





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری استخراج مواد معدنی

مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان با تأثیر فاکتورهای ریسک
مشهود و نامشهود (مطالعه موردی: ماشین آلات معدنی)

نگارنده

رضا برابادی

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطائی و دکتر رضا کاکایی

استاد مشاور:

دکتر علی نوری قراحسنلو

اسفند ۹۹

فرم شماره ۱۲

و تقدیم بابوسه بردستان پدرم:

به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا مردانگی، سخاوت، سکوت، مهربانی و...

پدرم راه تمام زندگیت

پدرم دهنوشی بهمیلیت

و در آخر تقدیم به مادر عزیزتر از جانم:

مادرم، مری من ز بستی توست تا بستم و بستی دارم دوست

نگار جاودانی مادر است

چشم سار مهربانی مادر است

تقدیم به بهسر عزیزم

به پاس قدردانی از قلبی که کنده از عشق و معرفت که محلی سرشار از سلامت و امنیت و آرایش و آسایش برای من فراهم آورده است

تشکر و قدردانی

نهال را “باران” باید، تا سیرابش کند از آب حیات و “آفتاب” باید تا بتاباند نیرو را و محکم کند شاخه‌های تازه رویده را؛ بسی شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه‌ام دکتر **محمد عطائی** و استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر **رضا کاکایی** آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند تقدیر و تشکر نمایم.

نمی‌توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانه جاری سازم و سپاس خود را در وصف استاد محترم جناب دکتر **علی نوری قراحسنلو** آشکار ننمایم، که هر چه گویم و سراپم، کم گفته‌ام. بدون شک جایگاه و منزلت ایشان، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگارم.

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، خانواده‌ای نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن‌ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان درراه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدین و عموهایی که بودندشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چراکه ایشان، پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده‌اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند. سپاس از **همسر عزیزم** که طی دوره تحصیل دکتری و ارشد همه سختی‌های زندگی را با گشاده‌رویی تحمل کردند و بنده پیشرفت‌های تحصیلی‌ام را مدیون صبر ایشان هستم.

در این میان و در امر داوری از اساتید گران‌قدر جناب آقای دکتر سید هادی حسینی از دانشگاه صنعتی اصفهان، آقای دکتر رضا میکائیل از دانشگاه صنعتی ارومیه و استاد گرامی جناب دکتر فرهنگ سرشکی از دانشگاه صنعتی شاهرود که زحمت داوری رساله این‌جانب را قبول فرمودند، قدردانی نموده و برای بزرگواران آرزوی طول عمر و سربلندی دارم.

از کلیه کارکنان، پرسنل و مسئولین محترم معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان به‌ویژه مسئولین محترم شرکت آرمان‌گهر که بامحبت و بزرگواری خویش بنده را یاری کردند سپاسگزارم.

تعهدنامه

این جانب رضا برابادی دانشجوی دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان با تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود (مطالعه موردی: ماشین آلات معدنی) تحت راهنمایی پروفسور محمد عطائی و پروفسور رضا کاکایی متعهد می‌شوم:

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

تاریخ: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

امضای دانشجو: رضا برابادی

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

معدنکاری روباز با نرخ تولید بالا نیازمند به کارگیری ماشین‌آلات بزرگ است. فراهم کردن و به کارگیری این ماشین‌آلات و حفظ و نگهداری آن‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری کلان می‌باشد. عملیات واحد معدنکاری شامل چالزنی، انفجار، بارگیری و باربری است که بارگیری یکی از مهم‌ترین بخش عملیات واحد معدنکاری، نقش قابل توجهی در نرخ تولید معدن دارد و در صورت توقف آن کل عملیات متوقف خواهد شد. توقفات پیش‌بینی نشده سبب افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، کاهش سود، تاخیر در انجام سفارشات و تحویل به موقع آن به مشتری و در نهایت کاهش اعتبار شرکت شده و نارضایتی مشتری را به دنبال خواهد داشت. مدیریت قطعات یدکی و تدارکات بخشی از مدیریت پشتیبانی محصولات و مؤثر در هزینه چرخه عمر محصول است. دسترسی به قطعات یدکی به هنگام نیاز، زمان افت سیستم را کاهش و کارایی آن را افزایش داده در نتیجه سود حاصل از کل پروژه را افزایش خواهد داد. در این رساله از شاخص قابلیت اطمینان در تخمین قطعات یدکی استفاده شده است. در تکمیل این رویکرد و به منظور نزدیک‌تر کردن هر چه بیشتر نتایج تحلیل به شرایط واقعی، تأثیر شرایط محیطی مؤثر (عملیاتی) به عنوان "فاکتورهای ریسک مشهود" نیز در تحلیل‌ها اضافه شد. که صرف نظر از شرایط محیط کاری سخت و خشن معدن در تحلیل‌ها، خلل بزرگی در کلیه نتایج حاصله به دنبال خواهد داشت. با این وجود امکان تعیین و وارد کردن تمامی فاکتورهای ریسک مشهود در تحلیل وجود ندارد. چراکه برخی از فاکتورهای ریسک مانند تأثیر تصمیم‌های مدیریتی، برندهای مختلف، تخصص‌های اپراتور و ... به دلایل مختلف از جمله قابل ثبت نبودن و عدم امکان کمی‌سازی، کمبود اطلاعات، عدم شناخت دقیق محیط، کمبود تخصص، باوجود مشهود بودن ثبت نشده و یا به درستی طبقه‌بندی نمی‌شوند و یا کوتاهی بازه گردآوری داده، پنهان خواهد ماند که این فاکتورها تحت عنوان "فاکتورهای ریسک نامشهود" در تحلیل اضافه می‌شود. برای بررسی بیشتر تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر روی تابع قابلیت اطمینان (تخمین پارامترهای مربوطه) و در نهایت تخمین تعداد قطعات یدکی بر اساس تابع قابلیت اطمینان به دست آمده، الگوریتمی در ۵ مرحله پیشنهاد می‌شود. بدین منظور از بسط‌های مبتنی بر مدل‌های رگرسیونی کاکس استفاده شده است؛ زیرا این مدل‌ها قادر به تحلیل هم‌زمان داده‌های عملکردی (داده‌های زمانی) و شرایط محیطی مؤثر (فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود) می‌باشند. در گام بعدی نیز، به منظور صحت سنجی الگوریتم ارائه شده برای تخمین قطعات یدکی بر اساس فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود نمونه موردی از سیستم ناوگان بارگیری (ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار 390 DL معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر سیرجان) انتخاب شد. پس از تشکیل بانک داده‌ها طی ۲۴ ماهه برای ۴ بیل مکانیکی داده‌های مورد نیاز در دو قالب داده‌های زمانی شامل زمان تا وقوع خرابی‌ها (TTFs) و فاکتورهای ریسک مشهود شامل نوبت کاری (Z_1)، نوع سنگ (Z_2)، گروه عملیاتی (Z_3)، دما (Z_4)، بارندگی (Z_5) و کد ماشین (Z_6) استخراج شد. نتایج حاصل آزمون نرخ درست‌نمایی پیشنهادی تأییدکننده وجود فاکتورهای ریسک نامشهود در داده‌ها است، لذا از مدل نمایی - نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی با مقدار ضریب شکنندگی ۰/۲۹۷ به عنوان تابع قابلیت اطمینان استفاده شده است. نتایج مدیریت قطعات یدکی با مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی برای یک سال برای سناریوهای موجود به ترتیب ۹۶، ۱۲۹، ۲۲۲ عدد و تابع کلاسیک نمایی ۱۱۲ عدد پیش‌بینی شده است. نتایج مطالعات انجام گرفته تأثیر چشمگیر و بارز فاکتورهای ریسک نامشهود را در تحلیل مدیریت قطعات یدکی نشان می‌دهد.

کلیدواژه: قابلیت اطمینان، قطعات یدکی، فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود، شرایط عملیاتی، ماشین‌آلات معدنی

لیست مقالات مستخرج از رساله

مقالات چاپ یا پذیرفته شده در مجلات ISI، علمی و پژوهشی، بین‌المللی، ...

مقاله	مجله	نوع مقاله	وضعیت
Spare-Parts Management in Heterogeneous Environment	plos one journal	ISI	پذیرش
بررسی شاخص نرخ مخاطره بر مبنای متغیرهای کمکی مشهود و نامشهود مطالعه موردی معدن جاجرم بوکسیت	سال هفدهم، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸	علمی - پژوهشی	پذیرش

مقالات ارائه شده در کنفرانس یا مجلات داخلی

مقاله	مجله	نوع مقاله	وضعیت
Spare Part Management Considering Risk Factors	--	Congress and Workshop on Industrial	پذیرش

مقالات تحت داوری

مقاله	مجله	نوع مقاله	وضعیت
Reliability and Spare parts provision Considering Observed and Unobserved Risk Factors: a Case Study	Quality and Reliability Engineering International	ISI	داوری

فهرست عناوین

۱- کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۲-۱- بیان مسئله ۳

۳-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق ۳

۴-۱- اهداف رساله ۵

۵-۱- فرضیات تحقیق ۵

۶-۱- ساختار رساله ۶

۲- مفاهیم اساسی و چارچوب تحقیق ۷

۱-۲- مقدمه ۸

۲-۲- قابلیت اطمینان ۹

۱-۲-۲- روش‌های کلاسیک تحلیل قابلیت اطمینان ۱۲

۲-۲-۲- مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک ۱۶

۳-۲- قابلیت پشتیبانی ۲۴

۴-۲- مدیریت قطعات یدکی ۲۵

۱-۴-۲- انبارداری قطعات یدکی ۲۵

۲-۴-۲- تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز ۲۸

۵-۲- جمع‌بندی فصل ۳۲

۳- بررسی سابقه علمی موضوع ۳۵

۱-۳- مقدمه ۳۶

۲-۳- پیشینه موضوع در حیطه صنعت بر اساس شاخص‌های رفتاری ۳۶

۳-۳- پیشینه موضوع در حیطه مهندسی معدن بر اساس شاخص‌های قابلیت اطمینان و پشتیبانی ۴۲

۱-۳-۳- قابلیت اطمینان ۴۲

۴-۳- قابلیت پشتیبانی ۴۷

۵-۳- بحث و بررسی ۴۹

۴- رویکرد پیشنهادی برای مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان و فاکتورهای

ریسک ۵۱

۱-۴- مقدمه ۵۲

۴-۲- رویکرد پیشنهادی برای مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان و فاکتورهای ریسک ۵۲

۴-۳- جمع‌بندی ۶۰

۵- مطالعه موردی - ماشین‌آلات معدنی (بارگیری) ۶۱

۵-۱- مقدمه ۶۲

۵-۲- مطالعه موردی - معدن بوکسیت جاجرمد ۶۲

۵-۲-۱- مرز بندی و انتخاب زیرسیستم و اجزاء ۶۳

۵-۲-۲- جمع‌آوری و تشکیل بانک اطلاعاتی اولیه ۶۴

۵-۳- مطالعه موردی - معدن گل‌گهر سیرجان ۶۴

۵-۳-۱- مرحله اول - مرزبندی و انتخاب اجزاء ۶۵

۵-۳-۲- مرحله اول - جمع‌آوری و تشکیل بانک اطلاعاتی اولیه ۶۶

۵-۳-۱- داده‌های زمانی خرابی ۶۷

۵-۳-۳- مرحله دوم - بررسی وابستگی فاکتورهای ریسک مشهود ۷۰

۵-۳-۴- محله سوم - ارزیابی مستقل بودن و توزیع یکسان (iid) ۷۰

۵-۳-۵- مرحله سوم - ارزیابی فرض همگنی برای فاکتورهای ریسک نامشهود ۷۱

۵-۳-۶- مرحله سوم - آزمون فرض متناسب بودن ۷۳

۵-۳-۷- برازش مدل مناسب برای قابلیت اطمینان ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار ۷۵

۵-۳-۸- مرحله چهارم و پنجم - مدیریت قطعات یدکی ۸۳

۵-۴- جمع‌بندی فصل ۸۷

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۹

۶-۱- بحث و نتیجه‌گیری ۹۰

۶-۲- پیشنهادها ۹۴

منابع و مراجع ۹۵

پیوست ۱۰۵

پیوست نمونه‌ای از داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی ۱۰۶

پیوست الف - داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی هیتاچی ۱۰۶

پیوست ب - داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار ۳۹۰ ۱۰۷

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- الگوریتم تحلیل قابلیت اطمینان و پشتیبانی با داده‌ها زمانی ۱۴
- شکل ۲-۲- تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر نرخ مخاطره ۱۶
- شکل ۳-۲- مقدار سفارش اقتصادی ۲۶
- شکل ۱-۴- الگوریتم تخمین قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان و فاکتورهای ریسک ۵۴
- شکل ۱-۵- موقعیت جغرافیایی شهرستان جاجرم ۶۳
- شکل ۲-۵- موقعیت جغرافیای مجموعه صنعتی معدن گل‌گهر ۶۵
- شکل ۳-۵- آزمون ترسیمی روند ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار ۷۲
- شکل ۴-۵- روش ترسیمی ارزیابی خودهمبستگی ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار ۷۲
- شکل ۵-۵- ارزیابی فرض PH نوع سنگ برای ناخن باکت بیل مکانیکی به روش گرافیکی ۷۶
- شکل ۶-۵- نمودار قابلیت اطمینان تابع‌نمایی-ExMPHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت ۸۰
- شکل ۷-۵- نمودار باقیمانده کاکس-اسنل مدل نمایی-ExMPHM ۸۱
- شکل ۸-۵- نمودار قابلیت اطمینان تابع‌ویبول-WePHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت ۸۳
- شکل ۹-۵- تعداد ناخن موردنیاز باکت بیل مکانیکی برای ۵ سال با تابع‌نمایی-MPHM ۸۵
- شکل ۱۰-۵- مقادیر ارسال سفارش مجدد و مقدار سفارش اقتصادی برای ناخن باکت بیل مکانیکی با تابع‌نمایی-MPHM ۸۵

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ چیدمان داده‌های فاکتورهای ریسک مشهود و زمان‌های وقوع خرابی ۱۱
- جدول ۲-۲ مدل‌های مبتنی بر فاکتور ریسک مشهود ۲۱
- جدول ۱-۳ مروری بر عناوین پژوهش‌های انجام‌شده مبتنی بر شاخص‌های رفتاری در صنعت ۳۷
- جدول ۱-۵ فاکتور ریسک نوبت ۶۸
- جدول ۲-۵ طبقه‌بندی فاکتورهای ریسک کیفی ۶۹
- جدول ۳-۵ بخشی از داده‌های TTF همراه با فاکتورهای ریسک خرابی بیل مکانیکی کاترپیلار ۷۰
- جدول ۴-۵ وابستگی بین داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار ۷۰
- جدول ۵-۵ آزمون روند تحلیلی ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار ۷۱
- جدول ۶-۵ مقادیر P-Value برای ارزیابی فرض PH فاکتورهای ریسک ۷۵
- جدول ۷-۵ مقادیر GOF توابع رگرسیون با شکنندگی برای داده‌های خرابی ناخن باکت ۷۷
- جدول ۸-۵ پارامتر شکل و مقیاس تابع‌نمایی-MPHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت ۷۸
- جدول ۹-۵ پارامترهای تابع‌نمایی-MPHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی ۷۸
- جدول ۱۰-۵ سناریوهای تابع‌نمایی-MPHM ۷۹
- جدول ۱۱-۵ مقادیر GOF توابع کلاسیک برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی ۷۹
- جدول ۱۲-۵ پارامترهای تابع کلاسیک‌نمایی برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی ۷۹
- جدول ۱۳-۵ مقادیر GOF توابع رگرسیون برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی ۸۱
- جدول ۱۴-۵ پارامتر شکل و مقیاس تابع ویبول-PHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت ۸۱
- جدول ۱۵-۵ پارامترهای تابع ویبول-PHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی ۸۲
- جدول ۱۶-۵ سناریوهای تابع ویبول-PHM ۸۲
- جدول ۱۷-۵ تعداد ناخن موردنیاز باکت بیل مکانیکی برای یک سال با مدل تابع‌نمایی-MPHM ۸۴
- جدول ۱۸-۵ تعداد ناخن موردنیاز باکت بیل مکانیکی برای یک سال بامدل ویبول-PHM ۸۶
- جدول ۱۹-۵ تعداد ناخن موردنیاز باکت بیل مکانیکی برای پنج سال بامدل ویبول-PHM ۸۶
- جدول ۲۰-۵ مقدار ارسال سفارش مجدد برای ناخن باکت برای ۵ سال بامدل ویبول-PHM ۸۷
- جدول ۲۱-۵ مقدار سفارش اقتصادی برای ناخن باکت برای ۵ سال بامدل ویبول-PHM ۸۷

علائم اختصاری

معیار اطلاعات آکائیکه	AIC	فرایند پواسون ناهمگن	NHPP
توزیع ویبول	We(t)	مدل مخاطرات متناسب کاکس	PHM
اندرسون - دارلینگ	A-D	فرض متناسب بودن	PH
معیار اطلاعات بیزین	BIC	مدل مخاطرات متناسب ترکیبی کاکس	MPHM
توزیع یکسان و مستقل داده‌ها	iid	فرایند قانون توانی	PLP
توزیع نمایی	Exp(t)	قابلیت اطمینان	R(t)
تابع توزیع تجمعی	F(t)	تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز	SPP
تابع چگالی احتمال خرابی	f(t)	مدل رگرسیونی لایه‌بندی شده کاکس	SCRM
فرایند پواسون همگن	HPP	سطح معنی‌داری	Sig
نسبت مخاطرات	HR	زمان بین خرابی	TBF
توزیع نمایی	Exp(t)	ضریب شکنندگی	θ
مدل رگرسیونی تعمیم‌یافته کاکس	ECRM	زمان تا وقوع خرابی	TTF
قابلیت تعمیم‌پذیری	M(t)	زمان تجمعی تا وقوع خرابی	TTTF
میانگین زمان تا خرابی	MTTF	میانگین (متوسط زمان تا وقوع خرابی)	T
میانگین زمان بین خرابی	MTBF	مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی توسعه یافته	EMPHM
انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌ها	$\sigma(T)$	مدل نرخ مخاطرات لایه‌بندی شده ترکیبی کاکس	MSCRM
نقطه سفارش مجدد	Rp	فرایند تجدیدپذیر	RP
آماره کتابچه نظامی آمریکا	Mil-Hdbk-189	مقدار سفارش اقتصادی	EOQ
آزمون نرخ درستی‌نمایی بیشینه	LR	خطای استاندارد	SE

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

قیمت ماشین‌آلات صنعتی در ایران به علت تحریم و مسائل سیاسی چندین برابر گران‌تر از قیمت جهانی است. این مسئله خود مانع از نوسازی اساسی شده و هزینه‌های نگهداری و تعمیر آن‌ها را به‌طور معنی‌داری افزایش داده است. علاوه بر آن جبران فرسودگی این ماشین‌آلات و جلوگیری از افت کارکرد آن‌ها نیازمند پشتیبانی و تأمین قطعات یدکی به‌موقع و مناسب است که این مسئله نیز با مشکل عدیده‌ای مواجه است. پشتیبانی از محصول، به‌عنوان سرویس و خدمات پس از فروش که دربرگیرنده حالات مختلف پشتیبانی و کمک‌رسانی نیز است. که از طرف تولیدکنندگان به‌منظور بهره‌مندی حداکثر مشتریان از محصول ارائه می‌شود. این کمک‌رسانی می‌تواند به اشکال و مراحل مختلف از چرخه عمر محصول ارائه شود. شاخص پشتیبانی در دودسته کلی قابل تقسیم بندی است که عبارت‌اند از: پشتیبانی از مشتری و پشتیبانی از محصول. پشتیبانی شامل نصب، تعلیم و آموزش اپراتور/ مصرف‌کننده محصول، مستندسازی، خدمات تعمیرات (به معنی خدمت‌رسانی)، قابلیت دسترسی به قطعات یدکی. مشاوره مشتری و برنامه‌های گارانتی برای محصولات و درواقع شامل تمامی فعالیت‌های ضروری به‌منظور اطمینان از دسترسی به یک محصول به‌دوراز هر مشکلی برای مصرف‌کننده در طول عمر مفید آن محصول است. در پژوهش پیش رو تمرکز ما بر نوع دوم یعنی پشتیبانی از محصول است که به‌طور گسترده متأثر از ویژگی‌های قابلیت اطمینان است لذا درک صحیح و ملموس از ویژگی‌های قابلیت اطمینان محصول دارای اهمیت زیادی است.

وقوع خرابی در سیستم ازجمله عوامل مهمی است که دستیابی به اهداف تولید را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. تحلیل قابلیت اطمینان ازجمله روش‌های پرکاربرد برای بررسی رفتار سیستم در رابطه با خرابی‌ها است. قابلیت اطمینان به‌عنوان فعالیت سیستم، یا به‌عبارت‌دیگر تحلیل وقوع خرابی‌ها در سیستم تعریف می‌شود. از آنجایی که پیشگیری مطلق از وقوع خرابی‌ها غیرممکن است، لذا کاهش احتمال وقوع خرابی و پیامدهای آن دو موضوع مهم در رابطه با خرابی‌ها است. از لحاظ اقتصادی خراب شدن سیستم، زیرسیستم یا اجزاء آن پیامدهای منفی مختلفی را در پی دارد که می‌توان به افزایش

زمان تولید، افزایش هزینه‌های نیروی کار (انسان، ماشین‌آلات)، افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات (نت)، افزایش قیمت تمام‌شده محصول، تأخیر در انجام سفارش‌ها و تحویل به‌موقع آن‌ها به مشتری و در نتیجه صدمه دیدن اعتبار شرکت اشاره نمود. این نتایج منفی حاصل از وقوع خرابی را می‌توان با پیاده‌سازی سیاست پشتیبانی مناسب کاهش داد. بر اساس این سیاست، درواقع مناسب‌ترین زمان‌های بازرسی و تعویض قطعات به‌منظور جلوگیری از رخ دادن خرابی تعیین می‌شود. هرچند، به‌طور طبیعی امکان رخ دادن خرابی‌های تصادفی ماشین‌آلات در بین بازه‌های زمانی تعیین‌شده نیز وجود دارد، لذا یک سیاست پشتیبانی مناسب قادر به تعیین بازه‌های زمانی مناسب به‌منظور به حداقل رساندن تعداد خرابی‌ها بوده که نهایتاً سبب کاهش هزینه و سایر پیامدهای منفی خواهد شد. بدین منظور نیاز به جمع‌آوری داده‌های خرابی و برآزش توزیع مناسب بر این داده‌ها می‌باشد. درنهایت به کمک این توزیع‌ها و تحلیل خروجی‌ها سیاست پشتیبانی مناسب ارائه می‌شود.

۱-۲- بیان مسئله

دو موضوع اصلی در این رساله مطرح می‌باشد؛ نخست تحلیل قابلیت اطمینان با بکارگیری هر سه وسایل زمان، فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود و بعدی تخمین قطعات یدکی براساس قابلیت اطمینان محاسبه شده در مرحله قبل. لذا پرسش‌های پژوهشی مرتبط با این مشکل به‌صورت زیر مطرح می‌شود:

۱- چگونه می‌توان فاکتورهای ریسک مشهود مؤثر بر شاخص قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی شناسایی کرد؟

۲- چگونه می‌توان تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود را در تحلیل قابلیت اطمینان لحاظ کرده و مقدار کمی این تأثیرات را تخمین زد؟

۳- چگونه می‌توان فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود در تخمین تعداد قطعات یدکی تأثیر را لحاظ کرد؟

۱-۳- اهمیت و ضرورت تحقیق

مدیریت و حفظ ارزش دارایی در هر شرایط و در هر حوزه ضروری و لازم است. در بخش معدن‌کاری ماشین‌آلات استخراجی بخش قابل توجهی از هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی را بر عهده‌دارند. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در افزایش قیمت تمام‌شده محصول در صنعت معدن‌کاری، هزینه پشتیبانی سیستم (چال زنی، آتشباری، بارگیری، باربری و سنگ‌شکنی) است. از سویی دیگر وقوع خرابی‌ها با توجه به افزایش پیچیدگی سیستم و گسترش سرمایه‌گذاری‌های بزرگ‌مقیاس حالت بحرانی‌تری پیدا کرده است. لذا نیاز به اجرای فعالیت‌های پشتیبانی دقیق‌تر و منظم‌تر احساس می‌شود؛ بنابراین بهینه‌سازی عملکرد سیستم، به حداقل رساندن هزینه‌ها، افزایش تولید و امکان بهره‌برداری هرچه

بیشتر از دارایی‌های موجود نیازمند استراتژی متشکل از شاخص عملکرد قابلیت اطمینان و پشتیبانی مناسب است، چراکه کاربرد هر کدام از این دو به تنهایی قادر به تأمین تمامی اهداف موردنظر نخواهد بود. به‌طوری‌که هزینه‌های بالای ناشی از به‌کارگیری تجهیزات بزرگ، حساس و گران‌قیمت در صنعت معدن‌کاری و سایر صنایع، کنترل عملکرد و مکانیزم خرابی آن‌ها، باعث ورود صنعت‌گران و مهندسیان به حوزه مهندسی قابلیت اطمینان شده است.

بررسی و تحلیل شاخص قابلیت اطمینان اولین و اساسی‌ترین گام در تحلیل مباحث شاخص‌های رفتاری (عملیاتی) است. پژوهش‌های انجام‌شده حاکی از تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود بر روی قابلیت اطمینان است که این فاکتورها باعث بهبود یا تضعیف قابلیت اطمینان می‌شوند ولی از تأثیر فاکتورهای ریسک نامشهود تحلیلی وجود ندارد. با توجه به اینکه در صنعت معدن‌کاری، استخراج مواد معدنی در ارتباط مستقیم باکیفیت و نحوه کارکرد ماشین‌آلات است، از این‌رو شناسایی رفتار سیستم موجود ضروری است.

در مورد ماشین‌آلات معدنی، قابلیت اطمینان نقش غیرانکاری در چرخه عمر محصولات دارد. هرگونه خرابی ماشین‌آلات معدنی باعث توقف سایر دستگاه‌های مرتبط با تولید و درنهایت توقف عملیات در معدن می‌شود در نتیجه این امر باعث اتلاف سرمایه و بروز خسارات مالی به معدن خواهد شد. قسمت عمده زمان از کارافتادگی سیستم به علت کمبود یا انتظار برای تأمین قطعات یدکی است که عمدتاً به علت تخمین نادرست تعداد قطعات یدکی مصرفی است. شرکت‌های معدنی اغلب پیشنهادات تولیدکنندگان راجع به مصرف قطعات یدکی را که تنها مبتنی بر زمان عملکرد ماشین است خط‌مشی خود قرار می‌دهند. اغلب تولیدکنندگان تأثیر شرایط مؤثر بر قابلیت اطمینان سیستم را در محاسبات خود در نظر نمی‌گیرند. حال آنکه این عوامل غالباً تأثیر منفی در طول عمر و کارکرد قطعات یدکی خواهند داشت. بنابراین همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در نظرگیری تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود در طول عمر و کارکرد اجزاء و تخمین تعداد موردنیاز از آن امری بسیار مهم است. زیرا در این حالت برنامه‌ریزی بهتر و بهینه‌ای برای قطعات یدکی خواهیم داشت.

گرچه تحقیقات گسترده و مهمی در زمینه قابلیت اطمینان و پشتیبانی ماشین‌آلات معدنی ارائه شده است، اما از بررسی و تحلیل تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر روی شاخص قابلیت اطمینان بی‌بهره بوده‌اند. بر این اساس در این رساله به بررسی و تحلیل تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر روی قابلیت اطمینان و مدیریت قطعات یدکی ماشین‌آلات معدنی پرداخته شده است.

۱-۴- اهداف رساله

هدف اصلی تحقیق تخمین قطعات یدکی مورد نیاز با در نظر گرفتن تأثیرات فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر قابلیت اطمینان است. اهداف جنبی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

الف. چهارچوبی برای بررسی رفتار عملکردی سیستم براساس رفتار خرابی‌ها و تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بیان می‌کند.

ب. تحلیل جامعه آماری به روش مدل قابلیت اطمینان

ج. برازش مدل آماری قدرتمند نرخ مخاطره متناسب ترکیبی بر بانک داده تشکیل شده برای منظور کردن تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود (تأثیر شرایط محیطی و عملیاتی) و نامشهود و

سنجش پارامترهای تابع قابلیت اطمینان

د. معرفی اثرگذارترین فاکتورهای ریسک مشهود

ذ. تعمیم رویکرد پیشین تخمین تعداد قطعات یدکی بر مبنی تابع قابلیت اطمینان

ه. مدیریت قطعات یدکی با و بدون در نظر گرفتن فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود در قالب

مدل قابلیت اطمینان و روش رگرسیون کاکس (مدل نرخ مخاطره متناسب ترکیبی)

۱-۵- فرضیات تحقیق

این پژوهش دارای برخی محدودیت‌ها و مرزهایی به صورت زیر است:

- تنها فازهای عملیاتی و نگهداری مورد مطالعه قرار خواهد گرفت (به عنوان مثال فاز طراحی مورد نظر نخواهد بود).
- تنها محیط معدنی مورد توجه بوده و سایر محیط‌های عملیاتی در این پژوهش مطالعه نخواهد شد.
- فاکتورهای ریسک مشهود بر اساس گستره‌ی بانک داده موجود تعیین خواهد شد.
- برای پیش‌بینی بخشی از شاخص‌های عملکردی جزء، از داده‌های تاریخی ثبت شده استفاده خواهد شد.
- تنها اجزاء ماشین‌آلات معدنی (بارگیری) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.
- اجزاء به عنوان سطحی از سیستم تعریف می‌شود که داده‌های مورد نیاز برای تخمین یا محاسبه ویژگی‌های آن قابل دستیابی باشد.
- قابلیت پشتیبانی از محصول متمرکز بر تخمین تعداد قطعات یدکی خواهد بود.
- تخمین تعداد قطعات یدکی برای اجزاء تعمیرناپذیر (اقلامی که بعد از وقوع خرابی قابل تعمیر نبوده و باید تعویض شوند) و دارای اولویت بالا انجام خواهد گرفت (نه برای تمامی اجزاء موجود)

۱-۶- ساختار رساله

این رساله علاوه بر فصل حاضر از پنج فصل دیگر به صورت زیر تشکیل شده است. در فصل دوم به بررسی مفاهیم اساسی در رابطه با قابلیت اطمینان و انواع روش‌های متداول تحلیل آن شامل روش‌های کلاسیک و روش‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک برای سیستم پرداخته شده است. در ادامه این فصل مبحث تخمین قطعات یدکی و نحوه تحلیل این شاخص مطرح شده است.

در فصل سوم تحقیقات مربوط به عناوین اصلی رساله شامل قابلیت اطمینان و پشتیبانی محدود به زمینه معدنی مورد بحث قرار گرفت تا اشراف بیشتر و تخصصی‌تر بر موضوعات حاصل شود. این تحقیقات تقریباً از نخستین سال مطرح‌شدن موضوع در زمینه تخصصی رساله ۱۹۶۷ تا سال ۲۰۲۰ بررسی شده‌اند.

در فصل چهارم به معرفی الگوریتم پیشنهادی برای مدیریت قطعات یدکی پرداخته شده است. سپس به ترتیب هر کدام از مراحل مدیریت قطعات یدکی به‌طور مفصل توضیح داده می‌شود. مراحل مدیریت قطعات یدکی شامل مرزبندی و انتخاب اجزاء، جمع‌آوری داده، بررسی همبستگی بین فاکتورهای ریسک، ارزیابی مستقل بودن و توزیع یکسان (iid)، ارزیابی فرض متناسب بودن نرخ مخاطره، انتخاب مدل برای قابلیت اطمینان، انتخاب توزیع برای تابع اساسی بر اساس معیارهای اطلاعات بیزین و آکائیکه، و در نهایت مدیریت قطعات یدکی اجزاء است.

در فصل پنجم که مهم‌ترین فصل رساله است، شامل ۳ بخش اصلی است، بخش اول به معرفی مشخصات معدن بوکسیت جاجرم و معدن سنگ آهن سیرجان اختصاص داده شده است. بخش دوم به منظور صحت سنجی الگوریتم ارائه‌شده به منظور تخمین قطعات یدکی بر مبنی فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر اساس بانک اطلاعات جمع‌آوری شده از نمونه موردی ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار 390 DL معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر سیرجان مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت بخش آخر به بحث و بررسی نتایج پرداخته شده است.

