

مقاله پژوهشی

تأثیر شرایط محیطی در تخمین عمر مفید باقیمانده مبتنی بر قابلیت اطمینان در

معدن مس سونگون

آوات قمقلعه<sup>۱</sup>، رضا کاکائی<sup>۲</sup>، محمد عطائی<sup>۳\*</sup>، علی نوری قراحسنلو<sup>۴</sup>، عباس برآبادی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، Ghomghale@gmail.com
۲. استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، R\_kakaie@shahroodut.ac.ir
۳. استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، Ataei@shahroodut.ac.ir
۴. استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، Ali\_Nouri@eng.ikiu.ac.ir
۵. استاد، دانشکده تکنولوژی و ایمنی، دانشگاه شمالگان ترومسو نروژ، Abbas.barabadi@uit.no

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

چکیده

تخمین عمر باقیمانده ماشین‌آلات در بخش معدنکاری برای حصول اطمینان از تولید و رضایت‌مندی مشتری از محصول امری ضروری است و از آن با عنوان عمر باقیمانده مفید (RUL) یاد می‌شود. این معیار براساس قابلیت اطمینان محاسبه شده که متأثر از شرایط محیطی است. تأثیرات شرایط محیطی نیز با عنوان "فاکتورهای ریسک" در تحلیل‌ها وارد می‌شوند. در این مقاله رویکردی پیشنهاد شده است که براساس آن نخست قابلیت اطمینان سیستم با توجه به تأثیر فاکتورهای ریسک بررسی و سپس RUL برای حالات مختلف تخمین زده می‌شود. همچنین عمر باقیمانده مفید یک دستگاه بیل مکانیکی کوماتسو ۱۲۵۰-PC از معدن مس سونگون به عنوان مطالعه موردی با این رویکرد ارزیابی شد. در نتیجه ارزیابی، بر مدل نرخ مخاطرات متناسب و بیول برای توصیف رفتار خرابی برآزش شده و عمر مفید برای چهار سناریوی تصادفی محاسبه شد. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق را می‌توان برای توسعه، برنامه‌ریزی، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط، تخمین بازه‌های تعویض قطعات یدکی استفاده کرد.

کلمات کلیدی

قابلیت اطمینان، فاکتور ریسک، عمر باقیمانده مفید، فرض متناسب بودن، معدنکاری.

\* نویسنده مسئول مکاتبات.

## فهرست اختصارات مقاله

اختصار	اصطلاح	اختصار	اصطلاح
AFT	مدل زمان خرابی شتاب‌یافته	PLP	فرایند قانون توانی
EPHM	مدل رگرسیون کاکس گسترش یافته	PRM	مدل نرخ تعمیرات متناسب
HPP	فرآیند پواسن همگن	RBD	نمودار بلوک دیگرام
iid	توزیع یکسان و مستقل داشتن	RLU	عمر باقیمانده مفید
LHD	لودر زیرزمینی	RP	فرآیند تجدیدپذیر
MRL	متوسط عمر باقیمانده	SCRM	مدل رگسیون لایه‌بندی کاکس
MTTF	متوسط زمان تا وقوع خرابی	TBF	زمان بین خرابی
NHPP	پواسن ناهمگن	TTF	زمان تا وقوع خرابی
PH- assumption	فرض متناسب بودن	TTR	زمان انجام تعمیرات
PHM	نرخ مخاطرات متناسب	WPHM	نرخ مخاطرات متناسب و بیول

## ۱- مقدمه

تجهیزات و ماشین‌آلات معدنی در ایران با چالش‌ها و تنگناهای متعددی روبروست که به شدت بر ظرفیت تولید و قیمت تمام‌شده ماده معدنی مؤثر بوده و امکان رقابت در بازارهای جهانی را از این بخش سلب کرده است. چالش‌هایی نظیر عدم دسترسی به قطعات یدکی، عدم امکان نوسازی تجهیزات فرسوده، نگهداری و تعمیرات (نت) سنتی، رویکردهای سنتی مدیریتی و غیره. در تقابل با این چالش‌ها سیستم مدیریتی این بخش را بایستی به سمت شاخص‌ها و رویکردهای جدید سوق داد. این شاخص‌ها توانایی شناسایی چالش‌ها را فراهم نموده و در مرحله بعد امکان انجام اقدامات بهبودی برای ارتقاء عملکرد فراهم خواهد شد. شاخص‌هایی نظیر قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، پشتیبانی، دسترسی و غیره برخی از شاخص‌های مطرح در حوضه بررسی عملکرد سیستم و برنامه‌ریزی نت (مانند نت اصلاحی، پیشگیرانه، ...) می‌باشند. اما تمامی این شاخص‌ها در گرو عملکرد و عملکرد سیستم نیز در گرو خرابی‌های رخ داده

می‌باشد [۱]، [۲]. لذا پیش‌آگاهی<sup>۱</sup> از وقوع خرابی مهندسین نت را در این راستا یاری خواهد نمود. پیش‌آگاهی در واقع داشتن تخمینی از ریسک و زمان تا وقوع یک حالت خاص (حالت‌های مختلف) از خرابی در آینده و یا پیش‌بینی عمر مفید سیستم می‌باشد که تحت عنوان کلی تخمین "عمر باقیمانده مفید (RUL)"<sup>۲</sup> یاد می‌شود [۳]. RUL در واقع مدت زمان تا وقوع خرابی تحت شرایط سابق و بر اساس رفتار عملیاتی گذشته سیستم را تخمین می‌زند. جمله آخر این تعریف حکایت از اهمیت رفتار گذشته سیستم دارد که یکی از رویکردهای مورد استفاده در این بخش بکارگیری شاخص قابلیت اطمینان می‌باشد. در این رویکرد با تشخیص علائم خرابی، قابلیت اطمینان برآورده شده و سپس تخمینی از عمر باقیمانده مفید ارائه می‌شود. این تخمین از عمر باقیمانده مفید در اتخاذ تصمیمات به موقع در رابطه با موضوعات نت، بررسی عملکرد سیستم، تخمین قطعات یدکی و ارتقاء بهره‌وری قابل کاربرد است [۴]، [۵]. هرچند خود قابلیت اطمینان (رفتار عملکردی سیستم) بشدت متأثر از شرایط محیطی و وضعیت حاکم در محیط کاری می‌باشد که در مهندسی قابلیت اطمینان به عنوان فاکتورهای ریسک<sup>۳</sup> شناخته می‌شوند. این فاکتورها براحتی قادر به بالابردن کردن عملکرد سیستم بوده و صرف نظر از آنها تخمین‌های ناریب حاصل خواهد نمود [۲]، [۴]، [۶].

لذا سوالی اصلی مقاله به اینصورت مطرح می‌شود که "چطور می‌توان عمر باقیمانده مفید را براساس قابلیت اطمینان و درنظرگیری تاثیرات فاکتورهای ریسک محاسبه نمود؟". بنابراین هدف اصلی این پژوهش "حرکت از قابلیت اطمینان به سمت تخمین RUL" می‌باشد. اما نوآوری اصلی این مقاله را می‌توان در ارائه یک چارچوب منسجم برای محاسبه RUL براساس قابلیت اطمینان و درنظرگیری تاثیرات شرایط محیطی دانست. کاری که تاکنون انجام نگرفته و اکثر محققین به صورت بخشی به هر یک از موارد پرداخته و عملاً رویکردی مشخص و اجرائی در این حوزه ارائه نشده است.

در این راستا چارچوبی برای ادغام تاثیر شرایط محیطی در تخمین RUL طی چهار بخش اصلی در این مقاله ارائه شده است. در بخش اول مرورادبیتی بر دو زیرشاخه اصلی تحقیق یعنی قابلیت اطمینان و عمر مفید باقیمانده مرور شد. در بخش‌های دوم و سوم کلیاتی درباره مفاهیم و روابط اساسی و حوزه‌های قابلیت اطمینان و تخمین عمر باقیمانده مفید بیان

<sup>1</sup> Prognostic

<sup>2</sup> Remaining Useful Life

<sup>3</sup> Risk factors

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 تحقیق، بسط‌های مدل PHM مانند: مدل رگسیون لایه‌بندی کاکس (SCRM)<sup>۶</sup>، مدل زمان خرابی شتاب‌یافته (AFT)<sup>۷</sup>، مدل نرخ تعمیرات متناسب (PRM)<sup>۸</sup> معرفی شد. در نهایت نیز تعدادی نرم‌افزار برای تحلیل قابلیت اطمینان پیشنهاد شد [۲۵]. تحقیقات کومار و وستبرگ بر روی ماشین LHD در سال ۱۹۹۶ نیز ادامه یافت و طی آن فرض ثابت بودن فاکتورهای کمکی در طول زمان برای مدل PHM ارزیابی شد [۲۶]. طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ قدرتی و همکارانش برای نخستین بار در مدیریت قطعات یدکی ماشین‌آلات معدنی از PHM استفاده نمودند [۲۷]–[۳۱]. قدرتی همچنین مدل‌های نیمه پارامتریک PHM نمایی و ویبول با هم مقایسه کرد. نتایج تحقیق نشان داد که برای تخمین قطعات یدکی تعمیرناپذیر یا نرخ خرابی متغیر می‌توان از مدل ویبول- PHM (WPHM)<sup>۹</sup> استفاده کرد، درحالی‌که مدل نمایی- PHM تنها در مورد نرخ خرابی ثابت معتبر است [۲۷]. برآبادی در سال ۲۰۱۱ از مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده در تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان استخراجی معدن بوکسیت استفاده کرد [۳۲]. در سال‌های اخیر نیز نوری و همکاران در رابطه با تحلیل ناوگان استخراجی معدن سونگون از مدل PHM و بسط‌های آن نظیر مدل رگسیون لایه‌بندی کاکس (SCRM) استفاده کردند [۲۲]، [۳۳]، [۳۴]. در سال ۲۰۱۸ منیری و همکاران از PHM برای تحلیل سیستم بارگیری معدن مس سونگون استفاده کردند. نتایج نشان داد که شکل تابع نرخ مخاطره یک سیستم چند جزئی الزاما از توابع خانواده ویبول پیروی نکرده و امکان برازش تابع PHM برای آنها وجود دارد [۳۵].

