

(گزارش فنی)

تأثیر شرایط محیطی بر قابلیت اطمینان تجهیزات معدن مطالعه موردی معدن مولیبدن - مس آذربایجان

علی نوری قراחסنلو^۱، محمد عطایی^۲، رضا خالوکاکایی^۳، سعید فطوریچی^۴، رضا برآبادی^۵

۱- دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۴- کارشناس شرکت ملی مس ایران، واحد طراحی و نظارت معدن مس سونگون

۵- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: آذر ۱۳۹۴، پذیرش: آذر ۱۳۹۵)

چکیده

در صنعتی مانند صنعت معدنکاری با محیط سخت و خشن نمی‌توان از تأثیر شرایط محیطی بر رفتار سیستم‌ها صرف‌نظر کرد، چرا که این موضوع ارزیابی شدید در نتایج تحلیل‌ها را به دنبال خواهد داشت. با این دیدگاه در این پژوهش تلاش شد تا قابلیت اطمینان سیستم لودر از معدن مولیبدن- مس آذربایجان با استفاده از نوعی مدل رگرسیونی معروف به مدل نرخ مخاطرات متناسب محاسبه شود. این مدل از دو تابع یکی بر اساس داده‌های زمانی و دیگری شامل شرایط محیطی (فاکتورهای ریسک) هست. داده‌های مورد نیاز از بانک داده ۱۵ ماهه از منابع مختلف چون گزارش‌های روزانه، تعمیرگاه، گزارش‌های هواشناسی، ملاقات و مشاهده‌های مستقیم و مرتب‌شده بر اساس تاریخ وقوع در قالب زمان بین خرابی‌ها و فاکتورهای ریسک استخراج گردید. در نخستین گام برای تعیین تابع پایه نرخ مخاطره، آزمون‌های روند و خودهمبستگی برای ارزیابی فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته و در نتیجه آن فرض رد شد. لذا روش‌های کلاسیک آماری برای تحلیل نامناسب بوده و مدل فرایند قانون توانی جهت تحلیل سیستم تعمیرپذیر مناسب است. 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 دامپتراک، وضعیت آب و هوا، دمای محیط و وضعیت جاده دارای تأثیر معناداری بودند. 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 فاکتورهای ریسک و بدون آنها به دست آمد.

کلید واژه‌ها

معدنکاری، قابلیت اطمینان، فاکتورهای ریسک، مدل نرخ مخاطرات متناسب

*عهده دار مکاتبات: Alinoorimine@gmail.com

صنایع بخش عمده‌ای از هزینه‌های عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهند. سهم این هزینه در صنایع مختلف ۱۵ تا ۶۰ درصد هزینه تولید است. به طور کلی اهداف مطالعه قابلیت اطمینان را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود [۱]:

- شناسایی نواقص (تعیین علل و استفاده از آنها در اجرای نگهداری)
- تجزیه و تحلیل فیزیکی نواقص در راستای شناسایی بیشتر
- ادراک کمی و کیفی در طول زمان از رفتار محصولات و سیستم با توجه به ملاحظات تأثیرات عوامل داخلی و خارجی
- تعیین مدل‌های ریاضی، تعیین و پیش‌بینی روش‌هایی برای قابلیت اطمینان مبتنی آزمون عملیات و تحلیل عملکرد محصولات و سیستم‌ها
- ایجاد ابزاری برای اعتماد، نگهداری و افزایش قابلیت اطمینان در طول طراحی، اجرا و فاز عملیاتی تولید
- تشکیل روندی برای گزینش داده‌های قابلیت اطمینان و پردازش آنها

۲- تاریخچه

شاخص قابلیت اطمینان از اواسط دهه ۱۹۶۰ تا اواخر دهه ۱۹۸۰، توسط پژوهشگرانی چون؛ لوکویچ و چالانکو [۲]، الت شولر [۳]، ایوکو و همکارانش [۴]، فردینا و همکاران [۵]، بوندار و مروو [۶]، گاراکوی و همکاران [۷] و دهیلون [۸] وارد حوزه مهندسی معدن شده است و این سال‌ها را می‌توان 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 نرم‌افزارهای مدلسازی آماری به لحاظ محتوایی چندان قوی نیستند. در اواخر دهه ۱۹۸۰، گودمن قابلیت اطمینان راه‌های فرار اضطراری در معادن زغال اتاق و پایه را با استفاده از روش تحلیل درخت خطا مورد بررسی قرار داد [۹]. کومار و همکاران (۱۹۸۹) برای نخستین بار در زمینه مهندسی معدن، فرآیند منسجمی را برای تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان بارگیری متشکل از سه دستگاه LHD را اجرا کردند. آنها پس از تحلیل سیستم LHD، پنج زیرسیستم: موتور، انتقال قدرت، هیدرولیک، ترمز و سایر اجزاء را مشخص کردند. در مرحله بعد رابطه این

با ظهور و گسترش تقاضا برای خودکارسازی در بخش‌های مختلف صنایع و تولید از جمله خطوط تولید فرآیندی از قبیل صنایع تولید مواد شیمیایی، کاغذسازی و صنایع مواد معدنی حجم سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده در صنعت به شدت افزایش یافت. بازگشت این سرمایه‌گذاری‌های کلان و ادامه حیات در فضای رقابتی کسب‌وکار جهان امروز مستلزم طراحی سیستم‌های کارآمد و تدوین برنامه‌های تولید و بازاریابی و فروش منطقی، کارا، اثربخش و در عین حال عملی به منظور تولید و فروش بالاتر و در نتیجه کسب بیشینه ممکن سهم بازار و سود است. عملیاتی کردن این برنامه‌ها بدون حفظ کیفیت ماشین‌آلات و آماده به کار نگه‌داشتن آنها و استفاده بهره‌ور از تجهیزات غیرممکن بوده و بالا بردن قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی آنها عنصری کلیدی در نیل به آرمان تولید بالاتر و در نتیجه سود بیشینه است.