در فصل آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادات بیان شده است.

فصل دوم

مفاهیم اساسی و چارچوب تحقیق

۲-۱- مقدمه

با توجه به اهمیت دارایی‌های فیزیکی بخصوص ماشین‌آلات در پروژه‌های بزرگ عمرانی و معدنی مانند راه، راه‌آهن، سد، کانال‌های انتقال آب، نفت و گاز که به دلیل وابستگی زیاد آن‌ها به این ماشین‌آلات، بیش از نیمی از منابع حاضر در پروژه از جمله منابع مالی به ماشین‌آلات اختصاص می‌یابد. بی‌شک یکی از ارکان اساسی در اجرای پروژه‌های راه‌سازی و عمرانی و معدنی ماشین‌آلات و تجهیزات است. عدم انجام پشتیبانی به‌موقع و مناسب بر ظرفیت تولید و قیمت تمام‌شده اثرگذار بوده و عملاً باعث کاهش سود نهایی واحدهای بزرگ و کوچک خواهد شد. صنعت معدن ایران نیز از این مشکلات مستثنی نبوده؛ بنابراین باید به سراغ شاخص‌ها و رویکردهای مختلف مدیریتی مناسب برای افزایش کارایی و استفاده بهینه از منابع و تجهیزات موجود رفت که این رویکردها نیز نیازمند تحلیل داده‌های موجود از جمله داده‌های خرابی و تعمیراتی است. یکی از مؤثرترین کارهایی که در تحلیل داده‌ها باید انجام شود، تعیین زمان دقیق خرابی است که بتوان پشتیبانی لازم را طراحی و از توقف غیرضروری تولید جلوگیری کرد. در دنیای امروز حجم داده‌های در دسترس هر ساله به‌طور نمایی افزایش می‌یابد و یکی از مهم‌ترین مهارت‌ها، توانایی توصیف و ارزیابی داده‌های موجود با علم و ابزار مناسبی چون علوم ریاضی و شاخه کاربردی‌تر آن علم آمار و احتمالات است. برای بهینه‌سازی نیازمند رویکردی منسجم و قابل کاربرد در شرایط واقعی هستیم. این رویکرد باید مبنای ریاضی مناسب و درعین حال کاربردی داشته باشد تا هم بتواند وضعیت عملکرد تجهیزات را با کمترین خطا و انحراف نسبت به حالت واقعی تخمین بزند و هم به راحتی توسط متخصصین صنعتی که از فضای علمی دورترند، قابل استفاده باشد. روش پیشنهادی باید ویژگی‌های مختلف عملکردی تجهیزات مانند زمان کارکرد، زمان تعمیرات، زمان خدمات‌رسانی را پوشش دهد. درعین حال با واردکردن تأثیرات شرایط محیطی به عنوان پارامتری انکارناپذیر در تحلیل‌ها، تخمین‌های واقعی ارائه دهد. بررسی رفتار سیستم‌های صنعتی و بهره‌گیری حداکثری از آن‌ها برگرفته از این علم است. درواقع هدف مدیریت، استفاده بهینه از تجهیزات موجود

است و خرابی‌ها در نقطه مقابل آن قرار دارند. خرابی‌ها با از دسترس خارج کردن تجهیزات، زمان کارکرد را کاهش می‌دهند و موجب افت عملکرد آن‌ها می‌شوند. از سوی دیگر هر خرابی فرایندی تحت عنوان تعویض یا تعمیر را به دنبال دارد. پس برآیند داده‌های مربوط به دو پارامتر زمان بین خرابی‌ها و زمان انجام پشتیبانی درمجموع تعیین‌کننده رفتار عملکردی تجهیزات است که این دو زمان علاوه بر رفتار ماشین‌آلات تحت تأثیر شرایط محیطی مانند آب‌وهوا، دما، مهارت اپراتور، جنس سنگ، وضعیت جاده، تجربه گروه تعمیرات و ... است.

۲-۲- قابلیت اطمینان

نظریه قابلیت اطمینان یکی از شاخه‌های اصلی علم آمار است که در زمینه نمایش رفتار پدیده‌های تصادفی به کار می‌رود. از جمله پدیده‌های تصادفی می‌توان به طول عمر قطعات مکانیکی، تجهیزات صنعتی و طول عمر و زمان بقای افراد و بیماران اشاره کرد. تحلیل طول عمر بوسیله نظریه قابلیت اطمینان از اواسط قرن گذشته همواره مورد توجه متخصصین بوده است تا با تحلیل آن برآوردهای صحیح و منطقی از زمان بقای سیستم‌ها و افراد به دست آید.

قابلیت اطمینان به عنوان "توانایی یک وسیله در انجام فعالیت موردنیاز، در یک بازه زمانی و شرایط محیطی مشخص" تعریف می‌شود (IEC 60050, 2014). برای توصیف خرابی‌ها به‌طور آماری، چهار تابع مختلف اما هم‌ارز و مرتبط باهم تعریف می‌شود این توابع عبارت‌اند از (Dhillon, 2008): تابع چگالی احتمال توزیع خرابی^۱ با نماد $f(t)$ ، تابع توزیع تجمعی^۲ (CDF) خرابی با نماد $F(t)$ ، متمم $F(t)$ با عنوان تابع قابلیت اطمینان^۳ با نماد $R(t)$ ، تابع نرخ خرابی^۴ یا تابع مخاطره^۵ با نماد $\lambda(t)$ یا $h(t)$. نرخ مخاطره به‌عنوان نرخ وقوع خرابی‌ها در بازه زمانی مشخص در نظر گرفته می‌شود. این نرخ به‌عنوان میزان وقوع خرابی در هر واحد زمانی از بازه $[t_1, t_2]$ تعریف می‌شود، به‌طوری‌که خرابی قبل از t_1 (ابتدای بازه) رخ نداده باشد (Barlow and Proschan, 1996; Pham, 2006).

مهمترین داده آماری برای تحلیل قابلیت اطمینان زمان تا خرابی‌ها می‌باشد که در واقع بیان‌کننده خرابی‌های متعدد یک جزء یا سیستم بوده، یا به بیان بهتر زمان تا رسیدن به خرابی نامیده می‌شود داده‌های موردنیاز به‌طورکلی در دودسته خرابی و فاکتور ریسک تقسیم‌بندی می‌شوند که در بررسی قابلیت اطمینان داده‌ها متمرکز بر خرابی‌ها است. لذا در وهله نخست شناسایی خرابی و انواع آن ضروری است. این داده‌ها را می‌توان از منابع مختلف نظیر اسناد ثبت‌شده (گزارش‌های گروه نت،

^۱ - Failure Distribution Density Function

^۲ - Cumulative Distribution Function

^۳ - Reliability Function

^۴ - Failure Rate Function

^۵ - Hazard Function

مکانیک، روزانه ...، مدارک آرشیو شده (گزارش‌های قبلی، دفترچه ماشین‌آلات ...)، مصاحبه‌ها و مشاهدات مستقیم گردآوری کرد (Yin, 2008).

الف - خرابی

خرابی را عدم توانایی یک وسیله در انجام فعالیت مورد انتظار تعریف کرده‌اند (IEC 60050, 2014). در رابطه با قطعات و اقلام مکانیکی انواع مختلفی از خرابی‌های مکانیکی مانند خرابی خستگی^۱، خزش یا گسیختگی^۲، خمشی^۳، متالورژیکی^۴، ناپایداری^۵، بارگذاری برشی^۶، ترک‌خوردگی مواد تشکیل‌دهنده^۷، فشاری^۸، لهیدگی^۹، تمرکز تنش^{۱۰}، مقاومت کششی نهایی^{۱۱} و مقاومت کششی تسلیم^{۱۲} را می‌توان در نظر گرفت (Ma, 2008).

منظور از داده‌های خرابی در این پژوهش داده‌هایی از جنس زمان است. در مباحث قابلیت اطمینان این داده‌ها به شکل زمان بین خرابی‌ها (TBF)^{۱۳}، زمان تا وقوع خرابی (TTF)^{۱۴}، زمان بین تعمیرات (TBM)^{۱۵} و برای مباحث تعمیر پذیری به شکل زمان انجام تعمیرات (TTR)^{۱۶}، زمان پاسخ‌دهی (DTT)^{۱۷} جمع‌آوری خواهد شد (Ma, 2008). می‌شود، داده‌های سری زمانی دارای دو وضعیت کامل^{۱۸} و معلق^{۱۹} (داده سانسور شده^{۲۰} و داده بریده شده^{۲۱}) می‌باشد. در داده کامل، زمان‌های مربوط به وقوع خرابی قبل و بعد از وقوع خرابی دقیقاً مشخص است. اما در داده معلق زمان‌های مربوط به وقوع خرابی به صورت دقیق مشخص نیست. داده‌های سانسور شده به سه حالت سانسور از چپ، راست و هر دو حالت چپ و راست (بازه‌ای) می‌باشند. داده‌های سانسور شده با عنوان داده‌های تعلیقی نیز شناخته شده‌اند (Zio, 2007).

¹ - Fatigue Failure

² - Creep or Rupture Failure

³ - Bending Failure

⁴ - Metallurgical Failure

⁵ - Instability Failure

⁶ - Shear loading Failure

⁷ - Material Flaw Failure

⁸ - Compressive Failure

⁹ - Bearing Failure

¹⁰ - Stress Concentration Failure

¹¹ - Ultimate Tensile-Strength Failure

¹² - Tensile-Yield-Strength Failure

¹³ - Time Between Failures

¹⁴ - Time To Failures

¹⁵ - Time Between Maintenance

¹⁶ - Time To Repair

¹⁷ - Time To Delivery

¹⁸ Complete failure data

¹⁹ Suspended data

²⁰ Censored data

²¹ Truncated data

ب- فاکتورهای ریسک

در دنیای حقیقی، عمر مفید تجهیزات متأثر از عوامل گوناگون، خطر و خرابی‌ها می‌باشد. بنابراین شاخص‌های رفتاری آنها نیز تابعی از زمان و/ یا عملکرد سیستم و شرایط محیطی کارکرد خواهد بود (Gorjian Jolfaei, 2012)، 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 می‌باشد. 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 مشهود**¹ (z) رفتار می‌شود. فاکتورهای ریسک مشهود بر داده‌های "زمان وقوع خرابی" افزوده خواهند شد (Ghodrati and Kumar, 2005a). در جدول ۱-۲ 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 مشهود در نظر گرفته شده را خواهیم داشت. روش آماری که برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان در مناطق مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید بتواند تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود (در برگیرنده عواملی محیطی هستند که بر عملکرد و عمر ماشین آلات تأثیر می‌گذارند) را بر قابلیت اطمینان تجهیزات یا سیستم اندازه‌گیری کند.

جدول ۱-۲ چیدمان داده‌های فاکتورهای ریسک مشهود و زمان‌های وقوع خرابی (Kleinbaum, 2011)

شماره خرابی	زمان وقوع خرابی	وضعیت خرابی	فاکتورهای ریسک مشهود			
No.Failure	Time to failure	Failure status	z_1	z_2	...	z_p
۱	t_1	d_1	z_{11}	z_{12}	...	z_{1p}
۲	t_2	d_2	z_{21}	z_{22}	...	z_{2p}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N	t_n	d_n	z_{n1}	z_{n2}	...	z_{np}

برخی از عوامل محیطی مانند تأثیر تصمیمات مدیریتی، برندهای مختلف، تخصص‌های اپراتور و ... به دلایل مختلف از جمله قابل ثبت نبودن و عدم امکان کمی‌سازی، کمبود اطلاعات، عدم شناخت دقیق محیط، کمبود تخصص، باوجود مشهود بودن ثبت نشده و یا به درستی طبقه‌بندی نمی‌شوند و یا کوتاهی بازه گردآوری داده، پنهان خواهد ماند. به عنوان مثال تفاوت‌های غیرقابل اندازه‌گیری بین وسایل مختلف که ناشی از استراتژی‌های متفاوت نت، میزان تجربه گروه نت یا آموزش فراگرفته توسط آن‌ها

¹ Observable Covariates

باشد. مثال بعدی را می‌توان در رابطه با تفاوت جنس و عناصر تشکیل‌دهنده اجزاء/جزء در نظر گرفت مانند جنس زنجیرچرخ (شامل: لینک، پین، کفشک و...) از شرکت‌های مختلف تهیه شده است. به‌عنوان آخرین مثال می‌توان به تفاوت در عملکرد ماشین‌آلات دو شرکت پیمانکاری در معدن مس سونگون (توسط نویسندگان این رساله تحلیل شده است) اشاره کرد؛ پیمانکار اول با ماشین‌آلات قدیمی، عملکرد بهتری نسبت به پیمانکار دوم با ماشین‌آلات جدیدتر دارد. دلیل این امر را می‌توان در نحوه مدیریت بهتر شرکت اول و کنترل دقیق‌تر تعمیرگاه این شرکت بیان داشت که این موضوع به‌هیچ‌وجه قابل ثبت یا کمی‌سازی نیست. لذا امکان تشکیل بانک داده و انجام تحلیل مشابه با عوامل قابل ثبت (فاکتورهای ریسک مشهود) برای این نوع تأثیرات وجود نخواهد داشت درحالی‌که این پارامترها بشدت مؤثر در عملکرد سیستم می‌باشند. این دست از عوامل در مهندسی قابلیت اطمینان به‌عنوان فاکتورهای ریسک نامشهود در نظر گرفته می‌شوند (Gutierrez, 2002). دسته اخیر از فاکتورهای ریسک تحت تابعی به‌عنوان "تابع شکنندگی"^۱ در تخمین قابلیت اطمینان وارد شده است. در بیشتر مطالعات قابلیت اطمینان اثرات فاکتورهای ریسک نامشهود نادیده گرفته می‌شوند که این امر مدل‌سازی اشتباهی از خرابی‌ها را به دنبال خواهد داشت.

در آمار برای توصیف رابطه یک متغیر وابسته (قابلیت اطمینان) با یک یا چند متغیر مستقل (فاکتورهای ریسک و زمان) از مبحثی با نام رگرسیون استفاده می‌شود.

۲-۱-۲- روش‌های کلاسیک تحلیل قابلیت اطمینان

در این روش‌ها برای تحلیل فقط از داده‌های زمانی استفاده می‌شود و نقش فاکتورهای ریسک در تحلیل نادیده گرفته می‌شود (Hall and Daneshmend, 2003a). مدل‌های مورد استفاده در تحلیل قابلیت اطمینان به روش کلاسیک: فرآیند پواسون همگن^۲ (HPP)، فرآیند تجدید پذیر^۳ (RP)، پواسون ناهمگن^۴ (NHPP)، فرآیند تجدید پذیر مازاد^۵ (SRP)، فرآیند تجدید پذیر منشعب^۶ (BRP)، فرآیند پواسون منشعب^۷ (BPP)، فرآیند مارکوف^۸ (MP) و فرآیند نیمه مارکوف^۹ (SMP) اشاره کرد (Pijnenburg, 1991). مدل فرآیند تجدید پذیر بر این فرض استوار است که داده‌های زمانی از فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها^{۱۰} (iid) پیروی می‌کنند. در فرآیند پواسون همگن، علاوه بر فرضیات

¹ - Frailty Function

² - Homogeneous Poisson Process

³ - Renewal Process

⁴ - Non-Homogeneous Poisson Process

⁵ - Superimposed Renewal Process

⁶ - Branching Renewal Process

⁷ - Branching Poisson Process

⁸ - Markov Process

⁹ - Semi-Markov Process

¹⁰ - Independent And Identically Distributed

فرآیند تجدید پذیر، فرض پیروی بازه‌های زمانی از توزیع نمایی نیز افزوده می‌شود. مدل پواسون همگن از لحاظ ریاضی ساده‌تر است ولی به علت بی حافظه بودن توزیع نمایی در توصیف شرایط واقعی دچار ضعف است، بنابراین در مورد تحلیل داده‌های سیستم‌های تعمیر پذیر که به علت تنزل یا بهبود سیستم دارای روند^۱ می‌باشند، کاربرد این روش‌ها نامناسب است و از مدل‌های فرآیند پواسون ناهمگن (مدل فرآیند قانون توانی^۲) استفاده می‌شود.

فرآیند تجدید پذیر مازاد برای تحلیل سیستم n جزئی، سری، مستقل از هم که با فرآیند تجدید پذیر مدل‌سازی شده است، به کار گرفته می‌شود. فرآیند تجدید پذیر منشعب نیز برای حالتی به کار گرفته می‌شود که هر مجموعه از رویدادهای (خرابی) اولیه^۳، یک سری رویدادهای تابعه^۴ را به دنبال داشته باشد. درواقع این فرآیند انطباقی از دو مجموعه رویداد اولیه و تابعه است. در این فرآیند رویدادهای اولیه و تابعه باید قابل تمیز باشند. فرآیند پواسون منشعب نیز مشابه فرآیند تجدید پذیر منشعب است، با این تفاوت که سری رویدادهای اولیه در آن توزیع پواسون همگن دارند. در فرآیند مارکوف فرض بر این است که سیستم امکان قرارگیری در n وضعیت را دارد و چرخه مارکوف برای آن ایجاد می‌شود. این وضعیت‌ها به‌عنوان: خرابی، عدم خرابی، یک فرآیند n مرحله‌ای تنزل و غیره در نظر گرفته می‌شوند. در این مدل مدت‌زمان توقف^۵ در وضعیت i توزیع نمایی با پارامتر میانگین λ_i دارد و احتمال‌های انتقال (P_{ij}) ، برای یک جهش^۶ از وضعیت i به j ، در ماتریس احتمال P قرار می‌گیرد که P_{ij} مستقل از تاریخچه فرآیند است. این دو ویژگی یعنی توزیع نمایی برای زمان‌های توقف و بی حافظه بودن به‌عنوان ویژگی‌های مارکوف شناخته می‌شوند. فرآیند نیمه مارکوف نیز ترکیبی از نظریه مدل فرآیند تجدید پذیر و زنجیره مارکوف است (Pijnenburg, 1991). الگوریتم شکل ۲-۱ رویکرد آماری محاسبه قابلیت اطمینان با استفاده از داده‌های زمانی را نشان می‌دهد که در این رساله با عنوان "الگوریتم تحلیل قابلیت اطمینان و پشتیبانی با داده‌ها زمانی" مورد استفاده قرار خواهد گرفت. این روش برگرفته از روش کلاسیک محاسبه قابلیت اطمینان است که با استفاده از آزمون‌های جدید بهبودیافته تا صحیح‌ترین مدل یا تابع آماری پیشنهاد شده است (Barabady and Kumar, 2008). الگوریتم تحلیل قابلیت اطمینان و پشتیبانی با داده‌ها زمانی در سه بخش کلی به شرح زیر بیان می‌شود:

الف- تشکیل بانک داده

ب- تعیین تابع یا مدل آماری مناسب

¹ - Trend

² - Power law Process Model

³ - Primary Events

⁴ - Subsidiary Events

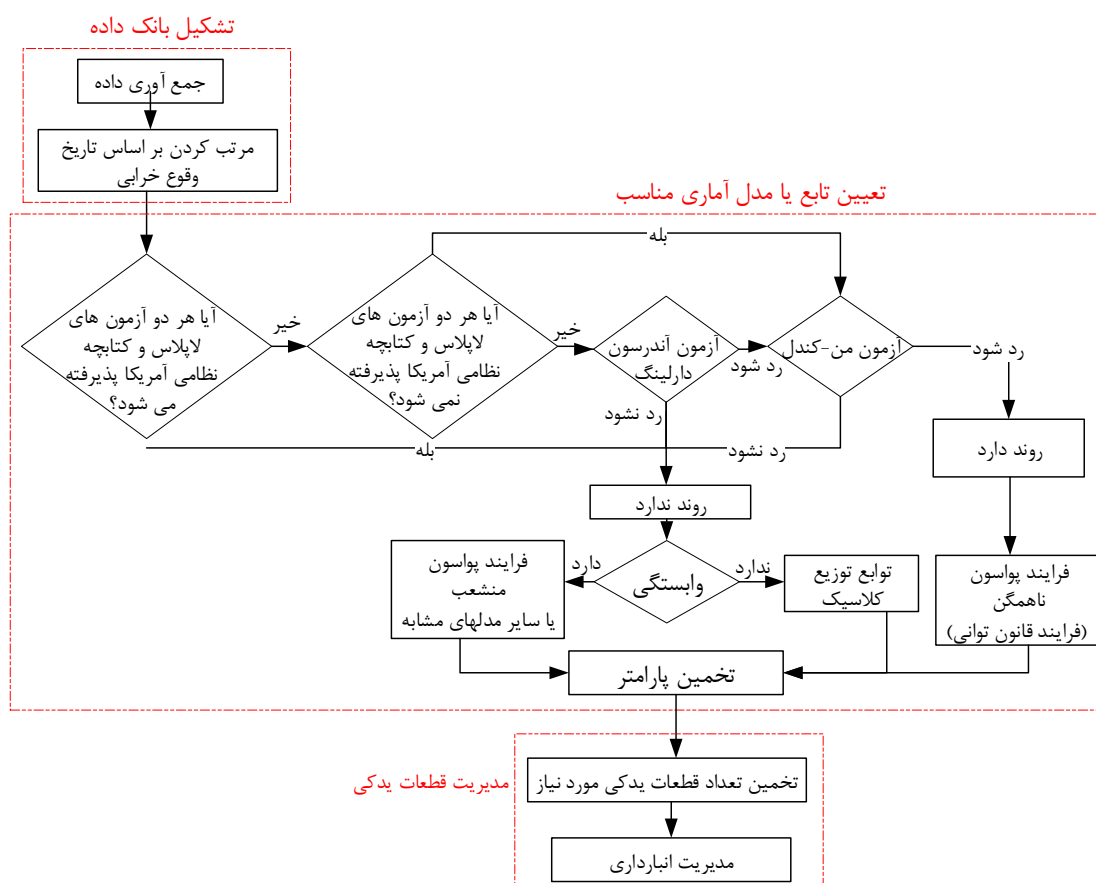
⁵ - Sojourn Time

⁶ - Jump

ج- تعیین شاخص‌های عملکردی سیستم یا زیرسیستم

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

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



شکل ۱-۲- "الگوریتم تحلیل قابلیت اطمینان و پشتیبانی با داده‌ها زمانی" برگرفته از (Barabady and Kumar, 2008; Garmabaki, Ahmadi, Block, et al., 2016)

آزمون روند تعیین می‌کند که آیا نحوه پراکنش داده‌های خرابی به‌طور معنی‌داری (تنزل یا بهبود) در طول بازه زمانی تغییر کرده است یا خیر. برای توصیف وجود یا عدم وجود روند روش‌های مختلفی وجود دارد که رویکردی مطابق شکل ۱-۲ پیشنهاد شده است که با دو آزمون تحلیلی روند Laplace (T1) و کتابچه نظامی (T2) انجام می‌گیرد که در خروجی سه حالت خواهیم داشت (Garmabaki, Ahmadi, Block, Pham, & Kumar, 2016; Garmabaki, Ahmadi, Mahmood, & Barabadi, 2015):

- حالت اول (رد فرض صفر (عدم وجود روند H_0) توسط یکی از دو آزمون T1 و T2): سراغ آزمون اندرسون-دارلینگ (T3) رفته و در صورت عدم رد آن داده‌ها روند نخواهند داشت. در صورت رد T3 سراغ آزمون بعدی یعنی آزمون من-کندل^۱ (T4) باید رفت. در صورت عدم رد H_0 توسط T4 داده‌ها روند نداشته و در غیر این صورت داده‌ها روند دارد.
- حالت دوم (رد فرض صفر توسط هر دو آزمون T1 و T2): سراغ آزمون T4 رفته و رد (روند دارد) یا پذیرش (روند ندارد) آن را بررسی می‌شود.
- حالت سوم (عدم رد فرض صفر توسط هر دو آزمون T1 و T2): در این حالت مستقیماً عدم وجود روند استنباط می‌شود.

در خروجی آزمون‌های T1، T2، T3 و T4 در صورت وجود روند در داده‌ها از PLP برای توصیف رفتار داده‌ها استفاده نموده و در صورت عدم وجود روند، آزمون فرض وابستگی (خودهمبستگی) انجام خواهد گرفت.

در خروجی آزمون‌های تحلیل‌های روند در صورت وجود روند در داده‌ها از فرایند قانون توانی برای توصیف رفتار داده‌ها استفاده می‌شود و در صورت عدم وجود روند، آزمون فرض وابستگی (خودهمبستگی) انجام می‌گیرد. خودهمبستگی به‌صورت همبستگی بین اعضای سری‌های مشاهداتی که در زمان (مانند داده‌های سری زمان) یا مکان (مانند داده‌های مقطعی) ردیف شده‌اند، تعریف می‌شود. برای تعیین خودهمبستگی نمودار i امین TBF(TTR) در برابر $(i-1)$ امین TBF(TTR) ترسیم می‌شود که در صورت نامستقل و همبسته بودن داده‌ها نقاط در امتداد یک خط واقع خواهند شد. نکته مهمی که در رابطه با آزمون باید در نظر گرفته شود، ترسیم داده‌ها به ترتیب وقوع هست، چرا که مرتب‌سازی داده‌ها سبب همگرایی خواهد شد (Hall & Daneshmend, 2003; Uday Kumar & Klefsjö, 1992).

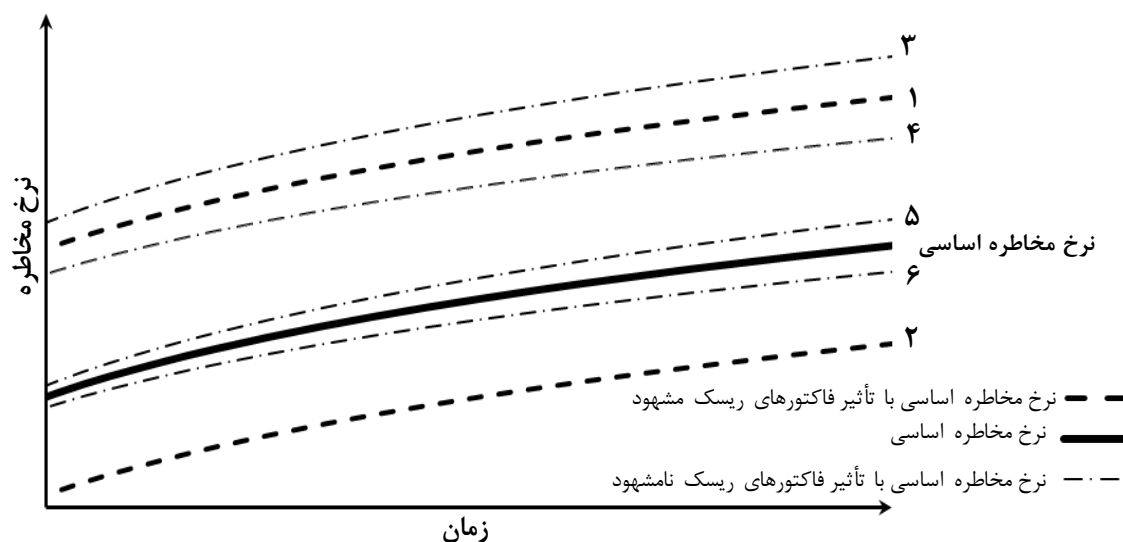
عیب اصلی روش کلاسیک ثابت در نظر گرفتن شرایط یکسان برای همه خرابی‌ها در طول زمان است؛ به‌عنوان مثال علیرغم متفاوت بودن شرایط محیط در زمستان و تابستان، این شرایط در روش مذکور یکسان در نظر گرفته می‌شود (Barabadi et al., 2011b).

۲-۲-۲- مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک

همان‌طور که اشاره شد، قابلیت اطمینان سیستم تابعی از زمان و فاکتورهای ریسک عملیاتی سیستم است؛ بنابراین مطالعه قابلیت اطمینان محصول^۱ نیازمند چارچوبی است که دربرگیرنده مسائل فنی، عملیاتی، بازرگانی، مدیریتی و به‌طور کلی فاکتورهای ریسک باشد (Ghodrati and Kumar, 2005b).

برای ارائه تخمین‌های بهتر از ویژگی‌های قابلیت اطمینان، در دهه ۱۹۷۰ استفاده از مدل‌های رگرسیون با توجه به توانایی آن‌ها در واردکردن فاکتورهای ریسک در محاسبات، پیشنهاد شد (Gorjian Jolfaei, 2012; Kumar and Klefsjö, 1994a). این فاکتورهای ریسک به‌طور تصادفی تغییر می‌کنند و ممکن است زمان وقوع خرابی را نیز تغییر دهند (Gorjian, Ma, et al., 2010a).

فاکتور ریسک مشهود باعث کاهش یا افزایش نرخ مخاطره خواهد شد. به‌عنوان مثال در مورد شرایط بد عملیاتی، نگهداری و تعمیرات ضعیف و ناکامل یا قطعات یدکی نادرست نرخ مخاطره مشاهده‌شده بیشتر از نرخ مخاطره اساسی خواهد بود (بازه زمانی صفر الی t_1). اگرچه در مورد شرایط مناسب عملیاتی یا قطعات توسعه یافته و قابل‌اعتماد سیستم نرخ مخاطره مشاهده‌شده کوچک‌تر از نرخ مخاطره اساسی خواهد بود (بازه زمانی t_1 الی t_2). در شکل ۲-۲ نیز چگونگی تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر نرخ مخاطره اساسی ترسیم شده است.



شکل ۲-۲- تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر نرخ مخاطره (Ghodrati and Kumar, 2005a)

در این شکل نمودار نرخ مخاطره اساسی (نرخ مخاطره بدون تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود) با خط پررنگ مشخص شده است. این نمودار در صورت تأثیر نامناسب فاکتورهای ریسک مشهود مانند شرایط عملیاتی بد (سرما یا گرمای شدید، گردوغبار شدید ...)، نت ضعیف و یا استفاده از

¹ - Product

قطعات یدکی نامناسب به حالت نمودار شماره ۱ یعنی بیشتر از نرخ مخاطره اساسی منتقل خواهد شد. در صورت خوب بودن تأثیرات فاکتورهای ریسک مشهود نیز نمودار نرخ مخاطره اساسی به حالت ۲ منتقل می‌شود که در کارهای انجام‌گرفته تاکنون به آن پرداخته شده است؛ اما در صورت ورود تأثیرات فاکتورهای ریسک نامشهود تغییرات چه برای نرخ مخاطره اساسی و چه برای دو نمودار شماره ۱ و ۲ (نرخ مخاطره اساسی به همراه فاکتورهای ریسک مشهود) متفاوت خواهد بود.

فاکتورهای ریسک نامشهود قادر به انتقال نرخ مخاطره اساسی به حالت ۵ یا ۶ برای دو تأثیر بد و خوب می‌باشند. این دو نمودار درواقع نشان‌دهنده تأثیرات فاکتورهای ریسک نامشهود به‌تنهایی بر نرخ مخاطره اساسی می‌باشند. در صورت ترکیب تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر نرخ مخاطره اساسی نیز به نمودار ۳ و ۴ دست خواهیم یافت. نمودار شماره ۳ نشان‌دهنده تأثیرات بد فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بوده و نمودار شماره ۴ نشان‌دهنده تأثیرات بد فاکتورهای ریسک مشهود و خوب فاکتورهای ریسک نامشهود است؛ که مشابه همین ترکیب را می‌توان برای نمودار شماره ۲ نیز بیان کرد که برای جلوگیری از پیچیدگی بیش‌ازحد شکل از تأثیرات فاکتورهای ریسک نامشهود صرف‌نظر شده است.

