http://www.jocs.ir

مجله علمی رویکردهای پژوهشی در علوم زمین (سال ششم)
شماره ۱۶ / بهار ۱۴۰۰ / ص ۱۲ - ۱

تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه حفاری جامبودریل و لودر LHD (مطالعه موردی ماشین‌آلات بخش زیرزمینی معدن مس چهارگنبد)

تاریخ دریافت مقاله: فروردین ۱۴۰۰
تاریخ پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۴۰۰

فرشاد عزیزی[۱]، فائزه شمس اسفندآبادی[۲]، محمد امجدی[۳]، احسان امینی[۴]، سیدیاسین رضوی[۵]

[۱] سرپرست دستگاه نظارت مقیم پروژه زیرزمینی معدن مس چهارگنبد، شرکت مهندسی و مشاوره‌ای پارس‌اولنگ
[۲] دانشجوی کارشناسی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
[۳] دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
[۴] ناظر مقیم، پروژه زیرزمینی معدن مس چهارگنبد
[۵] سرپرست کارگاه، پروژه زیرزمینی معدن مس چهارگنبد

نام نویسنده مسئول:
فرشاد عزیزی

چکیده

در این مقاله دو دستگاه حفاری جامبودریل و لودر LHD در معدن مس چهارگنبد برای انجام یک تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و در دسترس بودن یا نبودن آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌است. با توجه به برتری تحلیل آماری نسبت به سایر روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان، از این روش استفاده شده است. از بین روش‌های تحلیل آماری داده‌ها نیز از آزمون‌های همبستگی و روند، برای دستیابی به قابلیت اطمینان استفاده شده است. با جمع‌آوری داده‌های خرابی و زمان توقف این دو دستگاه، قابلیت اطمینان جامبودریل و لودر LHD به دست آمده است.

کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان، معدن مس چهارگنبد، دستگاه حفاری جامبو دریل، دستگاه لودر LHD، تحلیل آماری.

۱- مقدمه

قابلیت اطمینان یک شاخص عمومی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های مهندسی است و اولین بهره‌گیری از آن در مهندسی معدن به اواخر دهه ۱۹۶۰ برمی‌گردد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم‌های مهندسی در دنیا ارائه شده است. از این بین، در دهه اخیر قابلیت اطمینان تجهیزات معدنی مختلفی همچون ماشین‌های LHD، تجهیزات باربری زیرزمینی، شاول‌های هیدرولیکی، کارخانه فرآوری، شیررهای روش استخراج جبهه کار بلند، سیستم نوار نقاله، شبکه پیچیده تهویه معادن زغالسنگ، دستگاه دراگلاین، سیستم تهویه فرعی در تونل‌های طویل تحت احداث، ماشین‌های حفاری دورانی در معادن روباز و سیستم تخلیه و انباشت، مطالعه و گزارش شده است [۱-۶].

۲- قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان یک شاخص مهندسی و ریاضی برای بررسی خرابی و پیش‌بینی زمان عملیات مفید هر دستگاه یا سیستم مهندسی می‌باشد. در بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان، یک سری از اصطلاحات و کمیت‌ها، مرسوم و پرکاربرد هستند. مجموعه‌ای از مفاهیم و محاسبات ریاضی به عنوان ابزار ضروری و کاربردی در این شاخص استفاده می‌شود که لازم است ابتدا کمیت‌های مهندسی قابلیت اطمینان تشریح شود و با توجه به آن‌ها قابلیت اطمینان توضیح داده شود [۷].

۲-۱- خرابی[1]

ناتوانی یک بخش یا یک قطعه از دستگاه یا سیستم در انجام وظایف تعریف شده، خرابی یا نقص نامیده می‌شود. افراد مختلفی دلایل وقوع خرابی‌های مکانیکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند که شامل طراحی ضعیف یا ناقص، نقص در ساخت، کاربرد نادرست، جایگذاری و نصب نادرست، فرسودگی، وقوع خرابی در سایر اجزا سیستم و تنزیل تدریجی در کارکرد است [۷].

۲-۲- نرخ خرابی[2]

نرخ خرابی یا نرخ حادثه، نسبت تغییر در تعداد اجزا یا بخش‌هایی از دستگاه که به طور مطلوب عمل نمی‌کنند به تعداد اجزایی که به حالت مطلوب کار می‌کنند است. احتمال وقوع خرابی در واحد زمان، به شرطی که سیستم تا این لحظه (به مدت t) بدون اشکال کار کرده باشد، به صورت زیر است [۷].

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (۱)$$

یکی از عوامل مهم در تعیین نرخ خرابی عامل زمان است. چنانچه مقدار زمانی که دستگاه یا ماشین از دسترس کارفرما خارج است و هیچگونه کاری را انجام نمی‌دهد مشخص باشد، زمان عدم دسترسی به این دستگاه قابل محاسبه است تا ماشین دیگری جایگزین شود یا با بهره‌گیری از راه حل مناسب دیگر، کمترین انحراف از هدف و برنامه زمانبندی حادث شود.

۲-۳- زمان بین خرابی‌ها (TBF)[3]

فاصله زمانی بین خرابی‌های مداوم یک بخش یا یک قطعه از دستگاه را زمان بین خرابی‌ها یا زمان تا خرابی می‌نامند. با در دست داشتن این زمان می‌توان با نزدیک شدن به زمان خرابی این قطعه یا بخش از ماشین، با تعویض آن از خرابی کل ماشین جلوگیری کرد. رابطه (۲) زمان بین خرابی را نشان می‌دهد [۷].

$$TBF = UT + DT \quad (۲)$$

که UT "زمان تا وقوع خرابی یا زمان در حال کار" و DT "متوسط زمان انجام تعمیرات یا متوسط زمان توقف‌ها" است.