وقوع خرابی‌ها در سیستم از جمله عوامل مهمی است که دستیابی به اهداف تولید را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. تحلیل قابلیت اطمینان از جمله روش‌های پرکاربرد برای بررسی رفتار سیستم در رابطه با خرابی‌ها است. قابلیت اطمینان با احتمال و فراوانی وقوع خرابی (به طور دقیق‌تر، عدم وقوع خرابی‌ها) سروکار دارد. ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم‌های تعمیرپذیر غالباً با استفاده از متوسط زمان بین خرابی‌ها^۱ و در سیستم‌های تعمیرناپذیر با استفاده از متوسط زمان تا خرابی^۲ انجام می‌پذیرد. قابلیت اطمینان را به عنوان احتمال موفقیت در طول یک بازه زمانی نیز می‌توان تعریف کرد. در واقع، قابلیت اطمینان به تحلیل زمان‌های ازکارافتادگی و زمان‌های فعالیت سیستم، یا به عبارت دیگر تحلیل وقوع خرابی‌ها در سیستم می‌پردازد. از آنجایی که پیش‌گیری مطلق از وقوع خرابی‌ها غیرممکن است، لذا پایین آوردن احتمال وقوع خرابی و کاستن از تأثیرات آن دو موضوع مهم در رابطه با خرابی‌ها است. از لحاظ اقتصادی خراب شدن سیستم (یا زیرسیستم‌ها) پیامدهای منفی مختلفی را در پی دارد که از جمله می‌توان به ایجاد وقفه غیرمترقبه در فرآیند تولید، افزایش هزینه‌های نیروی کاری، مواد مصرفی و پشتیبانی و در نتیجه افزایش قیمت تمام‌شده محصول، افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و تأخیر در انجام سفارش‌ها و تحویل به‌موقع آنها به مشتری و در نتیجه آسیب دیدن اعتبار شرکت اشاره نمود. هزینه‌های تعمیر و نگهداری در همه

مخاطرات متناسب^۴ (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 ارزیابی نیکویی برازش مدل معرفی شد. در بخش بعدی پژوهش، بسط‌های مدل PHM مانند مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی، مدل زمان خرابی شتاب‌یافته، مدل نرخ تعمیرات متناسب معرفی شد [۲۷]. یک سال بعد این پژوهشگران از مدل PHM برای تحلیل قابلیت اطمینان کابل انتقال الکتریسیته، در لودرهای معدنی استفاده کردند [۲۸]. در سال ۱۹۹۵ نیز کومار مدل PHM را برای سیستم‌های تعمیرپذیر گسترش داد [۲۹]. پژوهش‌های 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 [۳۰]. پارساد و رائو (۲۰۰۲) سه نمونه مطالعاتی مختلف را مورد بررسی قرار دادند. در نخستین مورد با استفاده از مدل پارامتریک 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 [۳۱]. طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ قدرتی و همکاران برای نخستین بار در مدیریت قطعات یدکی برخی از اجزاء 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 پژوهش‌ها علاوه بر تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز، زمان تجدید انبار (خرید مجدد برای پر کردن انبار) را نیز تعیین کردند [۲۶، ۳۲-۳۵]. قدرتی همچنین به مقایسه مدل‌های نیمه پارامتریک PHM نمایی و ویبول پرداخت. نتایج پژوهش 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 [۳۶]. عباس برآبادی در سال ۲۰۱۱ از مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده در تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان استخراجی معدن بوکسیت استفاده کرد [۳۷]. ویجایا در سال ۲۰۱۲ رساله دکتری

زیرسیستم‌ها با استفاده از روش نمودار بلوکی قابلیت اطمینان به صورت شبکه سری به نمایش در آمده است. سپس داده‌های زمان تا وقوع خرابی تشکیل یافته و وارد مرحله تحلیل آماری شده است. در این مرحله به بررسی فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها پرداخته و سپس مدل یا فرآیند آماری مناسب بر داده‌ها برازش می‌شود. در این پژوهش برای زیرسیستم‌های هر سه LHD، توزیع ویبول به کار رفته و در تحلیل نیکویی برازش مدل‌ها، فرض توزیع یکسان و مستقل و تحلیل رفتار خرابی‌های زیرسیستم‌ها و سیستم‌ها (افزایشی یا کاهشی بودن نرخ خرابی) نمودار TTT^۳ استفاده می‌شود. همچنین برای نخستین بار مدل فرآیند قانون توانی در زمینه مهندسی معدن در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. در دو دهه بعد نیز مشابه همین روند توسط همین محقق [۱۱، ۱۲]، واگناژ و همکاران [۱۳]، هال و دانش‌مند [۱۴]، واگناژ و همکاران [۱۵]، سامانتا و همکاران [۱۶]، جواد برآبادی و همکاران [۱۷-۱۹]، وایناس و خیانگزی [۲۰] و در سال‌های اخیر حسینی و همکاران [۲۱-۲۴] برای تحلیل قابلیت اطمینان ماشین LHD، سیستم‌های هیدرولیک در ماشین LHD، شاول هیدرولیکی، خاک‌کش و کامیون زیرزمینی، ماشین‌های کند و برداشت در معادن زیرزمینی، بخش سنگ‌شکنی، ماشین شیرر مورد استفاده قرار گرفته است. وجه مشترک پژوهش‌های بررسی‌شده درباره قابلیت اطمینان، صرف‌نظر کردن از شرایط محیطی بوده، همچنین در این پژوهش‌ها سهم عمده تحلیل را روش کلاسیک به دوش می‌کشد. حال آنکه در دنیای حقیقی، عمر مفید تجهیزات متأثر از عوامل گوناگون، خطر و خرابی‌ها است. بنابراین شاخص‌های رفتاری آنها نیز تابعی از زمان و/یا عملکرد سیستم و شرایط محیطی کارکرد خواهد بود [۲۵] که در برگیرنده عواملی چون محیط اطراف (مانند دما، رطوبت و گردوغبار)، پارامترهای تعیین وضعیت (مانند لرزش و فشار) و ویژگی‌های انسانی یا افراد مانند مهارت اپراتور است. در تحلیل‌های آماری با این عوامل به عنوان فاکتورهای ریسک (z) رفتار می‌شود. داده‌های فاکتورهای ریسک بر داده‌های "زمان وقوع خرابی" افزوده خواهند شد [۲۶]. پژوهشگران کارهای گسترده‌ای به منظور وارد نمودن تأثیر این شرایط در پارامترهای سنجش عملکردی داشته‌اند. در سال ۱۹۹۳ کومار و کلفسجو طی مقاله‌ای برای نخستین بار به مروری نسبتاً کامل درباره مدل نرخ

تحلیل‌های دقیق‌تر و نزدیک به شرایط واقعی، وارد نمودن آنها الزامی است. لذا داده‌های مورد نیاز به طور کلی در دو دسته خرابی و فاکتورهای ریسک تقسیم‌بندی شده‌اند. این داده‌ها را می‌توان از منابع مختلف همچون: اسناد ثبت شده (گزارش‌های گروه نت، مکانیک، روزانه ...)، مدارک آرشیو شده (گزارش‌های قبلی، دفترچه ماشین‌آلات ...)، ملاقات و مصاحبه‌ها، مشاهدات مستقیم گردآوری نمود [۴۰].