**بخش سوم:** مقدار عمر تصادفی باقیمانده پس از گذشت مدت زمان  $t$  از شروع به کار به عنوان "متوسط عمر باقیمانده (MRL)"<sup>۱۰</sup> در نظر گرفته می‌شود. این تابع نخستین بار توسط واتسون و ولز برای تحلیل خرابی‌ها در بازه عمر نوزادی (نمودار وانی) مطرح شد [۳۶]. السید در سال ۲۰۰۳ متوسط عمر باقیمانده لوله‌های کوره صنعتی پرداخت. وی در این تحقیق به دنبال تعیین شرایط محیطی بهینه برای لوله‌ها با کمترین هزینه بود [۳۷]. در سال‌های بعدی خی و همکاران نقاط تغییر

شده است. در بخش چهارم برای تخمین RUL و اعتبارسنجی نتایج تحقیق از داده‌های معدن مس سونگون (با مجتمع مولیبدن-مس آذربایجان) استفاده شده است. آخرین بخش مقاله نیز به نتایج تحقیق اختصاص دارد.

## ۲- مرور ادبیات

با توجه به روند کلی مقاله مرورادبیات در سه بخش اصلی: قابلیت اطمینان، تأثیر شرایط محیطی بر قابلیت اطمینان و تخمین عمر باقیمانده مفید انجام شد.

### بخش اول: در اواخر دهه ۱۹۸۰ گودمن قابلیت اطمینان را

وارد حوزه مهندسی معدن نمود [۷]. در دهه بعد کومار و همکارانش (۱۹۸۹) فرآیند منسجمی را برای تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان بارگیری متشکل از سه دستگاه LHD<sup>۱</sup> را اجرا کردند. آن‌ها پس از تحلیل سیستم LHD، در مرحله بعد رابطه این زیرسیستم‌ها با استفاده از روش نمودار بلوکی قابلیت اطمینان (RBD)<sup>۲</sup> به صورت شبکه سری نشان داده شد. سپس داده متشکل از داده‌های زمان تا وقوع خرابی تشکیل شده و مرحله تحلیل آماری آغاز می‌شود. در این مرحله فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها (iid)<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار گرفته و سپس مدل یا فرآیند آماری مناسب بر داده‌ها برازش داده می‌شود. در این تحقیق برای نخستین بار مدل فرآیند قانون توانی (PLP)<sup>۴</sup> در زمینه مهندسی معدن مورد استفاده قرار گرفت [۸]. در دو دهه بعد نیز مشابه روند کومار تحقیقات توسط همین محقق [۹]، [۱۰]، واگناژ و همکاران [۱۱]، گیرویچیچ و همکاران [۱۲]، هال و دانشمند [۷]، [۸]، واگناژ و همکاران [۱۱]، [۱۳]، سامانتا و همکاران [۱۴]، جواد برآبادی و همکاران [۱۵]–[۱۷] و ایناس و وو [۱۸] ادامه یافت. در سال‌های اخیر نیز نوری و همکاران به تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های مختلف از کارخانه سیمان پرداخته‌اند [۱۹]، [۱۹]، [۲۰]، [۲۰]–[۲۳]. وی همچنین به مطالعه در مورد ناوگان استخراجی معدن مس سونگون نیز پرداخته است [۲۴].

### بخش دوم: وجه مشترک تحقیقات بررسی شده در بخش

اول، نادیده گرفتن شرایط محیطی است. از این رو در سال ۱۹۹۳ کومار و کلفسجو مدل نرخ مخاطرات متناسب<sup>۵</sup> (PHM) را به طور کامل مرور نمودند تا با استفاده از آن بتوان تأثیر شرایط محیطی را در تحلیل قابلیت اطمینان لحاظ کنند. ایشان پس از

<sup>6</sup> Stratified Cox regression model

<sup>7</sup> Accelerated failure time

<sup>8</sup> Proportional repair model

<sup>9</sup> Weibull proportional hazard model

<sup>10</sup> Mean residual life function

<sup>1</sup> Load-Haul-Dump

<sup>2</sup> Reliability block diagram

<sup>3</sup> Independent and identically distributed

<sup>4</sup> Power law process

<sup>5</sup> Proportional hazard model

شکل زمان انجام تعمیرات (TTR)<sup>۴</sup>، می‌باشد [۴۵]. تعریف ریاضی قابلیت اطمینان (R(t)) به‌طور کلی عبارت‌اند از [۴۶]:

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

این تابع در حالت ساده به‌صورت قابلیت اطمینان در طول زمان صفر تا t تعریف می‌شود.

اما منظور از عبارت شرایط محیطی قید شده در تعریف قابلیت اطمینان، شرایط محیط کاری سیستم مانند آب‌وهوا، وضعیت جاده، جنس سنگ، ... و عوامل درونی مانند فشار روغن، دما دورنی سیستم، لرزش، ... برای سیستم‌های معدنی یا عمرانی می‌باشند که بشدت متاثر در رفتار عملکردی سیستم می‌باشند که به عنوان فاکتورهای ریسک تعریف شدند. مدل‌های مورد استفاده در تحلیل قابلیت اطمینان نیز براساس در نظرگیری یا عدم در نظرگیری تاثیر شرایط محیطی به دو دسته مدل‌های کلاسیک و مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک تقسیم می‌شوند.

### ۱-۳- مدل‌های کلاسیک

تحلیل در مدل‌های کلاسیک قابلیت اطمینان صرفاً براساس داده‌های زمانی انجام گرفته و از پرکاربردترین این مدل‌ها می‌توان به فرآیند پواسن همگن (HPP)<sup>۵</sup>، فرآیند تجدیدپذیر (RP)<sup>۶</sup>، پواسن ناهمگن (NHPP)<sup>۷</sup> و غیره اشاره نمود. برای اطلاعات بیشتر در مورد این مدل‌ها به منابع [۲۱]، [۴۷] مراجعه شود.

### ۲-۳- مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک

این مدل‌ها تلفیقی از داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک بوده و عمدتاً بر اساس مدل نرخ مخاطرات متناسب توسعه یافته‌اند. مدل PHM رویکردی ناپارامتری یا نیمه‌پارامتری می‌باشد که نخستین بار توسط کاکس (۱۹۷۲) برای داده‌های بقا در زمینه پزشکی توسعه یافت [۴۸]. این مدل، فرآیند آماری ارزشمند می‌باشد که برای تخمین ریسک وقوع خرابی با توجه به ملاحظات شرایط و محیط کارکرد سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل بر این فرض مبتنی می‌باشد که تابع مخاطره جزء یا داراییی از تجهیزات، ترکیبی از تابع نرخ مخاطره پایه<sup>۸</sup> آن و یک عبارت در برگیرنده تأثیرات فاکتورهای ریسک است [۲۸]. تابع نرخ مخاطره این مدل به‌صورت رابطه

شیب در نمودار MRL و وابستگی آن با نمودار نرخ مخاطره را بررسی کردند [۳۸]. قدرتی و همکارانش برای نخستین بار در سال ۲۰۱۲ مبحث RUL را در زمینه سیستم‌های معدنی مطرح کرد. در این تحقیق از RUL مبتنی بر قابلیت اطمینان برای تحلیل عمر باقیمانده جک‌های هیدرولیک لودرهای LHD معدن زیرزمینی سوئد استفاده شد [۳۹]. لیو و همکارانش الگوریتمی قابلیت اطمینان‌گرا برای پیش‌بینی RUL یا تاقان‌های ماشین‌های دوار را پیشنهاد دادند [۴۰]. خلیف و همکارانش در مقاله‌ای برخلاف روش‌ها سنتی، روشی را برای تخمین RUL به صورت مستقیم و با استفاده از اطلاعات به‌دست از حس‌گرها و بدون نیاز به تخمین میزان تنزیل پیشنهاد کردند [۴۱]. در مقاله ارائه شده توسط وو و همکارانش در سال ۲۰۱۸ برای تخمین RUL موتورهای تورفن هواپیماها، از نوع خاصی از روش شبکه‌های عصبی موسوم به مدل حافظه طولانی کوتاه-مدت وانیلی<sup>۱</sup> استفاده کردند [۴۲].