۲-۴- زمان برای تعمیر (TTR)[4]

زمان برای تعمیر، زمان مورد نیاز برای رفع نقص و خرابی و یا تعمیر بخش خراب شده دستگاه است. این زمان در تعمیرگاه و یا بخش مربوط به پارکینگ معدن سپری می‌شود که مطابق رابطه (۳) می‌باشد [۷].

$$TTR = DT \quad (۳)$$

[1] Failure
[2] Hazard/Failure Rate
[3] Time Between Failures (TBF)
[4] Time To Repair (TTR)

۲-۵- قابلیت اطمینان

احتمال این که یک دستگاه یا سیستم بتواند وظیفه محوله خویش را در یک بازه زمانی مشخص به حالت خوب و مطلوبی انجام دهد، قابلیت اطمینان آن دستگاه یا سیستم نامیده می‌شود. بعبارتی معیاری برای سنجش توانایی عملکرد سیستم به هنگام نیاز، در بازه زمانی مشخص و محیط خاص می‌باشد [۱۰-۸].

$$R(x) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x)dx$$
$$F(t) = \int_0^t f(x)dx \quad (۴)$$

که $F(t)$ بیانگر تابع توزیع تجمعی و $f(x)$ بیانگر تابع چگالی توزیع احتمال می‌باشد. این رابطه در حالت ساده به صورت قابلیت اطمینان در زمان t خوانده می‌شود. این کمیت از جنس احتمال بوده و به صورت درصد بیان می‌شود.

در تحلیل قابلیت اطمینان هر سیستم یا دستگاهی، اطلاع دقیق از ساختار عملیاتی و نیز طراحی آن سیستم یا دستگاه الزامی است. بررسی ساختار دستگاه به منظور ارزیابی ارتباطات داخلی اجزای مختلف دستگاه (بخش یا قطعه) و تأثیر آن‌ها بر عملکرد کلی دستگاه صورت می‌گیرد. عملکرد دستگاه، مجموع و برآیند عملکرد تمامی بخش‌ها است. از این‌رو قابلیت اطمینان دستگاه نیز به طور مستقیم به قابلیت اطمینان بخش‌های مختلف آن بستگی دارد [۱۱].

در مهندسی قابلیت اطمینان هر یک از بخش‌های دستگاه یا سیستم را که عمل مشخص و قابل ملاحظه‌ای انجام می‌دهد؛ زیرسیستم می‌نامند. در تحلیل و مدلسازی قابلیت اطمینان هر دستگاه ابتدا باید تمامی زیرسیستم‌های حیاتی دستگاه شناسایی شده و ارتباط داخلی این بخش‌ها تعیین شوند. نحوه ارتباط داخلی و آرایش زیرسیستم‌ها را در مهندسی قابلیت اطمینان شبکه می‌نامند [۱۱].

امروزه روش‌های متنوعی برای بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی و دستگاه‌ها ارائه شده است. کاربرد روش‌های مختلف به مشخصات سیستم مورد مطالعه، قابلیت‌های روش و اهداف مطالعات بستگی دارد و روش واحدی که پاسخگوی همه نیازها باشد، وجود ندارد. از این رو تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت اطمینان توسعه یافته و روش‌های جدیدی برای پوشش معایب روش‌های قبلی در حال توسعه است. روش‌های اصلی در این حوزه عبارت است از [۷] :

۱- روش تحلیل عوامل خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها

۲-روش تحلیل درخت خطا

۳-روش مارکوف

۴-روش تحلیل آماری

با بررسی روش‌ها در ادامه بهترین روش برای تحلیل قابلیت اطمینان انتخاب می‌شود.

۲-۵-۱- روش تحلیل عوامل خرابی‌ها

روش تجزیه و تحلیل انواع خرابی و تاثیرات آن یک روش قابلیت اطمینانی می‌باشد که تمامی خرابی‌های ممکن را در طراحی سیستم مورد نظر در محدوده و چارچوب خود مستند می‌سازد. توسط تجزیه و تحلیل عوامل خرابی را بر عملکرد سیستم را تعیین می‌کند و نقاط تک خرابی را شناسایی می‌کند. همچنین ممکن است که هر خرابی را مطابق با میزان حساسیت تاثیرات خرابی و یا احتمال وقع آن دسته‌بندی نماید. روش تجزیه و تحلیل انواع خرابی با محدودیت‌هایی از جمله عدم تعیین دقیق احتمال وقوع خرابی و توانایی مهارت اعضای تیم روبه‌رو است[۷].

۲-۵-۲- روش تحلیل درخت خطا

روش ارزیابی درخت خطا، مدلی منطقی- دیداری است که از آن برای شرح چگونگی وقوع وقایع ناخواسته ویژه در یک سیستم که ممکن است به وسیله اثرات یک نقص ساده یا ترکیبی از نقایص ایجاد شود، استفاده می‌شود. واقعه ناخواسته ویژه واقعه نهایی نامیده می‌شود. این روش تجزیه و تحلیل راه‌های چگونگی وقوع این واقعه ناخواسته را بررسی می‌کند. با در دست داشتن اطلاعات صحیح امکان محاسبات مربوط به فرکانس و احتمال واقعه نیز ممکن است [۷].

محدودیت اصلی روش درخت خطا، ضعف احتمالی آن در شناسایی کلیه رویدادهایی است که می‌توانند به وقوع رویداد اصلی کمک کنند که دلیل اصلی این امر می‌تواند عدم تجربه و آگاهی کافی محقق از وظیفه و رفتار سیستم باشد. محدودیت دیگر این روش مشکل بودن تعیین احتمال وقوع شکست‌ها است هرچند داده‌های زیادی از طریق بانک‌های اطلاعاتی مهندسی، قابلیت اعتماد منابع دیگر در دسترسند ولی تعیین احتمال دقیق شکست‌ها بویژه خطاهای انسانی بسیار مشکل می‌باشد؛ زیرا رفتار انسان‌ها در شرایط مختلف نظیر خستگی، حواس پرتی، فشارهای روانی و ... متفاوت می‌باشد. بعلاوه رفتار افراد مختلف در شرایط یکسان نیز متفاوت است [۱۲].

۲-۵-۳- روش مارکوف[5]

روش مارکوف مدلی برای نمایش دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی است که در آن احتمال رویداد هر پیشامد فقط به پیشامد قبلی وابسته است. به این ترتیب احتمال رخداد پیشامدها در چنین مدلی فقط به زمان قبل وابسته بوده و بقیه پیشامدها در میزان احتمال دخالت نمی‌کنند. از این رو برای بررسی احتمال خرابی ماشین‌آلات روش مارکوف کارایی لازم را ندارد [۷].