۳-۳-۱- خرابی

خرابی به عنوان عدم توانایی یک‌قلم در انجام فعالیت مورد انتظار تعریف می‌شود [۴۱]. 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 انجام نت اصلاحی (TCM)، زمان انجام نت پیشگیرانه (TPM) و زمان‌های توقف تدارکات و مدیریتی (ADLT) جمع‌آوری خواهد شد. خود این داده‌ها نیز در دسته کلی داده خرابی کامل^۱ و داده معلق^{۱۱} (داده سانسور شده^{۱۲} و داده بریده شده^{۱۳}) تقسیم‌بندی خواهند شد [۴۲].

۳-۳-۲- فاکتورهای ریسک

در دنیای حقیقی، عمر مفید تجهیزات متأثر از عوامل گوناگون، خطر و خرابی‌ها است. بنابراین شاخص‌های رفتاری آنها نیز تابعی از زمان و/یا عملکرد سیستم و شرایط محیطی کارکرد خواهد بود [۲۵] که در برگزیده عواملی چون محیط اطراف (مانند دما، رطوبت و گردوغبار)، پارامترهای تعیین وضعیت (مانند لرزش و فشار) و ویژگی‌های انسانی یا افراد مانند مهارت اپراتور است. در تحلیل‌های آماری با این عوامل به عنوان فاکتورهای ریسک (Z) رفتار می‌شود. داده‌های فاکتورهای ریسک بر داده‌های "زمان وقوع خرابی" افزوده خواهند شد [۲۶]. در جدول ۱ نحوه چیدمان داده‌ها برای انجام تحلیل‌ها نشان داده شده است. یعنی برای هر خرابی، شماره خرابی، زمان وقوع خرابی، وضعیت داده زمانی (کامل یا سانسور شده) و وضعیت فاکتورهای ریسک در نظر گرفته شده را خواهیم داشت.

جدول ۱: چیدمان داده‌های فاکتورهای ریسک و زمان‌های وقوع خرابی [۴۴]

خویش را در زمینه روش‌های بهبود قابلیت دسترسی دستگاه لقی‌گیر ارائه نمود [۳۸].

با توجه به تاریخچه انجام گرفته و روشن شدن اهمیت بررسی شاخص عملکردی چون قابلیت اطمینان و تأثیر شرایط محیط بر رفتار آن تلاش شد که ساختار کلی از نحوه تحلیل این شاخص به روش آماری را بیان شود. از اینرو دو بخش کلی در این پژوهش در نظر گرفته شد؛ بخش اول شامل تئوری و مدل‌های آماری مورد استفاده در تحلیل‌ها بوده و بخش دوم به مطالعه موردی از معدن مولبدن-مس آذربایجان (مس سونگون) اختصاص یافته است.

۳- تئوری تحقیق

۳-۱- قابلیت اطمینان

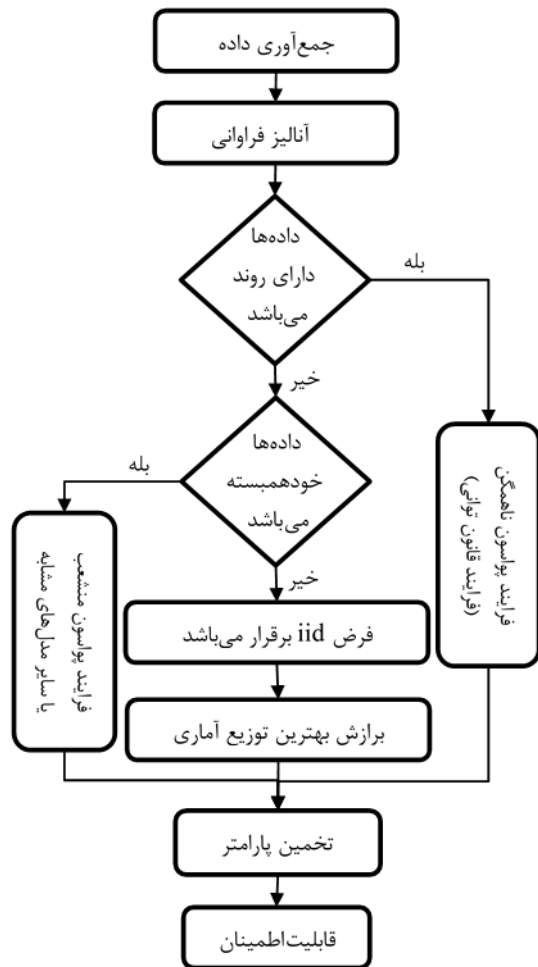
قابلیت اطمینان به عنوان "توانایی یک‌قلم در انجام فعالیت مورد نیاز، در یک بازه زمانی مشخص و شرایط محیطی مشخص" تعریف می‌شود [۳۹]. این زیر بخش با بیان توابع اصلی آغاز می‌شود، در ادامه داده‌های مورد نیاز در قالب دو دسته داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک^۵ تشریح می‌شود. سپس روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان در دو دسته کلی روش کلاسیک (فقط با داده‌های زمانی) و روش مبتنی بر فاکتورهای ریسک (در نظر گرفتن شرایط عملیاتی) بیان می‌شود.

۳-۲- توابع آماری اصلی

برای توصیف خرابی‌ها به شکل آماری، چهار تابع مختلف اما هم‌ارز و مرتبط باهم تعریف می‌شود این توابع عبارت‌اند از: تابع چگالی احتمال توزیع خرابی^۶ با نماد $f(t)$ ، تابع توزیع تجمعی^۷ (CDF) خرابی با نماد $F(t)$ ، متمم $F(t)$ با عنوان تابع قابلیت اطمینان با نماد $R(t)$ و تابع نرخ خرابی^۸ یا تابع مخاطره^۹ با نماد $\lambda(t)$ یا $h(t)$ وجود دارد.

۳-۳- داده‌ها

داده‌های مورد نیاز در مبحث قابلیت اطمینان به طور کلی متمرکز بر خرابی‌ها است. لذا در وهله نخست شناسایی خرابی و انواع آن ضروری خواهد بود. از سویی دیگر همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، شرایط محیطی نیز در تحلیل‌ها نقش به‌سزایی داشته و برای دستیابی به



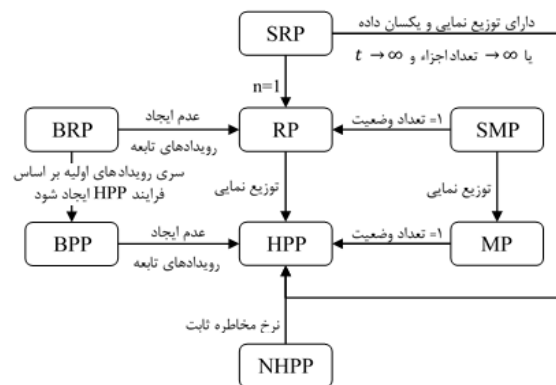
شکل ۲: الگوریتم محاسبه قابلیت اطمینان به روش کلاسیک [۱۷]

مدل فرآیند تجدیدپذیر بر این فرض استوار است که داده‌های زمانی از فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها (iid) پیروی می‌کند. این مدل در واقع مسیر مستقیم در الگوریتم شکل ۲ خواهد بود. 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 مورد 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 توانی^{۲۳}) استفاده می‌شود. فرآیند تجدیدپذیر مازاد برای تحلیل سیستم n جزئی، در حالت سری، مستقل از هم و مدل‌سازی شده با فرآیند تجدیدپذیر به کار گرفته می‌شود [۴۵].