در نهایت باید قید نمود که در مطالعات مرور شده عمدتاً توجه چندانی به کاربرد قابلیت اطمینان نشده و کارهای انجام گرفته صرفاً در حد تحلیل باقی مانده است. تخمین عمر مفید باقیمانده یکی از مواردی است که می‌توان از قابلیت اطمینان در این حوزه استفاده نمود. هرچند کارهایی محدودی در این زمینه انجام گرفته ولی با این وجود رویکردی منسجم و فراگیر برای تلفیق ایده قابلیت اطمینان با عمر مفید باقیمانده وجود نداشته است. چالش بعدی در مورد تحقیقات بررسی شده عدم ورود یا کاربرد محدود تخمین عمر باقیمانده مفید در حوزه مهندسی است. لذا ارائه رویکردی منسجم و کاربردهای بیشتر از RUL در این زمینه کارهای مهندسی و صنایع احساس می‌شود.

### ۳- قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان به عنوان توانایی سیستم در انجام کار خواسته شده در زمان معین و تحت شرایط مشخص تعریف می‌شود [۴۳]. اما خرابی عاملیست که مانع از انجام به موقع فعالیت مورد نظر می‌شود. خرابی به‌عنوان عدم توانایی یک قطعه یا ابزار در انجام فعالیت مورد انتظار تعریف می‌شود [۴۴]. غالباً منظور از داده‌های خرابی در مبحث قابلیت اطمینان داده‌هایی از جنس زمان نظیر: زمان بین خرابی‌ها (TBF)<sup>۲</sup>، زمان تا وقوع خرابی (TTF)<sup>۳</sup> و برای مباحث تعمیرپذیری به

<sup>4</sup> Time to repair

<sup>5</sup> Homogeneous Poisson process

<sup>6</sup> Renewal process

<sup>7</sup> Non-homogeneous Poisson process

<sup>8</sup> Baseline

<sup>1</sup> Vanilla Long Short-Term Memory (vanilla-LSTM)

<sup>2</sup> Time between failure

<sup>3</sup> Time to failure

(۱) بیان می‌شود:

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

در این رابطه  $\lambda(t, z)$ : تابع نرخ مخاطره (متغیر پاسخ) و  $z$ : بردار سطری فاکتور ریسک است که هر عضو این بردار درجه تأثیر یک فاکتور ریسک را بر نرخ مخاطره شامل می‌شود.  $t$ : بیانگر زمان تا وقوع خرابی یا زمان سالم بودن یک دارایی است. در رابطه یاد شده  $\lambda_0(t)$ : نرخ مخاطره پایه و  $\psi(z, \alpha)$ : تابع پیوند<sup>۲</sup> است [۴۹]. برای تابع پیوند حالات مختلفی را می‌توان در نظر گرفت که از آن جمله می‌توان به حالت نمایی  $\exp(z\alpha)$ ، حالت لجستیک  $\log(1+\exp(z\alpha))$ ، حالت خطی معکوس  $\frac{1}{1+(z\alpha)}$  و خطی  $1+(z\alpha)$  اشاره کرد که حالت نمایی پرکاربردترین آن‌ها می‌باشد [۲۵]. با فرض حالت تابع نمایی برای تابع  $\psi(z, \alpha)$ ، نرخ مخاطره به صورت (۳) در می‌آید [۲۸]:

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

عامل ضربی  $\exp(z\alpha)$ ، نشان دهنده ریسک خرابی ناشی از حضور فاکتور ریسک است. در رابطه  $\alpha = \sum_{i=1}^n z_i \alpha_i$ ، برداری ستونی تست که عناصر آن پارامترهای مجهول مدل یا ضرایب رگرسیون مربوط به فاکتور ریسک را نشان می‌دهد [۲۵]. در این صورت تابع قابلیت اطمینان مدل PHM به صورت رابطه (۴) در می‌آید [۵۱]:

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

در این مدل مهمترین فرض مستقل از زمان بودن فاکتورهای ریسک، یعنی ثابت بودن نسبت بین دو نرخ مخاطره در طول زمان است که به‌عنوان فرض متناسب بودن (فرض PH)<sup>۳</sup> شناخته می‌شود. این فرض از لحاظ آماری نیز به‌صورت رابطه (۵) بیان می‌شود [۵۲]:

$$\frac{\lambda_i(t, z_1)}{\lambda_j(t, z_2)} = cns \tan \quad (5)$$

این فرض در صورت متقاطع بودن نمودارهای نرخ مخاطره برای دو فاکتور ریسک  $Z_1$  و  $Z_2$  رد می‌شود. 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 [۵۲].

براساس مدل PHM مدل‌ها مختلفی توسعه یافته است که از بین آن‌ها تابع قابلیت اطمینان دو مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده و مدل رگرسیون کاکس گسترش یافته<sup>۴</sup> (EPHM) به ترتیب عبارت از رابطه (۶) و (۷) [۵۳]–[۵۷]:

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

$$R_{EPHM}(t, z(t)) = R_0(t) \exp\left[-\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i + \sum_{j=1}^m \alpha_j z_j(t)\right] \quad (7)$$

در این رابطه  $R_{0s}(t)$  قابلیت اطمینان پایه برای لایه  $s$  ام در مدل SCRM و  $R_0(t)$  تابع قابلیت اطمینان پایه در EPHM است.  $\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i$ : تابع پیوند فاکتورهای ریسک مستقل از زمان،  $\sum_{j=1}^m \alpha_j z_j(t)$ : تابع پیوند فاکتورهای ریسک وابسته به زمان،  $m$ : تعداد فاکتورهای ریسک وابسته به زمان و  $n$ : تعداد فاکتورهای ریسک مستقل از زمان است.

#### ۴- تخمین عمر مفید باقیمانده مبتنی بر قابلیت اطمینان

عمر مفید باقیمانده برای اجزا و قطعات در واقع زمان باقی‌مانده کارکرد صحیح قبل از وقوع خرابی در آنها می‌باشد [۵۸]. عمر باقیمانده مفید یا متوسط عمر باقیمانده<sup>۵</sup> ( $L$ ) را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

اگر  $MTTF(t_0)$  متوسط زمان مورد انتظار تا وقوع خرابی در سیستم با عمر  $t_0$  عمر مفید باقیمانده یا متوسط عمر باقیمانده ( $L$ ) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۴]، [۵]:

(۸)

$$L(t) = E(T - t | T \geq t) = MTTF(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} (t - t_0) f(t | t_0) dt \quad t \geq 0$$

در این رابطه  $f(t | t_0)$  تابع شرطی چگالی احتمال خرابی در زمان  $t$  مشروط به عدم وقوع خرابی تا زمان  $t_0$  است که از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۴]، [۵]:

$$f(t | t_0) = h(t) \times R(t | t_0) \quad t > t_0 \quad (9)$$

$R(t | t_0)$  قابلیت اطمینان سیستم مشروط به رخ ندادن خرابی تا زمان  $t$  است. بدیهی است که در این صورت سیستم تا زمان  $t_0$  نیز سالم خواهد بود. لذا رابطه (۹) به صورت رابطه

<sup>1</sup> Response variable<sup>2</sup> Link function<sup>3</sup> Proportional hazard assumption (PH-assumption)<sup>4</sup> Extended proportional hazard model<sup>5</sup> Mean residual life

(۱۰) در می‌آید [۴]، [۵]:

$$f(t|t_0) = h(t) \times \frac{R(t)}{R(t_0)} \quad (10)$$

$$f(t|t_0) = \frac{f(t)}{R(t_0)} \quad t > t_0 \quad (11)$$

با استفاده از رابطه (۸) و (۱۱) داریم [۴]، [۵]، [۳۹]:

$$MTTF(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} t \times \frac{f(t)}{R(t_0)} dt - \int_{t_0}^{\infty} t_0 \times \frac{f(t)}{R(t_0)} dt \quad (12)$$

در صورت ساده کردن رابطه (۱۲) فرمول کلی عمر باقیمانده مفید (RUL(t)) به صورت رابطه (۱۳) در می‌آید [۴]، [۵]:

$$MTTF(t_0) = \frac{MTTF - \int_0^{t_0} R(t)}{R(t_0)} = \frac{\int_0^{\infty} R(t) dt - \int_0^{t_0} R(t) dt}{R(t_0)} = \frac{\int_{t_0}^{\infty} R(t) dt}{R(t_0)} \quad (13)$$

رابطه (۱۳) را در نظرگیری فاکتورهای ریسک می‌توان به صورت رابطه (۱۴) بازنویسی کرد [۴]، [۵]:

$$MTTF(t_0, z) = \frac{MTTF - \int_0^{t_0} R(t, z)}{R(t_0, z)} = \frac{\int_0^{\infty} R(t, z) dt - \int_0^{t_0} R(t, z) dt}{R(t_0, z)} = \frac{\int_{t_0}^{\infty} R(t, z) dt}{R(t_0, z)} \quad (14)$$

## ۵- مطالعه موردی

معدن مس سونگون 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. با بررسی تمامی سیستم‌های بارگیری سه پیمانکاری مبین، آجین و نوآوران، یک دستگاه بیل مکانیکی کوماتسو PC-1250 به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. در شکل ۱ چارچوب اجرای تحقیق در پنج مرحله به شرح زیر ترسیم شده است:

- مرحله اول: شناسایی و تعیین مرزهای سیستم براساس فرضیات و داده‌های در دسترس.
- مرحله دوم: جمع‌آوری اطلاعات و استخراج داده‌های مورد نیاز در قالب داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک.
- مرحله سوم: ارزیابی فرض متناسب بودن برای انتخاب مدل مناسب.
- مرحله چهارم: تخمین پارامترهای تابع برازش شده و محاسبه قابلیت اطمینان.
- مرحله پنجم: تخمین عمر باقیمانده مفید سیستم.