۲-۵-۴- روش تحلیل آماری

تحلیل آماری عبارت است از گزارشی شامل جداول و نمودارهای آماری و تحلیل و تفسیر آن، به گونه‌ای که تصویری روشن و توصیفی از داده‌ها و هم‌چنین استنباط‌های حاصل از استخراج نکات کلیدی و مدیریتی از داده‌ها و آزمون‌های آماری برای قبول یا رد فرضیات تحقیق ارائه می‌دهد [۱۱].

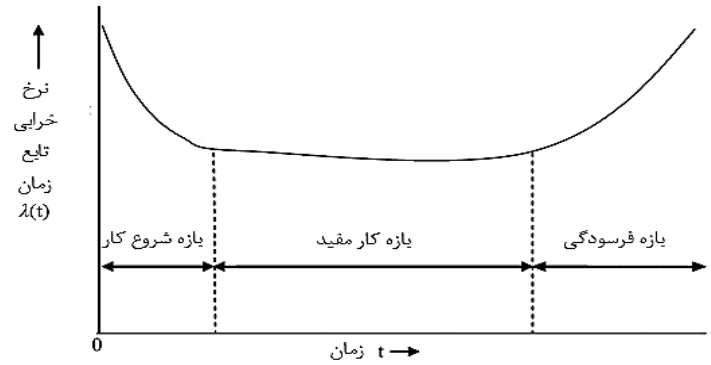
از این میان روش تحلیل آماری کامل‌ترین و جامع‌ترین روش تحلیل قابلیت اطمینان به شمار می‌آید. به همین دلیل در این مقاله از روش تحلیل آماری استفاده شده است.

هر دستگاه در طول عمر خود سه بازه زمانی مشخص را طبق منحنی میزان نرخ حادثه (شکل ۱) در طول مدت عمر یک دستگاه سپری می‌نماید. این منحنی در مهندسی قابلیت اطمینان به منحنی "وان شکل" شهرت یافته است [۱۳،۷].

در اوایل عمر دستگاه (بازه شروع کار)، ابعاد فنی و مشخصات عملیاتی بخش‌های مختلف دستگاه برای اپراتور به طور کامل مشخص نبوده و رفتار دستگاه تا حدودی برای کاربر ناشناخته است. این امر در اوایل عمر دستگاه باعث بروز خرابی‌ها و توقف‌هایی در تولید می‌شود. کنترل کیفیت ضعیف، مواد و لوازم یدکی غیراستاندارد، نقاط ضعف موجود در ساخت دستگاه، رفع نقص و تعمیر نامناسب و خطاهای انسانی از جمله دلایل دیگر بالا بودن نرخ خرابی در اوایل عمر دستگاه می‌باشد.

مدتی پس از شروع و راه‌اندازی دستگاه، نرخ خرابی با گذشت زمان کمتر می‌شود. در اواسط عمر دستگاه با توجه به شناخت کافی کاربر از دستگاه و همچنین برنامه‌ریزی صحیح برای تعمیر و نگهداری، دستگاه از نظر خرابی به حالت پایداری نسبی رسیده و نرخ خرابی در بازه زمانی کار مفید تقریباً ثابت می‌ماند.

با نزدیک شدن به انتهای عمر دستگاه، کلیه بخش‌های دستگاه دچار فرسودگی و کاهش کیفیت می‌شوند. در نتیجه قطعات دستگاه دچار خرابی‌های غیر ملموس شده و قطعات تحت سرعت و تنش‌های بالاتر از توان خود قرار می‌گیرند و با گذشت زمان نرخ خرابی دستگاه افزایش می‌یابد.



شکل ۱ - منحنی میزان نرخ حادثه در طول مدت عمر یک دستگاه [۷]

تعیین نرخ خرابی یک دستگاه می‌تواند دید مناسبی از شرایط عملیاتی و سطح آمادگی دستگاه ارائه نماید. همچنین تعیین این شاخص در بازه‌های زمانی مشخص، باعث می‌شود تا کاربر از وضعیت فرسودگی و نیز عمر مفید باقیمانده دستگاه مطلع شود. با استفاده از این شاخص می‌توان با کنترل آماری خرابی‌های یک بخش یا یک قطعه از دستگاه، زمان مناسب تعویض یک قطعه از دستگاه را پیش‌بینی کرد.

۳- ماشین‌آلات مورد مطالعه

در این مقاله ماشین حفاری جامبودریل و ماشین بارگیری لودر LHD (شکل ۲) که در بخش زیرزمینی معدن مس چهارگنبد سیرجان فعالیت می‌کنند؛ مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصات دستگاه‌های مذکور به ترتیب در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

[5] Markov

شکل ۲- ماشین آلات معدن مس چهارگنبد

جدول ۱- مشخصات دستگاه حفاری جامبودریل

نوع مته	Montabert HC 109
سرعت مته	۱۹۰ rpm
وزن مته	۱۴۲ کیلوگرم
توان موتور	۵۸ کیلووات
حجم تانک سوخت	۹۰ لیتر
حداکثر سرعت در سطح صاف	۱۲ کیلومتر در ساعت
بوم	تلسکوپی ASM
سایز لاستیک	۱۴-۲۴
وزن	۱۷۰۰۰ کیلوگرم
طول	۹۷۰۰-۱۰۵۰۰ میلی‌متر
عرض	۲۳۰۰ میلی‌متر
ارتفاع	۲۲۰۰-۳۴۱۵ میلی‌متر

جدول ۲- مشخصات دستگاه لودر LHD

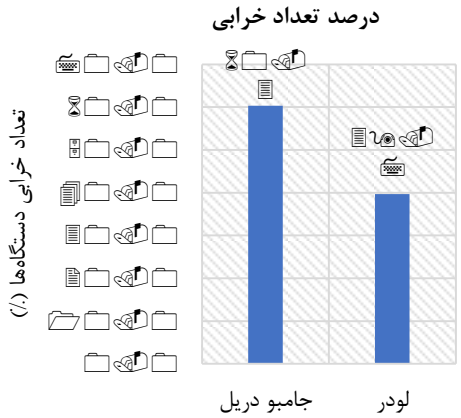
توان موتور	۱۲۹ کیلووات
حجم تانک سوخت	۱۶۰ لیتر
حداکثر سرعت در سطح صاف	۸- ۴/۵ کیلومتر در ساعت
سایز لاستیک	۱۲-۲۴
وزن	۱۴۹۰۰ کیلوگرم
طول	۷۷۰۱-۸۱۷۶ میلی‌متر
عرض	۱۶۵۰ میلی‌متر
ارتفاع	۱۵۹۹-۲۲۰۰ میلی‌متر
ظرفیت جام	۲/۴ مترمکعب
بوم	هیدرولیکی