مدل‌های مبتنی بر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود در تحلیل قابلیت اطمینان عمدتاً بر اساس مدل نرخ مخاطرات متناسب هستند. مدل ^۱ PHM رویکردی ناپارامتری یا نیمه‌پارامتری است که نخستین بار توسط کاکس^۲ برای داده‌های بقا در زمینه پزشکی توسعه یافت (Cox, 1972). این مدل، فرآیند آماری ارزشمندی است که برای تخمین ریسک وقوع خرابی با توجه به ملاحظه شرایط و محیط سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل مبتنی بر این فرض است که تابع مخاطره جزء یا زیرسیستم، ترکیبی از تابع نرخ مخاطره اساسی آن و یک عبارت دربرگیرنده تأثیرات فاکتورهای ریسک است (Ghodrati et al., 2003). تابع نرخ مخاطره این مدل را می‌توان به صورت رابطه (۱-۲) بیان نمود:

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t)\psi(z, \alpha) \quad (1-2)$$

در این رابطه:

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

^۱ - Proportional hazard model

^۲ - Sir David Roxbee Cox

^۳ - Response Variable

$\psi(z, \alpha)$: تابع پیوند (Martorell et al., 1999)، تابعی است که برای آن حالات مختلفی را می‌توان در نظر گرفت. حالت نمایی $\exp(z\alpha)$ ، حالت لجستیک $\log(1+\exp(z\alpha))$ ، خطی معکوس $\frac{1}{1+(z\alpha)}$ ، خطی $1 + (z\alpha)$ برخی از این حالت‌ها هستند که حالت نمایی پرکاربردترین آن‌ها است (Kumar and Klefsjö, 1994a). با فرض حالت تابع‌نمایی برای تابع $\psi(z, \alpha)$ ، نرخ مخاطره را می‌توان به صورت (۲-۲) بیان نمود:

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

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

فاکتور ریسک است (Kumar and Klefsjö, 1994a). تابع قابلیت اطمینان $(R(t, z))$ برای PHM نیز به صورت رابطه (۳-۲) بیان نمود (Ghodrati, 2005):

$$R(t, z) = (R_0(t))^{\exp(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i)} \quad (3-2)$$

در این رابطه $R_0(t)$ قابلیت اطمینان اساسی است که تنها مبتنی بر زمان است. این مدل مبتنی بر مستقل از زمان بودن فاکتورهای ریسک، یعنی ثابت بودن نسبت بین دو نرخ مخاطره در طول زمان است که این فرض به عنوان فرض متناسب بودن (PH) شناخته می‌شود. این فرض از لحاظ آماری نیز به صورت رابطه (۴-۲) بیان می‌شود (Kleinbaum, 2011):

$$\frac{\mu_i(t, z_1)}{\mu_j(t, z_2)} = \theta, \text{ constan over } t \quad (4-2)$$

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

در ادامه نحوه تحلیل رفتار جزء (زیرسیستم) با استفاده از PHM و $SCRM^1$ به صورت مرحله به مرحله بیان شده است. این مراحل شامل فعالیت‌های زیر است (Barabadi et al., 2011a; Barabady and Kumar, 2008; Ghodrati and Kumar, 2005b):

الف. تعریف محدودیت‌ها^۲، فرضیات

ب. گردآوری داده

1. Stratified Cox Regression Model

2 - Boundaries

ج. شناسایی، فرمولاسیون فاکتورهای ریسک و استخراج داده‌های زمانی مورد نیاز و برازش مدل مناسب بر داده‌ها

د. تعیین قابلیت اطمینان جزء

نقطه شروع این روش با تعریف مرزها در سطوح مختلف مانند اجزاء، زیرسیستم و سیستم است. مرز سیستم، بر اساس اجزاء/جزء داخلی سیستم تعریف می‌شود تا از همپوشانی با سیستم‌های مجاور جلوگیری شود. یک سیستم نیز به نوبه خود ممکن است از چندین زیرسیستم تشکیل یافته باشند که در تراکنش با یکدیگر می‌باشند. مرز زیرسیستم را می‌توان به‌عنوان یک گروه منطقی از اجزاء در نظر گرفت که بر اساس فعالیت مورد تحلیل در سیستم بیان می‌شوند. تحت این تفصیل تمامی ادوات و اجزاء/جزء که وجود آن‌ها در زیرسیستم برای اجرای فعالیت سیستمی آن ضروری است را باید در مرزبندی زیرسیستم قرارداد. تعریف دقیق مرزهای جزء و سیستم به‌منظور تعیین پارامترهای قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری تجهیزات ضروری است. ذکر این نکته ضروری است که تنها خرابی‌های واقع در داخل مرز جزء در محاسبات وارد خواهند شد.

مرزبندی تأثیر مستقیم در جمع‌آوری داده دارد. علاوه بر این مرزبندی باید سازگار با داده‌های تولیدی (ثبت‌شده) باشد. به عنوان مثال در تحلیل قابلیت اطمینان ابزار الکتریکی متشکل از مقاومت‌ها و خازن‌ها، در صورت ثبت داده‌های پیشینه برای این قطعات می‌توان، آن‌ها را مورد تحلیل قرارداد. بنابراین مقاومت‌ها و خازن‌ها را می‌توان به‌عنوان اجزاء تعریف کرده و مرزبندی سیستم را تا این اجزاء بسط داد. در حالت دیگر زمانی که داده خرابی تنها برای کل ابزار الکتریکی در دسترس باشد، در این صورت آن ابزار به‌عنوان جزء مطرح بوده و مرزبندی اجزاء تا مقاومت‌ها و خازن‌ها پیش نخواهد رفت. داده‌های اساسی برای تحلیل قابلیت اطمینان برای سیستم‌های تعمیرپذیر زمان بین خرابی (TBF) و برای سیستم‌های تعمیرناپذیر از زمان تا وقوع خرابی‌ها (TTF) است. علاوه بر این تمامی داده‌های مربوط به شرایط محیطی مانند دما، گردوغبار، رطوبت، جنس سنگ، وضعیت جاده و غیره می‌باشند که به‌عنوان فاکتورهای ریسک در نظر گرفته خواهند شد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که شناسایی و فرمولاسیون فاکتورهای ریسک (مرحله دوم) می‌تواند به‌موازات مرحله اول اجرا شود.

در سومین مرحله شناسایی و صورت‌بندی فاکتورهای ریسک (تأثیرات، تراکنش و یا حذف آن‌ها) انجام شود (Gao et al., 2010). در کل فاکتورهای ریسک می‌تواند منشأهای متفاوتی همچون شرایط محیطی، تاریخچه عملیات ماشین (مانند تعمیرات اساسی، تأثیر تعمیرات و نوع تعمیرات انجام‌گرفته)، نوع طراحی و مصالح بکار رفته در تجهیزات داشته باشد. به‌منظور فرمول‌بندی فاکتورهای ریسک باید نکات زیر را در نظر گرفت (Barabadi et al., 2011a):

- اثرات متقابل فاکتورهای ریسک: اثرات متقابل هر دو یا تعدادی بیشتر فاکتور ریسک را می‌توان با معرفی فاکتور ریسک جدید برای آن، مدل کرد.
- حذف فاکتور ریسک مؤثر: این مسئله می‌تواند، اریبی^۱ در تحلیل را به دنبال داشته باشد. مقدار این اریبی وابسته به اهمیت فاکتور ریسک حذف‌شده در مقایسه با متغیرهای لحاظ شده در محاسبات است.
- وابستگی به زمان برای فاکتور ریسک: به‌منظور فرمول‌بندی فاکتور ریسک وابسته به زمان در صورت وجود باید توجه شود.

رسم هیستوگرام و نمودارهای پراکنش^۲، برای ارزیابی توزیع فاکتور ریسک و شناسایی نقاط پرت و بررسی همبستگی بین آن‌ها مفید است (Barabadi et al., 2011a).

در مرحله بعد شناسایی رویکرد مناسب برای تحلیل داده و تخمین شاخص‌های قابلیت اطمینان جزء یا زیرسیستم است. در این مرحله در صورت عدم دستیابی به اطلاعات لازمه برای فاکتورهای ریسک از الگوریتم تحلیل داده‌های زمانی استفاده می‌شود. در صورت امکان دستیابی به هر دو دسته داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک سراغ روش‌های رگرسیونی مانند PHM یا SCRM باید رفت. تعیین تابع نهایی قابلیت اطمینان بر اساس داده‌های زمان و فاکتورهای ریسک نیازمند تعیین تابع اساسی (نرخ مخاطره، تعمیرپذیری و پشتیبانی) است که از دو رویکرد می‌توان بدین منظور استفاده نمود؛

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

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

در نهایت نیز تحلیل رفتار عملکردی جزء/قطعه/زیرسیستم برای شاخص عملکردی قابلیت اطمینان با داده‌های زمانی و شرایط محیطی (در صورت امکان) انجام می‌گیرد.

با این وجود تابع PHM به‌تنهایی قادر به تحلیل فاکتورهای ریسک مشهود بوده و برای دخیل کردن سایر پارامترها نیازمند بسط و گسترش است که در جدول ۲-۲ بعضی از بسط‌های این تابع مشاهده می‌شود. هر یک از این مدل‌ها با توجه به حالت‌های مختلف بسط داده‌شده ولی هیچ کدام قادر به تحلیل فاکتورهای ریسک نامشهود نمی‌باشند. لنکستر^۳ برای نخستین بار مدل نرخ مخاطرات متناسب

¹ - Bias

² - Scatter Plots

³ - Lancaster

ترکیبی (MPHM)^۱ را برای تحلیل تأثیرات فاکتورهای ریسک نامشهود پیشنهاد داد. کاربردهای این مدل در اقتصادسنجی، بیومتری و جمعیت‌شناسی رایج هستند (Lancaster, 1992, 1979).

جدول ۲-۲- مدل‌های مبتنی بر فاکتور ریسک مشهود

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

در مدل MPHMM نرخ مخاطره سیستم حاصل ضرب نرخ مخاطره اساسی در دو عبارت مثبت است: اولین عبارت تابع فاکتورهای ریسک مشهود و دومین عبارت تابع فاکتورهای ریسک نامشهود (تابع شکنندگی^۲) است. در مدل MPHMM فرض بر این است که تمام عوامل اندازه‌گیری نشده و خطاهای اندازه‌گیری را می‌توان به صورت یک عبارت تصادفی (α) که در تابع اصلی ضرب می‌شود، در محاسبات وارد نمود که این ضریب در واقع تأثیرات فاکتورهای ریسک نامشهود می‌باشد. فرض کنید ردیفی j

1. Mixture Proportional Hazard Model

2- Frailty Function

سیستم داشته باشیم در این تابع نرخ مخاطره برای سیستم در زمان $t > 0$ را می توان به صورت رابطه (۵-۲) بیان نمود: (Asfaw and Lindqvist, 2015; Cha and Finkelstein, 2014; Slimacek and Lindqvist, 2017)

$$\lambda_j(t; z; \alpha) = \alpha_j \lambda_0(t) \psi(z; \eta) \quad (۵-۲)$$

در این رابطه $\lambda_0(t)$ نرخ مخاطره اساسی دلخواه و تنها وابسته به زمان، z بردار ردیفی دربرگیرنده فاکتورهای ریسک مشهود مربوط به سیستم، η بردار ستونی دربرگیرنده پارامترهای رگرسیون برای تعیین میزان تأثیر هر فاکتور ریسک، α_j تابع شکنندگی مستقل از زمان برای سیستم j و نشان دهنده میزان تأثیر یک یا یک دسته فاکتورهای ریسک نامشهود است. در این رابطه تابع نرخ مخاطره اساسی را می توان به صورت نامعین و یا با استفاده از توابع معین نظیر ویبول یا فرایند پواسون ناهمگن (NHPP) مدل کرد. برای مقادیر $\alpha_j > 1$ می توان گفت که شکنندگی به دلایل غیرقابل توضیح افزایش ریسک خرابی را به دنبال خواهد داشت (در شکل ۲-۲ نمودارهای شماره ۳ و ۵) و برای $\alpha_j < 1$ برعکس است (در شکل ۲-۲ نمودارهای شماره ۴ و ۶). نحوه توصیف و رفتار $\psi(z; \eta)$ مشابه مدل PHM است. این مدل به طور کل دربرگیرنده تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر داده های زمانی است که این تأثیر به ضریب α که دارای تابع گاما است، بر تابع PHM افزوده شده است. برای مدل های تک متغیره تابع قابلیت اطمینان $(R(t))$ می توان از تابع شرطی قابلیت اطمینان $(R(t|\alpha))$ که مشروط به شکنندگی (α) است، استفاده نمود، که به صورت رابطه (۶-۲) خواهد بود:

$$R(t|\alpha) = \{R(t)\}^\alpha \quad (۶-۲)$$

تابع قابلیت اطمینان غیرشرطی (جامعه) را نیز می توان با انتگرال گیری از مقدار (α) نامشهود تخمین زد. اگر تابع چگالی احتمال α را با $g(\alpha)$ بیان شود، تابع قابلیت اطمینان غیرشرطی یا جامعه به صورت رابطه (۷-۲) است (Gutierrez, 2002):

$$R_\theta(t) = \int_0^\infty \{R(t)\}^\alpha g(\alpha) d\alpha \quad (۷-۲)$$

در این رابطه پانویس θ برای R برای تأکید بر وابسته بودن شکنندگی به واریانس θ به کار رفته است. همان طور که مشاهده می شود هنوز رابطه تابع قابلیت اطمینان با تابع نرخ مخاطره به علت وجود α به صورت غیرشرطی است، لذا تابع نرخ مخاطره جامعه عبارت است از (Gutierrez, 2002):

$$\lambda_\theta(t) = -\frac{d}{dt} R_\theta(t) [R_\theta(t)]^{-1} \quad (۸-۲)$$

با فرض تابع گاما برای فاکتورهای ریسک نامشهود خواهیم داشت (Gutierrez, 2002):

$$\lambda_{\theta}(t) = \lambda(t)[1 - \theta \ln(R(t))]^{-1} \quad (9-2)$$

$$R_{\theta}(t) = [1 - \theta \ln\{R(t)\}]^{-1/\theta} \quad (10-2)$$

برای برقراری ارتباط بین نرخ مخاطره و تابع قابلیت اطمینان ($R(t; z; z(t))$) می‌توان از تابع شرطی قابلیت اطمینان^۱ (جزء یا قلم) ($R(t; z; z(t)|\alpha)$) که مشروط به شکنندگی (α) است، استفاده نمود، که به صورت رابطه (۱۱-۲) خواهد بود:

$$R(t; z; z(t)|\alpha) = \{R(t; z; z(t))\}^{\alpha} \quad (11-2)$$

تابع قابلیت اطمینان غیرشرطی (جامعه) را نیز می‌توان با انتگرال‌گیری از مقدار (α) نامشهود تخمین زد. اگر تابع چگالی احتمال α را با $g(\alpha)$ بیان شود، تابع قابلیت اطمینان غیرشرطی یا جامعه به صورت رابطه (۱۲-۲) است (Gutierrez, 2002):

$$R_{\theta}(t; z; z(t)) = \int_0^{\infty} \{R(t; z; z(t))\}^{\alpha} g(\alpha) d\alpha \quad (12-2)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود هنوز رابطه تابع قابلیت اطمینان با تابع نرخ مخاطره به علت وجود α به صورت غیرشرطی است، لذا تابع نرخ مخاطره جامعه عبارت است از (Gutierrez, 2002):

$$\lambda_{\theta}(t; z; z(t)) = -\frac{d}{dt} R_{\theta}(t; z; z(t)) [R_{\theta}(t; z; z(t))]^{-1} \quad (13-2)$$

در این رابطه‌ها پانویس θ برای R و λ برای تأکید بر وابسته بودن شکنندگی به واریانس θ به کار رفته است. با فرض تابع گاما برای فاکتورهای ریسک نامشهود خواهیم داشت (Gutierrez, 2002):

$$\lambda_{\theta}(t; z; z(t)) = \lambda(t; z; z(t)) [1 - \theta \ln(R(t; z; z(t)))]^{-1} \quad (14-2)$$

$$R_{\theta}(t; z; z(t)) = [1 - \theta \ln\{R(t; z; z(t))\}]^{-1/\theta} \quad (15-2)$$

در صورت وارد کردن فاکتورهای ریسک تابع قابلیت اطمینان MPHM به صورت رابطه (۱۶-۲) بیان می‌شود:

$$R_{\theta}(t; z; z(t)) = [1 - \theta \ln\{R_0(t) \exp[\sum_{i=1}^{p_1} \eta_i s_i]\}]^{-1/\theta} \quad (16-2)$$

تابع MPHM در صورت وارد نمودن فاکتورهای ریسک مستقل از زمان به تعداد p_1 و فاکتورهای ریسک وابسته به زمان با تعداد p_2 به عنوان مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی توسعه یافته (EMPHM)^۲ تعریف شده و تابع قابلیت اطمینان به صورت رابطه (۱۷-۲) بیان نمود (Gutierrez, 2002):

¹ - Conditional Reliability Function

² - Extension Mix Proportional Hazard Model

$$R_{\theta}(t; z; z(t)) = \left[1 - \theta \ln \left\{ R_0(t) \exp \left[\sum_{i=1}^{p_1} \eta_i s_i + \sum_{j=1}^{p_2} \delta_j s_j(t) \right] \right\} \right]^{-1/\theta} \quad (17-2)$$

که s_i ، فاکتور ریسک مستقل از زمان و s_j ، فاکتور ریسک وابسته به زمان است. این تابع قادر به تحلیل فاکتورهای ریسک مشهود وابسته و مستقل از زمان است. البته برای تحلیل فاکتورهای ریسک مشهود وابسته به زمان می توان از مدل نرخ مخاطرات لایه بندی شده (SCRM)^۱ نیز استفاده نمود. این تابع پس از تعیین فاکتور ریسک وابسته به زمان داده ها را بر اساس این فاکتور لایه بندی می شود. تابع قابلیت اطمینان این مدل در صورت ترکیب با ناهمگنی به عنوان مدل نرخ مخاطرات لایه بندی شده ترکیبی (MSCRM)^۲ به صورت رابطه (۱۸-۲) بیان نمود (Gutierrez, 2002):

$$R_{\theta m}(t; z; z(t)) = \left[1 - \theta \ln \left\{ R_{0m}(t) \exp \left[\sum_{i=1}^{p_1} \eta_i s_i + \sum_{j=1}^{p_2} \delta_j s_j(t) \right] \right\} \right]^{-1/\theta} \quad (18-2)$$

که در این رابطه $R_{0m}(t)$ تابع قابلیت اطمینان اساسی است که برای هر لایه به صورت مجزا تعیین می شود.

۳-۲- قابلیت پشتیبانی

پشتیبانی از نگهداری و تعمیرات، به عنوان توانایی گروه نت برای تأمین تقاضای منابع مورد نیاز برای نگهداری از یک وسیله تحت شرایط مشخص و استراتژی نت معین تعریف می شود (IEC 60050, 2014). تعیین و توسعه فرآیند نگهداری، تدارکات قطعات یدکی، خرید ابزارآلات و تسهیلات نت، تدارکات و مدیریت، ثبت اسناد، توسعه و آموزش برنامه های نت به کارکنان برخی از موارد ضروری برای پشتیبانی نت است. علاوه بر این، برای سیستم های پیچیده، پیشرفته و سیستم های پیوسته تولید، پشتیبانی خارجی^۳ مانند پشتیبانی از طرف کارخانه تولیدکننده نیز ضروری است. از سوی دیگر پشتیبانی از نت را می توان به عنوان شاخه ای از موضوع پشتیبانی از محصول در نظر گرفت (Ghodrati, 2003; Markeset and Kumar, 2007; et al.). پشتیبانی از محصول را می توان به عنوان همه فعالیت ها در راستای اطمینان از دسترسی به عملیات بدون مشکل در طول عمر مفید محصول تعریف کرد (Kumar, 2003). نصب، خدمات نت و دسترسی به قطعات یدکی از جمله موارد خدمات فنی ارائه شده در پشتیبانی است (Ghodrati and Kumar, 2005a). در ادامه به بررسی تخمین قطعات یدکی از زیرشاخه های اصلی پشتیبانی اشاره می شود:

¹ - Stratified Cox Regression Model

² - Mix Stratified Cox Regression Model

³ - External Support

مدیریت قطعات یدکی و تدارکات^۱ وجهی از مدیریت پشتیبانی محصولات است که در هزینه چرخه عمر محصول مؤثر است. دسترسی به قطعات یدکی به محض تقاضا، زمان توقف سیستم/ ماشین را کاهش و کارایی آن را افزایش می‌دهد که نتیجه آن افزایش سود حاصل از کل پروژه است. در صورت ذخیره تعداد موردنیاز قطعات یدکی در انبار، هزینه‌های چرخه عمر محصول به‌عنوان تابع هدف را به حداقل خواهد رساند. تعداد بهینه قطعات یدکی با ملاحظه عوامل مختلف مانند حساسیت قطعه، هزینه‌های خرید قطعه، فاصله زمانی بین سفارش تا دریافت قطعه قابل تخمین است (Ghodrati, 2005).

۲-۴- مدیریت قطعات یدکی

برنامه‌ریزی قطعات یدکی یک مجموعه یا کارخانه عنصر اصلی مدیریت قطعات یدکی است. این برنامه امکان دسترسی همیشگی به قطعات یدکی موردنیاز را به مقدار کافی فراهم می‌کند و از هزینه‌های سنگین ناشی از تأخیر تأمین قطعات یدکی به هنگام اجرای تعمیرات جلوگیری می‌کند. هرچند، نگهداری این دارایی در انبار بدون بهینه‌سازی اندازه موجودی نیز می‌تواند هزینه‌های اضافی قابل توجهی را تحمل کند. به‌طور کلی اهداف یک برنامه مؤثر مدیریت قطعات یدکی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد (Ghodrati, 2005):

- تضمین وجود حداقل یک فقره از همه قطعات بحرانی در مورد سیستم‌هایی که به علت مسائل ایمنی، رفع خرابی در آن‌ها از اولویت بالایی برخوردار است.
- پیشگیری وقوع تلفات غیرقابل قبول برای اطمینان از تجدید دوباره موجودی انبار و تأمین سروقت تدارکات مربوط به اجزاء مهم.
- حفظ میزان دارایی انبار در سطح ضروری برای کمینه‌سازی هزینه‌ها.

۲-۴-۱- انبارداری قطعات یدکی

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

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

اگرچه برای کنترل هزینه‌های حمل‌ونقل و بهره‌مندی از تخفیف‌های ویژه، پیشنهاد خریدهای انبوه ارائه می‌شود، ولی برای مدیریت قطعات یدکی بسیاری از قطعات کوچک دارای اندازه سفارش

¹ - Logistics

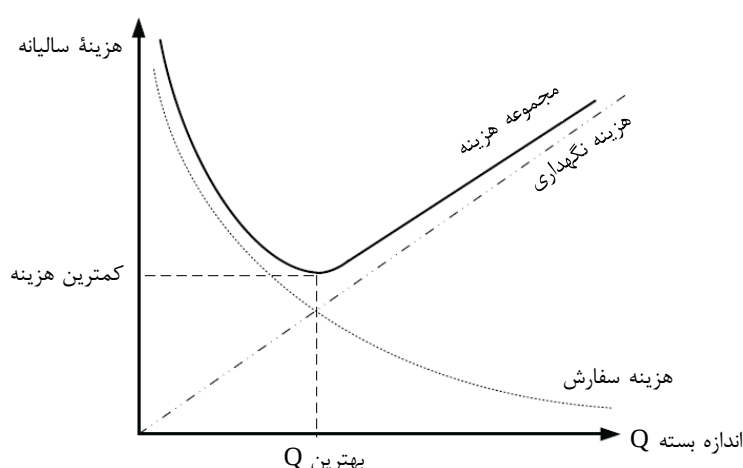
اقتصادی هستند. دو عامل یادشده در تعیین زمان تجدید قطعات یدکی نیز در نظر گرفته می‌شوند. بدین منظور محاسبات احتمال وقوع خرابی‌های بیشتر در طول چرخه سفارش مجدد یا چرخه تجدید تدارکات انجام می‌گیرد. احتمال عدم دسترسی به قطعات یدکی در هنگام نیاز تابعی از: تعداد قطعات نگهداری شده در انبار به‌طور معمول (تجدید قطعات یدکی)، تعداد قطعات مشابه و قابلیت اطمینان آن‌ها، محیط کارکرد سیستم (نرخ مصرف قطعات) و زمان بازگشت قطعات یدکی به انبار پس از خروج از انبار (چرخه تجدید تدارکات قطعات یدکی) است (Ghodrati, 2005).

ایده اصلی هر سیستم مدیریت انبارداری دستیابی به سطح خدمات‌رسانی کافی با کمینه سرمایه‌گذاری برای انبارکردن و کمینه هزینه‌های مدیریتی هست، به‌عنوان مثال مستقیماً از طریق صرفه‌جویی در هزینه‌های سفارش‌دهی به‌واسطه سفارش بیشتر از نیاز حاصل می‌شود. این موضوع سبب مسدود گشتن سرمایه در بخش انبارداری خواهد شد. به‌منظور حل این مسئله از "مقدار سفارش اقتصادی" ^۱ (EOQ) که توسط هاریس ^۲ (۱۹۱۳) ارائه و توسط ویلسون ^۳ (۱۹۳۴) ترویج‌شده است، می‌توان میزان ذخیره انبار با کمینه مجموع هزینه‌های انبارداری را تعیین کرد. این مفهوم در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود (Ghodrati, 2005).

مقدار سفارش اقتصادی با استفاده از رابطه (۲-۱۹)، قابل محاسبه است (Ghodrati et al., 2003):

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \quad (2-19)$$

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



شکل ۲-۳ - مقدار سفارش اقتصادی (Ghodrati, 2005)

^۱ - Economic Order Quantity

^۲ - Harris

^۳ - Wilson

سیستم بازبینی ادواری^۱ (سیستم P)

سیستم P (سفارش در بازه‌های زمان ثابت یا سیستم سفارش ادواری) یک سیستم کنترل انبارداری است که موجودی انبار به صورت ادواری بازبینی^۲ (TBO ثابت) و سفارش‌های جدید در انتهای هر بازه داده می‌شود (Ghodrati, 2005). این مدل ب دو پارامتر زیر نیازمند است و مدل مدیریت انبارداری بالا این دو عنصر را تعیین می‌کند (Ghodrati, 2005):

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

ا. سیستم بازبینی پیوسته^۳ (سیستم Q)

سیستم Q که از آن با عنوان سیستم نقطه سفارش مجدد^۴ (ROP) یا سیستم کمی سفارش‌های ثابت نیز یاد می‌شود، نوع دوم از سیستم مدیریت انبارداری است. در این سیستم موجودی انبار معادل توانایی دستگاه‌های موجود در برآورد تقاضای آینده خواهد بود. لذا موجودی انبار معادل کمینه مقدار نقطه سفارش مجدد^۵ (Rp) بوده و یک مقدار مشخص است. در روابط (۲۰-۲) و (۲۱-۲) فرم ریاضی نقطه سفارش مجدد مشاهده می‌شود (Ghodrati et al., 2003, 2012)

$$\sigma_{D(1\text{year})} = \sqrt{\frac{t}{T}} \quad (20-2)$$

$$Rp = d \times L + \sigma_D \times \sqrt{L} \Phi\left(\frac{p}{2}\right) \quad (21-2)$$

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

زمانی که تقاضا قطعی و مشخص است، زمان یا نقطه سفارش معادل مقدار تقاضایی است که در طول زمان تأخیر وجود دارد (قسمت اول تساوی (۲۱-۲))، ولی زمانی که تقاضا قطعی نیست، یک مقدار به عنوان ضریب ایمنی به متوسط میزان تقاضا در طول زمان تأخیر افزوده می‌شود (قسمت دوم تساوی (۲۱-۲)). نقطه سفارش مجدد (Rp) از حاصل جمع متوسط تقاضا (d) در طول زمان تأخیر (تصمیم تا اجرا) (L) (قسمت اول تساوی (۲۱-۲)) و مقدار موجودی ایمن (قسمت دوم تساوی (۲۱-۲)) حاصل

¹ - Periodic Review System

² - Time Between Order

³ - Continuous Review System

⁴ - Reorder Point System

⁵ - Reorder Point

می‌شود. موجودی ایمن بر اساس سطح معناداری چرخه خدمات‌رسانی و انحراف معیار استاندارد از مقدار متوسط $\sigma_{D(1yesr)}$ به دست می‌آید.

۲-۴-۲- تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز

دو نوع مدل ریاضی معروف در تخمین قطعات یدکی موردنیاز برای سامانه‌های تعمیرناپذیر به کار گرفته می‌شوند که مبتنی بر تئوری تجدید^۱ و فرایند پواسون همگن^۲ می‌باشند. فرایند پواسون به‌عنوان حالتی خواص از فرایند تجدید مطرح بوده و برای نرخ مخاطره ثابت (به این معنا که تمامی حالات خرابی و دیگر عوامل مؤثر در تقاضا باید از توزیع نمایی پیروی کند) بکار می‌رود. برای نرخ مخاطره متغیر نیز از تئوری تجدید برای پیش‌بینی قطعات یدکی موردنیاز استفاده می‌شود. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که عبارت فوق تنها در مورد اجزاء (قطعات یدکی) تعمیرناپذیر صحت دارد (B Ghodrati et al., 2010)، (Behzad Ghodrati & Kumar, 2005b).

تئوری تجدید در اصل برای تحلیل تعویض تجهیزات به‌مجرد خرابی، به‌منظور تعیین تابع تعداد تعویض‌ها و متوسط تعداد تعویض‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش ابزاری بسیار مناسب در پیش‌بینی تقاضا برای اقلام مصرفی هست. معمولاً در دنیای تحلیلی ارزیابی تابع خیلی سریع‌تر و بهینه‌سازی آن سهل‌تر است. (B Ghodrati et al., 2010)، (Behzad Ghodrati & Kumar, 2005b)، (Behzad Ghodrati, 2006). لذا یک فرایند تجدیدپذیر (به‌طور معمول) توسط تابع توزیع برای زمان‌های بین تجدیدها $F(t)$ بیان می‌شود. اگر $N(t)$ نشان‌دهنده تعداد تجدیدها (خرابی) در زمان t باشد و زمان تا وقوع خرابی‌ها (TTFs) مستقل از هم و دارای توزیع $F(t)$ باشد. تابع توزیع احتمال تعداد وقوع خرابی‌ها (n) به‌صورت زیر ارائه می‌شود (Ghodrati, 2005; Ghodrati et al., 2010):

$$P[N(t) = n] = F^n(t) - F^{n+1}(t) \quad (22-2)$$

در این رابطه $F^n(t)$ ، پیچش مرتبه n تابع $F(t)$ بوده و به‌صورت رابطه (۲۳-۲) می‌باشد:

$$F^n(t) = \int_0^t F^{n-1}(t-x) dF(x) \quad (23-2)$$

در این حالت $F^n(t)$ نشان‌دهنده احتمال وقوع n مین خرابی در زمان t است. تعداد خرابی‌های مورد انتظار در طول زمان t که با $M(t)$ نشان داده می‌شود، به‌صورت زیر است:

$$M(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F^n(t) \quad (24-2)$$

¹ - Renewal Theory

² - Homogeneous Poisson process

تساوی بالا به عنوان تابع تجدید شناخته شده و تعداد تجدیدها را در طول $[0, t]$ نشان می دهد و به صورت رابطه (۲۵-۲) قابل بازنویسی است:

$$M(t) = F(t) + \int_0^t M(t-x)f(x)dx \quad (25-2)$$

با توجه به ملاحظات تعویض ها برای قطعات، متوسط زمان تا وقوع خرابی با $\bar{T}$ و انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی ها نیز با $\sigma(T)$ باشد. در این صورت ضریب تغییرات (ξ) زمان تا وقوع خرابی ها به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$\xi = \sigma(T)/\bar{T} \quad (26-2)$$

در صورتی که زمان عملیات (t) سیستم یا ماشین که قطعه موردنظر برای آن نصب شده است خیلی طولانی باشد و چندین تعویض انجام شود، متوسط تعداد خرابی ها $E[N(t)] = M(t)$ با مقدار تقریبی تابع تجدید پذیری به صورت رابطه (۲۷-۲) تثبیت خواهد شد:

$$M(t) = E[N(t)] = \frac{t}{\bar{T}} + \frac{\zeta^2 - 1}{2} \quad (27-2)$$

و به تناسب آن شدت خرابی یا تابع نرخ تجدید پذیری به صورت رابطه (۲۸-۲) ارائه می شود:

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} = \frac{dE[N(t)]}{dt} = \frac{1}{\bar{T}} \quad (28-2)$$

انحراف معیار تعداد خرابی ها در زمان t به صورت رابطه (۲۹-۲) است:

$$\sigma[N(t)] = \zeta \sqrt{\frac{t}{\bar{T}}} \quad (29-2)$$

در صورتی که زمان t در تساوی بالا بیانگر یک افق برنامه ریزی بزرگ باشد، $N(t)$ تقریباً دارای توزیع نرمال با متوسط $\bar{N}(t)$ خواهد بود (بر اساس نظریه حد مرکزی). در این حالت تعداد قطعات یدکی موردنیاز (N_t) در طول این بازه با احتمال کمبود ($p-1$) به صورت رابطه (۳۰-۲) ارائه خواهد شد:

$$N_t = \frac{t}{\bar{T}} + \frac{\zeta^2 - 1}{2} + \zeta \sqrt{\frac{t}{\bar{T}}} \Phi^{-1}(p) \quad (30-2)$$

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

نتایج پژوهش انجام گرفته (Ghodrati et al. 2010; A. Nouri Qarahasanlou et al. 2016; Ghodrati, 2005) نشان می‌دهد که بهترین برازش برای داده‌ها از سه نوع تابع ویبول دو پارامتری یا PLP، ویبول سه پارامتری تشکیل یافته است. تابع توزیع ویبول در اشتراک با برخی از توزیع‌ها، مانند گاما، نرمال لگاریتمی، نمایی است و ویژگی مهم آن ثابت نبودن شکل کلی آن و انطباق با نرخ‌های خرابی ثابت، افزایشی، کاهشی است. این توزیع یکی از پرکاربردترین توزیع‌های آماری در زمینه مهندسی قابلیت اطمینان است تابع توزیع ویبول به دو صورت دوپارامتری و سه پارامتری در مهندسی قابلیت اطمینان به کار می‌رود. این پارامترها به پارامترهای شکل، مقیاس و موقعیت موسوم‌اند. تابع چگالی احتمال توزیع ویبول به شکل زیر است:

$$F(t; \eta, \beta) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right], \quad t \geq \gamma \quad (31-2)$$

در این تابع β پارامتر شکل^۱، η پارامتر مقیاس^۲ و γ پارامتر موقعیت^۳ است. پارامتر شکل تابع توزیع ویبول وضعیت نرخ خرابی سیستم را بازنمایی می‌کند. این توزیع هر سه بخش نمودار وان - حمام را پوشش می‌دهد و به دلیل این انعطاف‌پذیری بالا در مدل کردن هر سه فاز عمر سیستم، کاربرد وسیعی در مدل‌سازی خرابی‌ها دارد (Rausand and Høyland, 2003). تابع توزیع تجمعی، تابع قابلیت اطمینان، تابع نرخ مخاطره، متوسط زمان تا وقوع خرابی و انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌های توزیع ویبول به ترتیب به صورت روابط (۳۲-۲) تا (۳۶-۲) است:

$$f(t; \eta, \beta, \gamma) = \left(\frac{\beta}{\eta} \right) \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right], \quad t \geq \gamma \quad (32-2)$$

$$R(t; \eta, \beta, \gamma) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right], \quad t \geq \gamma \quad (33-2)$$

$$\lambda(t; \eta, \beta) = \left(\frac{\beta}{\eta} \right) \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}, \quad t \geq \gamma \quad (34-2)$$

$$E(T) = \gamma + \eta \times \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right), \quad t \geq \gamma \quad (35-2)$$

$$Var(T) = \eta^2 \left[\Gamma \left(\frac{2}{\beta} + 1 \right) - \Gamma^2 \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right) \right] \quad (36-2)$$

¹ Shape Parameter

² Scale Parameter

³ Location Parameter

اگر پارامتر موقعیت برابر صفر باشد ($\gamma = 0$)، توزیع ویبول سه پارامتری به توزیع ویبول دو پارامتری و اگر پارامتر شکل تابع توزیع ویبول برابر یک باشد ($\beta = 1$) توزیع ویبول به توزیع نمایی با پارامتر $\frac{1}{\eta}$ تبدیل می‌شود (Barabady and Kumar, 2005). در رابطه فوق Γ تابع گاما بوده و از رابطه زیر به دست آمده می‌آید:

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt \quad (37-2)$$

بر اساس رابطه (37-2) برای تخمین قطعات یدکی، متوسط زمان تا وقوع خرابی (T) و انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی ها ($\sigma(T)$) باید محاسبه شود. مقادیر این دو پارامتر را می‌توان با استفاده از سه نوع تابع ویبول دو پارامتری یا PLP، ویبول سه پارامتری تعیین نمود.