### ۵-۱- جمع‌آوری و تشکیل بانک داده بیل مکانیکی

با توجه به اینکه در این تحقیق مرحله اول الگوریتم به

صورت میدانی و با توجه نظرات متخصصین و شرایط حاکم بر معدن انجام گرفته لذا از این مرحله صرف نظر شده و مرحله دوم یعنی تشکیل بانک داده تشریح می‌شود. طبق رابطه (۱۴) مقدار RUL براساس مدت زمان سرپایی دستگاه و شرایط محیطی موثر بر عملکرد آن یا به عبارت بهتر براساس قابلیت اطمینان مبتنی بر فاکتورهای ریسک دستگاه به دست می‌آید. از این رو داده‌های مورد نیاز از جنس زمان بین خرابی (TBF) و فاکتورهای ریسک است. این داده‌ها را می‌توان از منابع مختلف نظیر: اسناد ثبت شده (گزارش‌های گروه نت، مکانیک، روزانه ...)، مدارک آرشیو شده (گزارش‌های قبلی، دفترچه ماشین‌آلات ...)، مصاحبه‌ها و مشاهدات مستقیم گردآوری کرد.

در گام اول، بخش عمده داده‌ها از محل گزارشات عملکردی ماشین‌آلات که به صورت روزانه (سه نوبت) و برای تمامی دستگاه‌ها در یک محل ثبت می‌شود، گردآوری گردید. این فرم‌ها شامل: ردیف گزارش‌های، کد دستگاه، موقعیت عملیاتی (شمالی، میانی، جنوبی)، تراز عملیاتی (تراز پله از سطح دریاها آزاد)، تعداد سرویس (برحسب نوع دامپتراک باربر: ۱۰۰ و ۳۲ تنی)، نوع سنگ (مانند ماده معدنی، تراکیت، منزونیت...، ساعت کارکرد، میزان توقفات (تحت تعمیر، بیکاری یا آماده‌به‌کاری) بودند.

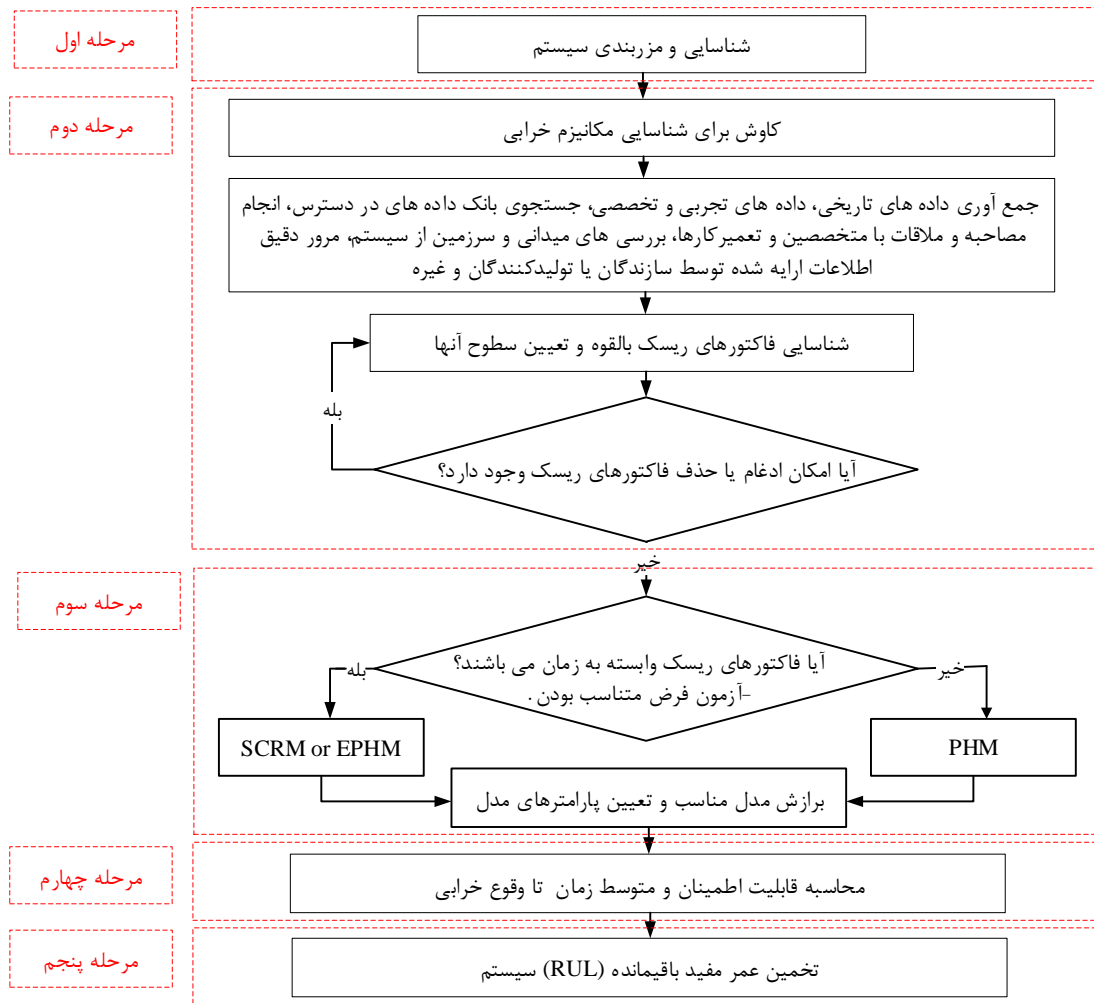
در گام دوم: بررسی شناسنامه دستگاه و اطلاعات انبارداری نیز نشان داد که این دستگاه از ابتدای بهمن‌ماه ۱۳۹۶ شروع به کار کرده و بازه جمع‌آوری داده تا انتهای شهریور ۹۷ به مدت ۸ ماه است.

در گام سوم، گزارش‌های روزانه دستگاه مورد نظر برای ۸ ماه بازه تحقیق از این گزارش‌های تفکیک شده و به ترتیب تاریخ ثبت پشت سرهم مرتب شد. سپس هر داده در قالب زمان‌های بین خرابی‌ها استخراج می‌شوند.

در گام چهارم، داده‌های زمانی خرابی از جنس TBF براساس خرابی کامل<sup>۱</sup> با نماد "f" یا سانسور شده<sup>۲</sup> با نماد "s" کدگذاری می‌شوند. خرابی کامل، خرابی است که زمان دقیق وقوع آن مشخص می‌باشد [۴۵].

<sup>1</sup> Complete data

<sup>2</sup> Censored data



شکل ۱- چارچوب تخمین عمر باقیمانده مفید با قابلیت اطمینان مبتنی فاکتورهای ریسک

ارائه شده است. به طور مثال در مورد فاکتور ریسک نوبت کاری، از نماد "Z<sub>1</sub>" برای نمایش آن در تحلیل‌های بعدی استفاده شده است. از آنجائی که این معدن در سه نوبت کاری صبح، ظهر و شب فعالیت دارد، لذا این سه حالت با مقادیر کمی ۱، ۲ و ۳ در بانک داده کمی‌سازی شدند.

در گام ششم، برای هر یک از TBF ها فاکتورهای ریسک بالقوه در قالب دو دسته فاکتور ریسک گسسته یا پیوسته و براساس اطلاعات حاصل از گزارشات، مصاحبه با متخصصین و اپراتورها در محل معدن تعیین می‌شوند. در جدول ۱ فاکتورهای ریسک گسسته و پیوسته سیستم و مقادیر کمی برای هر مورد

جدول ۱- فاکتورهای ریسک زیرسیستم‌های بارکننده

مقدار کمی	طبقه‌بندی	فاکتور ریسک	مقدار کمی	طبقه‌بندی	فاکتور ریسک	انواع فاکتورهای ریسک
۳	کانسنگ، اکسید یا سلفور	نوع سنگ (Z <sub>2</sub> )	۱	صبح	نوبت (Z <sub>1</sub> )	گسسته
۲	منزونیت یا اسکارن		۲	ظهر		
۱	تراکیت		۳	شب		
۴	آفتابی و بدون ابر	وضعیت آب‌وهوایی (Z <sub>6</sub> )	۰	۳۲	نوع باربری (Z <sub>3</sub> )	
۳	نیمه‌ابری		۱	۱۰۰		
۲	ابری		۲	۳۲ و ۱۰۰		
۱	مه شدید					
بر حسب میلیمتر		میزان بارش (Z <sub>4</sub> )	بر حسب درجه سانتیگراد		دما (Z <sub>5</sub> )	پیوسته

جدول ۲- نمونه‌های از داده‌های خرابی سیستم بیل مکانیکی

شماره خرابی	TBF(Hr)	نوع خرابی	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	z <sub>4</sub>	z <sub>5</sub>	z <sub>6</sub>
۱	۱۴۹	f	۱	۲	۰	۱/۳۶	-۴/۸۷	۲
۲	۷۶	f	۳	۳	۱	۰	-۷/۷۷	۴
۳	۱۸	f	۳	۳	۱	۰	-۴/۴۰	۴
۴	۱۸	f	۳	۳	۱	۰	-۱/۰۰	۴

جدول ۳- وابستگی بین داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک با ۱۰۰۰ خودراه‌اندازی

عناوین	TBF	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	z <sub>4</sub>	z <sub>5</sub>	z <sub>6</sub>
TBF	۱	۰/۱۳	-۰/۹۷	۰/۹۲	۰/۰۷	۰/۰۷	-۰/۱۳
z <sub>1</sub>	۰/۱۳	۱	۰/۱۱	-۰/۲۵	-۰/۰۰۳	-۰/۱۲	۰/۰۹
z <sub>2</sub>	-۰/۹۷	۰/۱۱	۱	-۰/۲۵	۰/۰۶۹	-۰/۱۱	۰/۲۲
z <sub>3</sub>	۰/۹۲	-۰/۲۵	۰/۲۵	۱	۰/۰۷۶	۰/۰۵	-۰/۰۹
z <sub>4</sub>	۱/۰۷۳	-۰/۰۰۳	۰/۰۷	۰/۰۸	۱	-۰/۲۳	-۰/۲۱
z <sub>5</sub>	۱/۰۷۲	-۰/۱۲	-۰/۱۱	۰/۰۵	-۰/۲۳	۱	-۰/۲۰
z <sub>6</sub>	-۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۲۲	-۰/۰۹	-۰/۲۱	-۰/۲۰	۱

قابل صرف نظر کرد.