شماره خرابی	زمان وقوع خرابی	وضعیت خرابی	فاکتورهای ریسک
۱	t_1	d_1	$Z_{1p} \dots Z_{12} Z_{11}$
۲	t_2	d_2	$Z_{2p} \dots Z_{22} Z_{21}$
⋮	⋮	⋮	⋮
n	t_n	d_n	$Z_{np} \dots Z_{n2} Z_{n1}$

۳-۴- روش کلاسیک تحلیل قابلیت اطمینان

در روش کلاسیک تنها داده‌های زمانی مورد استفاده قرار گرفته و فاکتورهای ریسک نقشی در تحلیل‌ها ندارد [۴۳]. مدل‌های مورد استفاده در تحلیل قابلیت اطمینان به روش کلاسیک شامل فرآیند پواسون همگن (HPP)^{۱۴}، فرآیند تجدیدپذیر (RP)^{۱۵}، پواسون ناهمگن (NHPP)^{۱۶}، فرآیند تجدیدپذیر مازاد (SRP)^{۱۷}، فرآیند تجدیدپذیر منشعب (BRP)^{۱۸}، فرآیند پواسون منشعب (BPP)^{۱۹}، فرآیند مارکوف (MP)^{۲۰} و فرآیند نیمه مارکوف (SMP)^{۲۱} است [۴۵]. در شکل ۱ ارتباط بین این مدل‌ها ترسیم شده است. در این شکل n، نشان دهنده تعداد اجزاء سیستم (در SRP) یا تعداد وضعیت (در MP و SMP) و t، زمان است (سایر اختصارات داخل متن اشاره شده است).

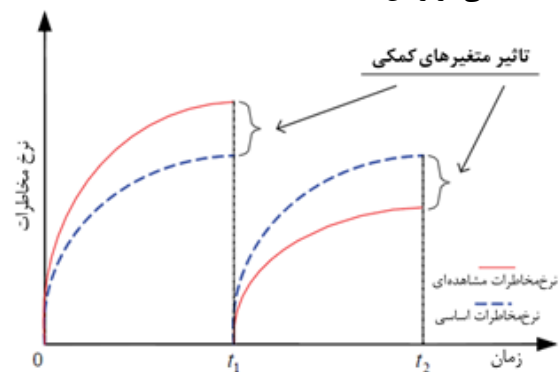


شکل ۱: ارتباط بین روش‌های کلاسیک آماری [۴۵]

الگوریتم شکل ۲ نیز نشان دهنده ارتباط برخی از این روش‌ها در رابطه با تحلیل‌های آماری است. در ادامه شرح مختصری از این مدل‌ها بیان شده است.

۳-۵- مدل 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 [۳۲]. 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 [۲۵، ۲۷]. این فاکتورهای ریسک به طور تصادفی تغییر می‌کنند و ممکن است زمان وقوع خرابی را نیز تغییر دهند [۴۶]. در شکل ۳ چگونگی تأثیرات فاکتورهای ریسک بر "نرخ مخاطره پایه" ترسیم شده است. در نرخ مخاطره پایه فاکتورهای ریسک تأثیری بر الگوی خرابی نداشته و فقط مبتنی بر زمان است.



شکل ۳: تأثیرات فاکتورهای ریسک بر نرخ مخاطره [۲۶]

$\lambda(t, z)$: تابع نرخ مخاطره (متغیر پاسخ) است. در این رابطه z : فاکتورهای ریسک (بردار سطری شامل پارامترهای فاکتورهای ریسک) است و دربرگیرنده درجه تأثیر هر فاکتور ریسک بر نرخ مخاطره است و t بیانگر زمان تا وقوع خرابی در یک قلم یا زمان سالم بودن آن است، $\lambda_0(t)$: نرخ مخاطره پایه، $\psi(z, \alpha)$: تابع پیوند [۴۸]. 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 [۲۷].

با فرض حالت تابع نمایی برای تابع $\psi(z, \alpha)$ ، نرخ مخاطره به صورت رابطه (۲) ارائه می‌شود [۲۷]:

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

عامل ضرب $\exp(z\alpha)$ می‌تواند نشان دهنده ریسک خرابی ناشی از حضور فاکتورهای ریسک باشد. در رابطه α ، $z\alpha = \sum_{i=1}^n z_i \alpha_i$ بردار ستونی از پارامترهای مجهول مدل یا ضرایب رگرسیون مربوط به فاکتورهای ریسک است [۲۷].

تابع قابلیت اطمینان PHM نیز به صورت رابطه (۳) خواهد بود:

$$R(t, z) = (R_0(t))^{\exp\left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i\right)} \quad (3)$$

در این رابطه $R_0(t)$ تابع قابلیت اطمینان پایه است.

۴- مطالعه موردی

معدن مس سونگون با ذخیره قطعی احتمالی در حدود ۸۰۰ میلیون تن در استان آذربایجان شرقی، ۱۰۵ کیلومتری شمال شرقی تبریز، ۷۰ کیلومتری شمال غرب اهر و ۲۸ کیلومتری شمال ورزقان در همسایگی جمهوری آذربایجان قرار دارد. سابقه معدنکاری در معدن مس سونگون به دو قرن پیش (دوره قاجاریه) برمی‌گردد. در سال‌های بعد با مطالعات انجام گرفته توسط شرکت اولنگ و Rio Tinto عملیات باطله‌برداری توسط شرکت‌های مبین، آجین و اولنگ و همچنین ساخت کارخانه تغلیظ از سال ۱۳۸۰ شدت گرفت تا اینکه در نیمه دوم سال ۱۳۸۵ عملاً بهره‌برداری از این معدن با ارسال ماده معدنی به کارخانه آغاز شد. روش استخراج در معدن سونگون روباز بوده و لذا

مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک در تحلیل قابلیت اطمینان عمدتاً بر اساس مدل نرخ مخاطرات متناسب (PHM) [۲۵] هستند. مدل PHM رویکردی ناپارامتری یا نیمه‌پارامتری است که نخستین بار توسط کاکس (۱۹۷۲) برای داده‌های بقا در زمینه پزشکی توسعه یافت [۴۷]. این مدل، فرآیند آماری ارزشمندی است که برای تخمین ریسک وقوع خرابی با توجه به ملاحظات شرایط و محیط کارکرد سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل مبتنی بر این فرض است که تابع مخاطره جزء یا قلمی از تجهیزات، ترکیبی از تابع نرخ مخاطره پایه آن و یک عبارت در برگیرنده تأثیرات فاکتورهای ریسک است [۳۳]. تابع نرخ مخاطره این مدل به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t) \psi(z, \alpha) \quad (1)$$

که:

حاکم پنج منبع اصلی شامل نظارت، ایستگاه هواشناسی، ملاقات و مصاحبات، مشاهدات مستقیم و پیمانکاران برای جمع‌آوری داده در نظر گرفته شده و بانک داده برای ۱۵ ماه تشکیل یافته که در جدول ۲ بخشی از داده‌ها برای سیستم مشاهده می‌شود.