تابع ویبول دو پارامتری و PLP از پرکاربردترین و انعطاف پذیرترین مدل های آماری در مباحث قابلیت اطمینان بوده و از لحاظ ساختاری کاملاً مشابه هستند که مدل ویبول برای داده های بدون روند و مدل PLP برای داده های روند دار مورد استفاده قرار می گیرد (Ghodrati and Kumar, 2005b; Hoseinie et al., 2012b; Kumar et al., 1992). شکل مدل رگرسیونی برای این دو تابع به صورت زیر خواهد بود (Ghodrati, 2005; Ghodrati et al., 2010):

$$\begin{aligned} \lambda_s(t, z) &= \left[\frac{\beta_{0s}}{\eta_{0s}} \left(\frac{t}{\eta_{0s}} \right)^{\beta_{0s}-1} \right] \times \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right] \\ &= \left[\frac{\beta_{0s} \times t^{\beta_{0s}-1}}{\eta_{0s}^{\beta_{0s}}} \right] \times \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right] \end{aligned} \quad (38-2)$$

$$\lambda_s(t, z) = \frac{\beta_{0s} \times t^{\beta_{0s}-1}}{\left[\eta_{0s} \times \exp \left(-\frac{1}{\beta_{0s}} \sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right]^{\beta_{0s}}} \quad (39-2)$$

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

$$\begin{aligned} \beta_s &= \beta_{0s} \\ \eta_s &= \eta_{0s} \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right]^{-\frac{1}{\beta_{0s}}} \end{aligned} \quad (40-2)$$

می‌توان مشاهده کرد که فاکتورهای ریسک مشهود در دو مدل ویبول دو پارامتری و PLP تنها پارامتر مقیاس را تغییر داده و پارامتر شکل آن بدون تغییر باقی خواهد ماند (Ghodrati et al., 2010).

در نتیجه مقدار $\bar{T}_s$ و $\sigma_s(T)$ برای دو مدل بر اساس پارامترهای رابطه (۲-۴۰) به صورت زیر است (Ghodrati, 2005; Ghodrati et al., 2010; Ghodrati and Kumar, 2005b):

$$\bar{T}_s = \eta_s \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta_s} \right) \quad (۲-۴۱)$$

$$\sigma_s(T) = \eta_s \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta_s} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta_s} \right)} \quad (۲-۴۲)$$

در مدل ویبول سه پارامتری فاکتورهای ریسک مشهود همانند ویبول دو پارامتری تنها پارامتر مقیاس را تغییر داده و پارامتر شکل و محل آن بدون تغییر باقی خواهد ماند. در نتیجه مقدار $\bar{T}_s$ و $\sigma_s(T)$ برای این مدل به صورت زیر است:

$$\bar{T}_s = \gamma_s + \eta_s \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta_s} \right) \quad (۲-۴۳)$$

$$\sigma_s(T) = \eta_s \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta_s} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta_s} \right)} \quad (۲-۴۴)$$

۲-۵- جمع بندی فصل

در این فصل پس از بیان تعاریف کلی در رابطه با مفاهیم اساسی قابلیت اطمینان مشخص شد که تحلیل این شاخص رفتاری نیازمند بانک داده‌ای متشکل از رفتار سیستم (زیرسیستم/جزء) در طول زمان مشخص و تحت شرایط مشخص است. این داده‌ها به عنوان خرابی در مبحث مهندسی قابلیت اطمینان مطرح است. هر خرابی‌ها دارای دو ویژگی اساسی است؛ نخست از نظر عملکردی و بعدی پارامترهای مؤثر در این زمان است. اطلاعات لازم برای ویژگی اول از بازه‌های زمانی عملکرد سرپایی دستگاه‌ها (زمان بین خرابی‌ها) حاصل شده و اطلاعات ویژگی دوم نیز در غالب فاکتورهای ریسک و در دو نوع مشهود و نامشهود در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین می‌بایست از روش آماری استفاده شود که قادر به تحلیل هم‌زمان این ویژگی‌های خرابی باشد. روش نرخ مخاطره متناسب (PHM) از جمله روش‌های پرکاربردی که توانایی این را دارد که داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی، شرایط عملیاتی و...) را به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار دهد؛ اما مدل نرخ مخاطره متناسب به تنهایی قادر به تحلیل فاکتورهای ریسک مشهود بوده و برای دخیل کردن سایر پارامترها نیازمند بسط و گسترش است. در این فصل مدل روش نرخ مخاطره متناسب مرکب برای حل این مشکل در نظر گرفته شد. در ادامه نیز روش متداول تخمین و مدیریت قطعات یدکی بر اساس قابلیت اطمینان ارائه شد. روش‌های تخمین قطعات یدکی که توسط محققین ارائه شده است. پایه و اساس آنها مدل‌های نیمه پارامتریک نرخ مخاطره متناسب نمایی و ویبول می‌باشد. تابع نرخ مخاطره در مدل‌های

نیمه پارامتریک با در نظرگیری فاکتورهای ریسک مشهود برای تابع ویبول دو پارامتری (سه پارامتری) بررسی شده که تنها پارامتر مقیاس را تغییر داده و پارامتر شکل (و پارامتر محل) آن بدون تغییر بوده است. در نتیجه مقادیر روابط متوسط زمان تا وقوع خرابی و انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی ها بر اساس پارامترهای مقیاس (و محل) و شکل جدید توسط این محققین ارائه شده است.

فصل سوم

بررسی سابقه علمی موضوع

۳-۱- مقدمه

این فصل شامل دو بخش اساسی می‌باشد. بخش اول شامل پیشینه موضوع در حیطه صنعت بر اساس شاخص‌های رفتاری سیستم (قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، دسترسی و پشتیبانی) می‌باشد. در بخش دوم پیشینه موضوع در حوزه مهندسی معدن بر اساس شاخص‌های قابلیت اطمینان و شاخص پشتیبانی (مدیریت قطعات یدکی) بررسی شده است.

۳-۲- پیشینه موضوع در حیطه صنعت بر اساس شاخص‌های رفتاری

این بخش مروری بر پژوهش‌های انجام‌گرفته در رابطه با شاخص‌های رفتاری سیستم (قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، دسترسی و پشتیبانی) در حیطه صنعت اختصاص دارد. البته تحقیقات انجام شده دامنه وسیعی از کارهای انجام گرفته در زمینه‌های مختلف مهندسی، پزشکی، هواضا و غیره را در بر می‌گرفت که در این فصل با توجه به هدف و مطالعه موردی رساله و پیشگیری از انحطاط موضوع پژوهش‌های مربوط به سایر زمینه‌ها در قالب تحلیل آماری ارائه می‌شود و تحقیقات مربوط به حیطه مهندسی معدن به‌طور اجمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضمن اینکه در مورد پژوهش‌های مربوط به سایر زمینه‌ها عمدتاً سیستم‌های صنعتی و مهندسی مورد توجه قرار گرفته است و تا حد ممکن از ورود به سایر زمینه‌ها مانند پزشکی، محیط‌زیست و ... خودداری شده است. در این بخش تحقیقات مهم و تأثیرگذار در حیطه مهندسی معدن به‌طور اجمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سعی بر آن است که نحوه ورود هر یک از زیرشاخه‌های موضوع در مهندسی معدن و روند کارهای انجام‌گرفته تا به امروز مورد بررسی قرار گیرد. هرچند، حجم تحقیقات انجام‌گرفته در مقایسه با وسعت و پیچیدگی ماشین‌آلات و سیستم‌های معدنی بسیار ناچیز است. در بخش دوم به موضوعات قابلیت اطمینان و سپس بحث تخمین قطعات یدکی ماشین‌آلات در معدن می‌پردازیم. در جدول ۳-۱ مروری مختصر بر پژوهش‌های انجام‌شده توسط محققین مختلف در رابطه با پیشینه موضوع در حیطه صنعت بر اساس شاخص‌های رفتاری ارائه شده است.

جدول ۳-۱- مروری بر عناوین پژوهش‌های انجام‌شده مبتنی بر شاخص‌های رفتاری در صنعت

شماره تحقیق	محقق	موضوع
۱	لوکویچ و چالینکو (Levkovich and Chalenko, 1969)	تخمین تعداد سینه کارهای موردنیاز در جبهه کار بلند
۲	گیمل‌شین و نیکشین (Gimel'shein and Nikeshin, 1967)	سیستم‌های الکترومکانیک در معادن
۳	الت‌شولر (Al'tshuler, 1969)	سیستم‌های انتقال اکسکواتورها
۴	سولداتو (Soldatov, 1969)	بررسی قابلیت اطمینان دریل واگن
۵	بوزاکات (Buzacott, 1970)	روش‌های ویژه نت برای وضعیت توده‌ای و تجزیه سیستم
۶	کیم و همکارانش (Kim et al., 1972)	قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده با یک رویکرد سه فازی
۷	ایوکو و همکارانش (Ivko et al., 1973)	قابلیت دسترسی مکانیکی و عملیاتی در نگهدارنده‌های قدرتی در معادن زیرزمینی
۸	چاو و همکارانش (Chow, 1973)	ارائه مدل قابلیت اطمینان بر اساس نرخ خرابی و نرخ تعمیرات
۹	فردینا و همکارانش (Freidina et al., 1975)	قابلیت اطمینان در سیستم‌های حمل و نقل در معدن روباز (اکسکواتور، کامیون‌ها، قطار)
۱۰	بوتورین و گاولنکو (Butorin and Gavrilenko, 1976)	قابلیت اطمینان ماشین چالزنی
۱۱	واپل و همکاران (Bondar' and Mernov, 1979)	استفاده از شکنندگی برای تابع بقای تک متغیره
۱۲	جانسون و همکارانش (Johnson et al., 1982)	تخمین مقادیر ضرایب رگرسیون در جامعه با نمونه کوچک
۱۳	آشر (Ascher, 1983)	تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های تعمیرپذیر (صنعت کشتیرانی) با استفاده از بسط مدل Cox
۱۴	گاراکوی و همکارانش (Garakavi et al., 1984)	ارزیابی نت و تولید محصول بر اساس قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی
۱۵	گوئل و گوپتا (Goel and Gupta, 1984)	تحلیل دو واحد گرمایی سیستم آماده به کار با در نظر گرفتن سه حالت خرابی
۱۶	کلایتون و کازیک (Dale, 1985)	کاربردی سازی عبارت شکنندگی در تابع بقا
۱۷	اسمیت و شافر (Smith and Schaefer, 1985)	استفاده از مدل مارکوف برای قابلیت دسترسی قطعات یدکی در تعیین موجودی اولیه قطعات به‌منظور کمینه‌سازی هزینه‌های کمبود و انبارداری
۱۸	کافارو (Cafaro et al., 1986)	استفاده از مدل‌های مارکوف برای محاسبه قابلیت اطمینان و دسترسی سیستم
۱۹	بالبیر و دهیلون (Dhillon, 1986)	مرور ادبیات کارهای انجام‌گرفته در مورد قابلیت اطمینان تجهیزات معدنی
۲۰	پترو و بوتورینا (Petrov and Butorina, 1986)	قابلیت اطمینان شبکه‌های مختلف تهویه

ادامه جدول ۱-۳		
۲۱	شاپتگانویچ و هاسلوسکایا (Shpiganovich and Maslovskaya, 1982)	موتورهای الکتریکی نوارنقاله و سیستم‌های الکتریکی ماشین شاتل
۲۲	مایو (Mau, 1986)	کاربرد مدل لایه بندی PHM در تحلیل داده‌های متغیر در زمان (پزشکی - سرطان سینه)
۲۳	دهیلون و راپاتی (Dhillon and Rayapati, 1988)	مروری بر مقالات منتشر شده در ارتباط با تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های شیمیایی طی ۲۵ سال
۲۴	گودمن (Goodman, 1988)	ارزیابی قابلیت اطمینان راه‌های فرار اضطراری در معدن با استفاده از FTA
۲۵	لین (Singh, 1989)	بررسی مدل کاکس و شکنندگی در تابع بقا
۲۶	کومار و همکارانش (Kumar et al., 1989)	ارزیابی قابلیت اطمینان LHD
۲۷	نیتیون (Ntuen, 1991)	ارائه نت پیشگیرانه برای سیستم بر اساس مدل هزینه چرخه عمر و تابع توزیع گاما
۲۸	پیچن‌بورگ (Pijnenburg, 1991)	کاربرد مدل مخاطرات افزوده (AHM) در بررسی قابلیت اطمینان موتور اتوبوس
۲۹	لاندز و سرودی (Landers and Soroudi, 1991)	کاربرد بسطی از مدل شدت متناسب (PIM) در سیستم تهویه مطبوع هواپیما
۳۰	کومار و کلفسجو (Kumar et al., 1992)	سیستم‌های هیدرولیک در ماشین LHD
۳۱	کومار و هانگ (Kumar and Huang, 1993)	سیستم تولیدی در معادن زیرزمینی
۳۲	هلسن و اشمیت‌لین (Helsen and Schmittlein, 1993)	کاربرد PHM در تحلیل زمان‌های دیرش ^۱ در بازاریابی (صنایع غذایی)
۳۳	کومار و کلفسجو (Kumar and Klefsjö, 1994a)	مروری بر PHM
۳۴	نوبی (Newby, 1994)	بررسی مزایا و محدودیت‌های PHM
۳۵	کومار (Kumar, 1995)	کاربرد PHM در تحلیل فاکتورهای ریسک مؤثر در مخاطرات سیستم‌های تعمیرپذیر (کابل انتقال برق)
۳۶	کومار و وستبرگ (Kumar and Westberg, 1996)	ارائه روش گرافیکی مبتنی بر مدل رگرسیون خطی برای آزمون فرض ثابت بودن تأثیرات فاکتورهای ریسک
۳۷	فام و وانگ (Pham and Wang, 1996)	مباحث مربوط به نت ناقص
۳۸	واگناژ و همکاران (Vagenas et al., 1997)	نت در ماشین‌های LHD
۳۹	کومار و وستبرگ (Kumar and Westberg, 1997)	کاربرد PHM در برنامه‌ریزی نت (فشار سنج)
۴۰	کوباسی و همکاران (Ascher, 1997)	کاربرد PHM در برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه (پمپ)
۴۱	شیور و همکاران (Shyur et al., 1999)	کاربرد مدل رگرسیون مخاطرات گسترش یافته در تحلیل خرابی دیودهای نوری (light emitting diodes) با فاکتورهای ریسک وابسته به زمان
۴۳	مارتورل و همکارانش (Martorell et al., 1999)	بررسی تأثیر شرایط محیطی مؤثر بر نت با مدل مبتنی بر عمر

¹ - Interpurchase Times

ادامه جدول ۱-۳		
۴۴	مارس گورا و زیو (Marseguerre and Zio, 2000)	بهینه سازی نت با استفاده از ترکیب روش بیشینه سازی الگوریتم ژنتیک و شبیه سازی مونت کارلو در کارخانه فرایند شیمیایی
۴۵	پارساد و رائو (Prasad and Rao, 2002)	مدل های قابلیت اطمینان در تجهیزات الکتریکی معادن زیرزمینی زغال
۴۶	گوتیز (Sammarco, 2002)	مقایسه مدل شکنندگی و شکنندگی مشترک
۴۷	هال و دانشمند (Hall and Daneshmend, 2003a)	تجهیزات معدن کاری روباز (شاول هیدرولیک)
۴۸	هال و دانشمند (Hall and Daneshmend, 2003b)	تجهیزات معدن زیرزمینی (LHD، دامپ تراک)
۴۹	واگناژ و همکارانش (Vagenas et al., 2003)	ماشین های کند و برداشت در معادن زیرزمینی
۵۰	نولت و پرنس (Nollet and Prince, 2003)	قابلیت اطمینان تجهیزات چرخشی در عملیات روباز
۵۱	زواشکیانی و همکاران (Zuashkiani et al., 2003)	مدلی برای به کارگیری داده های پایش وضعیت به عنوان فاکتورهای ریسک و بررسی تأثیرات آن ها بر عمر مفید اجزاء
۵۲	کومار (Kumar, 2003)	بررسی برخی از عوامل مؤثر در استراتژی تحویل خدمات و رویکردهای پیشنهادی برای اجرای این استراتژی در راستای دستیابی به رضایتمندی مشتریان و تکمیل عملیات
۵۳	سامانتا و همکاران (Samanta et al., 2004)	بررسی نت پیشگیرانه در لودرهای معدنی با استفاده از RAM و فرایند مارکوف در سیستم LHD
۵۴	اوکون و کازورلا -Ocón and Montoro- (Pérez Cazorla, 2004)	حل مشکل قابلیت اطمینان در سیستم با واحدهای آماده به کار
۵۵	برآبادی و کومار (Barabady and Kumar, 2005)	تحلیل قابلیت اطمینان و نت سنگ شکن
۵۶	برآبادی (Barabady, 2005)	تحلیل قابلیت اطمینان تجهیزات معدنی
۵۷	لین و تسنگ (Lin and Tseng, 2005)	روش ابتکاری از ترکیب روش های سنتی با تکنیک های پایش لرزش و تکنیک های شبکه عصبی برای اجرای بهتر نت (بلبرینگ)
۵۸	قدرتی و کومار (Ghodrati and Kumar, 2005a)	تخمین قطعات یدکی با استفاده از قابلیت اطمینان (الف)
۵۹	قدرتی و کومار (Ghodrati and Kumar, 2005b)	تخمین قطعات یدکی با استفاده از قابلیت اطمینان (ب)
۶۰	مارکست و کومار (Markeset and Kumar, 2005)	رویکردهای توسعه استراتژی پشتیبانی محصولات عملیاتی نسبت به روش های سنتی
۶۱	بهباد قدرتی (Ghodrati, 2005)	بررسی تأثیر شرایط محیطی مؤثر و قابلیت اطمینان بر تدارکات و تعداد قطعات یدکی
۶۲	آکسو و همکاران (Aksu et al., 2006)	پیشنهاد روشی برای ارزیابی قابلیت اطمینان
۶۳	زواشکیانی و همکاران (Zuashkiani et al., 2006)	استفاده از دانش تجربی و داده های آماری در تخمین پارامترهای

ادامه جدول ۱-۳		
۶۴	یانگ و همکاران (Sun <i>et al.</i> , 2006)	مدلی مبتنی بر PCM برای ارزیابی اجزاء مکانیکی
۶۵	جی‌آنگ و همکاران (Jiang <i>et al.</i> , 2006)	مروری بر کاربرد PIM در تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های تعمیرپذیر
۶۶	تاناکا و همکاران (Tanaka <i>et al.</i> , 2006)	روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان گاز اشتعال‌زا در معادن زغال‌زاين
۶۷	دیفستافانو و همکاران (Distefano <i>et al.</i> , 2006)	استفاده از مدل DRBD برای بررسی قابلیت اطمینان اجزاء (CPU) سیستم کامپیوتری
۶۸	قدرتی (Ghodrati, 2006)	مقایسه توابع نمایی و ویبول در تخمین قطعات یدکی
۶۹	ما و گرینگ (Ma and Krings, 2008)	مروری بر روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان
۷۰	ژو و گامست (Xu and Gamst, 2007)	تحلیل داده‌های قابلیت اطمینان (سرطان ریه) با روش PHM
۷۱	قدرتی و همکاران (Ghodrati <i>et al.</i> , 2007)	تخمین قطعات یدکی و تحلیل ریسک با ETA و FTA
۷۲	لیگین و تونالی (Ilgin and Tunali, 2007)	پیشنهاد رویکرد بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک برای بهینه‌سازی گرهی PM و سیاست‌های تأمین قطعات یدکی سیستم عملیاتی بخش‌های اتوماتیک
۷۳	برآبادی و کومار (Barabady and Kumar, 2008)	بحث در مورد قابلیت اطمینان و نت سیستم سنگ شکنی
۷۴	الولی و همکاران (Elevli <i>et al.</i> , 2008)	سیستم مکانیکی شاول‌های کابلی
۷۵	دیفستافانو و پولی آفیتو (Distefano and Puliafito, 2009)	تحلیل قابلیت دسترسی و قابلیت اطمینان بر سیستم‌های مختلف (کامپیوتر، آب رسانی) یا استفاده از DRBD
۷۶	وایناس و خیانگژی (Vayenas and Wu, 2009)	LHD ها در معادن زیرزمینی سنگ سخت
۷۷	شن‌فی‌مین و همکاران (Fei-min <i>et al.</i> , 2009)	مطالعه ساختار و کمیت شاخص سیستم تهویه در معدن
۷۸	گورجیان و همکاران (Gorjian, Ma, <i>et al.</i> , 2010b)	تحلیل قابلیت اطمینان با استفاده از مدل تنزل
۷۹	گورجیان و همکاران (Gorjian, Ma, <i>et al.</i> , 2010a)	روش مخاطرات صریح EHM
۸۰	گورجیان و همکاران (Gorjian, Mittinty, <i>et al.</i> , 2010)	کاربرد روش مخاطرات صریح (EHM) برای اجزاء الکتریکی
۸۱	احمدی (Ahmadi, 2010)	توسعه برنامه نت برنامه‌ریزی شده در صنایع هواپیمایی
۸۲	برآبادی و همکاران (Barabadi <i>et al.</i> , 2010)	کاربرد مدل AFM در قطعات الکتریکی در صنایع نفت و گاز
۸۳	قدرتی و همکاران (Ghodrati <i>et al.</i> , 2010)	استفاده از PHM در تخمین قطعات یدکی و بررسی قابلیت دسترسی به آن‌ها
۸۴	حسینی و همکاران (Hoseinie <i>et al.</i> , 2011a)	قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری سیستم الکتریکی شیرر
۸۵	حسینی و همکاران (Hoseinie <i>et al.</i> , 2011b)	قابلیت اطمینان سیستم هیدرولیک الکتریکی شیرر
۸۶	برآبادی و همکاران (Barabadi <i>et al.</i> , 2011a)	توسعه روش شناسی برای تحلیل ظرفیت خروجی با در نظرگیری ملاحظات شرایط محیطی مؤثر

ادامه جدول ۱-۳

۸۷	وینکه و همکاران (Sankavaram et al., 2011)	مطرح سازی مدل شکنندگی همبستگی
۸۹	دینگ و هی (Ding and He, 2011)	روش شناسی برای مدل سازی قابلیت اطمینان و ارزیابی مبتنی بر ویژگی حاصل از سیگنال های لرزش ابزار برش با استفاده از PHM
۹۰	جیامین و رنشو (Jianmin and Renshu, 2011)	تحلیل حوادث ناشی از هجوم آب به معادن با FTA
۹۱	برآبادی (Barabadi, 2011)	بررسی عملکرد تولید مبتنی قابلیت اطمینان و تعمیر پذیری
۹۲	سیلیونان و همکاران (Nan et al., 2011)	ارزیابی قطعات یدکی اسکاواتور بیل چرخشی در مدیریت سیستم یک پارچه
۹۳	جلالی و فروهنده (Jalali and Forouhandeh, 2011)	سیستم های تهویه تونل ها به هنگام ساخت
۹۴	یو و همکاران (You et al., 2011)	بحث در مورد نت ناقص و ارائه مدلی ترکیبی
۹۵	ویجیا و همکاران (Wijaya et al., 2012)	تحلیل قابلیت اطمینان ماشین لق گیری
۹۶	حسینی و همکاران (Hoseinie et al., 2012b)	قابلیت اطمینان سیستم کابلی شیر
۹۷	حسینی و همکاران (Hoseinie et al., 2012a)	قابلیت اطمینان سیستم درام شیر
۹۸	کلاین و همکاران (Tian et al., 2012)	بسط مدل شکنندگی
۹۹	گوستاوسون و همکاران (Gustafson et al., 2012)	تأثیر شرایط محیطی مؤثر کار بر لودر LHD اتوماتیک و غیراتوماتیک
۱۰۰	برآبادی (Barabadi, 2012)	تخمین تعداد قطعات یدکی با توجه به شرایط محیطی مؤثر
۱۰۱	راهادیان و ویجیا (Rahadiyan Wijaya, 2012)	توسعه قابلیت دسترسی ماشین لق گیری
۱۰۲	قدرتی و همکاران (Ghodrati et al., 2012)	بررسی سیستم پشتیبانی با استفاده از قابلیت اطمینان و تعمیر پذیری و تأثیرات عوامل خارجی
۱۰۳	بالا و خاویر (Bala and Xavier, 2012)	مدیریت انبارداری قطعات یدکی بخش اتومبیل با استفاده از داده کاوی، سیستم شبکه عصبی
۱۰۴	آنا گوستاوسون (Gustafson, 2013)	مدل سازی نت و بررسی عملکرد LHD های اتوماتیک
۱۰۵	آندرو و همکاران (Andrews et al., 2013)	استفاده از روش تحلیل فاز ماموریت در صنایع هواپیمایی
۱۰۶	حسینی و همکاران (Hoseinie et al., 2013)	نت سیستم اسپری جت درام شیر
۱۰۷	رحیم دل و همکاران (Rahimdel et al., 2013, 2014)	قابلیت اطمینان سیستم حفاری
۱۰۸	گوستافسون (Gustafson, 2013)	تحلیل عملکرد LHD
۱۰۹	مولی و همکاران (Mouli et al., 2014)	قابلیت اطمینان LHD
۱۱۰	منیری و همکارانش (Morad et al., 2014)	نت مبتنی بر قابلیت اطمینان ماشین آلات معدنی
۱۱۱	مرشدلو و دهقانی (Morshedlou et al., 2014)	قابلیت اطمینان دستگاه ناو زنجیری
۱۱۲	امینی و همکاران (Amini Khoshalan et al., 2015)	قابلیت اطمینان TBM
۱۱۳	حسینی و همکاران (Hoseinie et al., 2015)	بهینه سازی نت سیستم اسپری جت درام شیر
۱۱۴	رحیم دل و همکاران (Rahimdel et al., 2016)	نت برای زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری
۱۱۵	نوری قراحسنلو و همکاران (Nouri Qarahasanlou, 2017)	سنجش اهمیت قابلیت دسترسی تجهیزات معدنی

ادامه جدول ۱-۳		
۱۱۶	توری قراحسنلو و همکاران (Nouri Qarahasanlou, 2017)	تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود بر قابلیت اطمینان
۱۱۷	منیری و همکاران (Moniri et al., 2018)	تحلیل سیستم بارگیری معدن مس سونگون با استفاده از PHM
۱۱۸	کومار و همکاران (Kumar et al., 2018)	حالت سلامتی در باقیمانده عمر مفید ابزارهای برشی
۱۱۹	وی و یانگ (Wei and Yang, 2018)	مدل سازی نشست ناشی از معدنکاری با استفاده از مدل نرخ مخاطرات متناسب
۱۲۰	نوری قراحسنلو و همکاران (Nouri Qarahasanlou et al, 2019)	تخمین قطعات یدکی معدن مس سونگون
۱۲۱	زکی و همکاران (Zaki et al, 2019)	تحلیل قابلیت تعمیرپذیری ماشین آلات معدنی با استفاده از مدل نرخ مخاطره متناسب ترکیبی
۱۲۲	زمانی عربشاه و همکاران (Zamani Arabshah et al, 2020)	مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین آلات معدنی با اعمال شرایط محیطی
۱۲۳	حضرتی دستجرد و همکاران (Hazrati Dastjerd et al, 2020)	شناسایی گلوگاه ظرفیت عملیاتی ناوگان معدنی

۳-۳- پیشینه موضوع در حیطه مهندسی معدن بر اساس شاخص های قابلیت اطمینان و

پشتیبانی

۳-۳-۱- قابلیت اطمینان

وجه مشترک تحقیقات بررسی شده درباره قابلیت اطمینان، صرف نظر کردن از شرایط محیطی مؤثر است و در این پژوهش سهم عمده تحلیل را روش کلاسیک به دوش می کشد. در سال ۱۹۹۳ کومار و کلفسجو طی مقاله ای برای نخستین بار به مروری نسبتاً کامل درباره مدل نرخ مخاطرات متناسب (PHM) پرداختند تا با استفاده از آن بتوان تأثیر شرایط محیطی مؤثر را در تحلیل قابلیت اطمینان لحاظ کرد. آن ها پس از معرفی اساس مدل، نحوه تخمین پارامترهای رگرسیون و تعیین تابع نرخ مخاطره اساسی را بیان کردند. سپس دو نوع آزمون ترسیمی و تحلیلی برای ارزیابی نیکویی برازش مدل معرفی شد. در بخش بعدی تحقیق، بسط های مدل PHM مانند مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه بندی، مدل زمان خرابی شتاب یافته، مدل نرخ تعمیرات متناسب معرفی شد. در نهایت نیز چندین از نرم افزارهای کاربرپسند برای تحلیل ها در زمینه قابلیت اطمینان معرفی شده است (Kumar and Klefsjö, 1994a).

یک سال بعد محققین مذکور از مدل PHM برای تحلیل قابلیت اطمینان کابل انتقال الکتریسیته، در لودرهای معدنی استفاده کردند. در این تحقیق از نوع خرابی، جنس کابل، تعداد تعمیرات انجام گرفته و نوع ماشینی که از کابل استفاده می کند، به عنوان فاکتور ریسک مشهود مورد استفاده شد. در نهایت نیز برای ارزیابی نیکویی برازش مدل PHM از روش گرافیکی استفاده شد (Kumar and Klefsjö, 1994b).