## ۲-۵- آزمون فرض متناسب بودن نرخ مخاطره

در این مرحله بایستی برقراری فرض PH برای نرخ مخاطره ارزیابی شود تا از عدم وابستگی فاکتورهای ریسک به زمان اطمینان حاصل شود. همانطور که ذکر شد، برای این آزمون روش‌های مختلفی وجود دارد که روش گرافیکی یکی از پرکاربردترین‌ها است. در این روش پس از ترسیم نرخ مخاطره به ازای مقادیر مختلف فاکتورهای ریسک مقایسه متناسب بودن آن‌ها به صورت بصری انجام می‌شود. اما چالشی که در این رویکرد مطرح می‌شود، به اینصورت است که منظور از "متناسب بودن چیست؟". در واقع نتایج حاصله دربرگیرنده نگرش محقق خواهد بود. چالش بعدی این رویکرد از ارزیابی فرض PH، در رابطه با لایه‌بندی فاکتورهای ریسک پیوسته مانند بارندگی یا دما مطرح است. چرا که منطبق خاص برای لایه‌بندی این نوع فاکتور ریسک، لایه‌بندی نادرست را به همراه داشت و این موضوع نیز منجر به نازک‌تر شدن برخی لایه‌ها (داده کم) خواهد شد. چالش سوم نیز درباره نحوه ارزیابی فرض PH برای چندین فاکتور ریسک به‌طور هم‌زمان می‌باشد. بدین منظور آزمون تحلیلی و ترسیمی برای ارزیابی استفاده می‌شود [۲۲]. از این رو در این مقاله نخست از آزمون هارل و لی<sup>۲</sup> که حالت تغییر یافته آزمون شوئنفلد (سال ۱۹۸۲) بوده و به

در نهایت بانک داده اولیه به صورت جدول ۲ برای ۶۰ مورد خرابی تنظیم شد. ستون اول از این جدول نشان دهنده شماره خرابی، ستون دوم مدت زمان بین خرابی بر حسب ساعت، ستون سوم نشان دهنده وضعیت خرابی از نظر خرابی کامل یا سانسور شده می‌باشد. از ستون چهارم تا آخر نیز فاکتورهای ریسک اعم از نوبت‌کاری خرابی، نوع سنگ، نوع سیستم باربر، متوسط میزان بارش در طول زمان بین خرابی بر حسب میلیمتر، متوسط میزان دما در طول زمان بین خرابی بر حسب درجه سلسیوس و وضعیت آب‌وهوا قرار می‌گیرد.

در گام هفتم، پس از تشکیل بانک داده اولیه و استخراج فاکتورهای ریسک بالقوه، طبق الگوریتم ارائه شده در شکل ۱ باید تراکنش و وابستگی بین فاکتورهای ریسک بررسی می‌شد. بدین منظور ماتریس وابستگی برای فاکتورهای ریسک تشکیل شد. در این ماتریس که در جدول ۳ مشاهده می‌شود. برای اطمینان بیشتر از نتایج به‌دست آمده از خودراه‌اندازی<sup>۱</sup> که یک روش محاسباتی-آماري-کامپیوتری برای تعیین میزان دقت برآوردگرهای حاصل از داده‌های نمونه است، استفاده می‌شود [۳۹]. مطابق این جدول وابستگی معنی‌داری بین فاکتورهای ریسک وجود ندارد. فقط بین فاکتور ریسک نوبت‌کاری با فاکتور ریسک میزان بارش در سطح اطمینان ۹۵ درصد وابستگی وجود دارد که با توجه به کیفی بودن نوبت‌کاری می‌توان از آن

<sup>2</sup> Harrel and Lee

<sup>1</sup> Bootstrapping



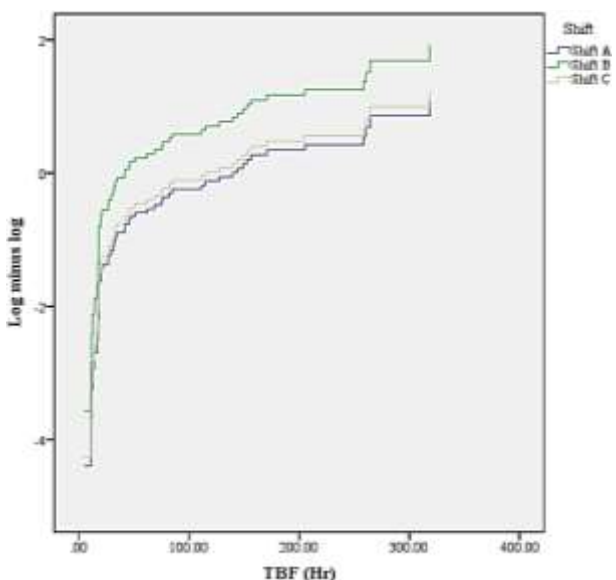
p-مقدار کوچکتر از ۰/۰۵ برای یک فاکتور ریسک نشان دهنده عدم پذیرش فرض PH است [۵۹]. نتایج این آزمون برای فاکتورهای ریسک مختلف به کمک نرم افزار Stata به صورت جدول ۴ تنظیم شده است.

جدول ۴- مقادیر p-مقدار برای ارزیابی فرض PH فاکتورهای ریسک بیل مکانیکی

فاکتور ریسک	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>
p-مقدار	۰/۹۰۹	-۰/۱۸۹	۰/۰۹	-۰/۰۵۲	-۰/۰۷۲	۰/۰۶۲

و مقیاس (β) می باشد. در جدول ۵ ضرایب فاکتورهای ریسک و پارامترهای تابع اساسی ویبول (θ و β) به کمک نرم افزار Stata محاسبه شده که در ادامه توضیحات لازمه در رابطه محاسبه پارامترهای این تابع بیان شده است.

در تابع PHM مقادیر نمایی ضرایب تحت عنوان نرخ مخاطره (HR)<sup>۲</sup> نشان از میزان تأثیر این ضرایب در تابع دارند به اینصورت که هر چقدر مقدار HR به سمت یک میل کند نشان دهنده عدم تأثیر ضرایب می باشد. فاکتور ریسک بارندگی (Z<sub>4</sub>) و دما (Z<sub>5</sub>) با توجه به ضرایب ۰/۰۲۲- و ۰/۰۱۰- که HR، ۰/۹۷۹ و ۰/۹۸۹ را به ترتیب برای دو فاکتور ریسک Z<sub>4</sub> و Z<sub>5</sub> به همراه دارد که با توجه به تقریباً ۱ بودن این مقادیر از محاسبات قابلیت اطمینان حذف شده و چهار فاکتور ریسک Z<sub>1</sub>، Z<sub>2</sub>، Z<sub>3</sub> و Z<sub>6</sub> در ادامه محاسبات باقی می ماند.



شکل ۲- نمودار (-ln(-ln R)) برای ارزیابی فرض PH برای بیل مکانیکی

آزمون "باقیمانده‌های شوئنفلد" معروف است، برای ارزیابی فرض PH استفاده شد. این روش به دلیل ارائه نتایج بر اساس p-مقدار جذاب تر است و ارزیابی راحت تری را با استفاده از منطق ریاضی ارائه می دهد. یک p-مقدار معنادار بزرگتر از ۰/۱ نشان دهنده قابل قبول بودن فرض PH است درحالی که یک

همان طور که مشاهده می شود، p-مقدار با توجه به ثابت بودن مقادیر باقیمانده‌های شوئنفلد هیچ وابستگی نشان نداده و در سطح ۵ درصد معنادار نیست. بنابراین فرض PH برای تمامی فاکتورهای ریسک برقرار است.