در این جدول ستون اول فراوانی خرابی و در ستون دوم زمان بین خرابی‌ها و در ستون آخر زمان تا وقوع خرابی‌ها نشان داده شده است. در ستون سوم نیز وضعیت خرابی از لحاظ خرابی کامل (۱) و یا داده سانسور شده (۰) به نمایش گذاشته است. در ده ستون بعدی نیز تأثیر شرایط محیطی در غالب فاکتورهای ریسک مشاهده می‌شود که از بین این ده فاکتور دو فاکتور میزان بارندگی و دما فاکتور ریسک پیوسته^{۲۸} بوده و به طور مستقیم در تحلیل‌ها وارد شده و هشت فاکتور بعدی: نوبت، محل کار، تناسب با تراک، وضعیت آب‌وهوایی، وضعیت جاده، تعداد سرویس، محل عملیات، نوع سنگ فاکتورهای ریسک رسته‌ای^{۲۹} بوده و به شرح جدول ۳ کمی‌سازی شده‌اند. قابل ذکر است در این مقاله از نرم‌افزارهای Minitab، SPSS و RGA برای تحلیل‌ها استفاده شده است.

ماشین‌آلات گول‌آسا با ابعاد بزرگ سه مرحله اصلی استخراج یعنی چال‌زنی و آتشیاری، بارگیری و باربری بر عهده دارند. پس در واقع سرپا بودن ماشین هر مرحله و قابل اطمینان بودن آنها تضمین‌کننده تولید و معدنکاری است. لودر به عنوان بازکننده، یکی از حلقه‌های اصلی استخراج بوده و نقش اساسی در تولید معدن دارد. بنابراین بروز خرابی در این دستگاه کل چرخه تولید را متوقف نموده و جدای از هزینه‌های تعمیرات، افت تولید را نیز در پی خواهد داشت. از این‌رو در این مقاله به تحلیل قابلیت اطمینان لودر چرخ لاستیکی کاترپیلار 988-B به عنوان یکی از مدل‌های پرکاربرد در معدن سونگون و اکثر معادن مس ایران پرداخته شده است.

۴-۱- جمع‌آوری داده‌های کاترپیلار 988-B

همان‌طور که اشاره شد برای تحلیل قابلیت اطمینان و وارد نمودن تأثیر شرایط محیطی به دو نوع داده نیاز است که نوع اول از جنس زمان (TBFs) و دومی از جنس داده‌های کیفی (فاکتورهای ریسک) است، که برای به کارگیری در تحلیل‌های آماری باید کمی‌سازی شوند. در این پژوهش پس از مطالعه نمونه موردی و بررسی شرایط

جدول ۲: داده‌های خرابی لودر کاترپیلار 988-B

فراوانی خرابی‌ها	TBFs	وضعیت خرابی	نوبت	محل کار	تناسب با تراک	وضعیت آب‌وهوایی	بارندگی (mm)	دما (C)	وضعیت جاده	تعداد سرویس	محل عملیات	نوع سنگ	TTFs
۱	۵/۵	۰	A	۲	۱	۱	۰	-۴/۹	۱	۳	۱	۱	۵/۵
۲	۱۰۰	۱	B	۲	۱	۲	۰/۱	۳/۲	۱	۲	۲	۲	۱۰۵/۵
۳	۷۷	۱	B	۲	۱	۲	۰	۰	۱	۲	۲	۲	۱۸۲/۵
۴	۳/۷۵	۱	A	۱	۱	۱	۰	-۰/۵	۱	۲	۱	۲	۱۸۶/۲۵
۵	۱۵۳/۸۳	۱	B	۲	۱	۲	۰	۱/۸	۱	۲	۲	۲	۳۴۰/۰۸
۶	۲/۵	۱	A	۲	۱	۱	۰/۳	۲	۲	۲	۱	۱	۳۴۲/۵۸
۷	۷/۵	۱	B	۱	۱	۱	۰	۲/۱	۱	۲	۱	۲	۳۵۰/۰۸
۸	۹۶/۲۵	۱	B	۲	۱	۱	۰/۴	۹/۶	۱	۲	۲	۲	۴۴۶/۳۳
۹	۸/۵	۱	B	۲	۱	۱	۰	۷/۸	۱	۲	۳	۱	۴۵۴/۸۳
۱۰	۳۹/۷۵	۱	B	۲	۱	۱	۰	۷/۷	۱	۲	۲	۲	۴۹۴/۵۸
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

را تعیین نمود. بدین منظور از الگوریتم ارائه شده در شکل ۲ استفاده می‌شود. طبق الگوریتم بالا قبل از انجام هر نوع

۴-۲- قابلیت اطمینان لودر کاترپیلار 988-B

در تحلیل قابلیت اطمینان به روش PHM در نخستین گام باید تابع نرخ مخاطره پایه که تنها مبتنی بر زمان است

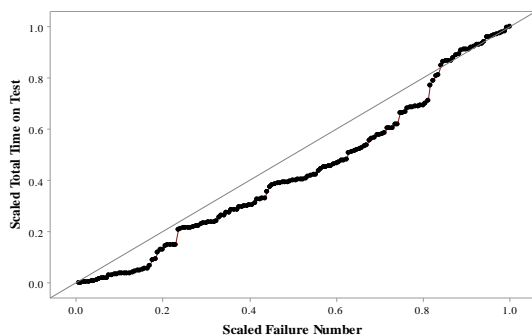
ترسیمی (TBF) های تجمعی به تعداد وقوع تجمعی خرابی‌ها) و در مورد آزمون خودهمبستگی نیز از روش ترسیمی تابع خودهمبستگی نما (AFC)^{۳۰} استفاده شده است [۱۱].