در سال ۱۹۹۵ نیز کومار مدل PHM را برای سیستم‌های تعمیرپذیر گسترش داد. در این تحقیق ابتدا کاربردهای PHM و بسط‌های آن در حیطه مهندسی قابلیت اطمینان در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی مانند نیروگاه تولید برق، کشتی، توربین‌های گازی، موتورهای هواپیما، سیستم‌های نفت و گاز و ... مرور شده است، سپس کاربردی از PHM و مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده در زمینه کابل‌های انتقال قدرت LHD ارائه شده است. کومار در این تحقیق از چهار نوع خرابی، تعداد تعمیرات انجام‌گرفته، عمر ماشین و شماره شناسایی ماشین از شماره ۱ تا ۱۲ برای هر دستگاه لودر به‌عنوان فاکتورهای ریسک مشهود استفاده کرد. وی در ادامه فرضیات مختلفی همچون: سیستم تحت تعمیرات کامل، سیستم تحت کمینه تعمیرات و ... را در نظر گرفته و در هر مورد پارامترهای مدل PHM را محاسبه نمود. نهایتاً این تحقیق روش مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده را به‌عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل سیستم‌های تعمیرپذیر معرفی کرد (Kumar, 1995).

تحقیقات کومار و وستبرگ در سال ۱۹۹۶ نیز بر روی ماشین LHD ادامه داشت و طی آن فرض ثابت بودن فاکتورهای ریسک مشهود در طول زمان برای مدل PHM مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مقاله روش گرافیکی بر اساس تابع تجمعی خرابی برای ارزیابی واقع‌بینانه بودن این فرض ارائه شده است. در این روش شیب نمودار تابع تجمعی، بیانگر ماهیت تأثیرات فاکتورهای ریسک مشهود در طول زمان (ثابت یا متغیر) است. درواقع یک فاکتور ریسک در صورت ایجاد تغییرات بارز در شیب نمودار تابع تجمعی، وابسته به زمان است و نقطه زمانی وقوع این تغییرات نیز به‌عنوان راهنمایی برای تعریف شکافت فاکتور ریسک وابسته به زمان در دو یا چند فاکتور ریسک مستقل از زمان مطرح‌شده است (Kumar and Westberg, 1996).

پارساد و رائو (۲۰۰۲) سه نمونه مطالعاتی مختلف را مورد بررسی قرار دادند. در نخستین مورد با استفاده از مدل ناپارامتریک PHM داده‌های تجهیزات الکترومکانیکی در سیستم‌های LHD تحت فرایند تجدیدشونده با فاکتورهای ریسک مشهود مانند مشکلات الکتریکی، هوای فشرده و خرابی کابل مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج حاصل با مدل پارامتریک ویبول مقایسه شد. در دومین مورد برای ارزیابی بازه‌های بهینه نت پیشگیرانه از داده‌های واحد قدرت حرارتی تحت فرایند پواسون ناهمگن با فاکتورهای ریسک مشهود مانند خرابی دیگ بخار، الکتریکی و توربین استفاده شد. برای ارزیابی این کار از تخمین گر ناپارامتریک نرخ مخاطره تجمعی استفاده شد. در آخرین مطالعه نرخ مخاطره حاصل از داده‌های موتور D.C. با فاکتورهای ریسک مشهود شامل ولتاژ، نوع کارکرد و جریان بار تحت شرایط مختلف عملیاتی برای دو مدل PHM - ناپارامتریک و مدل نیمه پارامتریک ویبول - PHM مقایسه شدند. نتیجه تحقیق حاکی از آن بود که مدل PHM روشی مناسب برای تحلیل سیستم‌های

تعمیرپذیر است و به کارگیری آن برای داده‌هایی با فرایند پواسون ناهمگن نیز امکان‌پذیر است (Prasad and Rao, 2002).

عباس برآبادی در سال ۲۰۱۱ از مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده در تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان استخراجی معدن بوکسیت استفاده کرد. در این تحقیق، ترسیم نمودار نرخ مخاطرات تجمعی برای ماده معدنی و سنگ باطله نشان داد که فاکتور ریسک مشهود (جنس سنگ) وابسته به زمان است و لذا برای زیرسیستم‌ها (دو نوع کامیون، لودر، دو نوع دریل واگن و بلدوزر) دو لایه مختلف (ماده معدنی و سنگ باطله) در نظر گرفته شد. سپس برای هر زیرسیستم برحسب جنس سنگ، تابع قابلیت اطمینان اساسی محاسبه شد (Barabadi et al., 2011a).

ویجایا در سال ۲۰۱۲ رساله دکتری خویش را در زمینه روش‌های بهبود قابلیت دسترسی دستگاه لقی‌گیر ارائه نمود. وی در این تحقیق خرابی‌های دستگاه را مورد مطالعه قرارداد و زیرسیستم‌های بحرانی (سیستم مرکزی روانکاری، چکش هیدرولیکی و بازوی دستگاه) در تشکیل زمان‌های توقف و دلایل وقوع آن‌ها را بیان کرد. ویجایا همچنین به بهینه‌سازی هزینه‌های لازم برای بهبود قابلیت اطمینان پرداخت. برای این کار پس از تعیین تابع چند هدف بهینه‌سازی شامل: بیشینه‌سازی قابلیت دسترسی و کمینه‌سازی هزینه کلی بهبود قابلیت اطمینان، با محدودیت‌های کوچک‌تر از یک بودن قابلیت اطمینان و بزرگ‌تر از صفر بودن: هزینه‌های زیرسیستم‌ها، متوسط زمان تعمیرات و متوسط زمان خرابی، با الگوریتم ژنتیک چندهدفه^۱، به حل آن پرداخت. نتیجه تحلیل نشان داد که سرمایه‌گذاری برای بهبود قابلیت اطمینان بیش از ۸۴/۵ درصد امکان‌پذیر نیست (Rahadiyan, 2012).

در سال‌های اخیر نیز نوری قراحسنلو و همکاران در رابطه با تحلیل ناوگان استخراجی معدن سونگون از مدل PHM و بسط‌های آن نظیر SCRM استفاده نمودند (Ali et al., 2016; Nouri Qarahasanlou, 2017; Qarahasanlou et al., 2017).

در سال ۲۰۱۸ منیری و همکاران از مدل PHM برای تحلیل سیستم بارگیری معدن مس سونگون استفاده نمودند. در این تحقیق سیستم به پنج زیرسیستم اصلی شامل موتور، توربین، گیربکس، هیدرولیک و تنه تقسیم‌بندی شد. نتایج حاکی از آن بود که شکل تابع نرخ مخاطره یک سیستم چند جزئی الزاماً از توابع خانواده ویبول پیروی نکرده و امکان برازش تابع PHM برای آن‌ها وجود دارد (Moniri et al., 2018).

¹ - Multi-Objective Genetic Algorithm

وی و یانگ در سال ۲۰۱۸ رویکرد داده محور آنالیز بقا را به منظور مدل سازی نشست ناشی از معدنکاری مورد توجه قرار دادند. ایشان در ابتدا آنالیز بقا را با استفاده از مدل نرخ مخاطرات متناسب کاکس اعمال کردند تا اهمیت پارامترهای در نظر گرفته شده را ارزیابی نمایند (Wei and Yang, 2018).

زمانی عربشاه و همکاران در سال ۲۰۲۰ از مدل PHM برای تحلیل سیستم بارگیری معدن سنگ آهن سیرجان استفاده نمودند. در این پژوهش تحلیل قابلیت اطمینان یک دستگاه بیل مکانیکی کاترپیلار مدل ۳۹۰DL در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر، با اعمال فاکتورهای ریسک به روش مدل مخاطرات متناسب انجام و سیستم بیل مکانیکی به ۶ زیرسیستم اصلی شامل جام، بدنه، برق، هیدرولیک، موتور و زیربندی تقسیم بندی شده است. با فرض مناسب بودن توزیع ویبول به عنوان تابع اساسی و تابع نمایی به عنوان تابع پیوند، و بررسی فاکتورهای ریسک در سطح معناداری ۵ درصد با روش بازگشتی و استفاده از آماره والد، و نیز تخمین پارامتر شکل و مقیاس توزیع ویبول برای زیرسیستم ها و ضرایب رگرسیون تابع پیوند، نتایج بدست آمده فاکتورهای ریسک تاثیرات قابل توجهی بر میزان قابلیت اطمینان زیرسیستم ها و در نهایت کل سیستم دارند (Zamani Arabshah et al., 2020).

بیشترین تحقیق انجام شده در مورد پیشینه موضوع فاکتورهای ریسک نامشهود (مدل شکنندگی)^۱ در زمینه پزشکی است و در زمینه مهندسی بسیار کم صورت گرفته است. بدین منظور در این قسمت به بررسی مدل شکنندگی در مدل بقا^۲ می پردازیم. لحاظ کردن اثر عوامل ناشناخته مؤثر بر داده های بقا در مدل نیز می تواند موجب بهبود کارایی مدل شود؛ اما در نظر گرفتن عوامل ناشناخته مؤثر بر داده ها در مدل رگرسیونی میسر نیست. از این رو از مدل های شکنندگی برای لحاظ کردن اثر عوامل ناشناخته استفاده می شود.

واپل و همکاران (Vaupel et al., 1979) برای اولین بار، عبارت شکنندگی را برای مدل های بقای تک متغیره مورد استفاده قرار دادند. سپس کلایتون و کازیک (Clayton and Cuzick, 1985) مدل های شکنندگی را به کار بردند. گوتیرز مدل های شکنندگی و شکنندگی مشترک^۳ را مورد مطالعه قرار داد و ویژگی های آنها را مقایسه کرد. گوتیرز به تحلیل داده های بقا توسط مدل شکنندگی پرداخت. مدل های شکنندگی، داده های بقا به دلیل ناهمگنی و اثرات تصادفی همانند مدل های رگرسیون است. شکنندگی یک اثر چندگانه پنهان روی عملکرد تابع مخاطره با میانگین یک و واریانس θ است، که همراه با پارامترهای دیگر مدل برآورد شده است (Gutierrez, 2002). پور حسینقلی و همکاران طی

¹ - Frailty Models

² -Survival Models

³ -Shared Frailty Models

مقاله‌ای به مقایسه رگرسیون کاکس و مدل‌های پارامتریک در تحلیل بقای بیماران مبتلا به سرطان معده پرداختند. نتایج حاصل بیانگر این است که مدل کاکس و مدل نمایی در آنالیز چند متغیری مشابه بودند و اگرچه در آنالیز تک متغیری یک مدل مشخص به عنوان کاراترین مدل به دست نیامده است. اما نتایج نشان داد مدل لگ نرمال در میان مدل‌های پارامتریک بهترین برازش را دارد و می‌تواند به عنوان جایگزین کاکس در تحلیل بقای بیماران سرطان معده به کار رود (Pourhoseingholi et al., 2007).

وینکه در کتاب خود با موضوع مدل‌های شکنندگی در تجزیه و تحلیل داده‌های بقا در هفت بخش به بررسی روند تحلیل پرداخت. در بخش سوم این کتاب با موضوعیت مدل‌های شکنندگی تک متغیره به مفاهیم اولیه مدل شکنندگی و تابع گاما جهت برازش با ذکر چندین مثال پرداخته شده است (Wienke, 2010).

فردمال و همکاران طی مقاله به بررسی مدل‌های بقای کاکس و شکنندگی برای تحلیل داده‌های سرطان سینه پرداختند. نتایج حاصله بیانگر این هست که به‌طور کلی مدل‌های شکنندگی نسبت به مدل مخاطرات متناسب کاکس، عملکرد بهتری دارند، که بیان‌کننده وجود عوامل خطر ناشناخته در داده‌های سرطان سینه است (Faradmal et al., 2012).

آتشگر و همکاران طی مقاله به بررسی و تجزیه و تحلیل مدل‌های بقا در سرطان پستان پرداختند. بررسی جامع این تحقیق نشان داده است که از میان مدل‌های موجود، نمی‌توان مدلی را به عنوان جامع‌ترین و بهترین معرفی کرد. ولی می‌توان اظهار کرد که مدل کاکس، بهترین و متداول‌ترین روش برای تحلیل بقای بیماران به سرطان پستان است (Atashgar et al., 2016).

برخی از مطالعات در زمینه قابلیت اطمینان از مدل شکنندگی برای مدل سازی تأثیر فاکتورهای ریسک نامشهود بر قابلیت اطمینان اجزا، به منظور تصمیم‌گیری در مورد نگهداری و تعمیرات (نت) استفاده کرده‌اند (Finkelstein 2007; Garmabaki et al. 2016a; Li and Liu 2016; Slimacek and Lindqvist 2017).

آشا مدل شکنندگی را برای یک سیستم‌های اشتراک بار بکار برد و نشان داد که تحلیل قابلیت اطمینان برای یک مورد ناهمگن با مورد همگن به شدت متفاوت است (Asha 2018). اسواف و لیندکویست (Asfaw and Lindqvist, 2015)، فینکلشتاین (Finkelstein 2007)، لیندکویست و اسلیمک (Slimacek and Lindqvist 2016)، جورجیو (Giorgio et al., 2014) و راد (Rod et al., 2020) با معرفی فرایند پواسون ناهمگن، شکنندگی را مدل کردند. برای مثال لیندکویست و همکارانش از شکنندگی برای مدل سازی تأثیر تفاوت‌های نامشهود بین توربین‌ها، به عنوان

فاکتورهای ریسک نامشهود بر روی قابلیت اطمینان توربین بادی، از فرایند پواسون استفاده کردند (Slimacek and Lindqvist 2016).

زکی و همکاران برای تحلیل تعمیرپذیری ماشین‌آلات از داده‌های تعمیرات که از بخش‌های مختلف، در قالب‌های گوناگون، در زمان‌های مختلف و با شرایط عملیاتی مختلف جمع‌آوری کردند، که این مسائل برخی ناهمگنی را در بانک داده به دنبال دارد. بخشی از ناهمگنی را می‌توان با فاکتور ریسک مشهود توضیح داد و تفکیک نمود. ولی بعضی از فاکتورها ریسک معمولاً ناشناخته‌اند یا در دسترس نیستند. این فاکتورها منجر به ناهمگنی پنهان می‌شوند که به‌عنوان فاکتور ریسک نامشهود دسته‌بندی گردیده است. دسته اخیر از فاکتورهای ریسک تحت تابعی به‌عنوان تابع شکنندگی در تخمین قابلیت تعمیرپذیری وارد شده و بدین منظور از بسط‌های مبتنی بر مدل‌های رگرسیونی استفاده شده است (Zaki et al, 2019).

۳-۴- قابلیت پشتیبانی

قابلیت پشتیبانی سعی در بیان مفهوم پشتیبانی و تأمین منابع موردنیاز برای نت (ابزارآلات، پرسنل، قطعات یدکی و ...) را دارد تا از بروز تأخیرات تدارکاتی و اتلاف زمان جلوگیری شود. طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ قدرتی و همکاران برای نخستین بار در مدیریت قطعات یدکی برخی از اجزای ماشین‌آلات معدنی مانند واشرها و سیستم ترمز لودرهای معدن روباز و جک‌های هیدرولیکی LHD از ترکیب تأثیرات شرایط محیطی مانند آب‌وهوا، رطوبت، مهارت اپراتور و ... بر قابلیت اطمینان استفاده کردند. آنان در این تحقیقات علاوه بر تخمین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز، زمان تجدید انبار (خرید مجدد برای پر کردن انبار) را نیز تعیین کردند (Ghodrati et al., 2003, 2010, 2012, Ghodrati and Kumar, 2005a, 2005b).

قدرتی همچنین به مقایسه مدل‌های نیمه پارامتریک PHM نمایی و ویبول پرداخت. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که می‌توان از مدل ویبول - PHM برای تخمین قطعات یدکی تعمیرناپذیر با نرخ خرابی متغیر استفاده کرد، درحالی‌که مدل نمایی - PHM تنها در مورد نرخ خرابی ثابت صادق است (Ghodrati, 2006). در این تحقیقات عواملی مانند مهارت اپراتور، مهارت گروه نت، کیفیت روغن هیدرولیک، شرایط آب و هوایی و محیط فیزیکی به‌عنوان فاکتورهای ریسک مشهود در نظر گرفته شده‌اند و سپس برای ترکیب فاکتورهای ریسک با قابلیت اطمینان از مدل PHM و عمدتاً دو بسط از این مدل یعنی ویبول - PHM و نمایی - PHM استفاده شده است. دو مدل مذکور حالت نیمه پارامتریک از مدل PHM هستند و بر معتبر بودن فرض توزیع مستقل و یکسان داده‌ها مبتنی می‌باشند. در این تحقیقات پس از تخمین تعداد قطعات یدکی، تعداد موجودی قطعات یدکی در انبار را نیز برآورد شده است، زمان خریداری مجدد قطعات برحسب تعداد قطعات یدکی موجود در انبار نیز

بیان شده است (Ghodrati *et al.*, 2003, 2010, 2012; Ghodrati and Kumar, 2005a, 2005b). مقایسه استفاده از دو مدل نمایی - PHM با ویبول - PHM در تخمین قطعات یدکی نیز توسط قدرتی نشان داد که مدل نمایی از لحاظ جمع‌آوری داده‌های موردنیاز و تحلیل آن‌ها بسیار ساده است در حالی که مدل ویبول برای محاسبه دقیق تعداد کل قطعات یدکی مناسب است. ضمن اینکه تأثیر فاکتورهای ریسک بر مدل نمایی در مقایسه با مدل تجدید پذیر ویبول تأثیر بیشتری دارند (Ghodrati, 2006). وی در تحقیقی ارائه شده در سال ۲۰۰۷ به تحلیل ریسک در زمینه مدیریت پشتیبانی پرداخت و این ریسک را از دو منظر لحاظ کردن شرایط محیطی مؤثر در تحلیل قطعات یدکی و زمان‌های افت مورد ارزیابی قرارداد. این ارزیابی با تحلیل درخت رویداد و تحلیل درخت خطا انجام شد و پیامد و دلایل مؤثر در هر مورد به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت (Ghodrati *et al.*, 2007).

برآبادی (۲۰۱۱) و نان و همکارانش (۲۰۱۱) تدارکات قطعات یدکی را با همان رویکرد ارائه شده توسط قدرتی، در زمینه سیستم‌های الکترونیکی و قطعات یدکی اسکاواتور بیل چرخشی بکار گرفته‌اند (Barabadi, 2011; Nan *et al.*, 2011).

برآبادی و همکاران (۲۰۱۴) تخمین تعداد سرمت‌های موردنیاز دستگاه چال زنی معدن بوکسیت جاجرم با در نظر گرفتن جنس سنگ به عنوان فاکتور ریسک با مدل رگرسیون لایه‌بندی شده کاکس تخمین زدند. در این تحقیق، ترسیم نمودار نرخ مخاطرات تجمعی برای ماده معدنی و سنگ باطله نشان داد که فاکتور ریسک (جنس سنگ) وابسته به زمان است (Barabadi *et al.*, 2014).

نوری قراحسنلو و همکاران (۲۰۱۹) تخمین قطعات یدکی را با همان رویکرد ارائه شده توسط قدرتی، برای تخمین لاستیک‌های دامپتراک معدن مس سونگون بکار گرفتند. نتایج مطالعات انجام گرفته در رابطه با تعداد لاستیک‌های موردنیاز تأثیر چشمگیر و بارز فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) در تحلیل‌های قطعات یدکی را نشان داد. در این مطالعه ویژگی‌های عملکردی لاستیک‌ها برای داده‌های ۱۱ ساله و فاکتورهای ریسک لاستیک‌ها با مدل‌های رگرسیونی PHM و SCRM مورد بررسی قرار گرفت. وجود فاکتورهای ریسک مشهود وابسته به زمان (مدل تراک و برند لاستیک) باعث شده است که تا داده‌های لاستیک تراک در ۱۲ لایه تقسیم شوند. برازش مدل SCRM نشان داد که فاکتورهای ریسک مشهود محور، بارندگی و دما به ترتیب مؤثرترین عوامل در رفتار خرابی‌های لاستیک تراک می‌باشند و لذا تعداد قطعات یدکی موردنیاز را به شدت تحت تأثیر قرار خواهند داد. نتایج تحلیل قابلیت اطمینان با مدل PHM برای لاستیک لودر نیز نشان داد که نرخ مخاطره لاستیک در لودر کوماتسو ۴۷۰ تقریباً ۲/۹۱ برابر بیشتر از سایر مدل‌های لودر است. همچنین فاکتورهای ریسک مشهود مدل لودر، برند لاستیک، دما و عمق آج لاستیک مؤثرترین فاکتورهای ریسک مشهود

در رفتار خرابی‌های لودر و بالأخص در تعداد لاستیک مورد نیاز است (Nouri Qarahasanlou, 2019).

۳-۵- بحث و بررسی

تابع قابلیت اطمینان درواقع بیانگر رفتار زمان‌های سرپایی دستگاه است که می‌توان در پیشنهاد بخشی از برنامه پشتیبانی مورد استفاده قرار گیرد. قابلیت اطمینان با احتمال و فراوانی وقوع خرابی سروکار دارد که این احتمال جدای از رفتار زمانی به‌طور مشخصی با رفتار محیطی (مشهود) و سایر پارامترها (نامشهود) در ارتباط است. در صنعتی مانند صنعت معدنکاری با محیط سخت و خشن، در بسیاری از موارد داده‌های خرابی از بخش‌های مختلف، در قالب‌های گوناگون، در زمان‌های متفاوت و با شرایط عملیاتی مختلف جمع‌آوری می‌شوند که این مسائل برخی ناهمگونی را در بانک داده به دنبال دارد. با این حال در پژوهش‌های انجام‌شده دو آیتم زمان و رفتار محیطی از سه آیتم زمان، رفتار محیطی و پارامترهای نامشخص مورد بررسی قرار گرفته و درواقع داده‌های خرابی (به‌طور نادرست) همگن فرض شده‌اند. این همگنی جدای از بحث همگنی است که در تحلیل داده‌های زمانی (به‌تنهایی) قابل‌اندازه‌گیری با آزمون‌های آماری روند و خودهمبستگی است. بخشی از ناهمگنی را می‌توان با فاکتور ریسک مشهود (قابل مشاهده مانند وضعیت آب و هوایی، وضعیت جاده و...) توضیح داد و تفکیک نمود. با این حال، بعضی از فاکتورها ممکن است بر قابلیت اطمینان آیتم (اجزا) تأثیر بگذارند، اما معمولاً ناشناخته‌اند یا در دسترس نیستند. این فاکتورها منجر به ناهمگنی پنهان می‌شوند که به‌عنوان فاکتور ریسک نامشهود (غیرقابل مشاهده مانند: تأثیر نوع روغن مصرفی با برندهای مختلف در تعمیرگاه) دسته‌بندی می‌شوند. در بیشتر مطالعات قابلیت اطمینان، اثر فاکتور ریسک نامشهود نادیده گرفته شده است. کومار پس از ارائه الگوریتم تحلیل قابلیت اطمینان با داده‌های زمانی در اوایل دهه نود میلادی در زمینه کارهای معدنی در همین سال‌ها با همکاری کلفسجو مدل نرخ مخاطرات متناسب (PHM) جهت تحلیل تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود را در تحلیل قابلیت اطمینان لحاظ کردند. این مدل در سال‌های بعد توسط افراد مختلفی چون دکتر قدرتی، برآبادی و نوری در زمینه معدنی برای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری اجزاء لودر (جک و اورینگ)، سیستم‌های باربری، بارگیری مورد استفاده قرار گرفتند. با این وجود PHM یا بسط‌های آن همچون نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی (SCRM) فقط برای تحلیل فاکتورهای ریسک مشهود قابل استفاده است. از این رو محققین برای پوشش این ضعف PHM سراغ مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی (MPHM) رفتند. لنکستر نخستین بار این مدل را در دهه هفتاد میلادی پیشنهاد نمود. در این مدل فرض بر این است که تمام فاکتورهای ریسک نامشهود و خطاهای اندازه‌گیری را می‌توان به‌صورت یک عبارت ضربی تصادفی محاسبه نمود و در مدل PHM اضافه کرد. در ادامه همان‌طور که اشاره شد هدف اصلی برقراری

ارتباط بین قابلیت اطمینان با بخشی از شاخص قابلیت پشتیبانی تحت عنوان "مدیریت قطعات یدکی" بود؛ بنابراین نیازمند رویکردی هستیم که قادر به تخمین قطعات یدکی بر اساس قابلیت اطمینان باشد. قدرتی در سال ۲۰۰۵ نخستین بار مدل نرخ مخاطرات متناسب برای تخمین قطعات یدکی جک و اورینگ لودر مورد استفاده قرار داد. در سال‌های بعدی این مدل توسط برآبادی و نوری در تخمین فیوزهای الکتریکی و تایلر لودر و دامپتراک بکار گرفته شد. هرچند این محققین با استفاده از PHM تأثیر انکارناپذیر فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) را تخمین قطعات یدکی وارد نموده و نتایج حاصله را بیشتر به شرایط واقعی نزدیک کردند ولی همان نقص مدل PHM در عدم توانایی تحلیل فاکتورهای ریسک نامشهود را در تخمین‌های خود وارد کرده‌اند.

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید در پژوهش‌های انجام‌شده نقص‌های وارد است که شامل:

- هیچ اشاره به زیرسیستم بندی و نحوه تعیین مرزهای سیستم، زیرسیستم و اجزاء در آن نشده است.
- همگن فرض کردن داده‌های خرابی در صورتی که داده‌های مربوطه از واحدهای مختلف، توزیع شده در زمان‌های مختلف و با شرایط مختلف عملیاتی جمع‌آوری می‌شوند. این مسائل برخی ناهمگونی را در بانک داده به دنبال دارد.
- بیشترین پژوهش صورت گرفته در زمینه تأثیرات فاکتور ریسک نامشهود در محدوده پزشکی صورت گرفته است و در محدوده مهندسی بسیار کم در این زمینه پژوهش انجام شده است.
- پژوهش‌های انجام‌شده زمانی از دقت تخمین (پیش‌بینی) بالای برخوردار هستند که تأثیرات هر دو فاکتور ریسک مشهود و نامشهود در توابع آماری دیده شده باشد. درحالی‌که پژوهش‌های انجام‌شده فقط از تأثیر فاکتور ریسک مشهود در توابع آماری سخن گفته شده است.

از این‌رو فصل بعدی رساله به منظور پوشش این ضعف، رویکردی ارائه گردیده است که قابلیت اطمینان را با هر سه آیتم زمان، فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود تحلیل کرده و تخمینی از قطعات یدکی ارائه کند که هر سه آیتم را در برگیرد.

فصل چهارم

رویکرد پیشنهادی برای مدیریت قطعات یدکی

مبتهنی بر قابلیت اطمینان

۴-۱- مقدمه

این بخش از رساله، ابتدا به معرفی الگوریتم پیشنهادی برای مدیریت قطعات یدکی تعمیرناپذیر پرداخته می‌شود. سپس به ترتیب هر کدام از مراحل مدیریت قطعات یدکی به‌طور مفصل توضیح داده می‌شود. مراحل مدیریت قطعات یدکی شامل مرزبندی و انتخاب اجزاء، جمع‌آوری داده، بررسی همبستگی بین فاکتورهای ریسک، ارزیابی مستقل بودن و توزیع یکسان (iid)، ارزیابی فرض متناسب بودن نرخ مخاطره، انتخاب مدل برای قابلیت اطمینان، انتخاب توزیع برای تابع اساسی بر اساس معیارهای اطلاعات بیزین و آکائیکه، و در نهایت مدیریت قطعات یدکی اجزاء است.

مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان شامل چندین مرحله پیوسته می‌باشد. هر کدام از این مراحل، وابسته به نتایج مرحله قبلی هستند. در ادامه هر کدام از این مراحل به‌صورت جداگانه بررسی و به‌طور مفصل توضیح داده می‌شود.

۴-۲- رویکرد پیشنهادی برای مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان و فاکتورهای ریسک

مدیریت قطعات یدکی و تدارکات بخشی از مدیریت پشتیبانی محصولات و مؤثر در هزینه چرخه عمر محصول است. دسترسی به قطعات یدکی به هنگام نیاز، زمان افت سیستم را کاهش و کارایی آن را افزایش داده در نتیجه سود حاصل از کل پروژه را افزایش خواهد داد. در صورت ذخیره تعداد موردنیاز قطعات یدکی در انبار، هزینه‌های چرخه عمر محصول به‌عنوان تابع هدف را به حداقل خواهد رساند.

