and will consequently affect the number of spare parts required to a great extent. Maintenance was investigated as the second branch of supportability in a dump truck subsystem. The suggested method in this sector was reliability-based preventive maintenance which aimed to maintain reliability at the level of 80 percent. Accordingly, reliability analyses of the subsystem were carried out with four reliability functions depending on whether maintenance was done perfectly, imperfectly and in presence of absence of environmental impacts and, subsequently, four types of preventive maintenance strategy were proposed.

The last step was to analyze deliverability using results of the analysis of historical data of performance where impact of environmental conditions and production capacity of a system consisting of a wagon drill, a bulldozer, a loader and six dump trucks were studied. Overall results indicated the undeniable effects of environmental conditions as well as that achieving real outcomes was subject to inclusion of risk factors in calculations. The analyses proved loader and mine drill wagon subsystems as critical devices. Therefore, enhancement of reliability and reparability of these two subsystems must be put high on the agenda.

Keywords: Production Assurance, Deliverability, Dependability, Maintenance, Spare part, Operating environment, Extraction Fleet of Sungun Copper mine



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics

PhD Thesis in Mineral Exploitation

**Production Assurance of Mining Fleet Based on
Dependability and Risk Factor(Case Study: Sungun Copper Mine)**

By: Ali Nouri Qarahasanlou

Supervisors:

Dr. Reza Khalokakaie

Dr. Mohammad Ataei

Advisors:

Dr. Behzad Ghodrati

Dr. Jafar Abodollahisharif

February 2017