تحلیل باید توزیع یکسان و مستقل داده‌ها (iid) بررسی شود. بدین منظور دو آزمون روند و خودهمبستگی بر روی داده‌ها انجام می‌گیرد. در این پژوهش، برای انجام آزمون روند از هر دو روش تحلیلی (MLI-Hdbk-189, Laplace) و

جدول ۳: کمی‌سازی فاکتورهای ریسک ربنته‌ای خرابی‌های لودر کاتریپلار 988-B

فاکتور ریسک	طبقه‌بندی	مقدار کمی	فاکتور ریسک	طبقه‌بندی	مقدار کمی	فاکتور ریسک	طبقه‌بندی	مقدار کمی	
وضعیت خرابی	خرابی کامل	۱	وضعیت آب‌وهوایی (Z4)	آفتابی و بدون ابر	۱	وضعیت جاده (Z5)	لغزنده	۲	
	خرابی سانسور شده	۰		نیمه ابری	۲		لغزنده و مسدود	۲	
نوبت (Z1)	صبح	A		ابری	۳		نوع سنگ (Z8)	خوب	۱
	ظهر	B		مه شدید	۴			متوسط	۲
محل کار (Z2)	شب	C	عادی	۱	تناسب با تراک (Z3)	بد		۳	
	سینه کار	۲	ORE - SUF - OXD - دامپ	۱		ORE		۱	
تناسب با تراک (Z3)	دامپ تخلیه	۱	ORE	۱		OXD	۱		
	متناسب	۱	SUF	۱		MZT	۲		
	نسبتا مناسب	۲	MZT	۲	دامپ	۲			
	نامناسب	۳	TRT	۳	TRT	۳			

نمودار آزمون ترسیمی روند سیستم در شکل ۴ دیده می‌شود. این نمودار انطباق کامل بین نتایج آزمون‌های تحلیلی و ترسیمی را نشان می‌دهد.



شکل ۴: آزمون ترسیمی روند سیستم لودر کاتریپلار

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 ۵ استفاده شده است. در این نمودار مقادیر AFC با

نتیجه روش تحلیلی آزمون روند سیستم در سطح معنی‌داری $\alpha=0.05$ در جدول ۴ 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.

جدول ۴: نتایج آزمون تحلیلی روند

سیستم لودر	نوع آزمون	
	MIL-Hdbk-189	لاپلاس
آماره محاسبه شده	۴۶۲/۸۷	-۳/۲۴
p-مقدار	۰	۰/۰۰۱
نتیجه آزمون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵	روند دارد	روند دارد

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.

جدول ۱: فاکتورهای ریسک حذف‌شده در هر گام

گام	فاکتور ریسک
گام ۲	تعداد سرویس
گام ۳	تعداد سرویس محل عملیات
گام ۴	تعداد سرویس محل عملیات نوع سنگ
گام ۵	میزان بارندگی تعداد سرویس محل عملیات نوع سنگ

جدول ۲: فاکتورهای ریسک، معناداری و تأثیرات آنها

فاکتورهای ریسک	α	Wald	Sig	Exp(α)
نوبت (۱) (Z_{11})	۰/۲۴۹	۰/۰۴۸۸	۰/۴۵۸	۱/۲۸۳
نوبت (۲) (Z_{12})	-۱/۵۱۷	۱۹/۱۹۸	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

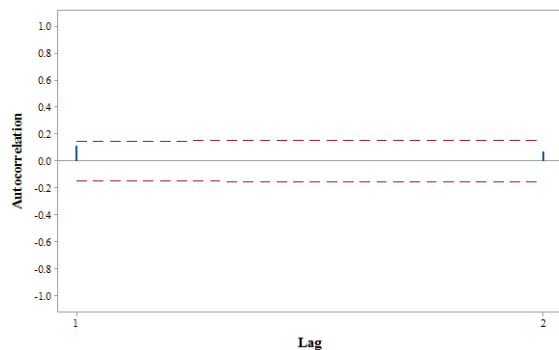
طبق نتایج حاصل از تحلیل (جدول ۲) فاکتورهای نوبت (۱) (Z_{11})، نوبت (۲) (Z_{12})، محل کار (Z_2)، تناسب با تراک (Z_3)، وضعیت آب‌وهوایی (Z_4)، دمای محیط (Z_9)، وضعیت جاده (Z_5) دارای تأثیر معناداری بوده و لذا تابع قابلیت اطمینان لودر را با استفاده از رابطه (۳) می‌توان به صورت رابطه (۴) نوشت:

$$R(t, z) = (R_0(t))^{\exp(+0.249z_{11} - 1.517z_{12} - 1.019z_2 - 1.027z_3 + 0.254z_4 - 0.023z_9 - 0.552z_5)} \quad (4)$$

مدل باید کنترل شود. برای این منظور می‌توان از آزمون فرض GOF^{۳۳} استفاده نمود که با آرایه آماره استاتیک و p-

ستون‌ها و مرز بحرانی اطمینان ۹۵ درصد برای ارزیابی فرضیه صفر با خط‌چین نمایش داده شده است. همان‌طوری که دیده می‌شود ستون AFC مربوط به گام ۱ برای سیستم دارای مقدار ۰/۱۱ بوده 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 شده و روش NHPP مناسب برای توصیف رفتار متغیر، خرابی‌ها در طول زمان خواهد بود. همان‌طور که اشاره شد، 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.



شکل ۵: نمودار خودهمبستگی برای لگ‌های ۱ و ۲

حال برای وارد نمودن تأثیر شرایط محیطی باید تابع پیوند از مدل PHM تعیین شود. به این منظور داده‌های TBFs و فاکتورهای ریسک مربوطه با استفاده از نرم‌افزار SPSS و به روش بازگشتی تحلیل شد. در نخستین گام ضرایب رگرسیون (α) تخمین زده شده و معناداری هر یک از α ها با محاسبه آماره والد^{۳۱} و مقدار p-value آن بررسی می‌شود. در این مطالعه p-value ۵ درصد به عنوان حد بالایی سطح معناداری فاکتور ریسک در نظر گرفته می‌شود. نتایج تحلیل‌ها در جدول ۵ و جدول ۶ آورده شده است. طبق جدول ۵ فاکتورهای ریسک حذف شده در هر مرحله بر اساس سطح معناداری تعریف شده، مشخص شده است. در جدول ۶ مقدار Exp(α) نشان دهنده نرخ مخاطره

از سویی دیگر به منظور پیشگیری از هر نوع ارزیابی در نتایج به دست آمده از PHM، فرض متناسب بودن (PH)^{۳۲}

خواهد کرد) و حالت دوم با در نظرگیری تأثیرات فاکتورهای ریسک به ازای مقادیر متوسط فاکتورها ریسک در جدول ۷ و با استفاده از رابطه (۴) در شکل ۶ ترسیم شده است.