برای اطمینان از نتایج به دست آمده در آزمون فرض PH از آزمون گرافیکی نمودار منفی لگاریتم منفی لگاریتم قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> (-ln(-ln R)) برای ارزیابی فرض PH استفاده شد. این نمودار حاصل دوبار لگاریتم طبیعی از مقادیر قابلیت اطمینان است. از آنجائی که مقادیر قابلیت اطمینان در بازه [0,1] متغیر می باشد، لذا با تبدیل -ln(-ln R) نمودار به بازه [-∞,+∞] منتقل خواهد شد. در صورت برقراری فرض PH، نمودارهای لگاریتمی قابلیت اطمینان مربوط به مقادیر مختلف یک فاکتور ریسک در یک نمودار مشترک، به صورت تقریباً متناسب با یکدیگر قرار می گیرند [۵۲]. در شکل ۲ نمودار -ln(-ln R) برای فاکتور ریسک نوبت کاری ترسیم شده است.

همانطور که مشاهده می شود نمودار قابلیت اطمینان برای هر سه نوبت کاری در طول زمان تقریباً به صورت متناسب حرکت کرده است. لذا فرض متناسب یا مستقل از زمان بودن فاکتورهای ریسک برای داده‌های بیل مکانیکی را می توان پذیرفت. بنابراین طبق الگوریتم ارائه شده از مدل PHM برای توصیف رفتار خرابی‌های بیل مکانیکی استفاده می شود.

### ۳-۵- برازش مدل مناسب و تخمین پارامتر

پس از تعیین مدل مناسب برای توصیف رفتار خرابی از مدل نرخ مخاطرات متناسب با تابع اساسی ویبول (WPHM) استفاده شده است. دلیل انتخاب تابع ویبول، کاربرد گسترده این مدل در سیستم‌های صنعتی، انعطاف و شکل پذیری این تابع در برازش بر داده‌های خرابی به کمک دو پارامتر شکل (θ)

<sup>۲</sup> Hazard ratio

<sup>۱</sup> log-log reliability curves

جدول ۵- پارامترهای تابع رگرسیونی ویبول- PHM برای داده‌های خرابی بیل مکانیکی

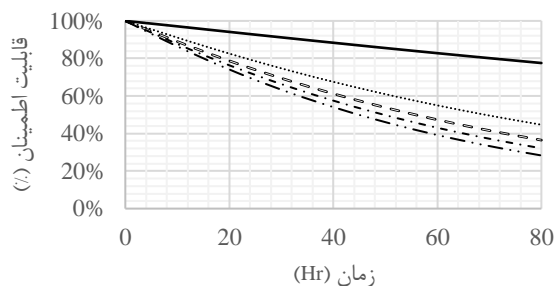
فاکتورهای ریسک و پارامتر		ضرایب	خطای استاندارد	آماره آزمون z	بازه اطمینان ۹۵٪
Z <sub>1</sub>		-۰٫۱۱۹	۰٫۱۸۶	-۰٫۶۴۰	-۰٫۴۸۳   ۰٫۲۴۶
Z <sub>2</sub>		۰٫۳۹۳	۰٫۳۱۸	۱٫۲۴۰	-۰٫۲۳۰   ۱٫۰۱۶
Z <sub>3</sub>		-۰٫۱۶۸	۰٫۲۶۵	-۰٫۶۳۰	-۰٫۶۸۸   ۰٫۳۵۲
Z <sub>4</sub>		-۰٫۰۲۲	۰٫۰۹۶	-۰٫۲۲۰	-۰٫۲۱۰   ۰٫۱۶۷
Z <sub>5</sub>		-۰٫۰۱۰	۰٫۰۲۰	-۰٫۵۱۰	-۰٫۰۵۰   ۰٫۰۲۹
Z <sub>6</sub>		۰٫۲۴۹	۰٫۱۶۵	۱٫۵۱۰	-۰٫۰۷۴   ۰٫۵۷۳
cons		-۵٫۹۱۴	۱٫۱۱۱	-۵٫۳۲۰	-۸٫۰۹۳   -۳٫۷۳۶
p		۱٫۰۳۷	۰٫۱۱۲		۰٫۸۴۰   ۱٫۲۸۱

$$R(t, z) = \left( e^{-\left(\frac{t}{299.695}\right)^{1.037}} \right)^{\exp(-0.119z_1 + 0.393z_2 - 0.168z_3 + 0.249z_4)} \quad (19)$$

در شکل ۳ نمودار قابلیت اطمینان مدل WPHM ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در سناریوهای مختلف رفتار قابلیت اطمینان سیستم با تغییر شرایط محیطی تغییر می‌کند. به عنوان مثال قابلیت اطمینان بیل مکانیکی برای ۴۰ ساعت کارکرد در نوبت کاری شب، با نوع سنگ اکسید (سولفور یا ماده معدنی) و وضعیت آب‌وهوایی ابری در سناریوی اول، در مقایسه با عملکرد آن در نوبت کاری صبح، با نوع سنگ تراکیت و وضعیت آب‌وهوایی صاف در سناریوی چهارم حدود ۱۰ درصد اختلاف دارد. در سناریوی اول قابلیت اطمینان سیستم در صورت ۸۰ ساعت کارکرد به تقریباً ۴۵ درصد افت کرده است. در حالی که این مقدار در سناریوی چهارم در حدود ۳۲ درصد است.

جدول ۶- چهار سناریوی تصادفی با استفاده روش طراحی عامل

سناریو	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>6</sub>
۱	۳	۳	۱	۲
۲	۲	۲	۱	۴
۳	۲	۳	۲	۴
۴	۱	۲	۱	۴



----- 2 ..... 1 - - - - 3 - - - - 4 ——— Baseline

شکل ۳- نمودار قابلیت اطمینان مدل WPHM

در نرم‌افزار Stata نتایج حاصل برای پارامترهای تابع ویبول به صورت تابع ویبول تک پارامتری و بر اساس پارامتر p (سطر ۹ در جدول ۵) ارائه می‌شود [۶۰]:

$$R = \exp(-t^p) = \exp(-t^{-5.914}) \quad (15)$$

در این مقاله برای یکسان‌سازی و تبدیل به شکل عمومی تابع ویبول از تبدیل‌های زیر برای دستیابی به پارامترهای شکل ( $\theta$ ) و مقیاس ( $\beta$ ) استفاده شد:

$$\theta = p = 1.037 \quad (16)$$

$$\beta = \exp\left(-\frac{cons}{p}\right) = 299.695 \quad (17)$$

با توجه به حضور چهار فاکتور ریسک در تحلیل‌ها و عدم امکان (و نیاز به) بررسی تمامی حالت‌های ممکن برای آنها از روش طراحی عامل<sup>۱</sup> برای تعیین سناریوهای مختلف جهت تحلیل‌های بعدی استفاده شده است (برای اطلاع از این روش به منبع [۶۱] مراجعه شود). خروجی این روش حدود ۳۰ سناریوی است که از بین آنها با نظر به محدودیت در ارائه مقاله فقط چهار سناریوی تصادفی مطابق جدول ۶ انتخاب شد.

#### ۵-۴- تحلیل قابلیت اطمینان بیل مکانیکی

تابع قابلیت WPHM به صورت رابطه (۱۸) خواهد بود:

$$R(t, z) = \left( e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\theta}} \right)^{\exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right)} \quad (18)$$

که پس از جایگذاری مقادیر حاصل از جدول ۵ و روابط (۱۶) و (۱۷) خواهیم داشت:

<sup>1</sup> Factorial design method

قابلیت اطمینان، تابع RUL به صورت زیر خواهد بود:

$$RUL(t_0, z) = \frac{\int_{t_0}^{\infty} \left( e^{-\left(\frac{t}{299.695}\right)^{1.037}} \right)^{\exp(-0.119z_1 + 0.393z_2 - 0.168z_3 + 0.249z_6)} dt}{\left( e^{-\left(\frac{t}{299.695}\right)^{1.037}} \right)^{\exp(-0.119z_1 + 0.393z_2 - 0.168z_3 + 0.249z_6)}} \quad (20)$$

مقادیر RUL نیز براساس طبق رابطه (۱۹) برای ۴ سناریو به صورت جدول ۷ محاسبه می‌شود.

همانطور که دیده می‌شود مقادیر RUL در انطباق با قابلیت اطمینان محاسبه شده، در سناریوهای مختلف به شدت متفاوت است که نشان دهنده تأثیر شرایط محیطی است. همچنین طبق نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان بالاتر RUL بالاتر را نیز به همراه دارد. این موضوع را می‌توان به خوبی در مقایسه عمر باقیمانده مفید سناریوی اول با سناریوی چهارم مشاهده کرد.