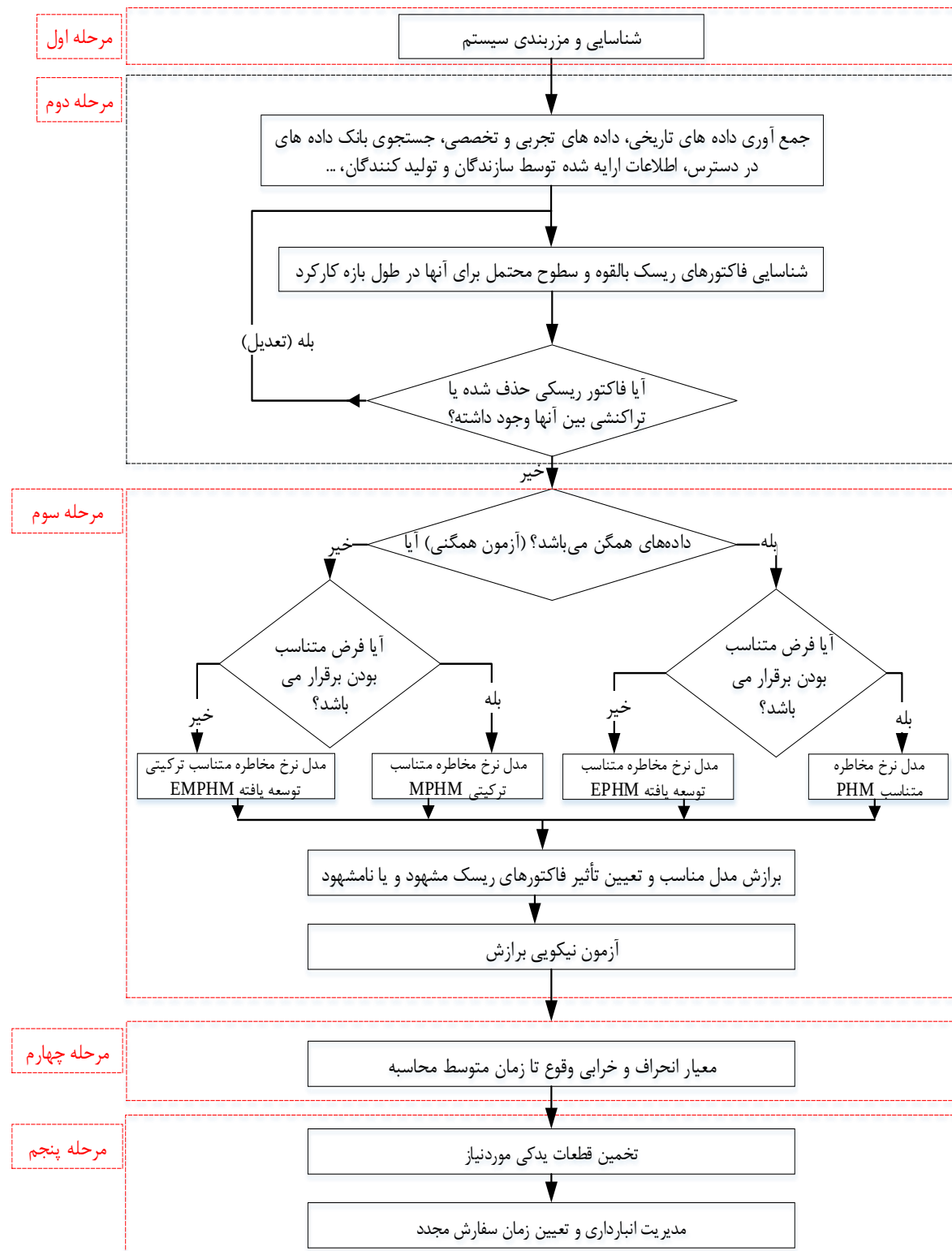
تعداد موردنیاز قطعات یدکی را نیز می‌توان با در نظر گرفتن عوامل مختلف مانند تعداد وقوع خرابی، تعداد تجهیزات موجود، حساسیت قطعه، هزینه‌های خرید قطعه، فاصله بین تولیدکننده تا مصرف‌کننده، زمان‌های تأخیر بین تصمیم تا اجرا و به‌طور کلی تأثیر شرایط محیطی مؤثر تعیین کرد. تخمین قطعات یدکی موردنیاز بر اساس شرایط محیطی مؤثر، رفتار فنی و کارکردی سیستم و نحوه اجرا یکی از مؤثرترین راه‌ها برای بهینه‌سازی توقف‌های ناخواسته است. در این رساله از شاخص قابلیت اطمینان در تخمین قطعات یدکی استفاده شده است (این شاخص بر اساس داده‌های خرابی و شرایط محیطی مؤثر تحلیل می‌شود). در این بخش رویکرد پیش‌بینی قطعات یدکی موردنیاز بر اساس قابلیت اطمینان به ازای وارد شدن تأثیر شرایط محیطی تحت عنوان فاکتورهای ریسک مشهود تحلیل می‌شود. نخست قابلیت اطمینان اجزاء بر اساس داده‌های خرابی و فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود تعیین شده و سپس تعداد قطعات یدکی موردنیاز، میزان سفارش بهینه و زمان ارسال سفارش بر اساس مصرف سالیانه محاسبه می‌شود. یکی از اهداف اصلی این رساله دستیابی به چهارچوبی برای بررسی رفتار عملکردی سیستم براساس رفتار خرابی‌ها و تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بیان می‌کند. این چارچوب شکل ۴-۱ شامل پنج مرحله می‌باشد که در ادامه بحث به‌طور مفصل به آن‌ها پرداخته می‌شود:

مرحله اول-شناسایی سیستم: در اولین قدم قبل از جمع‌آوری داده باید سیستم، زیرسیستم و اجزاء شناسایی و مرز آن با سیستم‌ها، زیرسیستم‌ها و اجزای دیگر مشخص شود. این کار در جمع‌آوری داده‌ها و جلوگیری از هم‌پوشانی سیستم مورد مطالعه با سیستم‌های مجاور مؤثر است (Barabadi et al., 2011a). دو عامل مؤثری که در مرزبندی باید در نظر گرفته شود سطح مطالعه (ناوگان یا ماشین) و محدودیت داده است. اگر سطح مطالعه ناوگان باشد، بهتر است که هر ماشین به‌عنوان جزء، هر سری به‌عنوان زیرسیستم و کل ناوگان به‌عنوان سیستم در نظر گرفته شود (جعبه سیاه) اگر سطح مطالعه ماشین باشد، تجزیه ماشین به قطعات و زیرسیستم‌های کوچک‌تر رویکرد مناسبی است (جعبه سفید) (Distefano and Puliafito, 2009). برای شناسایی و مرزبندی سیستم می‌توان از روش‌های مختلفی نظیر بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان^۱، درخت خطا^۲، نمودار قابلیت اطمینان^۳ و شبیه‌سازی استفاده کرد. برای سیستم‌های استاتیک به خاطر سادگی آن‌ها، معمولاً از روش بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و درخت خطا استفاده می‌شود (Barabadi et al., 2011a)

¹ - Reliability Block Diagram

² - Fault Tree

³ - Reliability Graph



شکل ۴-۱- الگوریتم تخمین قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان و فاکتورهای ریسک

مرحله دوم - تشکیل بانک داده و تعیین فاکتورهای ریسک مشهود: داده‌های مورد نیاز برای تحلیل و مدل‌سازی شاخص‌هایی نظیر قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، دسترسی و انعطاف‌پذیری^۱ در دو قالب سری زمانی و فاکتورهای ریسک^۲ از منابع مختلفی نظیر گزارش‌های عملیاتی روزانه، گزارش‌های سیستم واحد دیسپچینگ^۳، واحد تعمیرگاه، سنسورهای نصب‌شده بر روی ماشین‌آلات، گزارش هواشناسی منطقه، مشخصات زمین‌شناسی معدن، مصاحبه و ملاقات با متخصصین و اپراتورها جمع‌آوری می‌گردد. دقت در ثبت داده و دقت در استخراج داده موردنظر از داده‌های ثبت شده باعث افزایش دقت تخمین می‌شود. ظهور سیستم‌های پیشرفته مانند واحد دیسپچینگ که وضعیت آنی ماشین‌آلات را نشان می‌دهند. این سیستم‌ها باعث افزایش دقت در ثبت داده‌های خرابی و فاکتورهای ریسک نظیر محل عملیات، تعداد سرویس بارگیری شده، نوع سنگ استخراجی و غیره می‌شود. داده‌های جمع‌آوری شده ماشین‌آلات معدنی یا تجهیزات کارخانه فراوری و یا هر دستگاه دیگر در معدن داده‌های خامی بوده و به‌صورت مستقیم در تحلیل‌ها قابل استفاده نیستند. برای استفاده از داده‌ها در تحلیل‌های موردنظر داده‌ها باید در قالب‌های مشخصی نظیر زمان بین خرابی (TBF) تنظیم گردد.

این نوع از داده‌ها (فاکتورهای ریسک) برخلاف داده‌های خرابی از جنس زمان نبوده، بلکه دربرگیرنده عوامل محیطی و عملیاتی هستند که بر عملکرد ماشین‌آلات، اپراتورها و مکانیزم خرابی اقلام تأثیر می‌گذارند. این عوامل در حوزه مهندسی قابلیت اطمینان با عنوان "فاکتورهای ریسک" شناخته شده‌اند. نادیده گرفتن این فاکتورها منجر به کاهش دقت و یا اریب در نتایج خواهد شد. مخصوصاً در محیط‌هایی که اثرات شرایط محیطی و عملیاتی زیاد باشد. به‌عنوان مثال، اگر بخواهیم تعداد قطعات یدکی موردنیاز را برای ماشینی تخمین بزنیم و در تخمین آن از فاکتورهای ریسک صرف‌نظر کنیم، این عمل باعث کاهش دقت در تعداد قطعات یدکی خواهد بود. فاکتورهای ریسک طبقه‌ای^۴ مانند وضعیت جوی، نوع سنگ و غیره داده‌های کیفی بوده و به‌صورت مستقیم در تحلیل‌های آماری قابل استفاده نیستند. این داده‌ها باید به‌صورت دودویی^۵ و یا چندگانه کمی‌سازی شوند. به‌عنوان مثال، قرار دادن مقدار ۱ برای مهارت بالای اپراتور و مقدار ۰- برای مهارت پایین اپراتور، یا در نظر گرفتن مقادیر ۱ تا ۴ برای کیفیت تعمیر را می‌توان اشاره کرد (Barabadi et al., 2011a). فاکتورهای ریسک پیوسته^۶ نظیر دما، فشار، رطوبت، بارندگی برخلاف فاکتورهای ریسک گسسته کمی بوده و بدون هیچ‌گونه تغییراتی در تحلیل‌ها به کار گرفته می‌شود.

¹ Resilience

² Covariates

³ Dispatching

⁴ Categorical

⁵ Binary

⁶ Continuous

بعد از مرتب و منظم کردن داده‌های خرابی و فرمول‌بندی فاکتورهای ریسک طبقه‌ای، همبستگی^۱ بین فاکتورهای ریسک بررسی می‌گردد تا در صورت وجود وابستگی بین فاکتورهای ریسک، فاکتورهای ریسک موجود حذف و به جای آن‌ها فاکتور ریسک جدیدی معرفی شود

مرحله سوم-برازش مدل قابلیت اطمینان مناسب: در صنایع مختلف نظیر معدن، داده‌های خرابی از بخش‌های مختلف، در قالب‌های گوناگون، گسترده در زمان‌های مختلف و با شرایط عملیاتی مختلف جمع‌آوری می‌شوند که این مسائل برخی ناهمگونی را در بانک داده به دنبال دارد. بخشی از ناهمگنی را می‌توان با فاکتور ریسک مشهود (از جمله دما، فشار، رطوبت، بارندگی، گردوغبار، وضعیت جوی، یخ‌زدگی و باد، و نیز عوامل عملیاتی از جمله نوع سنگ، نوع شیفت کاری، برنامه تولید، کیفیت تعمیر، مهارت اپراتور، مهارت پرسنل تعمیر، کیفیت روغن و...) توضیح داد و تفکیک نمود. اما بعضی از عوامل ممکن است بر قابلیت اطمینان وسایل (اجزا) تأثیر بگذارند، اما معمولاً ناشناخته‌اند یا دسترس نیستند. به عنوان مثال تفاوت جنس و عناصر تشکیل‌دهنده اقلام و قطعات بکار رفته در تعمیرات مانند جنس مته‌های حفاری از شرکت‌های تهیه‌کننده مختلف، یا نوع جنس ناخن باکت مصرفی با برندهای مختلف. این موضوع به هیچ وجه قابل ثبت یا کمی سازی نیست. لذا امکان تشکیل بانک داده و انجام تحلیل مشابه با عوامل قابل ثبت (فاکتورهای ریسک مشهود) برای این نوع تأثیرات وجود نخواهد داشت، درحالی‌که این پارامترها بشدت مؤثر در عملکرد سیستم می‌باشند. این دست از عوامل در مهندسی قابلیت اطمینان به عنوان فاکتورهای ریسک نامشهود در نظر گرفته می‌شوند. دسته اخیر از فاکتورهای ریسک تحت تابعی به عنوان "تابع شکنندگی" در تخمین قابلیت اطمینان وارد شده و با مقادیر بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از ۱ مقدار آن را کم و زیاد می‌کند. ولی مشکل در رابطه با این مقدار از آنجایی شروع می‌شود که خود این مقدار قابل مشاهده نبوده لذا بایستی از طریق همگنی یا ناهمگنی داده‌ها اقدام به بررسی وجود آن شود.

روش‌های مختلف برای آزمون همگنی ارائه شده است که شامل آزمون نرخ درستنمایی بیشینه^۲، معیار اطلاعاتی آکائیکه^۳ و معیار اطلاعاتی بیزین^۴ آزمون‌های رایج برای بررسی فرض مقابل (H_1) مبنی بر حضور ناهمگنی در برابر فرض صفر (H_0) مبنی بر عدم حضور ناهمگنی ($\theta = 0$) می‌باشند (Brewer et al., 2016; Garmabaki, Ahmadi, Block, et al., 2016; Lawless, 1987) در این پژوهش از رویکرد آزمون نرخ درستنمایی بیشینه (LR) استفاده می‌شود.

¹ Correlation

² A likelihood Ratio Test

³ Akaike Information Criterion

⁴ Bayesian Information Criterion

در این مرحله طبق الگوریتم شکل ۴-۱ باید برقراری فرض متناسب بودن نرخ مخاطره (PH) مورد ارزیابی قرار گیرد تا از عدم وابستگی به زمان فاکتورهای ریسک مشهود اطمینان حاصل نمود. برای این منظور می‌توان از آزمون‌های تحلیلی و ترسیمی استفاده نمود که آزمون‌های تحلیلی با ارائه آماره استاتیک و P-Value به ارزیابی فرض PH برای هر یک از فاکتورهای ریسک می‌پردازد. یکی از آزمون‌های تحلیلی پرکاربرد در این زمینه آزمون هارل و لی^۱ که حالت تغییر یافته از آزمون شوئنفلد (سال ۱۹۸۲) بوده و معروف به آزمون "باقیمانده‌های شوئنفلد" است (Kleinbaum and Klein, 2012).

از آنجایی که توابع خروجی مدل‌های پیشنهادی همه از نوع نرخ مخاطره خواهند بود، قابلیت اطمینان سیستم بر اساس مدل مناسب و پارامترهای تخمینی و با استفاده از روابط بین قابلیت اطمینان با نرخ مخاطره برآورد می‌شود. بدین ترتیب یکی از اهداف این رساله دستیابی به تابع قابلیت اطمینانی سیستم خواهد بود که رفتار عملکردی را براساس رفتار خرابی‌ها و تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بیان می‌کند. به‌طور کلی، حالت‌های زیر ممکن است صورت گیرد:

- مجموعه داده‌ها با فاکتور ریسک نامشهود و وابسته به زمان، با مدل‌های EMPHM^۲ یا MSCRM^۳ مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.
- مجموعه داده‌ها با فاکتور ریسک نامشهود و عدم وابستگی به زمان، با مدل‌های نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی^۴ MPHMM^۴ مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.
- مجموعه داده‌ها با فاکتور ریسک مشهود و وابسته به زمان، با مدل‌های EPHM یا SCRM مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.
- مجموعه داده‌ها با فاکتور ریسک مشهود و عدم وابستگی به زمان، با مدل‌های نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی (PHM) مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

در گام بعدی طبق الگوریتم ارائه شده مدل مناسب با استفاده از آزمون نیکوئی برازش تعیین می‌شود. در این مرحله نیز از دو معیار اطلاعاتی آکائیکه و معیار اطلاعاتی بیزین برای انتخاب مناسب‌ترین مدل برازش استفاده می‌شود. این دو معیار مبتنی بر اطلاعات بوده و از طریق مقایسه مقدار درست‌نمایی پیشینه به‌طور کلاسیک برای انتخاب مدل مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مطمئن‌ترین راه‌ها برای حصول اطمینان از مناسب بودن مدل (مدلی که دارای کوچک‌ترین مقادیر AIC و BIC برازش شده، استفاده از باقیمانده‌ها است. در آنالیز قابلیت اطمینان مانند مدل رگرسیون کاکس با

¹ - Harrel and Lee

² - Extension Mix Proportional Hazard Model

³ - Mix Stratified Cox Regression Model

⁴ - Mixture proportional hazard model

انواع مختلف باقیمانده‌ها سروکار داریم که هر یک برای منظور خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچند در استفاده از باقیمانده‌ها نظرات متفاوت است و بستگی به نوع اطلاعات، تجربه و نظر محقق دارد ولی به‌طور مرسوم باقیمانده‌های ذیل برای مواردی که اشاره می‌گردد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. باقیمانده کاکس - اسنل^۱ معمولاً در ارزیابی کلی مدل به کار می‌رود. باقیمانده مارتینگل^۲ در ارزیابی شکل تابعی که در برگیرند فاکتورهای ریسک است و همچنین در سنجش عدم توانایی مدل در برازش مناسب به داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. باقیمانده‌های اسکور^۳ و شوئنفلد برای ارزیابی برقرار بودن فرض متناسب بودن خطر در مدل مخاطره متناسب کاکس، شناسایی نقاط پرنفوذ و شناسایی مقادیر پرت به کار می‌روند و باقیمانده دیوینس^۴ در ارزیابی درستی و صحت مدل و شناسایی مقادیر پرت مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gutierrez, 2002). باقیمانده کاکس - اسنل در مدل نیمه پارامتری کاکس و همچنین برای مدل‌های پارامتری از جمله نمایی، وایبل، لگ نرمال، لگ لجستیک، گاما، گومپرتز دارای توزیع نمایی با پارامتر $\lambda = 1$ است (Cox, 1972). بنابراین می‌توان از این باقیمانده برای ارزیابی خوبی یک مدل و همچنین مقایسه مدل‌های مختلف قابلیت اطمینان با یکدیگر استفاده نموده و در نهایت از بین آن‌ها مناسب‌ترین مدل را انتخاب نمود. لذا برای هر یک از مدل‌های قابلیت اطمینان برازش شده به داده‌ها، باقیمانده کاکس - اسنل محاسبه می‌شود. سپس برای ارزیابی و همچنین مقایسه این مدل‌ها با یکدیگر کافی است بررسی کنیم آیا این باقیمانده‌ها می‌توانند از توزیع نمایی تبعیت کنند. این مورد در نرم‌افزار Stata بدین‌صورت انجام می‌پذیرد که برآورد تابع قابلیت اطمینان به روش کاپلان - مایر برای این باقیمانده‌ها به دست می‌آید و تابع مخاطره تجمعی این برآورد محاسبه می‌گردد. سپس نمودار این تابع مخاطره را نسبت به باقیمانده کاکس - اسنل رسم می‌شود، هراندازه که نمودار به دست آمده به خط نیمساز نزدیک‌تر باشد، مدل برازش شده مناسب‌تر خواهد بود (Gutierrez, 2002).

مرحله چهارم - تخمین میانگین و انحراف معیار براساس قابلیت اطمینان: مرحله بعدی رویکرد پیشنهادی تخمین تعداد قطعات یدکی^۵ (SPP) توسعه یافته می‌باشد، و روندی اتخاذ گردید که مقادیر متوسط زمان تا وقوع خرابی و انحراف معیار (لازم برای تخمین قطعات یدکی) بر مبنای تابع قابلیت اطمینان محاسبه شوند تا از این طریق محدودیت‌های به مدل‌های خاص مانند وایبل و نمایی برطرف گردد. در ادامه به منظور رفع نقص مدل نرخ مخاطره متناسب تلاش بر این است که رویکردی از تخمین قطعات یدکی ارائه شود که هر سه آیتم (زمان، فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود) را در

^۱ - Cox-Snell

^۲ - Martingale

^۳ - Score

^۴ - Deviance

^۵ - Spare parts provisioning

برگیرد. بنابراین آخرین هدف این پژوهش مدیریت قطعات یدکی با در نظر گرفتن تأثیر فاکتورهای ریسک نامشهود است.

بعد از مشخص شدن مناسب‌ترین برآزش در بین توابع مدنظر براساس کمترین مقدار دو معیار AIC و BIC و محاسبه تابع قابلیت اطمینان سیستم (جزء) بر مبنی ضرایب فاکتورهای ریسک مشهود مؤثر، در این مرحله پارامترهای مجهول مدل و ضرایب تأثیر هریک طبق رابطه (۲-۳) برای تخمین تعداد قطعات یدکی، متوسط زمان تا وقوع خرابی (T) و انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌ها ($\sigma(T)$) باید محاسبه شود. متوسط زمان تا وقوع خرابی بر اساس تابع قابلیت اطمینان در حالت کلی به صورت رابطه (۱-۴) خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 M = MTTF = E(T) &= \int_0^{\infty} t f(t) dt \xrightarrow{f(t)=-R'(t)} = - \int_0^{\infty} t R'(t) dt \xrightarrow{\substack{\downarrow + \\ \rightarrow -}} \frac{R'(t)}{R(t)} \\
 &= - \left[t R(t) \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt = \\
 \Rightarrow \bar{T} = M = MTTF = E(T) &= \int_0^{\infty} R(t) dt
 \end{aligned} \tag{1-4}$$

در رابطه (۲-۴) نیز انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌ها براساس تابع قابلیت اطمینان محاسبه شده است:

$$\begin{aligned}
 Vor(T) = \sigma^2(T) &= \int_0^{\infty} (t - M)^2 f(t) dt \xrightarrow{f(t)=-R'(t)} = - \int_0^{\infty} (t - M)^2 R'(t) dt = \\
 &= - \int_0^{\infty} (t^2 - 2tM + M^2) R'(t) dt = - \int_0^{\infty} t^2 R'(t) dt + 2M \int_0^{\infty} t R'(t) dt - M^2 \int_0^{\infty} R'(t) dt \\
 &= - \left[t^2 R(t) \right]_0^{\infty} + 2 \int_0^{\infty} R(t) dt - 2M^2 + M^2 = 2 \int_0^{\infty} t R(t) dt - M^2 \\
 \Rightarrow Vor(t) &= 2 \int_0^{\infty} t R(t) dt - M^2
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

مرحله پنجم - مدیریت قطعات یدکی: تخمین تعداد قطعات یدکی محاسبه شده در این روش مبتنی بر قابلیت اطمینان اجزاء سیستم خواهد بود. لذا پس از تخمین قابلیت اطمینان در این مرحله با توجه به روابط بین تابع قابلیت اطمینان و تخمین قطعات یدکی که در فصل دوم اشاره شد اقدام به تخمین قطعات یدکی و مدیریت انبار برای اجزاء سیستم خواهد شد. تعداد بهینه قطعات یدکی با در نظر گرفتن عوامل مختلف مانند حساسیت قطعه، هزینه‌های خرید قطعه، فاصله زمانی بین سفارش تا دریافت قطعه قابل تخمین است (Ghodrati, 2005).

۴-۳- جمع‌بندی

در این بخش از رساله، به معرفی الگوریتم پیشنهادی برای مدیریت قطعات یدکی تعمیرناپذیر پرداخته شده است. سپس هر کدام از مراحل به صورت جداگانه و به‌طور مفصل توضیح داده شد. مراحل الگوریتم پیشنهادی برای مدیریت قطعات یدکی شامل مرزبندی و انتخاب اجزاء، جمع‌آوری داده، بررسی همبستگی بین فاکتورهای ریسک، ارزیابی مستقل بودن و توزیع یکسان (iid)، ارزیابی فرض متناسب بودن نرخ مخاطره، انتخاب مدل برای قابلیت اطمینان، انتخاب توزیع برای تابع اساسی بر اساس معیارهای اطلاعات بیزین و آکائیکه، و در نهایت مدیریت قطعات یدکی اجزاء است.

فصل پنجم

مطالعه موردی

ماشین آلات معدنی (سیستم بارگیری)

۵-۱- مقدمه

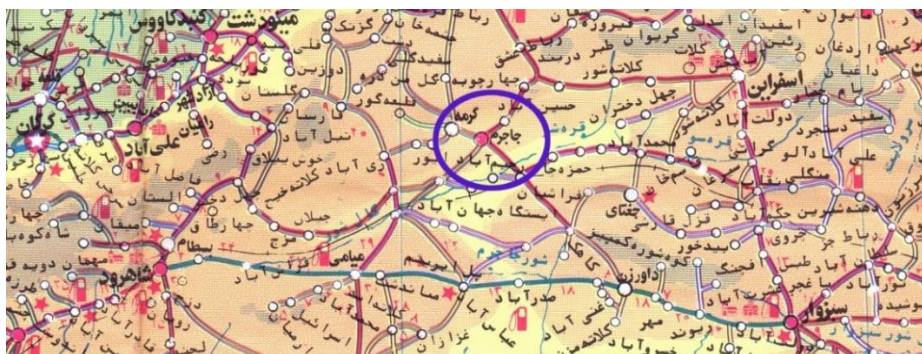
این فصل از رساله، شامل ۳ بخش اصلی می‌باشد، که بخش اول شامل دو قسمت است. قسمت اول به معرفی مشخصات مطالعه موردی معدن بوکسیت جاجرم اختصاص داده شده است. به دلیل عدم وجود ناهمگنی در بانک اطلاعاتی جمع آوری شده از معدن بوکسیت جاجرم، رویکرد بررسی همانند رویکرد ارائه شده توسط محققین گذشته خواهد بود. از این رو جهت بررسی تأثیرات فاکتور ریسک نامشهود بر قابلیت اطمینان و در نهایت مدیریت قطعات یدکی منطقه مورد مطالعه بازنگری شده است. قسمت دوم به معرفی مشخصات مطالعه موردی معدن سنگ آهن سیرجان اختصاص یافته است. در بخش دوم، جهت صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی شکل ۴-۱ ارائه شده به منظور تخمین قطعات یدکی مبتنی بر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر اساس بانک اطلاعاتی جمع آوری شده از نمونه موردی ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار 390 DL معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر سیرجان مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت بخش آخر به بحث و بررسی نتایج پرداخته شده است.

لازم به ذکر است که تمام محاسبات لازم با استفاده از نرم افزار Stata انجام شده است.

۵-۲- مطالعه موردی - معدن بوکسیت جاجرم

معدن بوکسیت جاجرم به عنوان بزرگ‌ترین معدن بوکسیت ایران، تأمین‌کننده بوکسیت خوراک کارخانه ۲۸۰ هزار تنی تولید آلومینای جاجرم است. این معدن به صورت لایه‌ای - عدسی‌ای قرار دارد. این معدن با ذخیره‌ای معادل ۲۰/۷ میلیون تن بوکسیت سخت با عیار ۴۳/۶۷ درصد آلومینا و ۱۴/۴۹ درصد سیلیس بزرگ‌ترین معدن بوکسیت ایران محسوب می‌شود. به دلیل عملکرد گسل‌های امتدادلغز لایه‌های مختلف در منطقه از جمله بوکسیت، تداوم اولیه خود را ازدست‌داده و کل مجموعه معدنی به

دوازده بلوک کاملاً مجزا تقسیم شده است، گسترش طولی معدن، که از غرب به شرق به نام‌های، گل بینی یک تا هشت، زو یکتا چهار، تاگوئی یک تا شش و سنگ‌تراش نام‌گذاری شده است، حدود ۱۶ کیلومتر است. استخراج از این معادن (بلوک‌ها) به روش‌های سطحی و زیرزمینی صورت می‌گیرد. معادن بوکسیت جاجرم در ۱۹ کیلومتری شمال شرق شهرستان جاجرم قرار دارد. شکل ۵-۱ نیز موقعیت شهرستان جاجرم را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان جاجرم

روش استخراج در معدن بوکسیت جاجرم روباز بوده و لذا ماشین‌آلات غول‌آسا با ابعاد بزرگ مراحل اصلی استخراج یعنی چال زنی و حفاری، بارگیری و باربری را بر عهده دارند. درواقع سرپا بودن ماشین در هر مرحله و قابل اطمینان بودن آن‌ها تضمین‌کننده تولید و معدنکاری می‌باشند.

۵-۲-۱- مرز بندی و انتخاب زیرسیستم و اجزاء

در این بخش از رساله، بخشی از ناوگان بارگیری معدن بوکسیت جاجرم- زو یک که توسط بیل مکانیکی‌های هیتاچی مدل ۴۷۰ انجام می‌شود و به عنوان ماشین‌آلات مورد مطالعه انتخاب شدند. دلایل این انتخاب، عواملی نظیر نبود و عدم ثبت داده‌های کافی برای سایر ماشین‌آلات مانند بلدوزر، چالزن، لودر و غیره در حد زیرسیستم و اجزا می‌باشد (برای اطمینان بیشتر اطلاعات ثبت شده اکثر تجهیزات بررسی شدند). از سوی دیگر اهمیت زیاد ماشین‌آلات بارگیری در عملیات واحد استخراج به طوری که حجم بالایی از سنگ‌های کنده و خرد شده توسط بیل مکانیکی‌ها بارگیری می‌شود، اهمیت قابل توجه بیل مکانیکی‌های مشغول به کار در منطقه زو یک معدن بوکسیت جاجرم را بیشتر نشان می‌دهد (ناوگان بارگیری شامل ۴ دستگاه بیل مکانیکی و ۴ دستگاه لودر می‌باشد). داده‌های خرابی (سری زمانی) و فاکتورهای ریسک ۴ دستگاه بیل مکانیکی هیتاچی مدل ۴۷۰ (قابل ذکر می‌باشد که این دستگاه‌ها دارای داده‌های کامل بوده و از این نظر برای مطالعه موردی انتخاب شده‌اند) از منابع مختلف در مدت ۱۵ ماه جمع‌آوری گردیده است. مشخص کردن سیستم و مرز بندی آن اولین مرحله از مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان می‌باشد. یک سیستم شامل چندین زیرسیستم و اجزا است. در این مطالعه، دستگاه بیل مکانیکی هیتاچی مدل ۴۷۰ به دلیل اینکه حجم بالایی از

سنگ‌های کنده و خرد شده توسط بیل مکانیکی‌ها بارگیری می‌شود به‌عنوان یک زیرسیستم و ناخن باکت به دلیل اینکه در صورت خرابی تمام عملیات بارگیری متوقف خواهد شد به عنوان اجزاء در نظر گرفته شده است.

۵-۲-۲- جمع‌آوری و تشکیل بانک اطلاعاتی اولیه

در این بخش به نحوه جمع‌آوری داده‌های زمانی در معدن بوکسیت جاجرمد پرداخته شده است. این دسته از داده‌ها (داده‌های خرابی) از جنس زمان بوده و به‌صورت زمان تا وقوع خرابی‌ها^۱ (TTF)، به مدت ۱۵ ماه برای ۴ بیل مکانیکی هیتاچی از منابع مختلف نظیر نظارت، ایستگاه هواشناسی، ملاقات و مصاحبات، مشاهدات مستقیم و پیمانکاران جمع‌آوری شده است. در نخستین گام، زمان تا وقوع خرابی‌ها برحسب کارکرد اجزاء محاسبه شده و داده‌های زمانی در قالب TTF برای بازه ۱۵ ماهه تحقیق در مجموع ۳۴ خرابی از بانک داده استخراج شد.

این دسته از داده‌ها (فاکتورهای ریسک) دربرگیرنده شرایط محیطی مؤثر و عملیاتی هستند که بر عملکرد ماشین‌آلات، اپراتورها و مکانیزم خرابی اجزاء تأثیر می‌گذارد. فاکتورهای ریسک مشهود به دو صورت کیفی (طبقه‌ای) و کمی (پیوسته) بوده و به مدت ۱۵ ماه برای ۴ بیل مکانیکی هیتاچی جمع‌آوری شده است. قابل ذکر است که تعداد ۳۴ داده زمانی به همراه فاکتورهای ریسک جمع‌آوری شده است. در پیوست نمونه‌ای از داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی هیتاچی درج شده است. مراحل ارزیابی فرض همگنی برای داده‌های ناخن باکت بیل مکانیکی هیتاچی از معدن بوکسیت جاجرمد انجام شد، و طبق نتایج به‌دست‌آمده نرخ درستمایی بیشینه کوچک‌تر از ۲/۷ (یعنی در سطح اطمینان ۵٪ فرض صفر: عدم وجود ناهمگنی، رد نخواهد شد اگر $R \leq 2.706$) حاصل شده است. لذا نتیجه تحلیل در الگوریتم شکل ۴-۱ به سمت راست یعنی مدل PHM یا EPHM هدایت می‌شود. همچنین این روند برای اجزاء دیگر مربوط به بیل مکانیکی هیتاچی مانند: فیلتر روغن، پین، دینام و ... انجام گرفته است. تمامی تحلیل‌ها بر وجود همگنی بانک اطلاعاتی تأکید دارند. از این رو رویکرد تخمین قطعات یدکی همان رویکرد ارائه شده توسط قدرتی، نوری قراحسنلو و ... بوده است از این رو جهت بررسی تأثیرات فاکتور ریسک نامشهود بر قابلیت اطمینان و در نهایت مدیریت قطعات یدکی منطقه مورد مطالعه بازنگری شده است

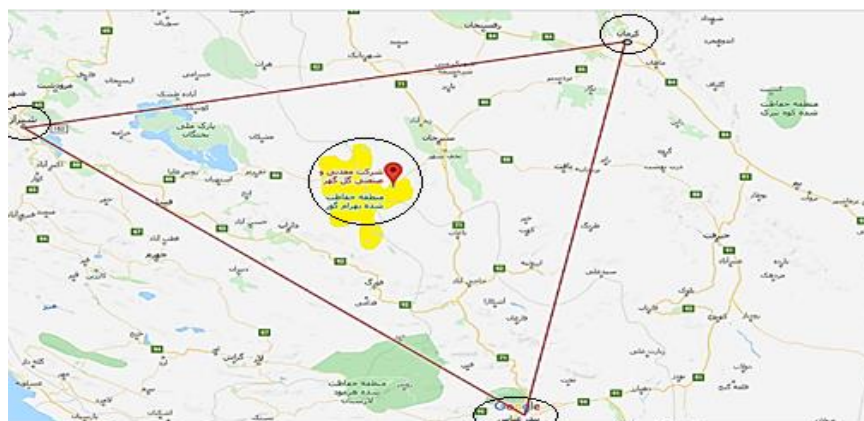
۵-۳- مطالعه موردی - معدن گل‌گهر سیرجان

مجموعه معدنی سنگ آهن گل‌گهر سیرجان واقع در استان کرمان، با طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی، و با عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۷ دقیقه شمالی، با ارتفاع متوسط ۱۷۵۰ متر از سطح

^۱ - Time to failures

دریا در ۵۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان سیرجان قرار دارد. به طور تقریبی در مرکز مثلثی قرار گرفته است که رئوس آن را کرمان، شیراز و بندر عباس تشکیل می‌دهد. در شکل ۵-۲ موقعیت مجموعه معدنی سنگ آهن گل‌گهر مشخص است.

پیشینه استخراج در این معدن حداقل به ۹۰۰ سال قبل و بنا به روایتی به دوران هخامنشی برمی‌گردد. اکتشافات مقدماتی معدن گل‌گهر در سال ۱۳۴۸ توسط شرکت ایران باریت با همکاری شرکت ژاپنی ماروبنی آغاز و ادامه عملیات در سال ۱۳۵۳ به شرکت ملی صنایع فولاد واگذار شد. در حال حاضر مجموعه معدن سنگ آهن گل‌گهر سیرجان شامل ۶ توده معدنی تحت عناوین آنومالی‌های ۱ تا ۶ نامگذاری شده است. شرکت صنعتی و معدنی گل‌گهر سیرجان بهره‌برداری مجموعه معادن گل‌گهر را برعهده دارد.