۴- تحلیل داده‌ها

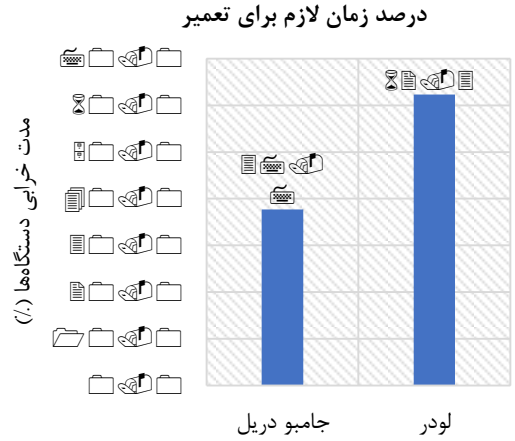
۴-۱- تحلیل پارتو

در روش متعارف تحلیل پارتو در ابتدا سیستم به چندین زیرسیستم مناسب تقسیم می‌شود. پس از تعیین زیرسیستم‌ها برای تجهیزات یا ماشین مورد نظر، از داده‌های مربوط به وقوع خرابی‌ها، هزینه‌های تعویض قطعات و تعمیرات انجام گرفته به هنگام وقوع خرابی، برای رسم نمودار درصد فراوانی تجمعی هزینه‌ها نسبت به درصد تجمع خرابی‌ها استفاده می‌شود. همچنین در مورد داده‌های خرابی می‌توان فراوانی خرابی برای هر زیرسیستم را به دست آورد و با استفاده از نمودار پارتو آن را تحلیل و زیرسیستم با بیشترین خرابی را مشخص نمود. پس در روش تحلیل پارتو امکان مشخص کردن نواحی مشکل‌دار را که باید به صورت هرچه گسترده‌تر به وسیله تحلیل پارتو و یا با استفاده از تکنیک‌های آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند؛ فراهم آورد. در این روش، پس از جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های خرابی، درصد تعداد خرابی و درصد مدت خرابی هر زیرسیستم نسبت به تمام خرابی‌ها محاسبه و نمودار ستونی فراوانی خرابی زیرسیستم‌ها، به ترتیب از بیشترین فراوانی به کمترین مقدار رسم می‌شود. به این ترتیب امکان تعیین بحرانی‌ترین زیرسیستم وجود خواهد داشت [۱۱].

در این پژوهش هدف از تحلیل پارتو مقایسه درصد تعداد و مدت خرابی دو دستگاه حفاری جامبودریل و لودر LHD با یکدیگر می‌باشد و سیستم به زیرسیستم‌های مختلف تقسیم نشده است. نمودار ستونی تحلیل پارتو برای سیستم‌های مختلف ماشین‌آلات معدن چهارگنبد مطابق شکل ۳ و ۴ است.



شکل ۳- نمودار تحلیل پارتو (مقایسه درصد تعداد خرابی دستگاه‌ها)



شکل ۴- نمودار تحلیل پارتو (مقایسه درصد مدت خرابی دستگاه‌ها)

بعد از جمع‌آوری داده‌ها و قبل از برازش توزیع بر داده‌ها، باید اساس فرض‌های مستقل بودن و داشتن توزیع یکسان داده‌های خرابی، مورد استفاده قرار گیرد. در آمار و احتمالات دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی، مستقل با توزیع یکسان نامیده می‌شود؛ اگر همه آن‌ها دارای توزیع یکسان بوده و دو به دو مستقل باشند. مستقل بودن با توزیع یکسان به این مفهوم است که یک عنصر در یک دنباله مستقل از متغیرهای تصادفی است که قبل از آن ظاهر شده‌اند [۱۱].

به منظور تحلیل این فرض، از دو روش آزمون روند[6] و آزمون همبستگی[7] استفاده می‌شود. در صورتی که داده‌ها مستقل نبوده و یکسان توزیع نشده باشند، باید از مدل‌های نامانا مانند پواسون ناهمگن فرآیند قانون توانی[8] استفاده کرد [۱۴].

۴-۲- آزمون روند

آزمون روند در واقع تعیین می‌کند که آیا نحوه پراکندگی داده‌های خرابی به طور معنی‌داری (تنزیل یا بهبود) در طول بازه زمانی تغییر کرده یا خیر. برای توصیف وجود یا عدم وجود روند روش‌های مختلفی وجود دارد. ارزیابی وجود روند در داده‌ها با استفاده از محاسبه یک شاخص آماری (U) (رابطه (۵)) انجام می‌شود [۳].

$$U = 2\sum_{i=1}^{n-1} \ln(T_n/T_i) \qquad (۵)$$

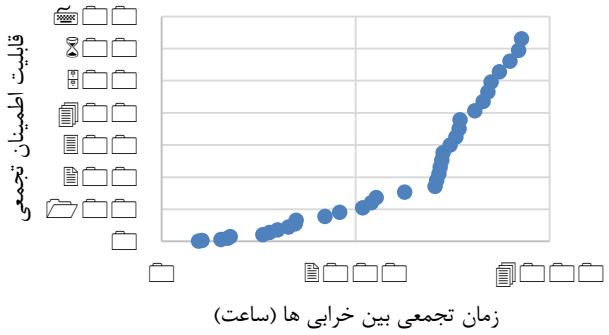
که در آن، n تعداد خرابی، T_n زمان آخرین خرابی، T_i زمان خرابی iام است.

در این روش، فرض صفر این است که داده‌ها از فرآیند پواسون ناهمگن تبعیت نمی‌کنند. برای کنترل صحت فرض صفر، پس از محاسبه U برای داده‌ها، از جدول استاندارد توزیع کی-دو استفاده می‌شود. اگر U از عدد بحرانی قرائت شده از جدول استاندارد بزرگتر باشد، فرض پایه صفر پذیرفته می‌شود.