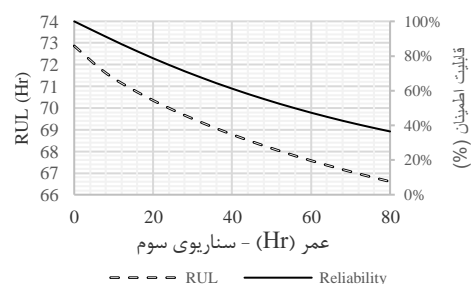
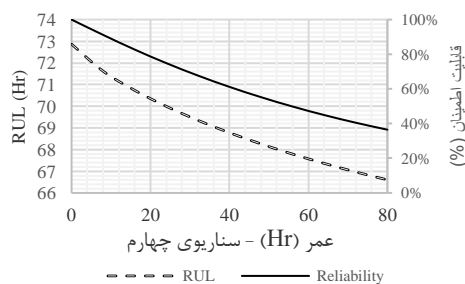
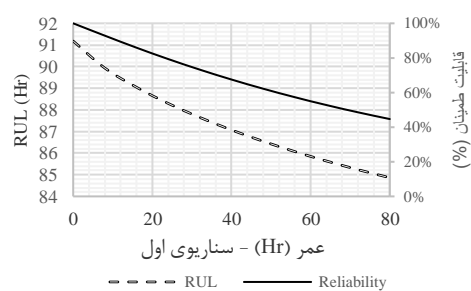
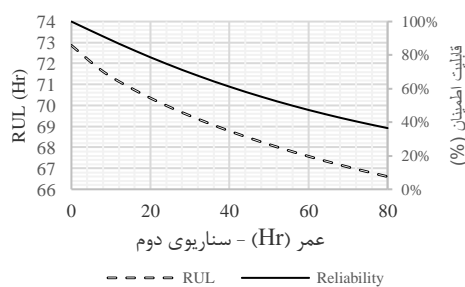
بازترین اختلاف را می‌توان در مقایسه نمودار چهار سناریوی مذکور با نمودار تابع پایه (خط پررنگ در شکل ۳) که بیانگر قابلیت اطمینان با صرف نظر از تأثیرات فاکتورهای ریسک مشاهده نمود. این اختلاف حکایت از تأثیر انکارناپذیر فاکتورهای ریسک داشته و در واقع نشان دهنده مزیت اصلی PHM در مقایسه با روش‌های کلاسیک می‌باشد که تحلیل‌های خود را صرفاً براساس داده‌های زمانی مستقر نموده‌اند. در این نمودار به وضوح می‌توان مشاهده نمود که فرضاً پس از ۴۰ ساعت عملکرد سیستم، قابلیت اطمینان بدون تأثیرات شرایط محیطی در حدود ۹۰ درصد می‌باشد، در حالی که مقادیر قابلیت اطمینان برای چهار سناریوی دیگر از ۵۰ تا ۷۰ درصد متغیر است. این اختلاف با افزایش زمان کارکرد سیستم، بیشتر هم می‌شود.

### ۵-۵- تخمین عمر باقیمانده مفید بیل مکانیکی

پس از تصمیم‌گیری در مورد تابع قابلیت اطمینان و تخمین پارامترهای آن در این مرحله برای تخمین عمر باقیمانده مفید از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود. با توجه به تابع WPHM برای

جدول ۷- مقادیر RUL برای تابع WPHM

سناریو	عمر بر حسب ساعت								
	۰	۸	۱۶	۲۴	۳۲	۴۰	۴۸	۵۶	۶۴
۱	۹۱٫۲	۸۹٫۹	۸۹٫۰	۸۸٫۳	۸۷٫۶	۸۷٫۱	۸۶٫۵	۸۶٫۱	۸۵٫۶
۲	۷۲٫۹	۷۱٫۶	۷۰٫۷	۷۰٫۰	۶۹٫۴	۶۸٫۸	۶۸٫۳	۶۷٫۸	۶۷٫۴
۳	۵۸٫۲	۵۷٫۰	۵۶٫۱	۵۵٫۳	۵۴٫۷	۵۴٫۱	۵۳٫۶	۵۳٫۲	۵۲٫۷
۴	۶۴٫۷	۶۳٫۵	۶۲٫۶	۶۱٫۸	۶۱٫۲	۶۰٫۶	۶۰٫۱	۵۹٫۷	۵۹٫۲



شکل ۴- نمودار قابلیت اطمینان و عمر باقیمانده مفید بیل مکانیکی برای مدل WPHM

به‌دست آمده قابلیت اطمینان بالاتر RUL بالاتر را نیز به همراه دارد. در آخر باید ذکر نمود که نتایج حاصل از این تحقیق در حوزه مهندسی برای برنامه‌ریزی نت و تخمین قطعات یدکی کاربردی است.

### مراجع

1. B. Rod, A. Barabadi, and M. Naseri, "Recoverability Modeling of Power Distribution Systems Using Accelerated Life Models: Case of Power Cut due to Extreme Weather Events in Norway," *Journal of Management in Engineering*, vol. 36, no. 5, p. 05020012, 2020.
2. R. Zaki, A. Barabadi, J. Barabadi, and A. N. Qarahasanlou, "Observed and unobserved heterogeneity in failure data analysis:," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, Jun. 2021, doi: 10.1177/1748006X211022538.
3. J. S. Kiddy, "Remaining useful life prediction based on known usage data," 2003, pp. 11–18.
4. A. Ghomghale, M. Ataei, R. Khalokakaie, A. Barabadi, and A. Nouri Qarahasanlou, "The Application of Frailty Model in Remaining Useful Life Estimation (Case Study: Sungun Copper Mine's Loading System)," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 18, no. 62, Oct. 2020, doi: 10.22075/jme.2020.19249.1817.
5. A. Ghomghaleh *et al.*, "Prediction of remaining useful life (RUL) of Komatsu excavator under reliability analysis in the Weibull-frailty model," *Plos one*, vol. 15, no. 7, p. e0236128, 2020.
6. R. Barabadi, M. Ataei, R. Khalokakaie, and A. Nouri Qarahasanlou, "Spare-part management in a heterogeneous environment," *Plos one*, vol. 16, no. 3, p. e0247650, 2021.
7. R. Hall and L. Daneshmend, "Evaluation of mining equipment automation including process considerations and sensitivity analysis," in *Mine Planning and Equipment Selection 2000*, Routledge, 2018, pp. 709–713.
8. R. A. Hall and L. K. Daneshmend, "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, 2003.
9. U. Kumar and B. Klefsjö, "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, 1992, doi: 10.1016/0951-8320(92)90080-5.
10. U. Kumar, "Reliability Analysis of Load-Haul-Dump Machines," Phd Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1990.
11. N. Vagenas, V. Kazakidis, M. Scoble, and S.

در شکل ۴ نیز نمودار قابلیت اطمینان (محور عمودی راست) و عمر باقیمانده مفید (محور عمودی چپ) برای سناریوهای طی ۸۰ ساعت کارکرد سیستم در یک نمودار ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر چهار سناریو با گذشت زمان از عمر مفید سیستم کاسته می‌شود و در واقع سیستم رو به وخامت خواهد گذاشت. به طور مثال در سناریوی اول عمر باقیمانده مفید سیستم بعد ۴۰ تقریباً ۸۷ ساعت خواهد بود. این یعنی مدیریت در بهترین حالت تقریباً ۴ روز فرصت دارد تا در مورد اقدامات لازم برای جلوگیری از وقوع خرابی تصمیم‌گیری نمایند. این وضع برای سناریوهای دیگر نیز به همین صورت بوده و سیستم در حالت افت عملکرد است. بنابراین سیستم به نت مناسب نیاز دارد.

### ۶- نتیجه‌گیری

چارچوب ارائه شده برای تخمین عمر باقیمانده مفید براساس شاخص قابلیت اطمینان و رفتار گذشته سیستم است. در این رویکرد برای بررسی تأثیرات شرایط محیطی، علاوه بر تأثیر کلاسیک قابلیت اطمینان که تنها بر داده‌های زمانی استوار است، از مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک استفاده شد. این مدل‌ها که توابع رگرسیونی پارامتریک، نیمه پارامتریک یا ناپارامتریک‌اند، با بررسی همزمان داده‌های زمانی و تأثیر شرایط محیطی ارزیابی واقعی‌تری از قابلیت اطمینان ارائه می‌دهند. تابع نرخ مخاطرات متناسب (PHM) معروف‌ترین و پرکاربردترین این مدل‌هاست که اصلی‌ترین شرط استفاده از آن مستقل از زمان بودن فاکتورهای ریسک است که این شرط به عنوان "فرض متناسب بودن" در تحلیل‌ها وارد می‌شود. در رویکرد پیشنهادی در این مقاله، در صورت عدم برقراری این فرض استفاده از بسط‌های PHM یعنی مدل رگرسیون لایه‌بندی شده کاکس با مدل رگرسیون کاکس گسترش یافته پیشنهاد شد. مطالعه عمر باقیمانده مفید یک دستگاه بیل‌مکانیکی کوماتسو از معدن مس سونگون برای یک بازه ۸ ماهه نشان داد که فاکتورهای ریسک نوبت‌کاری، نوع سنگ، نوع دامپتراک باربر، میزان بارش و دما با هم وابستگی ندارند و ارزیابی تحلیلی و ترسیمی فرض متناسب بودن نیز مستقل از زمان بودن آنها را تایید کرد. در نتیجه آن مدل PHM به عنوان تابع مناسب بر داده‌ها برازش شد. فرض سناریوهای مختلف برای این تابع به‌خوبی تأثیر شرایط محیطی را بر عملکرد سیستم نشان داد. متناسب با این تأثیرات و تغییرات قابلیت اطمینان تحت شرایط محیطی مختلف، مقادیر RUL نیز در سناریوهای مختلف بشدت متفاوت بود. همچنین طبق نتایج