شکل ۵-۲- موقعیت جغرافیای مجموعه صنعتی معدن گل‌گهر

۵-۳-۱- مرحله اول - مرزبندی و انتخاب اجزاء

در این رساله، بخشی از ناوگان بارگیری معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان که توسط بیل مکانیکی‌های کاترپیلار مدل 390 DL انجام می‌شود و به عنوان ماشین‌آلات مورد مطالعه انتخاب شدند. دلایل این انتخاب، عواملی نظیر نبود و عدم ثبت داده‌های کافی برای سایر ماشین‌آلات مانند بلدوزر، چالزن، لودر و غیره در حد زیرسیستم و اجزا می‌باشد (برای اطمینان بیشتر اطلاعات ثبت شده اکثر تجهیزات بررسی شدند). از سوی دیگر اهمیت زیاد ماشین‌آلات بارگیری در عملیات واحد استخراج به طوری که حجم بالایی از سنگ‌های کنده و خرد شده توسط بیل مکانیکی‌ها بارگیری می‌شود، اهمیت قابل توجه بیل مکانیکی‌های مشغول به کار در معدن شماره ۱ را بیشتر نشان می‌دهد (ناوگان بارگیری معدن شماره ۱ گل‌گهر شامل ۱۲ دستگاه بیل مکانیکی و ۴ دستگاه شاول می‌باشد). داده‌های خرابی (سری زمانی) و فاکتورهای ریسک ۴ دستگاه بیل مکانیکی کاترپیلار مدل 390 DL (قابل ذکر می‌باشد که

این دستگاه‌ها دارای داده‌های کامل بوده از این نظر برای مطالعه موردی انتخاب شده‌اند) از منابع مختلف در مدت ۲۴ ماه جمع‌آوری گردیده است. البته داده‌های جمع‌آوری شده به مدت ۳۶ ماه بود ولی طبق بررسی‌های به عمل آمده به دلیل عدم وجود اطلاعات بخشی از بیل مکانیکی‌ها فقط ۲۴ ماه از آن‌ها مناسب انجام این تحقیق بودند.

مشخص کردن سیستم و مرزبندی آن اولین مرحله از مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان می‌باشد. یک سیستم شامل چندین زیرسیستم و اجزا است. در این مطالعه، دستگاه بیل مکانیکی کاترپیلار مدل DL ۳۹۰ به عنوان یک زیرسیستم و ناخن بکت به عنوان اجزاء در نظر گرفته شده است. به علت عدم ثبت نحوه خرابی ناخن‌های بکت در گزارش‌های روزانه واحدهای مختلف در معدن (اطلاعات ثبت شده در گزارش‌ها شامل: زمان تعویض و تعداد ناخن تعویضی می باشد) در این رساله تحلیلی در مورد نحوه خرابی ناخن بکت ارائه نشده است.

۵-۳-۲- مرحله اول - جمع‌آوری و تشکیل بانک اطلاعاتی اولیه

بررسی قابلیت پشتیبانی و بخصوص تخمین تعداد قطعات یدکی نیازمند گسترش تحلیل‌ها به سطح اجزاء است که این مسئله با توجه به گستردگی فوق‌العاده ماشین‌آلات و اجزاء آن‌ها نیازمند تلاشی بسیار است، از سوی دیگر در این تحقیق تنها تخمین تعداد قطعات یدکی تعمیرناپذیر مدنظر است. لذا برای ارائه روش پیشنهادی داده‌های خرابی ناخن بکت (ناخن بکت بیل مکانیکی) گردآوری شد. قابل ذکر است که تخمین تعداد قطعات یدکی موردنیاز در این تحقیق صرفاً بر اساس قابلیت اطمینان و فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بوده و از این رو تنها جمع‌آوری داده‌های خرابی و فاکتورهای ریسک مشهود باید انجام پذیرد.

در نخستین گام با توجه به فرضیات و داده‌های موجود در معدن اقدام به مرزبندی سیستم شد. سپس مطابق روش تحقیق ارائه شده به گردآوری داده‌ها از منابع مختلف و تشکیل بانک داده پرداخته شد تا در مراحل آتی با استفاده از آن تحلیل قابلیت اطمینان اجزاء صورت گیرد و نهایتاً تعداد قطعات یدکی تخمین زده شود. بایستی توجه نمود که ضمن تشکیل بانک داده و تعیین رفتار خرابی‌ها برای اجزاء سیستم بر اساس آمارهای زمانی به دنبال تعیین پارامترهای محیطی مؤثر بر رفتار خرابی نیز خواهیم بود. این پارامترها و چالش‌ها که تحت عنوان فاکتورهای ریسک مشهود (پارامترهای محیطی مؤثر) تعریف شدند. پس از تعیین اجزاء، بانک داده بر اساس اطلاعات کسب‌شده از منابع مختلف تشکیل شد و سپس داده‌های خرابی اجزاء برای تعیین شاخص قابلیت اطمینان با در نظرگیری فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) از آن استخراج شد. تخمین تعداد قطعات یدکی محاسبه شده در این روش مبتنی بر قابلیت اطمینان اجزاء خواهد بود.

از این رو داده‌های زمانی مورد نیاز نیز برای اجزاء تعمیرپذیر با استفاده از زمان بین خرابی‌ها^۱ (TBF) و برای اجزاء تعمیرناپذیر با استفاده از زمان تا وقوع خرابی‌ها^۲ (TTF) خواهد بود. از سویی دیگر برای وارد کردن تأثیرات فاکتورهای ریسک بر قابلیت اطمینان اجزاء، تعیین فاکتورهای ریسک مرتبط با اجزاء نیز باید انجام شود. این داده‌ها را می‌توان از منابع مختلف همچون: اسناد ثبت شده (گزارش‌های گروه نت، مکانیک، روزانه ...)، مدارک آرشیو شده (گزارش‌های قبلی، دفترچه ماشین آلات ...)، ملاقات و مصاحبه‌ها، مشاهدات مستقیم گردآوری نمود.

در ادامه این بخش نحوه فرمولاسیون فاکتورهای ریسک مؤثر در خرابی‌های رخ داده در سطح اجزاء مورد بحث قرار گرفته و همچنین نحوه استخراج داده‌های زمانی خرابی در قالب (زمان تا وقوع خرابی‌ها) TTFs برای اجزاء بررسی شده است. پس از تشکیل بانک داده از منابع موجود (گزارش‌های روزانه، تعمیرگاه، گزارش هواشناسی و مصاحبه با متخصصین) در نخستین گام بانک داده مرتب شده است. منظور از مرتب کردن یعنی اینکه داده‌های گزارش‌های روزانه با افزودن تاریخ در سه ستون سال، ماه و روز در یک شیت مرتب شدند تا در ادامه کار داده‌های مورد نیاز از آن استخراج شوند. در سومین گام از استخراج داده پس از مرتب کردن، داده‌های مورد نیاز از بانک داده استخراج گردید. این داده‌ها حاوی داده‌های زمانی و نوع دیگری از داده‌ها یعنی فاکتورهای ریسک مشهود برای بررسی تأثیر شرایط محیطی مؤثر بر قابلیت اطمینان و در نهایت تخمین تعداد قطعات یدکی می‌باشند. قابل ذکر است که مراحل استخراج فاکتورهای ریسک مشهود با داده‌های زمانی موازی بوده و صرفاً برای حفظ توالی در گزارش نویسی به صورت جداگانه توضیح داده می‌شوند.

۵-۳-۲-۱- داده‌های زمانی خرابی

دسته اول داده‌های خرابی از جنس زمان بوده و به صورت زمان تا وقوع خرابی‌ها (TTF)، به مدت ۲۴ ماه برای ۴ بیل مکانیکی از منابع مختلف نظیر گزارش‌های عملیاتی روزانه، گزارش‌های سیستم واحد دیسپچینگ^۳، واحد تعمیرگاه، گزارش هواشناسی منطقه، مشخصات زمین‌شناسی معدن، مصاحبه و ملاقات با متخصصین و اپراتورها جمع‌آوری شده است. در این رساله، مقدار ۱ به داده‌های کامل و مقدار ۰ به داده‌های سانسور شده اختصاص داده می‌شود (وضعیت خرابی^۴).

¹ - Time Between Failures

² - Time To Failures

³ Dispatching

⁴ Failure Status

۵-۳-۲- فاکتورهای ریسک

این دسته از داده‌ها دربرگیرنده شرایط محیطی مؤثر و عملیاتی هستند که بر عملکرد ماشین‌آلات، اپراتورها و مکانیزم خرابی اجزاء تأثیر می‌گذارد. در ادامه به نحوه جمع‌آوری فاکتورهای ریسک مشهود در معدن سنگ آهن گل‌گهر سیرجان پرداخته شده است. فاکتورهای ریسک مشهود به دو صورت کیفی (طبقه‌ای) و کمی (پیوسته) بوده و به مدت ۲۴ ماه برای ۴ بیل مکانیکی کاترپیلار جمع‌آوری شده است. در ادامه به انواع فاکتورهای ریسک مشهود معدن سنگ آهن گل‌گهر سیرجان پرداخته شده است.

• نوبت^۱

فاکتور نوبت به عنوان یک فاکتور ریسک کیفی ساختگی بوده و تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد اپراتورها، پرسنل نت و تجهیزات دارد. با توجه به برنامه‌ریزی‌های معدن، عملیات استخراج در سه نوبت کاری انجام می‌شود. فاکتور ریسک نوبت (Z_1) به عنوان یک فاکتور ریسک کیفی در نظر گرفته می‌شود و به صورت جدول ۵-۱ مشخص می‌گردد.

جدول ۵-۱- فاکتور ریسک نوبت

نوبت	زمان کارکرد
صبح	۶:۰۰ تا ۱۴:۰۰
عصر	۱۴:۰۰ تا ۲۲:۰۰
شب	۲۲:۰۰ تا ۶:۰۰

• نوع سنگ^۲

کانسار گل‌گهر توسط مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی و آذرین شامل انواع شیست، گنایس، آمفیبولیت، مرمر و گرانیتهای میلونیتی در برگرفته شده است. با توجه به ساختار کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه، عیار و سختی کانی‌های موجود به شدت بالا بوده و تأثیر قابل توجهی بر خرابی تجهیزات دارند. در این گزارش نوع سنگ (Z_2) به عنوان یک فاکتور ریسک کیفی بر اساس اطلاعات موجود به دو قسمت کانسنگ و باطله تقسیم می‌شود.

• گروه عملیاتی^۳

در معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان ۴ گروه عملیاتی به صورت دوره‌ای بر اساس برنامه‌ریزی معدن در بخش استخراج مشغول به کار هستند. با توجه به توانایی هر گروه عملیاتی، این تیم‌ها تأثیرات

¹ Shift² Rock Ttype³ Operation Team

مختلفی بر عملکرد و مکانیزم خرابی تجهیزات می‌گذارند. فاکتور ریسک گروه عملیاتی (Z_3) به عنوان یک فاکتور ریسک کیفی در نظر گرفته شده است.

• دما^۱ و نزولات جوی^۲

مجموعه معدنی گل گهر سیرجان دارای آبوهوای خشک و کویری همراه با تغییرات شدید حرارتی در فصول مختلف سال است. حداقل دمای اندازه‌گیری شده در نزدیک‌ترین منطقه به معدن در فصل زمستان ۱۶- درجه سانتی‌گراد و حداکثر دما در فصل تابستان ۴۰+ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. میزان اختلاف درجه حرارت در روز و شب به ۳۵ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد. نزولات بارانی کم (به‌طور متوسط سالیانه ۱۲۰ میلی‌متر) و تبخیر سالیانه زیاد (حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر) نشان‌گر آبوهوای کویری منطقه است. فاکتور ریسک دما (Z_4) و بارندگی (میلیمتر) (Z_5) به عنوان دو فاکتور ریسک پیوسته (کمی) بدون هیچ‌گونه تغییراتی در تحلیل‌ها وارد می‌شوند. از بین فاکتورهای ریسک موجود فقط فاکتور ریسک دما و بارندگی کمی بوده و بقیه فاکتورها کیفی هستند. برای استفاده، فاکتورهای ریسک کیفی باید کمی سازی شوند. در جدول ۵-۲ طبقه‌بندی فاکتورهای ریسک کیفی مشخص شده است. در جدول ۵-۳ نمونه‌ای از داده‌های زمان وقوع خرابی‌ها (TTF) با فاکتورهای ریسک کمی و کیفی ارائه شده است.

قابل ذکر است که تعداد ۴۵۷ داده زمانی به همراه فاکتورهای ریسک جمع آوری شده است. تعداد ۱۳۰ داده به عنوان نمونه در پیوست نمونه‌ای از داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی درج شده است.

جدول ۵-۲- طبقه‌بندی فاکتورهای ریسک کیفی

فاکتورهای ریسک	طبقه‌بندی شده	مقادیر کمی
نوبت (Z_1)	صبح	۱
	عصر	۲
	شب	۳
نوع سنگ (Z_2)	باطله	۱
	کانسنگ	۲
گروه عملیاتی (Z_3)	A	۱
	B	۲
	C	۳
	D	۴

¹ Temperature

² Precipitation

۵-۳-۳- مرحله دوم- بررسی وابستگی فاکتورهای ریسک مشهود

بعد از مرتب کردن داده‌های مورد نیاز برای تحلیل (تشکیل بانک داده)، طبق الگوریتم پیشنهاد شده در شکل ۴-۱ در این مرحله، همبستگی بین فاکتورهای ریسک بررسی شد. به عبارت دیگر، نخستین مرحله بعد از تشکیل بانک داده، ارزیابی همبستگی بین فاکتورهای ریسک است. به عنوان نمونه، در جدول ۴-۵ همبستگی از نوع اسپیرمن بین فاکتورهای ریسک مشهود ناخن باکت محاسبه شده است.

جدول ۴-۵- بخشی از داده‌های TIF همراه با فاکتورهای ریسک خرابی بیل مکانیکی کاترپیلار

شماره خرابی	زمان بین خرابی‌ها (TIF)	وضعیت خرابی	فاکتورهای ریسک			
			نوبت	دما (C)	بارندگی (mm)	نوع سنگ
۱	۵۹/۸۰	۰	۳	۶/۷۴	۲۰/۹۰	۱
۲	۱۴/۲۸	۱	۱	۲/۵۹	۱۱/۰۷	۲
۳	۲۶/۱۹	۱	۲	۱۱/۲۴	۱۹/۱۳	۱
۴	۲۶/۶۸	۱	۳	۱۲/۴۵	۱۸/۱۸	۱
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

جدول ۴-۵- وابستگی بین داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار

همبستگی		نوبت	دما	بارندگی	نوع سنگ	گروه عملیاتی
نوبت	ρ	۱	۰/۱۰۳	-۱/۱۲۷	۰/۱۶۱	-۰/۰۷۶
	p-value	-	۰/۳۰۷	۰/۲۰۶	۰/۱۰۸	۰/۴۵۳
دما	ρ	۰/۱۰۳	۱	-۰/۰۶۹	۰/۱۴۷	-۰/۰۲۲
	p-value	۰/۳۰۷	-	۰/۴۹۱	۰/۱۴۳	۰/۸۲۸
بارندگی	P	-۰/۱۲۷	-۰/۰۶۹	۱	۰/۱۱۵	-۰/۰۹
	p-value	۰/۲۰۶	۰/۴۹۱	-	۰/۲۵۲	۰/۳۷
نوع سنگ	ρ	۰/۱۶۱	۰/۱۴۷	۰/۱۱۵	۱	-۰/۰۶
	p-value	۰/۱۰۸	۰/۱۴۳	۰/۲۵۲	-	۰/۵۵۳
گروه عملیاتی	ρ	-۰/۰۷۶	-۰/۰۲۲	-۰/۰۹	۰/۰۶	۱
	p-value	۰/۴۵۳	۰/۸۲۸	۰/۳۷	۰/۵۵۳	-

۵-۳-۴- محله سوم- ارزیابی مستقل بودن و توزیع یکسان (iid)

بر اساس الگوریتم ارائه شده در شکل ۲-۱ برای تحلیل فرض iid از دو آزمون روند و خودهمبستگی استفاده می‌شود. در صورتی که داده‌ها دارای توزیع یکسان بوده ولی مستقل از هم نباشند، از مدل‌های غیر مانا مانند پواسون ناهمگن (فرایند قانون توانی) استفاده می‌شود (Barabady and Kumar, 2008). در این رساله، برای انجام آزمون روند از روش‌های تحلیلی (آزمون‌های Anderson -

189-Hdbk-MLI, Darling و Laplace) و ترسیمی (TTF-های تجمعی به تعداد وقوع تجمعی خرابی‌ها) و برای آزمون خودهمبستگی از روش‌های ترسیمی (نمودار تابع خودهمبستگی نما) استفاده شده است (Kumar and Klefsjö, 1992; “Minitab® 16.2.0, Help”, 210AD). نتایج سه روش تحلیلی آزمون روند برای اجزاء، در سطح معنی‌داری آزمون‌ها ۵ درصد، در جدول ۵-۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-۵- آزمون روند تحلیلی ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار

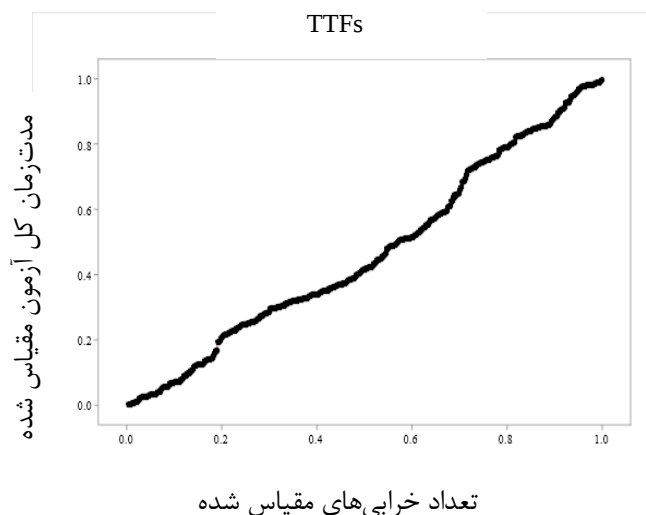
MIL- Hdbk- 189	Laplace's	Anderson- Darling	
۳۵/۱۲	۰/۶۶	۱/۱۲	آماره آزمون
۰/۶۲۱	۰/۵۰۹	۰/۳۰۲	P-Value
بدون روند			نتایج آزمون تحلیلی

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر P -value در اجزاء برای هر دو آماره آزمون تحلیلی روند در سری داده‌های خرابی (TTFs) بزرگ‌تر از سطح معنی‌داری $\alpha=0/05$ است، در نتیجه در این اجزاء فرضیه صفر، نبودن روند پذیرفته می‌شود نتایج آزمون ترسیمی روند نیز در شکل ۵-۳ نشان‌دهنده صحت نتایج حاصل از آزمون تحلیلی است، چراکه در نمودار تقعر یا تحدب چندان نسبت به قطر نمودار (خط صاف) مشاهده نمی‌شود.

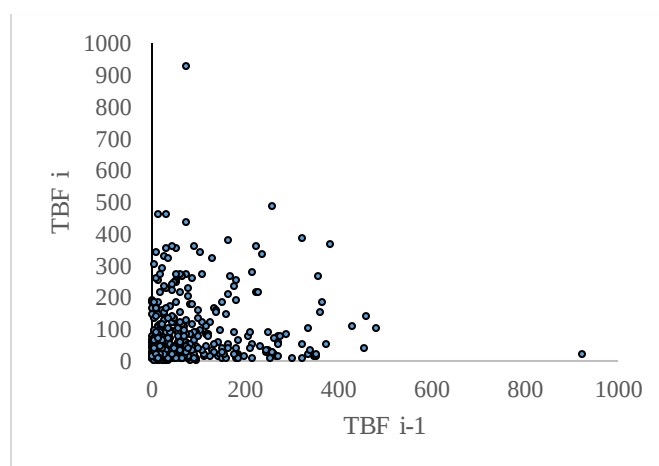
روش ترسیمی ارزیابی خودهمبستگی اجزاء در شکل ۵-۴ نشان داده شده است. همان‌طوری که دیده می‌شود هیچ خودهمبستگی در داده‌ها به چشم نمی‌خورد؛ بنابراین، نتایج ارزیابی خودهمبستگی با استفاده از آزمون فرضیه صفر، عدم وجود خودهمبستگی در مورد داده‌های زمانی ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار را تأیید می‌کند. بنابراین با توجه به نتایج آزمون‌های روند و خودهمبستگی فرض iid در مورد TTF ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار پذیرفته شده است.

۵-۳-۵- مرحله سوم - ارزیابی فرض همگنی برای فاکتورهای ریسک نامشهود

در بسیاری از موارد داده‌های خرابی از بخش‌های مختلف، در قالب‌های گوناگون، گسترده در زمان‌های مختلف و با شرایط عملیاتی مختلف جمع‌آوری می‌شوند که این مسائل برخی ناهمگونی را در بانک داده به دنبال دارد. این نوع ناهمگونی می‌تواند ناشی از فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود باشد که منجر به ناهمگنی مشهود یا نامشهود می‌گردد و تشخیص این ناهمگنی با استفاده از آزمون‌های آماری مناسب امکان‌پذیر است.



شکل ۳-۵ - آزمون ترسیمی روند ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار



شکل ۴-۵ - روش ترسیمی ارزیابی خودهمبستگی ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار

روش‌های مختلف برای تشخیص این ناهمگنی ارائه شده است. از بین آن‌ها اخیراً آزمون نرخ درست‌نمایی بیشینه (LR)^۱، معیار اطلاعاتی آکائیکه^۲ (AIC) و معیار اطلاعاتی بیزین^۳ (BIC) آزمون‌های رایج برای بررسی فرض مقابل (H_1) مبنی بر حضور ناهمگنی در برابر فرض صفر (H_0) مبنی بر عدم حضور ناهمگنی ($\theta = 0$) می‌باشند. در کل آزمون AIC برای مقادیر کوچک ناهمگنی به خوبی عمل کرده در حالی که BIC برای مقادیر درشت‌تر عملکرد مناسب خواهد داشت (Brewer et al., 2016; Garmabaki, Ahmadi, Block, et al., 2016; Lawless, 1987).

¹ - A likelihood Ratio Test

² - Akaike Information Criterion

³ - Bayesian Information Criterion

در این مرحله طبق الگوریتم پیشنهادی شکل ۴-۱ از رویکرد آزمون LR استفاده می‌شود. این آزمون فرض متقابل: عدم حضور ناهمگنی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. اگر تابع نرخ مخاطره اساسی ویبول یا مدل فرایند قانون توانی (PLP) باشد نرخ درستنمایی بیشینه به صورت زیر خواهد بود:

$$R = 2 \left(\ln L(\hat{\lambda}, \hat{\beta}, \hat{\eta}, \hat{\theta}) - \ln L(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_0, \hat{\eta}_0, 0) \right) \quad (۱-۵)$$

در این رابطه $\hat{\lambda}$ و $\hat{\beta}$ پارامترهای تابع اساسی و $\hat{\eta}$ ضریب رگرسیون برای فاکتورهای ریسک مشهود و $\hat{\theta}$ به عنوان درجه ناهمگنی تعریف می‌شود (Garmabaki, Ahmadi, Block, et al., 2016). این پارامترها از طریق بیشینه سازی تابع درستنمایی کامل تخمین زده می‌شوند. از آنجایی که $\hat{\eta} = 0$ در درون فضای پارامتر قرار ندارد ($\hat{\eta} < 0$ مجاز نیست)، لذا R دارای توزیع کای-دوی (χ_1^2) مجانب نرمال نیست. در حقیقت مجانب $\hat{\eta}$ دارای توزیع کای-دو با درجه آزادی یک (χ_1^2) با جرم احتمال ۰/۵ در $R=0$ است. این یعنی در سطح اطمینان ۵٪ فرض صفر: عدم وجود ناهمگنی، رد خواهد شد اگر $R \geq 2.706$. علاوه بر این تحت استراتژی کمینه تعمیرات مدل PLP را می‌توان به عنوان تابع شدت بکار برد. تحت فرض مدل PLP به عنوان تابع شدت خرابی برای بررسی وجود مقدار معناداری ناهمگنی در واحدها (زیرسیستم و اجزاء) یک فرایند سه مرحله‌ای آزمون LR می‌توان استفاده نمود (Garmabaki, Ahmadi, Block, et al., 2016):

- در مرحله اول فرض صفر برابر است با: $H_0: \lambda_1 = \lambda_2, \lambda_m = \lambda_0, \beta_1 = \beta_2, \beta_m = \beta_0$ که در برابر فرض یک یا متقابل: $H_1: \lambda_1 \neq \lambda_2, \lambda_m \neq \lambda_0, \beta_1 \neq \beta_2, \beta_m \neq \beta_0$ آزمون می‌شود.
- در مرحله دوم و سوم نیز λ معمول، β غیرمعمول و λ غیرمعمول و β معمول باید به ترتیب به دست آیند (Giorgio et al., 2014).

برای ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار از معدن آهن گل گهر سیرجان مقدار R برابر است با:

$$R = 2 \left(\ln L(\hat{\lambda}, \hat{\beta}, \hat{\eta}, \hat{\theta}) - \ln L(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_0, \hat{\eta}_0, 0) \right) = 23.56 \quad (۲-۵)$$

مقدار P-Value برای $R = ۲۳/۵۶$ برابر صفر است؛ که بیانگر وجود فاکتور ریسک نامشهود مؤثر بر قابلیت اطمینان ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار است و لذا نتیجه تحلیل در الگوریتم شکل ۴-۱ به سمت چپ یعنی مدل MPH یا EMPH هدایت می‌شود.

۵-۳-۶- مرحله سوم - آزمون فرض متناسب بودن

در این مرحله طبق الگوریتم پیشنهادی شکل ۴-۱ باید برقراری فرض متناسب بودن (PH) مورد ارزیابی قرار گیرد تا از عدم وابستگی به زمان فاکتورهای ریسک مشهود اطمینان حاصل نمود. برای این منظور می‌توان از آزمون فرض GOF استفاده نمود که با ارائه آماره استاتیک و P-Value به

ارزیابی فرض PH برای هر یک از فاکتورهای ریسک می‌پردازد. برای این آزمون روش‌های مختلفی وجود دارد که روش گرافیکی یکی از پرکاربردترین‌ها است. مشکل این روش ارائه تصویر بصری از موازی بودن نرخ‌های مخاطره است که باید از آن فرض متناسب بودن را نتیجه‌گیری کرد. در این روش پس از ترسیم نرخ مخاطره به ازای مقادیر مختلف فاکتورهای ریسک مقایسه آن‌ها به صورت بصری برای تعیین موازی بودن آن است، حال مشکل این است که منظور از "موازی بودن چه نوع موازی بودن است؟" چراکه این موضوع منجر به نتیجه‌گیری جداگانه بر اساس منطق‌های مختلف خواهد شد. مشکل بعدی در رابطه با لایه‌بندی فاکتورهای ریسک پیوسته مانند بارندگی یا دما خواهد بود. چراکه لایه‌بندی بیشتر لایه را نازک‌تر نموده و داده داخل آن کمتر خواهد شد. مشکل سوم نیز درباره نحوه ارزیابی فرض PH برای چندین فاکتور ریسک به طور هم‌زمان است. بدین منظور آزمون GOF تحلیلی برای ارزیابی این فرض استفاده می‌شود. در این رساله از آزمون هارل و لی^۱ که حالت تغییر یافته از آزمون شوئنفلد (سال ۱۹۸۲) بوده و معروف به آزمون "باقیمانده‌های شوئنفلد" استفاده می‌شود. این روش به خاطر ارائه نتایج بر اساس P-Value جذاب‌تر بوده و ارزیابی راحت‌تری با استفاده از منطق ریاضی ارائه می‌دهد. یک P-Value معنادار بزرگ‌تر از ۰/۱ نشان‌دهنده قابل قبول بودن فرض PH بوده در حالی که یک P-Value کوچک‌تر از ۰/۰۵ برای یک فاکتور ریسک نشان می‌دهد که فرض صفر برقرار نیست (فاکتورهای ریسک وابسته به زمان هستند). به عبارت دیگر، زمانی فرض صفر قابل قبول است که باقیمانده‌های شوئنفلد مستقل از زمان باشند ($H_0: \rho = 0$)، در صورت رد فرض صفر، فرض PH نیز رد خواهد شد. در این جا ρ ضریب همبستگی را نشان می‌دهد (Kleinbaum and Klein, 2012).

نتایج آزمون برای فاکتورهای ریسک مختلف به صورت جدول ۵-۶ تنظیم شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود، P(PH)-value برای هیچ‌یک از فاکتورهای ریسک در سطح معناداری ۵ درصد معنادار نیست. بنابراین فرض PH برای تمامی فاکتورهای ریسک برقرار است. برای اطمینان از نتایج به دست آمده از آزمون GOF، فرض PH برای فاکتورهای ریسک کیفی به صورت گرافیکی نیز ارزیابی شده است. یکی از علل پرکاربرد بودن این دسته از روش‌ها، مقایسه نمودارهای منفی لگاریتم قابلیت اطمینان یا همان نمودار $-\ln(-\ln R)$ برای مقادیر مختلف فاکتورهای ریسک است. این نمودار با دو بار لگاریتم طبیعی گرفتن از مقادیر قابلیت اطمینان به دست آمده و مقادیر قابلیت اطمینان متغیر در بازه $[0, 1]$ را به مقادیر نمودار $-\ln(-\ln R)$ در بازه $[-\infty, +\infty]$ منتقل می‌کند.

¹ - Harrel and Lee

جدول ۵-۶- مقادیر P-Value برای ارزیابی فرض PH فاکتورهای ریسک

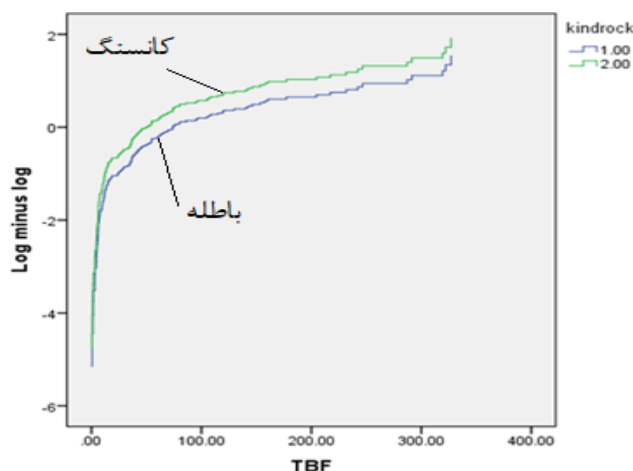
فاکتورهای ریسک	ρ	P-Value
نویت	۰/۰۰۴۶	۰/۹۲
دما	-۰/۰۷۵	۰/۱۳
بارندگی	۰/۰۰۱۲	۰/۹۸
نوع سنگ	۰/۰۱۴۲	۰/۷۷
گروه عملیاتی	۰/۰۳۵۳	۰/۴۷
آزمون کل	-	۰/۷۳

ارزیابی فرض متناسب بودن به این شکل است که در صورت رسم نمودارهای لگاریتمی قابلیت اطمینان مربوط به مقادیر مختلف یک فاکتور ریسک در یک نمودار مشترک این نمودارها به صورت تقریباً موازی با یکدیگر قرار گیرند. نمودار $-\ln(-\ln R)$ برای فاکتور ریسک "نوع سنگ" در شکل ۵-۵ ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می شود، نمودار قابلیت اطمینان برای هر دو نوع سنگ در طول زمان تقریباً به صورت موازی حرکت کرده است. لذا فرض متناسب بودن یا مستقل از زمان بودن فاکتورهای ریسک مشهود برای ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار را می توان پذیرفت. لذا طبق الگوریتم ارائه شده در شکل ۴-۱ از بین مدل MPHMM و EMPHMM برای توصیف رفتار خرابی های ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار انتخاب شده و مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی برای تابع قابلیت اطمینان برازش می شود.