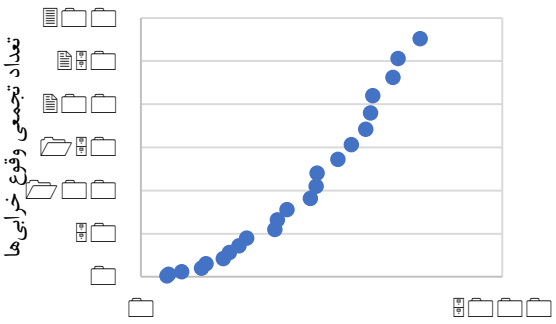
در این مقاله از روش نموداری آزمون روند استفاده شده است. روش نمودار تجمعی، زمان‌های بین خرابی‌ها (TBF) یا زمان انجام تعمیرات (TTR) را نسبت به تعداد تجمعی وقوع خرابی‌ها نشان می‌دهد. خط مستقیم نشان دهنده عدم روند در داده‌ها و منحنی‌های محدب یا مقعر به ترتیب نشان دهنده کاهش یا افزایش نرخ خرابی می‌باشند. نرخ خرابی افزایشی نشان دهنده‌ی وقوع خرابی‌های زودرس است [۱۴].

[6] Trend test
[7] Serial correlation test
[8] Power Low Process

از آنجا که مطابق اشکال ۵ و ۶ که روند قرارگیری نقاط در آزمون روند برای هر دو نمودار بسیار به حالت خطی نزدیک است، مشخص می‌شود که داده‌های خرابی این دو ماشین دارای روند نیستند و از این‌رو به صورت مانا توزیع شده‌اند.



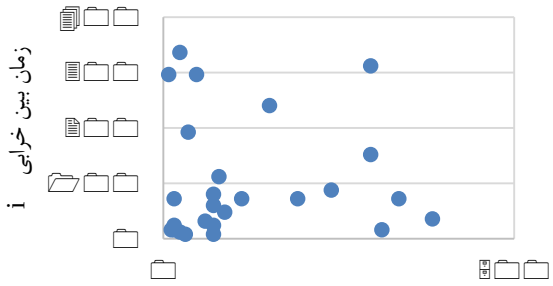
شکل ۵- آزمون گرافیکی بررسی وجود روند دستگاه حفاری جامبودریل



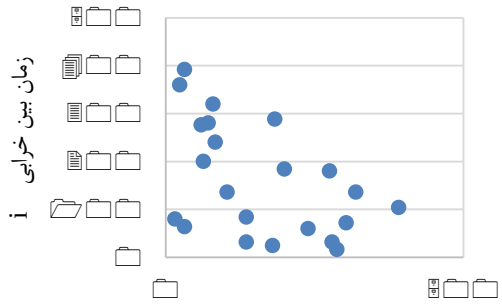
شکل ۶- آزمون گرافیکی بررسی وجود روند لودر LHD

۴-۳- آزمون همبستگی

برای بررسی همبستگی داده‌های خرابی یک دستگاه از روش گرافیکی استفاده می‌شود که n امین داده‌های خرابی به صورت تابعی از n□□ امین داده‌های خرابی در یک فضای (x,y) رسم می‌شوند. اگر نقاط موجود دارای نظم خاصی نباشد، بیانگر آن است که داده‌های متوالی دارای همبستگی نیستند. درغیر این حالت غیرمستقل خوانده می‌شود [۱۴].



شکل ۷- آزمون گرافیکی بررسی وجود همبستگی دستگاه حفاری جامبودریل



شکل ۸- آزمون گرافیکی بررسی وجود همبستگی لودر LHD

همانطور که در شکل ۷ و ۸ مشخص است پراکندگی نامنظم نقاط در آزمون همبستگی سری، بیانگر آن است که داده‌ها برای هر دو دستگاه دارای همبستگی سری نیستند و به صورت مستقل از هم توزیع شده‌اند. نتایج دو آزمون مذکور نشان می‌دهند که فرض مستقل و مانا بودن داده‌های خرابی ماشین‌آلات درست است.

۵- محاسبه مدل قابلیت اطمینان

در این بخش، محاسبات مربوط به تعیین بهترین تابع چگالی احتمال خرابی و تخمین پارامترهای مدل بر روی داده‌ها انجام می‌شود. با توجه به شرایط و تعداد داده‌های مورد استفاده، در این مطالعه از روش کلموگروف- اسمیرنوف[9] برای انتخاب بهترین تابع چگالی خرابی استفاده شده است [۱۵].

همچنین تطابق ظاهری توابع مورد بررسی با هیستوگرام داده‌ها به عنوان شاخص‌های کمکی برای انتخاب بهترین توزیع مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار Easyfit 5.5 استفاده شده است. این نرم‌افزار با محاسبه پارامترهای آماری، کاربر را در

[9] Kolmogorov-Smirnov

انتخاب بهترین تابع برازش شده در داده‌های موجود یاری می‌کند. گرچه در مجموع تعداد ۵۷ توزیع آماری در این نرم‌افزار مورد بررسی قرار می‌گیرند. با این حال هشت تابع اصلی شامل توابع نمایی، گاما، گامای تعمیم یافته، نرمال، لاگ نرمال، وایبول دو پارامتری، وایبول سه پارامتری و ارلانگ به عنوان توابع شناخته شده و پر کاربرد در مهندسی قابلیت اطمینان استفاده می‌شود [۱۶].

۵-۱- توزیع آماری

با استفاده از تکنیک‌های آماری می‌توان با برازش توزیع آماری مناسب بر داده‌های خرابی، به یک مدل معرف که تحلیل قابلیت اطمینان بر آن استوار خواهد بود؛ دست یافت. توزیع‌های آماری گسترده‌ای به منظور توصیف چرخه عمر تجهیزات وجود دارد که این توزیع‌ها به طورکلی می‌توانند به دو دسته مانا و نامانا تقسیم شوند که مطابق جدول ۳ می‌باشد [۱۷،۱۸].