جدول ۳: مقادیر p -value برای فاکتورهای ریسک

فاکتورهای ریسک (z)	ρ	P(PH)	متوسط (z)
نوبت (۱) (z_{11})	-۰/۰۰۸	۰/۹۲۱	۰/۲
نوبت (۲) (z_{12})	-۰/۰۶۲	۰/۴۲۵	۰/۷۲۴
محل کار (z_2)	-۰/۰۴۹	۰/۵۲۵	۱/۸۵۳
تناسب با تراک (z_3)	۰/۰۸۱	۰/۲۹۷	۲/۰۲۴
وضعیت آب‌وهوایی (z_4)	-۰/۰۱۶	۰/۸۳۳	۳/۰۹۴
دمای محیط (z_5)	-۰/۰۶۱	۰/۴۳۲	۵/۲۷۹
وضعیت جاده (z_6)	-۰/۰۳	۰/۶۹۷	۱/۱۹۴

value به ارزیابی فرض PH برای هر یک از فاکتورهای ریسک می‌پردازد. آزمون فرض بر این اساس استوار است که صورت برقراری فرض PH باقیمانده‌های شوئنفلد^{۳۴} همبستگی با زمان نخواهند داشت ($H_0: \rho=0$). در واقع در صورت رد فرض صفر فرض PH نیز رد خواهد شد [۴۴]. نتایج آزمون برای فاکتورهای ریسک مختلف به صورت جدول ۷ تنظیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، $P(PH)$ -value برای هیچ یک از فاکتورهای ریسک در سطح معناداری ۵ درصد معنادار نیست. بنابراین فرض PH برای تمامی فاکتورهای ریسک برقرار است. نهایتاً تابع قابلیت اطمینان لودر برای دو حالت: حالت اول، صرف‌نظر از تأثیرات فاکتورهای ریسک (قابلیت اطمینان پایه بیانگر قابلیت اطمینانی می‌باشد که در صورت مساوی صفر بودن تمامی تأثیرات متغیرهای کمکی تجربه



شکل ۶: قابلیت اطمینان لودر کوماتسو

نرخ مخاطره لودر نیز برای دو حالت مذکور به شکل ۷ است. در این نمودارها نیز به خاطر $\beta > 1$ نرخ مخاطره رفته‌رفته کاهش یافته است

۵- نتیجه‌گیری

از پرکاربردترین مدل‌ها در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان سیستم، فرایند پواسون همگن (HPP) و فرایند تجدیدپذیر (RP) بوده که در دو مدل مبتنی بر برقراری فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها هستند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان لودر بدون در نظرگیری تأثیرات شرایط محیطی بعد از تقریباً ۲ ساعت کارکرد به ۵۰ درصد افت کرده در حالی در صورت وارد نمودن 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.



شکل ۷: نرخ مخاطره لودر کوماتسو

مراجع

- [1] Nan, M. S., Nicolescu, C., Jula, D., Bolovan, C., Voicu, G. V., & 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*, 5(2), 238–246.
- [2] Levkovich, P., & Chalenko, N. (1969). Use of reliability theory to calculate the required number of reserve longwall faces. *Journal of Mining Science*, 5(2), 160–165.
- [3] Al'tshuler, V. (1969). A method of constructing a mathematical model to study the reliability of mine transportation systems. *Journal of Mining Science*, 5(1), 72–76.
- [4] Ivko, V., Ovchinnikova, L., & Plotnikova, V. (1973). A method of estimating the operational reliability of kinematic mechanized support systems. *Journal of Mining Science*, 9(3), 333–335.
- [5] Freidina, E., Kovalenko, A., & Rudenko, O. (1975). Effect of mine-transport-equipment reliability on the productivity of a quarry system. *Journal of Mining Science*, 11(1), 50–54.
- [6] Bondar', S., & Mernov, V. (1979). Operational reliability of conveyer lines with intermediate storage capacity. *Journal of Mining Science*, 15(3), 268–270.
- [7] Garakavi, A., Manevich, I., & Merkin, V. (1984). Technological reliability and its safeguards in mining operations. *Journal of Mining Science*, 20(6), 456–462.
- [8] Dhillon, B. S. (1986). Bibliography of literature on mining equipment reliability. *Microelectronics Reliability*, 26(6), 1131–1138.
- [9] Goodman, G. V. R. (1988). An assessment of coal mine escapeway reliability using fault tree

حال آنکه در مورد سیستم‌های تعمیرپذیر به علت تنزل یا بهبود سیستم دارای روند بوده و کاربرد این روش‌ها مناسب نبوده و استفاده از مدل‌هایی مانند فرایند قانون توانی (PLP) مناسب‌تر خواهد بود.

با تمام تفاسیر این مدل‌ها به علت یک‌بعدی بودن یعنی در نظرگیری تنها داده‌های زمان و صرف‌نظر از شرایط محیطی (فاکتورهای ریسک) از نتایج واقعی به دور هستند. در گذشته معمول‌ترین رویکرد در مواجهه با فاکتورهای ریسک حذف آنها از محاسبات یا تقسیم داده‌ها بر اساس این فاکتورها بود. در صورت تقسیم داده‌ها نیز امکان بروز مشکلاتی مانند عدم وجود تعداد کافی داده برای انجام تحلیل‌های معنادار در برخی گروه‌ها یا تشابه بین گروه‌ها بود که از تحلیل آنها صرف‌نظر می‌شود. از این‌رو در این پژوهش از مدل نرخ مخاطرات متناسب (PHM) استفاده شد که این مدل رگرسیونی قادر به تحلیل هم‌زمان داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک است. مدل پیشنهادی در مورد تحلیل قابلیت اطمینان سیستم لودری از معدن مس مولبدین- مس آذربایجان به کار گرفته شد. نتایج تحلیل حاکی از اختلاف سه برابری بهره‌وری در صورت در نظرگیری فاکتورهای ریسک در مقایسه با حالتی است که از آنها صرف‌نظر می‌شود. تابع به دست آمده در مرحله سرآغاز تحلیل‌های گسترده در مورد عملکرد ماشین است، زیرا 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 نمود.