- based on time-to-failure model,” *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, pp. 1–10, Mar. 2017, doi: 10.1007/s13198-017-0607-7.
22. A. Nouri Qarahasanlou, “Production Assurance of Mining Fleet Based on Dependability and Risk Factor (Case Study: Sungun Copper Mine),” PhD Thesis in Mineral Exploita, Shahrood University of Technology Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics, Iran, Shahrood, 2017.
  23. A. Nouri Qarahasanlou, A. Mokhtarei, A. Khodayarei, and M. Ataei, “Fault tree analysis of failure cause of crushing plant and mixing bed hall at Khoy cement factory in Iran,” *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, vol. 2, no. 1, pp. 33–38, 2014, doi: 10.1016/j.csefa.2013.12.006.
  24. A. Nouri Gharahasanlou, R. Khalokakaie, M. Ataei, and S. Fatorachi, “Availability analysis of mining machinery in Sungun copper mine,” *Journal of Research-Papers Mineral Resources Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 61–72, Feb. 2017.
  25. D. Kumar and B. Klefsjö, “Proportional hazards model: a review,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 44, no. 2, pp. 177–188, 1994.
  26. D. Kumar and U. Westberg, “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, 1996.
  27. B. Ghodrati, “Weibull and Exponential Renewal Models in Spare Parts Estimation: A Comparison,” *International Journal of Performability Engineering*, vol. 2, no. 2, p. 135, 2006.
  28. B. Ghodrati, U. Kumar, and D. Kumar, “Product support logistics based on product design characteristics and operating environment,” presented at the Annual International Logistics Conference and Exhibition: 12/08/2003-14/08/2003, 2003.
  29. B. Ghodrati and U. Kumar, “Operating Environment Based Maintenance and Spare Parts Planning: A Case Study,” 2004, p. 125.
  30. B. Ghodrati and U. Kumar, “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, 2005, doi: 10.1080/13675560512331338189.
  31. B. Ghodrati, D. Benjevic, and A. Jardine, “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, Apr. 2012, doi: 10.1108/02656711211224875.
  32. A. Barabadi, J. Barabady, and T. Markeset, “A Espley, “Applying a maintenance methodology for excavation reliability,” *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol. 17, no. 1, pp. 4–19, 2003.
  12. M. M. Grujic, M. M. Grujic, and M. D. Ivkovic, “The impact of multi-element external coal transportation on reliability of the system and on environment,” in *Mine Planning and Equipment Selection 2000*, Routledge, 2018, pp. 569–572.
  13. N. Vagenas, N. Runciman, and S. R. Clément, “A methodology for maintenance analysis of mining equipment,” *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol. 11, no. 1, pp. 33–40, 1997.
  14. B. Samanta, B. Sarkar, and S. Mukherjee, “Reliability modelling and performance analyses of an LHD system in mining,” *South African Institute Mining And Metallurgy*, vol. 104, pp. 1–8, 2004.
  15. J. Barabady and U. Kumar, “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, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.res.2007.10.006.
  16. J. Barabady and U. Kumar, “Maintenance Schedule by Using Reliability Analysis: A Case Study at Jajram Bauxite Mine of Iran,” Tehran, Iran, 2005, vol. 2, pp. 831–838.
  17. J. Barabady, “Reliability and maintainability analysis of crushing plants in Jajarm Bauxite Mine of Iran,” 2005, pp. 109–115.
  18. N. Vayenas and X. Wu, “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.
  19. N. G. Ali, K. Reza, A. Mohammad, and M. Ashkan, “Reliability Analysis of Conveyor Belt System of Crushing Department,” in *CIVILICA*, 2015, vol. 01. Accessed: Jan. 29, 2017. [Online]. Available: [http://www.civilica.com/Paper-RSTCONF01-RSTCONF01\\_115=Reliability-Analysis-of-Conveyor-Belt-System-of-Crushing-Department.html](http://www.civilica.com/Paper-RSTCONF01-RSTCONF01_115=Reliability-Analysis-of-Conveyor-Belt-System-of-Crushing-Department.html)
  20. N. G. Ali, K. Reza, A. Mohammad, and M. Ashkan, “Power Law Model for Reliability Analysis of Crusher System in Khoy Cement Factory,” in *CIVILICA*, 2015, vol. 01. Accessed: Jan. 29, 2017. [Online]. Available: [http://www.civilica.com/Paper-RSTCONF01-RSTCONF01\\_057=Power-Law-Model-for-Reliability-Analysis-of-Crusher-System-in-Khoy-Cement-Factory.html](http://www.civilica.com/Paper-RSTCONF01-RSTCONF01_057=Power-Law-Model-for-Reliability-Analysis-of-Crusher-System-in-Khoy-Cement-Factory.html)
  21. A. N. Gharahasanlou, M. Ataei, R. Khalokakaie, A. Barabadi, and V. Einian, “Risk based maintenance strategy: a quantitative approach

- 2285, Mar. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2623260.
42. Y. Wu, M. Yuan, S. Dong, L. Lin, and Y. Liu, "Remaining useful life estimation of engineered systems using vanilla LSTM neural networks," *Neurocomputing*, vol. 275, pp. 167–179, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.neucom.2017.05.063.
  43. "IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 191-02-06: 'reliability (performance)," Jan. 24, 2014. <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-02-06> (accessed Jan. 24, 2014).
  44. "IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 191-04-01: 'failure,'" Jan. 24, 2014. <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-04-01> (accessed Jan. 24, 2014).
  45. Z. Ma, "Survival analysis approach to reliability, survivability and prognostics and health management (phm)," 2008, pp. 1–20.
  46. B. S. Dhillon, *Mining equipment reliability, maintainability, and safety*. Springer, 2008.
  47. M. Pijnenburg, "Additive hazards models in repairable systems reliability," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 31, no. 3, pp. 369–390, 1991.
  48. D. R. Cox, "Regression models and life-tables," *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pp. 187–220, 1972.
  49. S. Martorell, A. Sanchez, and V. Serradell, "Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 64, no. 1, pp. 19–31, 1999.
  50. U. Kumar, B. Klefsjö, and S. Granholm, "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, Jan. 1989, doi: 10.1016/0951-8320(89)90004-5.
  51. B. Ghodrati, "Reliability and operating environment based spare parts planning," Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 2005.
  52. D. G. Kleinbaum, *Survival analysis*. Springer, 2011.
  53. S. Lakshmi and P. G. Sundari, "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, 2012.
  54. A. Barabadi, J. Barabady, and T. Markeset, "Application of accelerated failure model for the oil and gas industry in Arctic region," 2010, pp. methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment condition," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 12, pp. 1637–1646, 2011, doi: 10.1016/j.res.2011.09.001.
  33. A. Nouri Qarahasanlou, M. Ataei, R. Khalokakaie, S. Fatoorachi, and R. Barabady, "Operating Environment Based Reliability Analysis of Mining Equipment Case Study: Molybdenum-Copper Mine (Sungun Copper Mine)," *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, vol. 9, no. 18, pp. 129–141, Apr. 2019.
  34. A. Nouri Qarahasanlou, M. Ataei, R. Khaolukakaie, B. Ghodrati, and M. Mokhberdorran, "Maintainability measure based on operating environment, a case study: Sungun copper mine," *Journal of Mining and Environment*, 2016.
  35. A. Moniri-Morad, M. Pourgol-Mohammad, H. Aghababaei, and J. Sattarvand, "Reliability-based covariate analysis for complex systems in heterogeneous environment: Case study of mining equipment," *Proceedings of the IMechE*, p. 1748006X18807091, Oct. 2018, doi: 10.1177/1748006X18807091.
  36. G. Watson and W. Wells, "On the possibility of improving the mean useful life of items by eliminating those with short lives," *Technometrics*, vol. 3, no. 2, pp. 281–298, 1961.
  37. E. A. Elsayed, "Mean residual life and optimal operating conditions for industrial furnace tubes," *Case studies in reliability and maintenance*, pp. 497–515, 2003.
  38. M. Xie, T. N. Goh, and Y. Tang, "On changing points of mean residual life and failure rate function for some generalized Weibull distributions," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 84, no. 3, pp. 293–299, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.res.2003.12.005.
  39. B. Ghodrati, U. Kumar, and F. Ahmadzadeh, "Remaining useful life estimation of mining equipment: a case study," presented at the International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection: 28/11/2012-30/11/2012, 2012.
  40. L. Wang, L. Zhang, and X. Wang, "Reliability estimation and remaining useful lifetime prediction for bearing based on proportional hazard model," *J. Cent. South Univ.*, vol. 22, no. 12, pp. 4625–4633, Dec. 2015, doi: 10.1007/s11771-015-3013-9.
  41. R. Khelif, B. Chebel-Morello, S. Malinowski, E. Laajili, F. Fnaiech, and N. Zerhouni, "Direct Remaining Useful Life Estimation Based on Support Vector Regression," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2276–

- “Remaining useful life prognostic estimation for aircraft subsystems or components: A review,” 2011, vol. 2, pp. 94–98.
59. D. G. Kleinbaum and M. Klein, “Survival Analysis: A Self-Learning Text,” *Springer Science & Business Media*, 2012.
60. M. Cleves, W. Gould, W. W. Gould, R. Gutierrez, and Y. Marchenko, *An introduction to survival analysis using Stata*. Stata press, 2016.
61. E. George, W. G. Hunter, and J. S. Hunter, *Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery*. Wiley, 2005.
- 2244–2248.
55. N. Gorjian Jolfaei, “Asset health prediction using the explicit hazard model,” Queensland University of Technology, 2012.
56. P. Prasad and K. Rao, “Reliability models of repairable systems considering the effect of operating conditions,” 2002, pp. 503–510.
57. A. Barabadi, J. Barabady, and T. Markeset, “Maintainability analysis considering time-dependent and time-independent covariates,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 1, pp. 210–217, 2011.
58. C. Xiongzi, Y. Jinsong, T. Diyin, and W. Yingxun,