جدول ۳- توابع پرکاربرد مانا و نامانا در بررسی قابلیت اطمینان [۱۷،۱۸]

مدل	توابع	کاربرد
مانا	توزیع نمایی	معمولا برای مدل‌های عمر مربوط به تجهیزات مکانیکی که ترکیبی از خستگی، خردگی و فرسایش می‌باشند؛ نامناسب است. توزیعی که دارای خاصیت فقدان حافظه می‌باشد.
	توزیع نرمال	از متداول‌ترین توزیع‌های مورد استفاده در علم آمار و احتمالات بوده و دارای تاریخچه گسترده از لحاظ کاربرد در زمینه‌های مختلف به سبب ویژگی‌های سادگی و نظریه حد مرکزی باشد.
	توزیع نرمال لگاریتمی	توزیع نرمال لگاریتمی یک توزیع عمر نمی‌باشد.از این‌رو به عنوان توزیع مهمی در ارزیابی قابلیت اطمینان به حساب نمی‌آید.
	توزیع ویبول	از ویژگی‌های آن ثابت نبودن شکل کلی آن و انطباق با نرخ‌های خرابی ثابت، افزایشی-کاهشی می‌باشد.این توزیع به طور گسترده‌ای در تحلیل قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد.
	توزیع گاما	این توزیع مربوط به مدل کردنتنزیل می‌باشد.
نامانا	مدل قانون توانی	حالت خاص از فرآیند پوآسون ناهمگن و روشی مناسب در سیستم‌هایی است که با گذشت زمان بهبود یافته یا رو به وخامت می‌روند.

آزمون های نیکویی برازش به منظور صحت سنجی توابع برازش شده و انتخاب بهترین توزیع از بین آنها بکار می رود. در این گزارش از روش کلموگروف- اسمیرنوف استفاده می‌کنیم که آماره و شرط پذیرش آن به صورت زیر (رابطه (۶)) است [۱۵].

$$D_N = max|F(x) - S_N(x)|$$
$$D_N \leq D^{\alpha}_{c(N)} \qquad (۶)$$

که در آن N تعداد مشاهدات یا داده‌های خرابی، F(x) تابع توزیع تجمعی تجربی، $S_N(x)$ تابع توزیع تجمعی تئوریک، α سطح تشخیص یا سطح معنی‌دار بودن و c آماره نمایشگر مقدار بحرانی است.

۵-۲- تعیین مدل قابلیت اطمینان

در این مرحله تابع قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی محاسبه شده و منحنی‌های آن‌ها برای ارایه نمای گرافیکی از توابع، رسم می‌شوند. سپس، منحنی‌های قابلیت اطمینان و نرخ خرابی به دست آمده مورد بررسی قرار خواهند گرفت و تفاسیر مربوط به آن‌ها ارائه می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها و مقادیر محاسبه شده مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی برای ماشین‌آلات به صورت روابط زیر محاسبه شده است. بر این اساس منحنی قابلیت اطمینان این ماشین‌آلات و منحنی‌های نرخ خرابی آن‌ها در ادامه ارائه شده‌اند.

۵-۲-۱- دستگاه حفاری جامبودریل

با توجه به نتایج به دست آمده، تابع لاگ نرمال بهترین تابع چگالی احتمال برازش شده می‌باشد که در زیر روابط آن به همراه تابع توزیع داده‌های خرابی این دستگاه ارائه شده است.

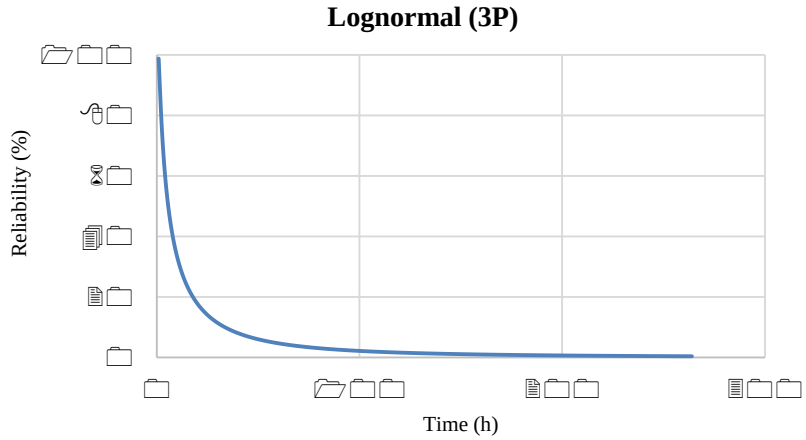
$$f(x) = \frac{exp(-\frac{1}{2}(\frac{\ln(x-\gamma)-\mu}{\sigma})^2)}{(x-\gamma)\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (۷)$$

$$F(x) = \varphi(\frac{\ln(x-\gamma)-\mu}{\sigma}) \quad (۸)$$

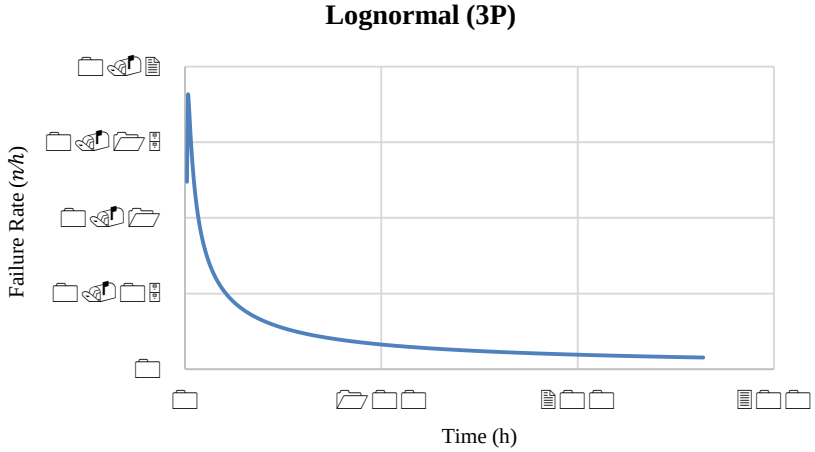
لازم به ذکر است که تابع لاگ نرمال دارای سه پارامتر است که مقادیر هر کدام عبارت است اند از:

$\sigma = 1 \cdot 48$
$\mu = 1 \cdot 58$
$\gamma = 0 \cdot 83$

نمودار قابلیت اطمینان به دست آمده در شکل ۹ نشان می شده که قابلیت اطمینان جامبو دریل پس از ۶ ساعت به ۵۰ درصد و پس از حدودا ۱۲۵ ساعت به زیر ۱ درصد افت پیدا می‌کند. این کمیت به این معنی است که این دستگاه پس از حدودا ۱۲۵ ساعت به احتمال صد در صد خراب شده و عملکرد آن متوقف خواهد شد.