- rock mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 23(3), 227–238.
- [21] Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., & Kumar, U. (2012). Reliability analysis of the cable system of drum shearer using the power law process model. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1–15. doi:10.1080/17480930.2011.622477
- [22] Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., & Kumar, U. (2011). Reliability and maintainability analysis of electrical system of drum shearers. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 17(2), 192–197. doi:10.1007/s12404-011-0216-z
- [23] Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., & Kumar, U. (2012). Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines. *Journal of quality in maintenance engineering*, 18(1), 98–119.
- [24] Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., & Kumar, U. (2011). Reliability modeling of hydraulic system of drum shearer machine. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 17(4), 450–456. doi:10.1007/s12404-011-0419-3
- [25] Gorjian Jolfaei, N. (2012). Asset health prediction using the explicit hazard model. Queensland University of Technology.
- [26] Ghodrati, B., & Kumar, U. (2005). Operating environment-based spare parts forecasting and logistics: a case study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 8(2), 95–105. doi:10.1080/13675560512331338189
- [27] Kumar, D., & Klefsjö, B. (1994). Proportional hazards model: a review. *Reliability Engineering & System Safety*, 44(2), 177–188.
- [28] Kumar, D., & Klefsjö, B. (1994). Proportional hazards model—an application to power supply cables of electric mine loaders. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 1(03), 337–352.
- [29] Kumar, D. (1995). Proportional hazards modelling of repairable systems. *Quality and reliability engineering international*, 11(5), 361–369.
- [30] Kumar, D., & Westberg, U. (1996). Proportional hazards modeling of time-dependent covariates using linear regression: a case study [mine power cable reliability]. *Reliability, IEEE Transactions on*, 45(3), 386–392.
- [31] Prasad, P., & Rao, K. (2002). Reliability models of repairable systems considering the effect of operating conditions (pp. 503–510). Presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2002. Proceedings. Annual, IEEE.
- [32] Ghodrati, B., & Kumar, U. (2005). Reliability and operating environment-based spare analysis. *Mining Science and Technology*, 7(2), 205–215.
- [10] Kumar, U., Klefsjö, B., & Granholm, S. (1989). Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a Swedish mine. *Reliability Engineering & System Safety*, 26(4), 341–361. doi:10.1016/0951-8320(89)90004-5
- [11] Kumar, U., & Klefsjö, B. (1992). Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model. *Reliability Engineering & System Safety*, 35(3), 217–224. doi:10.1016/0951-8320(92)90080-5
- [12] Kumar, U. (1990). Reliability Analysis of Load-Haul-Dump Machines (Phd Thesis). Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- [13] Vagenas, N., Runciman, N., & Clément, S. R. (1997). A methodology for maintenance analysis of mining equipment. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 11(1), 33–40. doi:10.1080/09208119708944053
- [14] Hall, R. A., & Daneshmend, L. K. (2003). Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment. *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) bulletin*, 96(1072), 159–165.
- [15] Vagenas, N., Kazakidis, V., Scoble, M., & Espley, S. (2003). Applying a maintenance methodology for excavation reliability. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 17(1), 4–19.
- [16] Samanta, B., Sarkar, B., & Mukherjee, S. (2004). Reliability modelling and performance analyses of an LHD system in mining. *South African Institute Mining And Metallurgy*, 104, 1–8.
- [17] Barabady, J., & Kumar, U. (2008). Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(4), 647–653. doi:10.1016/j.ress.2007.10.006
- [18] Barabady, J., & Kumar, U. (2005). Maintenance Schedule by Using Reliability Analysis: A Case Study at Jajram Bauxite Mine of Iran (Vol. 2, pp. 831–838). Presented at the 20th World Mining Congress, Tehran, Iran: World Mining Congress.
- [19] Barabady, J. (2005). Reliability and maintainability analysis of crushing plants in Jajarm Bauxite Mine of Iran (pp. 109–115). Presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings. Annual, IEEE.
- [20] Vayenas, N., & Wu, X. (2009). Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard

- International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 17(3), 139–155. doi:10.1076/ijsm.17.3.139.14773
- [44] Kleinbaum, D. G. (2011). Survival analysis. Springer.
- [45] Pijenburg, M. (1991). Additive hazards models in repairable systems reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 31(3), 369–390.
- [46] Gorjian, N., Ma, L., Mittinty, M., Yarlagadda, P., & Sun, Y. (2010). The explicit hazard model-part 1: theoretical development (pp. 1–10). Presented at the Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM'10., IEEE.
- [47] Cox, D. R. (1972). Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 187–220.
- [48] Martorell, S., Sanchez, A., & Serradell, V. (1999). Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 64(1), 19–31.
- parts estimation approach: a case study in Kiruna Mine, Sweden. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 11(2), 169–184.
- [33] Ghodrati, B., Kumar, U., & Kumar, D. (2003). Product support logistics based on product design characteristics and operating environment (p. 21). Presented at the 38th Annual International Logistics Conference and Exhibition: SOLE 2003, Huntsville, United States: Society of Logistics Engineers.
- [34] Ghodrati, B., Banjevic, D., & Jardine, A. (2010). Developing effective spare parts estimations results in improved system availability (pp. 1–6). Presented at the Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual, IEEE.
- [35] Ghodrati, B., Benjevic, D., & Jardine, A. (2012). Product support improvement by considering system operating environment: A case study on spare parts procurement. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 29(4), 436–450. doi:10.1108/02656711211224875
- [36] Ghodrati, B. (2006). Weibull and Exponential Renewal Models in Spare Parts Estimation: A Comparison. *International Journal of Performability Engineering*, 2(2), 135.
- [37] Barabadi, A., Barabady, J., & Markeset, T. (2011). A methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment condition. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(12), 1637–1646. doi:10.1016/j.res.2011.09.001
- [38] Rahadiyan Wijaya, A. (2012). Methods for Availability Improvements of a Scaling Machine System (Doctoral Thesis). Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- [39] IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-02-06: "reliability (performance)." (2014, January 24). Retrieved January 24, 2014
- [40] Yin, R. K. (2008). Case study research: Design and methods (Vol. 5). SAGE Publications, Incorporated.
- [41] IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-04-01: "failure." (2014, January 24). Retrieved January 24, 2014.
- [42] Ma, Z. (2008). Survival analysis approach to reliability, survivability and prognostics and health management (phm) (pp. 1–20). Presented at the Aerospace Conference, 2008 IEEE, IEEE.
- [43] Hall, R. A., & Daneshmend, L. K. (2003). Reliability Modelling of Surface Mining Equipment: Data Gathering and Analysis Methodologies.

¹ - Mean time between failures (TBFs)

² - Mean time to failures (TTFs)

³ - Total time on test

⁴ - Proportional hazard model

⁵ - Covariates

⁶ - Failure distribution density function

⁷ - Cumulative Distribution Function

⁸ - Failure rate function

⁹ - Hazard function

¹⁰ - Complete failure data

¹¹ - Suspended data

¹² - Censored data

¹³ - Truncated data

¹⁴ - Homogeneous Poisson process

¹⁵ - Renewal process

¹⁶ - Non-homogeneous Poisson process

¹⁷ - Superimposed renewal process

¹⁸ - Branching renewal process

¹⁹ - Branching Poisson process

²⁰ - Markov process

²¹ - Semi-Markov process

²² - independent and identically distributed

²³ - Power law process model

²⁴ - Baseline hazard rate

²⁵ - Proportional hazard model

²⁶ - Response variable

²⁷ - Link function

²⁸ - Continuous covariates

²⁹ - Categorical covariates

³⁰ - Autocorrelation function

³¹ - Wald statistics

³² - PH assumption

³³ - Goodness of Fit

³⁴ - Schoenfeld residuals