شکل ۹– نمودار قابلیت اطمینان به دست آمده برای جامبو دریل



شکل ۱۰– نمودار نرخ خرابی به دست آمده برای جامبو دریل

شکل ۱۰ نیز نشان می‌دهد که نمودار نرخ خرابی ارائه شده مطابقت خوبی با نمودار وان شکل معرفی شده دارد. در این نمودار نرخ خرابی در ابتدا افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به مقدار ۰/۱۸ نزولی شده و به مقدار ۰/۰۱ میل می‌کند.

۵-۲-۲- دستگاه لودر LHD

باتوجه به نتایج به دست آمده، پیرسون نوع ۵ تابع چگالی احتمال برازش شده برای این دستگاه می باشد که روابط به همراه تابع توزیع مربوط به داده های خرابی این دستگاه ارائه شده است.

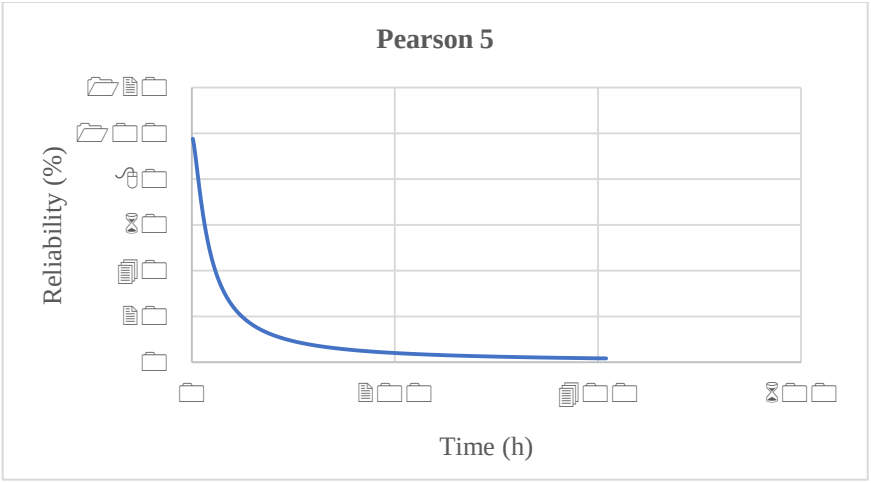
$$f(x) = \frac{\exp(-\frac{\beta}{x-\gamma})}{\beta\Gamma(\alpha)(\frac{x-y}{\beta})^{\alpha+1}} \quad (۹)$$

$$F(x) = 1 - \frac{\Gamma_{\beta(x-y)}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} \quad (۱۰)$$

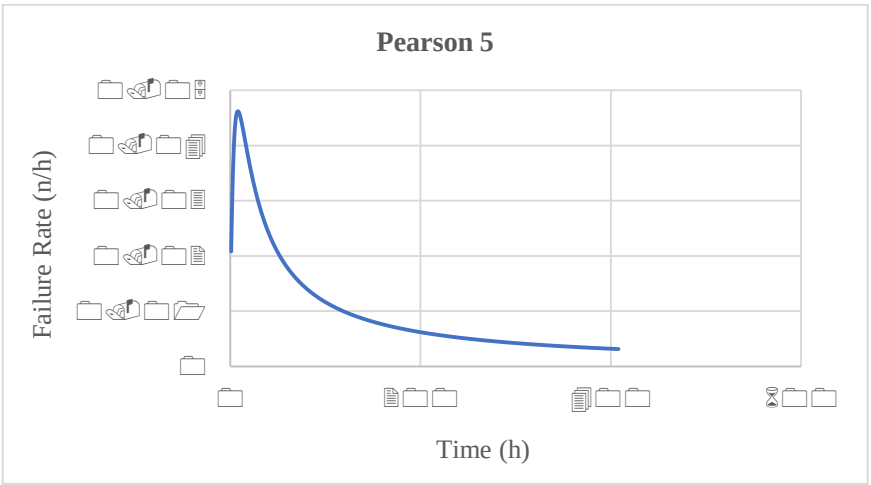
تابع پیرسون نوع ۵ نیز دارای سه پارامتر است که مقادیر هر کدام عبارت است اند از:

$\sigma = 1 \cdot 32$
$\beta = 20 \cdot 9$
$\gamma = -3 \cdot 76$

نمودار قابلیت اطمینان مطابق شکل ۱۱ نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان لودر پس از ۱۶ ساعت به ۵۰ درصد و پس از حدودا ۳۵۰ ساعت به زیر ۲ درصد افت پیدا می‌کند. این کمیت نشان می‌دهد که پس از حدودا ۳۵۰ ساعت دستگاه به خرابی نزدیک شده و نیاز به تعمیر خواهد داشت.



شکل ۱۱– نمودار قابلیت اطمینان به دست آمده برای لودر

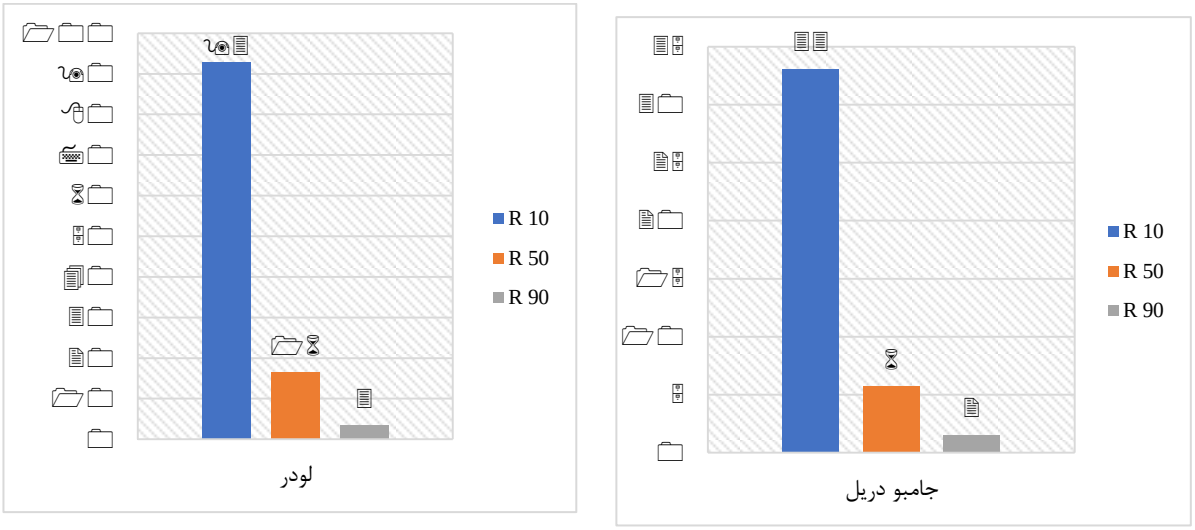


شکل ۱۲– نمودار نرخ خرابی به دست آمده برای لودر

شکل ۱۲ نیز مطابقت خوب نمودار نرخ خرابی را با نمودار وان شکل معرفی شده نشان می‌دهد. در این نمودار نرخ خرابی در ابتدا افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به مقدار ۰/۰۴۵ نزولی شده و به مقدار ۰/۰۰۵ میل می‌کند.

۵-۲-۳- شاخص قابلیت اطمینان دستگاه ها

اگر زمانی که قابلیت اطمینان هر دستگاه به ۹۰ درصد، ۵۰ درصد و ۱۰ درصد می‌رسد به ترتیب R90، R50 و R10 نامیده شود، این سه پارامتر را در معدن می‌توان در قالب نمودار ستونی مقایسه نمود. شاخص قابلیت اطمینان ارائه شده در شکل۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۳- شاخص قابلیت اطمینان برای جامبو دریل و لودر

۶- نتیجه‌گیری

اطمینان از عملکرد و در دسترس بودن ماشین‌آلات در معادن دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این بین اطلاع از قابلیت اطمینان دستگاه‌های حفاری به دلیل بزرگ مقیاس بودن و ایفای نقش در اولین مرحله از مراحل تولید ماده معدنی امری ضروری است.

به منظور برآورد قابلیت اطمینان از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. در پژوهش حاضر، با مد نظر قرار دادن دستگاه‌های حفاری معدن مس چهارگنبد و استفاده از نظریه تحلیل آماری، قابلیت اطمینان این دستگاه‌ها محاسبه شده است.

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل، مشاهده می‌شود لودر قابلیت اطمینان بالاتری داشته و این امر می‌تواند به دلیل عملکرد بهتر اپراتورها یا تعمیرکاران، قطعات یدکی مرغوب‌تر و یا شرایط کاری مطلوب‌تر باشد. اما مهم‌ترین عامل از دیدگاه اجرایی می‌تواند حساسیت قطعات بالای جامبودریل نسبت به لودر باشد. همانطور که از تحلیل پارتو نیز برمی‌آید، جامبودریل بیشترین درصد تعداد خرابی را دارد اما بیشترین درصد زمان برای تعمیر مربوط به لودر می باشد.

منابع و مراجع

1. Basiri, M.H. , Sharifi, M.R. , and Ostadi, B. “ Reliability and Risk Assessment of Electric Cable Shovel at Chadormalu Iron Ore Mine in Iran“ , Int. J. Eng., vol. 33, no. 1, pp. 170–177, 2020.
2. Dubey, S.P., Dr Uttawar, M.D., Tiwarri, M.S., “Reliability study of 42 cu.m shovel and 240 Te Dumper equipment system with special reference to Gevra OCP, SECL, BILASPUR“, Procedia Earth and Planetary Science., vol. 11, pp. 189 – 194, 2015.
3. Balaraju, J., Govinda Raj, M., and Murthy, C., “Estimation of reliability-based maintenance time intervals of Load-Haul-Dumper in an underground coal mine“, J. Min. Environ., vol. 9, no. 3, pp. 761–770, 2018.
4. Rahimdel, M.j., Ataei, M., and Ghodrati, B., “Modeling and simulaion approaches for reliability analysis of drilling machines“, J. Inst. Eng. India Ser. C, 2019.
5. Mishra1, A., Palei, S.K., Gupta, S., “Reliability analysis of dragline using equivalent aging model“,Arabian Journal for Science and Engineering, 2020.

6. Vayenas, N., Wu, X., "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, 2009.
7. Dhillion, B.S., "Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety", Springer, pp: 209, 2008.
8. Gendenka, B., Ushakov, I., "Probabilistic Reliability Engineering", Jone Wiely & Sons, pp: 537, 1995.
9. Kececiyoglu, D. B., "Reliability Engineering Handbook" Vol. 1, DEStech Publication, USA, pp: 721, 2002.
10. Birolini, A., "Reliability Engineering, Theory and Practice", 5TH edition, Speringer, pp: 588, 2007.
11. Barabady, J., and Kumar,U., " Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran ", Reliab. Eng. Syst. Saf., vol. 93, no. 4, pp. 647–653, 2008.
12. Vesley, W.E., Goldberg, F.F., Roberts N.H., Haasal, D.F., "Fault Tree Handbook", Report No. NUREG-0492, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, PP; 209, 1981.
13. Wang, H., Pham, H., "Reliability and Optimal Maintenance", Springer, pp: 352, 2006.
14. Hall R.A., and Daneshmend, L. K., "Reliability modelling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies", Int. J. Surf. mining, Reclam. Environ., vol. 17, no. 3, pp. 139–155, 2003.
15. Zio, E., "An introduction to the basics of reliability and risk analysis", vol. 13. World scientific, 2007.
16. Rahimdel, M J., Ataei, M., Khalokakaei, R., Hoseinie, S H., " Reliability-based maintenance scheduling of hydraulic system of rotary drilling machines", International Journal of Mining Science and Technology, Vol 23, 771-775, 2013.
17. Meeker, W.Q., and Escobar, L. A., "Statistical methods for reliability data", John Wiley & Sons, 2014.
18. Finkelstein, M., Failure rate modelling for reliability and risk. Springer Science & Business Media, 2008.