۵-۳-۷- برازش مدل مناسب برای قابلیت اطمینان ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلار

با توجه به نتایج حاصل از آزمون های متناسب و همگنی مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی (MPHMM) برای تجزیه و تحلیل داده های خرابی پیشنهاد می شود. نرم افزارهای که قابلیت تخمین پارامترهای مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی (MPHMM) را دارند شامل نرم افزارهای R, STATA, SAS و ... می باشند. STATA نرم افزاری قدرتمند و چند منظوره برای پردازش داده های آماری است که تمام امکانات مورد نیاز برای تحلیل، مدیریت و سازمان دهی داده ها با استفاده از نمودارهای گرافیکی را در بستری یکپارچه فراهم می آورد. این نرم افزار از صدها حالت تحلیل آماری نظیر تحلیل خطی، رگرسیون، خوشه ای، تعمیم برآورد، چند سطحی، آنووا، مانووا، آریما و ... پشتیبانی می کند و قادر به مدیریت کامل داده ها، ترکیب، گروه بندی، تغییر پارامترها، حذف داده های تکراری و ناکارآمد

به شکلی کاملاً همه جانبه می‌باشد. Stata یک محیط توسعه قدرتمند برای برنامه‌نویسی شی‌گرا مبتنی بر ماتریسها و انجام عملیات پیچیده بر روی آنها نیز در اختیار شما قرار می‌دهد.



شکل ۵-۵- ارزیابی فرض PH نوع سنگ برای ناخن باکت بیل مکانیکی به روش گرافیکی

برای ارزیابی بیشتر و مقایسه نتایج حاصله در صورت عدم پیروی از الگوریتم ارائه‌شده در این رساله دودسته مدل به ترتیب:

الف. مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی MPMH

ب. مدل نرخ مخاطرات متناسب PHM

برای قابلیت اطمینان برازش می‌شود. در هر مرحله نیز از دو معیار اطلاعات اکائیکه^۱ (AIC) و بیزین^۲ (BIC) برای انتخاب مدل مناسب استفاده می‌شود. این دو معیار مبتنی بر اطلاعات بوده و از طریق مقایسه مقدار درست‌نمایی بیشینه به‌طور کلاسیک برای انتخاب مدل مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دو معیار به‌صورت زیر فرموله می‌شوند:

$$AIC = -2 \times \ln(\text{likelihood}) + 2 \times k \quad (۳-۵)$$

$$BIC = -2 \times \ln(\text{likelihood}) + \ln(N) \times k \quad (۴-۵)$$

که در این رابطه k ؛ نشان‌دهنده تعداد پارامترهای تخمین زده شده و N ؛ تعداد مشاهدات (خرابی‌ها) را نشان می‌دهد؛ که در هنگام تحلیل نتایج هر دو معیار باهم مورد بررسی قرار می‌گیرد چراکه BIC محافظه‌کارتر از AIC بوده و AIC دارای برخی مشکلات است. هر دو معیار به‌عنوان سنجده‌هایی که توانایی ترکیب برازش^۳ از طریق محاسبه مقدار منفی $(-2 \times \ln(\text{likelihood}))$ و پیچیدگی^۴ از طریق محاسبه مقادیر مثبت $(2 \times k)$ برای AIC و $(\ln(N) \times k)$ برای BIC مطرح می‌باشند. نحوه برازش

^۱ - Akaike Information Criterion

^۲ - Bayesian Information Criterion

^۳ - Fit

^۴ - Complexity

مدل مناسب به این صورت است که مدلی دارای کوچکترین مقادیر معیار اطلاعاتی AIC و BIC مناسبترین انتخاب خواهد بود. اطلاعات بیشتر در رابطه با این دو معیار را می‌توان در منابع مناسبترین انتخاب خواهد بود. اطلاعات بیشتر در رابطه با این دو معیار را می‌توان در منابع (Akaïke, 1998; Raftery, 1995; Sakamoto *et al.*, 1986; Schwarz, 1978) یافت.

۵-۳-۷-۱- مرحله سوم - مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی MPHM

تابع قابلیت اطمینان درواقع بیانگر رفتار زمان‌های کارکرد دستگاه است که با احتمال و فراوانی وقوع خرابی سروکار دارد که این احتمال جدای از رفتار زمانی به‌طور مشخصی با رفتار محیطی و سایر پارامترها در ارتباط است. در صنعت معدنکاری اطلاعات خرابی‌ها از بخش‌های مختلف، در قالب‌های گوناگون با زمان‌های مختلف و شرایط عملیاتی متفاوت جمع‌آوری می‌شوند. این مسائل ناهمگنی در اطلاعات گردآوری‌شده و بانک داده را به دنبال خواهد داشت. بخشی از ناهمگنی به کمک فاکتورهای ریسک مشهود از محاسبات حذف می‌شوند ولی مشکل از جایی نشأت می‌یابد که واردکردن تمامی شرایط محیطی مؤثر امکان‌پذیر نیست؛ زیرا برخی عوامل مانند تأثیر تصمیمات مدیریتی، برندهای مختلف، تخصص‌های اپراتور، ... یا اصلاً قابل ثبت نبوده و امکان کمی‌سازی ندارند و برخی باوجود مشهود بودن ثبت نشده و یا به‌درستی طبقه‌بندی نمی‌شوند. این دسته از عوامل محیطی که منجر به ناهمگنی در داده‌ها می‌شوند به‌عنوان فاکتورهای ریسک نامشهود دسته‌بندی می‌شوند. این مدل تحت عنوان مدل نرخ مخاطرات مرکب (MPHM) شناخته می‌شود. این مدل درواقع ترکیبی از مدل نرخ مخاطرات متناسب PHM با در نظر گرفتن شکنندگی است. این مدل به‌طور کلی دربرگیرنده تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بر داده‌های زمانی است که این تأثیر به ضریب α که دارای تابع گاما است بر تابع PHM افزوده‌شده و درنهایت رابطه قابلیت اطمینان تابع MPHM به‌صورت رابطه (۵-۵) است (Gutierrez, 2002):

$$R_{\theta}(t; z; z(t)) = [1 - \theta \ln\{R(t; z; z(t))\}]^{-1/\theta} \quad (5-5)$$

در این مدل نیز برای تعیین تابع اساسی سراغ آماره‌های AIC و BIC رفته که در جدول ۷-۵ مقادیر این آماره‌ها برای دو تابع ویبول و نمایی مشخص شده است. در بین توابع اشاره‌شده نمایی-MPHM کمترین مقدار را داشته و لذا مناسب‌ترین برآزش را دارد.

جدول ۷-۵ - مقادیر GOF توابع رگرسیون با شکنندگی برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی

مدل	AIC	BIC
Weibull PH-Farilty	۱۵۲۷/۶۱۳	۱۵۶۴/۷۱۵
Exponential PH-Farilty	۱۵۲۵/۶۱۴	۱۵۵۸/۵۹۴

پارامتر شکل و مقیاس تابع اساسی در جدول ۸-۵ محاسبه و ارائه شده است.

جدول ۵-۸- پارامتر شکل و مقیاس تابع نمایی-MPHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی

اجزاء	تابع	مقادیر پارامترها	
		پارامتر شکل	پارامتر مقیاس
ناخن باکت	نمایی	۱	۹۷/۲۳۲

در جدول ۵-۹ مقادیر ضرایب فاکتورهای ریسک، پارامترهای تابع اساسی و مقدار ناهمگنی تابع شکنندگی محاسبه شده است.

جدول ۵-۹- پارامترهای تابع نمایی-MPHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی

فاکتورهای ریسک	ضرایب فاکتورهای ریسک	خطا استاندارد	η	p - value	95% Con. Interval
نوبت	۰/۰۱۶	۰/۰۷۵	۰/۲۲۰	۰/۸۲۵	-۰/۱۳۰ ۰/۱۶۳
دما	-۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	-۰/۴۳۰	۰/۶۷۰	-۰/۰۱۸ ۰/۰۱۲
بارندگی	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	-۰/۷۳۰	۰/۴۶۸	-۰/۰۱۷ ۰/۰۰۸
نوع سنگ	۰/۶۰۴	۰/۱۳۴	۴/۵۲۰	۰/۰۰۰	۰/۳۴۲ ۰/۸۶۶
گروه عملیاتی	-۰/۰۸۴	۰/۰۵۶	-۱/۴۹۰	۰/۱۳۵	۰/۱۹۳ ۰/۰۲۶
LR = ۲۳/۵۶		P-Value = ۰		$\theta = ۰/۲۹۷$	

مطابق جدول ۵-۹، در ستون اول (از سمت راست)، فاکتورهای ریسک وارد شده است. در ستون دوم، ضرایب رگرسیونی محاسبه شده برای هر کدام از فاکتورهای ریسک، ستون سوم، مقدار خطای استاندارد ضریب محاسبه شده و ستون چهارم مقدار ضریب آماره آزمون η با فرض صفر را نشان می‌دهد که در مراحل بعدی برای بررسی تأثیر فاکتورهای ریسک در رگرسیون به کار خواهد رفت. مهم‌ترین ستون، ستون پنجم است که فاکتورهای ریسک مؤثر را تعیین می‌کند. در صورتی که اندازه P-Value محاسبه شده برای آزمون η بیشتر از ۰/۰۵ باشد فرض صفر قبول خواهد شد، فاکتور ریسک مؤثر نیست. در غیر این صورت، فاکتور ریسک مؤثر است. مطابق جدول ۵-۹ فاکتور ریسک نوع سنگ به عنوان فاکتور ریسک مؤثر بر داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی انتخاب می‌شوند و بقیه فاکتورهای ریسک حذف می‌شوند. لذا تابع قابلیت اطمینان نمایی-MPHM با در نظرگیری فاکتورهای ریسک نوع سنگ به صورت رابطه (۵-۶) خواهد بود:

$$R_{\theta}(t; z) = \left[1 - \theta \ln \left\{ \left(e^{-\left(\frac{t}{scale}\right)^{shape}} \right)^{\exp(\sum_{j=1}^n \omega_j z_j)} \right\} \right]^{-1/\theta} = \left[1 - \theta \ln \left\{ \left(e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}} \right)^{\exp(\sum_{j=1}^n \omega_j z_j)} \right\} \right]^{-1/\theta} \quad (۵-۶)$$

که پس از جایگذاری مقادیر به صورت رابطه (۵-۷) خواهیم داشت:

$$R_{\theta}(t; z) = \left[1 - 0.297 \times \ln \left\{ \left(e^{-\left(\frac{t}{97.232}\right)^1} \right)^{\exp(0.604 z_2)} \right\} \right]^{-1/0.297} \quad (7-5)$$

در این مدل مطابق جدول ۵-۱۰ دو سناریو ارائه شده است.

جدول ۵-۱۰- سناریوهای تابع نمایی MPHM-

فاکتور ریسک	نوع سنگ	Exp(αz)
سناریو ۱	۱	۱/۸۳۰
سناریو ۲	۲	۳/۳۴۸

$$R_{\theta}(t; z) = \left[1 - 0.297 \times \ln \left\{ \left(e^{-\left(\frac{t}{97.232}\right)^1} \right)^{(1.83)} \right\} \right]^{-1/0.297} \quad (8-5)$$

$$R_{\theta}(t; z) = \left[1 - 0.297 \times \ln \left\{ \left(e^{-\left(\frac{t}{97.232}\right)^1} \right)^{(3.348)} \right\} \right]^{-1/0.297}$$

در این مرحله برای ارزیابی بیشتر و مقایسه با روش‌های فعلی از روش کلاسیک برای بررسی نتایج حاصله مدل شکنندگی (تابع نمایی MPHM-) استفاده شده است. منظور از توابع کلاسیک حالتی است از تاثیر فاکتورهای ریسک صرف نظر شده و تنها داده‌های زمانی مد نظر می‌باشد. در این قسمت از دو مدل نمایی و ویبول برای برازش در نظر گرفته شده است که طبق جدول ۵-۱۱ مقادیر AIC و BIC برای این توابع محاسبه شده است. در این بین تابع نمایی با ۱۶۹/۴۳ و ۱۷۱/۵۳ برای AIC و BIC کمترین مقادیر را داشته و بهترین تابع برای توصیف رفتار خرابی می‌باشد.

جدول ۵-۱۱- مقادیر GOF توابع کلاسیک برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی

توابع	AIC	BIC
Weibull	۱۷۱/۴۳۴	۱۷۵/۶۲۲
Exponential	۱۶۹/۴۳۹	۱۷۱/۵۳۳

در جدول ۵-۱۲ نیز پارامتر تابع نمایی به صورت مقدار ثابت با ضریب ۴/۳۸۶- مشاهده می‌شود.

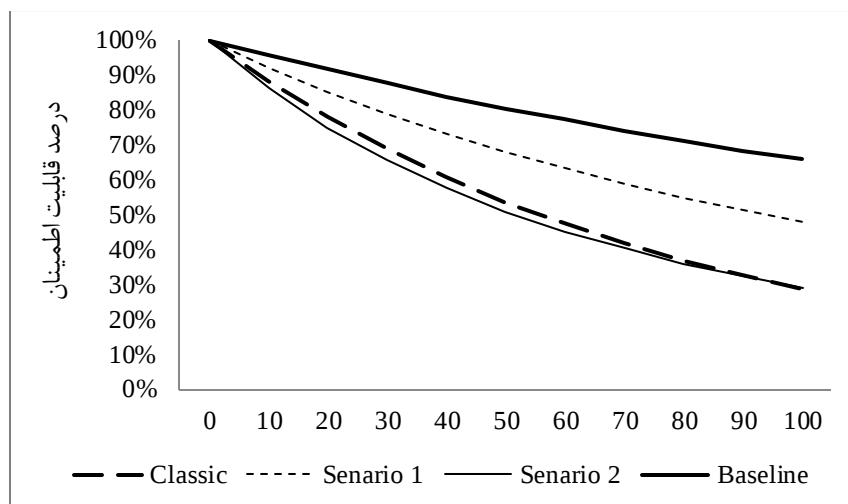
جدول ۵-۱۲- پارامترهای تابع کلاسیک نمایی برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی

	ضرایب فاکتورهای ریسک	خطا استاندارد	η	p – value	95% Con. Interval
_cons	-۴/۳۸۶	۰/۰۴۸	-۹۰/۷۴۰	۰/۰۰۰	-۴/۴۸۱ -۴/۲۹۱
Lambda	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱	۲۰/۶۹۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۱ ۰/۰۱۴

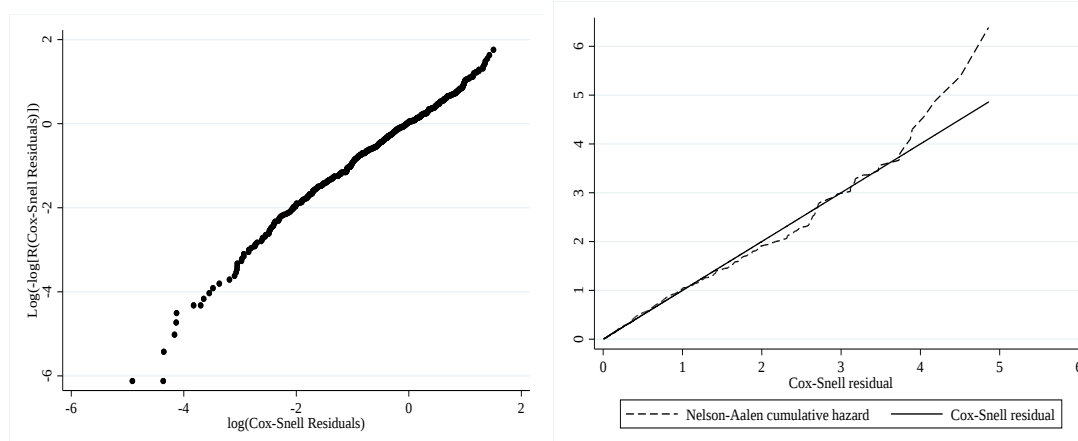
در نهایت رابطه قابلیت اطمینان تابع کلاسیک به صورت رابطه (۹-۵) است:

$$R(t; z) = e^{-\frac{t}{\left(\frac{1}{0.012}\right)}} \quad (9-5)$$

در شکل ۵-۶ مقادیر قابلیت اطمینان محاسبه شده بر اساس رابطه (۵-۸) و (۵-۹) جدول ۵-۱۰ و جدول ۵-۱۲ برای سه سناریوی، تابع کلاسیک و ۱۰۰ ساعت کارکرد اجزاء محاسبه شده است.



شکل ۵-۶- نمودار قابلیت اطمینان تابع نمایی ExMPHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی پس از محاسبه، قابلیت اطمینان سناریوها در پایان ۵۰ ساعت کارکرد، به ترتیب ۸۰/۵۵ (سناریو پایه بدون تأثیر فاکتورهای ریسک مؤثر)، ۶۸ (سناریو اول با میزان تأثیر ۱/۸۳۰ فاکتور ریسک مؤثر نوع سنگ بر تابع قابلیت اطمینان)، ۵۰/۹۰ (سناریو دوم با میزان تأثیر ۳/۳۴۸ فاکتور ریسک مؤثر نوع سنگ بر تابع قابلیت اطمینان)، ۵۳/۶۶ (مدل کلاسیک بدون تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود) درصد است. برای تعیین تابع اساسی مدل شکنندگی سراغ آماره‌های AIC و BIC رفته که در جدول ۵-۷ مقادیر این آماره‌ها مشخص شده است. در بین توابع اشاره شده مدل نمایی ExMPHM با مقادیر ۱۵۲۵/۶۱۴ و ۱۵۵۸/۵۹۴ برای AIC و BIC کمترین مقدار را داشته و لذا مناسب‌ترین برازش را دارد. همچنین یکی از مؤثرترین راه‌ها برای حصول اطمینان از مناسب بودن مدل برازش شده، استفاده از باقیمانده‌ها است. لذا نمودار باقیمانده کاکس-اسنل برای مدل نمایی ExMPHM در شکل ۵-۷ رسم شده است. اگر تابع مخاطره از خط ۴۵ درجه پیروی کند، می‌دانیم که تقریباً دارای یک توزیع نمایی با میزان مخاطره یک است و مدل به خوبی متناسب با داده‌ها برازش شده است. همچنین مناسب‌ترین مدل می‌تواند مدلی باشد که نمودار باقیمانده آن به خط نیمساز نزدیک‌تر باشد. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که مدل نمایی ExMPHM به‌طور مناسبی به داده‌ها برازش شده است.



شکل ۵-۷- نمودار باقیمانده کاکس-اسنل مدل نمایی-ExMPHM

۵-۳-۲- مرحله سوم- مدل نرخ مخاطرات متناسب PHM

مدل های رگرسیونی از جمله رویکردهای آماری هستند که قادر به تحلیل تأثیرات چندین پارامتر مستقل بر یک پارامتر وابسته می باشند. در این مرحله از تابع نیمه پارامتریک PHM با توابع اساسی مختلف برای توصیف رفتار خرابی ها استفاده می شود. برای این مدل نیز همان طور که ذکر شد از دو معیار AIC و BIC برای انتخاب بهترین تابع اساسی استفاده می شود. در جدول ۵-۱۳ مقادیر GOF برای توابع ویبول- PHM و نمایی- PHM محاسبه شده است. تابع ویبول- PHM با کمترین مقادیر مناسب ترین برازش را دارند.

جدول ۵-۱۳- مقادیر GOF توابع رگرسیون برای داده های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی

مدل	AIC	BIC
Weibull PH	۱۵۳۰/۸۵	۱۵۶۳/۸۳
Exponential PH	۱۵۴۷/۱۷۵	۱۵۷۶/۰۳۳

پارامتر شکل و مقیاس تابع اساسی در جدول ۵-۱۴ محاسبه و ارائه شده است.

جدول ۵-۱۴- پارامتر شکل و مقیاس تابع ویبول- PHM برای داده های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی

اجزاء	تابع	مقادیر پارامترها	
		پارامتر شکل	پارامتر مقیاس
ناخن باکت	ویبول	۰/۸۵۹	۱۱۵/۸۹۶

در جدول ۵-۱۵ نیز پارامترهای تابع ویبول- PHM و ضرایب فاکتورهای ریسک مشاهده می شود.

جدول ۵-۱۵- پارامترهای تابع ویبول PHM- برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی

فاکتورهای ریسک	ضرایب فاکتورهای ریسک	خطا استاندارد	η	p - value	95% Con. Interval
نوبت	۰/۰۱۰	۰/۰۶۰	۰/۱۷۰	۰/۸۶۶	-۰/۱۰۸ - ۰/۱۲۸
دما	-۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	-۱/۰۵۰	۰/۲۹۵	-۰/۰۱۸ - ۰/۰۰۵
بارندگی	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	-۰/۷۷۰	۰/۴۳۹	-۰/۰۱۴ - ۰/۰۰۶
نوع سنگ	۰/۵۱۵	۰/۱۰۹	۴/۷۴۰	۰/۰۰۰	۰/۳۰۲ - ۰/۷۲۸
گروه عملیاتی	۰/۰۶۹	۰/۰۴۴	-۱/۵۷۰	۰/۱۱۶	-۰/۱۵۶ - ۰/۰۱۷

مطابق جدول ۵-۱۵ مهم‌ترین ستون، ستون پنجم است که فاکتورهای ریسک مؤثر را تعیین می‌کند. در صورتی که اندازه P-Value محاسبه شده برای آزمون η بیشتر از ۰/۰۵ باشد فرض صفر قبول خواهد شد، فاکتور ریسک مؤثر نیست. در غیر این صورت، فاکتور ریسک مؤثر است. مطابق جدول ۵-۱۵ فاکتور ریسک نوع سنگ به عنوان فاکتور ریسک مؤثر بر داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی انتخاب می‌شوند و بقیه فاکتورهای ریسک حذف می‌شوند. لذا تابع قابلیت اطمینان ویبول PHM- با در نظرگیری فاکتورهای ریسک نوع سنگ به صورت زیر خواهد بود:

$$R(t, z) = \left(\exp\left(-\left(\frac{t}{115.896}\right)^{0.859}\right) \right)^{\exp(0.515Z_2)} \quad (۱۰-۵)$$

در این مدل مطابق جدول ۵-۱۶، دو سناریو ارائه شده است.

جدول ۵-۱۶- سناریوهای تابع ویبول PHM-

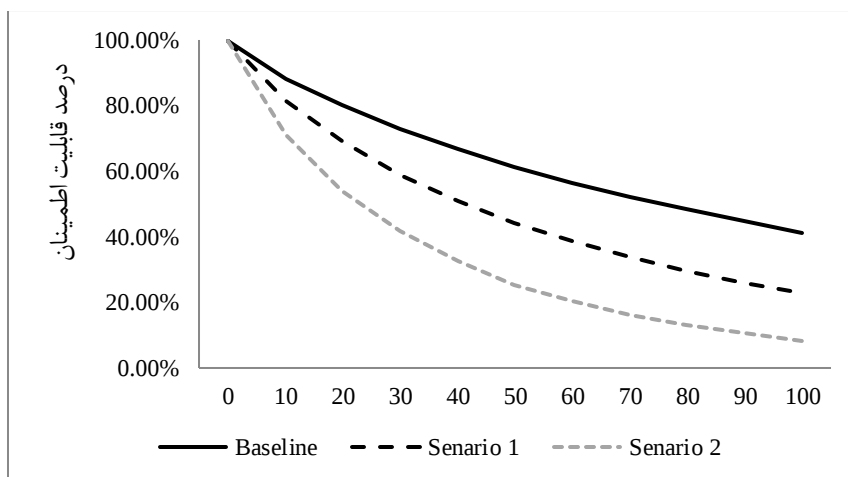
فاکتور ریسک	نوع سنگ	Exp(αz)
سناریو ۱	۱	۱/۶۷۳
سناریو ۲	۲	۲/۸۰۰

در شکل ۵-۸ مقادیر قابلیت اطمینان محاسبه شده بر اساس رابطه (۵-۱۱) و جدول ۵-۱۶ برای سه سناریوی ۱۰۰ ساعت کارکرد اجزاء محاسبه شده است.

$$R(t, z) = \left(\exp\left(-\left(\frac{t}{115.896}\right)^{0.859}\right) \right)^{1.673} \quad (۱۱-۵)$$

$$R(t, z) = \left(\exp\left(-\left(\frac{t}{115.896}\right)^{0.859}\right) \right)^{2.800}$$

پس از محاسبه، قابلیت اطمینان سناریوها در پایان ۵۰ ساعت کارکرد، به ترتیب ۶۱/۵۲، ۴۳/۳۵ و ۶۶/۲۵ درصد است.



شکل ۵-۸- نمودار قابلیت اطمینان تابع ویبول-WePHM برای داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی

۵-۳-۸- مرحله چهارم و پنجم - مدیریت قطعات یدکی

مدیریت قطعات یدکی نقش عمده‌ای در مدیریت عملیاتی مدرن داشته و برقراری توازن برای آن الزامی است. در یک سمت موجودی زیاد قطعات یدکی رکود سرمایه بزرگی به همراه داشته و از سمت دیگر موجودی کم انبار ممکن است. خدمات‌رسانی (پشتیبانی) ضعیف برای مشتری یا فعالیت‌های ضروری با هزینه هنگفت را به بار آورد. لذا پس از تصمیم‌گیری در مورد نوع و کیفیت قطعات یدکی که باید در انبار نگهداری شود، سؤال بعدی، میزان قطعات یدکی نگهداری شونده در انبار است. همچنین تجدید قطعات بر مبنای نرخ مصرف مورد انتظار قطعات یدکی و ریسک اقتصادی مرتبط با تهی بودن انبار در چرخه تجدید انبار، انجام خواهد پذیرفت.

مطابق الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴-۱ پس از طی آزمون‌های وابستگی به زمان و همگنی مدل مناسب برای قابلیت اطمینان برازش شده و پارامترهای آن تخمین زده شده است؛ که در این رساله برای مقایسه نتایج و بررسی‌های بیشتر دو مدل در نظر گرفته شد که اولین مدل یعنی مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی (MPHM) با در نظرگیری تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود به عنوان مناسب‌ترین حالت انتخاب شد. در این بخش طبق محاسبه قابلیت اطمینان، تخمین قطعات یدکی و مدیریت انبار برای دو مدل انجام می‌شود:

الف. مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی MPHM

ب. مدل نرخ مخاطرات متناسب PHM

۵-۳-۸-۱- مدیریت قطعات یدکی: مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی MPHM

همان‌طور که اشاره شد محققین با استفاده از PHM به تأثیر انکارناپذیر شرایط محیطی مؤثر در تخمین تعداد قطعات یدکی پی برده و نتایج حاصل را بیشتر به شرایط واقعی نزدیک کردند ولی همان

نقص مدل PHM در عدم توانایی تحلیل فاکتورهای ریسک نامشهود در تخمین‌های خود وجود داشت. از این رو در ادامه به منظور رفع این نقص تلاش بر این نکته است که رویکردی از تخمین قطعات یدکی ارائه شود که هر سه آیت (زمان، فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود) را در برگیرد. با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های متناسب و همگنی مدل نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی (MPHM) برای توصیف رفتار خرابی و تخمین تعداد قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان بر مبنای تابع (۵-۷) محاسبه شده است. حال برای تعیین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز (N_t) در طول یک سال با کارکرد روزانه متوسط ۲۱/۵ ساعت و ۳۶۵ روز در سال، زمان کارکرد متوسط ۷۶۶۸ ساعت با تعیین مقدار عددی روابط (۴-۱) و (۴-۲) و بر اساس رابطه (۲-۳۰) با احتمال کمبود ۵ درصد برای سه سناریو در جدول ۵-۱۰ به صورت جدول ۵-۱۷ و شکل ۵-۹ خواهد بود. برای نمونه مقادیر عددی دو پارامتر $\sigma(T)$ و $\bar{T}$ بر اساس رابطه (۵-۱۲) برای سناریو اول محاسبه می‌گردد.

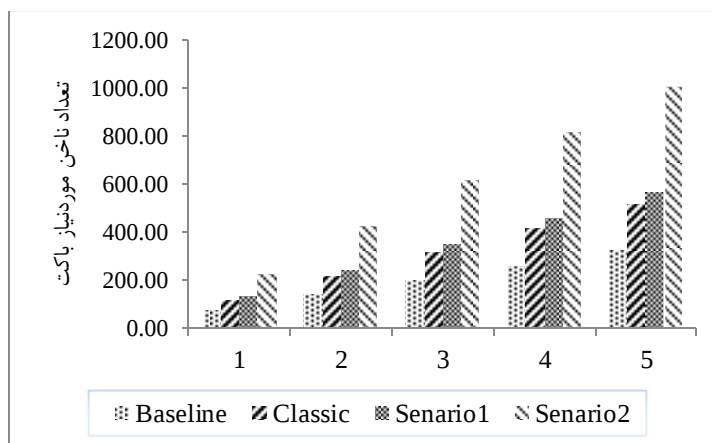
$$\bar{T} = \int_0^{\infty} R(t) dt \Rightarrow \bar{T} = \int_0^{\infty} \left[1 - 0.297 \times \ln \left\{ \left(e^{-\left(\frac{t}{97.232} \right)^1} \right)^{(1.83)} \right\} \right]^{-1/0.297} dt = 75.59 \quad (5-12)$$

$$\begin{aligned} \text{Vor}(t) &= 2 \int_0^{\infty} tR(t) dt - \bar{T}^2 \Rightarrow \text{Vor}(t) \\ &= 2 \int_0^{\infty} t \left[1 - 0.297 \times \ln \left\{ \left(e^{-\left(\frac{t}{97.232} \right)^1} \right)^{(1.83)} \right\} \right]^{-1/0.297} dt - 75.59^2 \\ &= 118.5 \end{aligned}$$

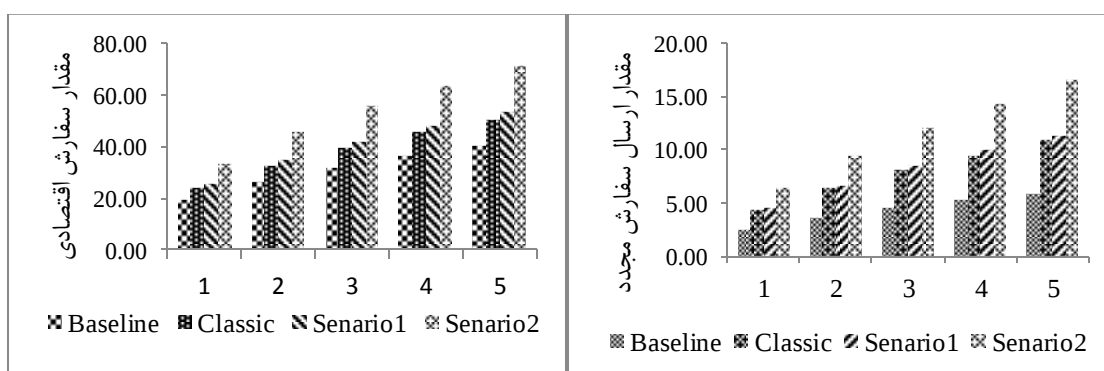
جدول ۵-۱۷- تعداد ناخن مورد نیاز باکت بیل مکانیکی برای یک سال با مدل تابع نمایی-MPHM

پارامترها	اساسی	سناریو اول	سناریو دوم	کلاسیک-نمایی
میانگین ($\bar{T}$)	۱۳۸/۳۳	۷۵/۵۹	۴۱/۳۲	۸۰/۳۱
انحراف معیار ($\sigma(T)$)	۲۱۶/۹۱	۱۱۸/۵۳	۶۴/۷۹	۸۰/۳۱
ضریب انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی ها (ζ)	۱/۵۷	۱/۵۷	۱/۵۷	۱
تعداد قطعات یدکی مورد نیاز (N_t)	۷۶	۱۲۹	۲۲۲	۱۱۲

در بحث انبارداری، برای داده‌های ناخن باکت بیل مکانیکی تعداد سفارشات اقتصادی (EOQ) و نقطه سفارش مجدد (Rep) با توجه به نرخ تقاضای سالیانه در سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن هزینه معادل هر ناخن ۲ دلار، هزینه سفارش ۰/۵ دلار، هزینه نگهداری سالیانه ۰/۲ دلار (۱۰ درصد قیمت یک ناخن)، متوسط زمان تأخیر در این حالت سه روز و سطح اطمینان ۹۰ درصد و با استفاده از روابط (۲-۱۹) و (۲-۲۱) در شکل ۵-۱۰ درج شده است.



شکل ۵-۹- تعداد ناخن مورد نیاز باکت بیل مکانیکی برای ۵ سال با تابع نمایی MPHM



شکل ۵-۱۰- مقادیر ارسال سفارش مجدد و مقدار سفارش اقتصادی برای ناخن باکت بیل مکانیکی با تابع نمایی MPHM

سناریوی دوم در سال اول نشان می‌دهد که در صورت رسیدن سطح انبار به ۷ ناخن باکت باید ۳۴ عدد ناخن باکت دیگر سفارش داده شود.

۵-۳-۸-۲- مدیریت قطعات یدکی: مدل نرخ مخاطرات متناسب PHM

شرایط محیطی تأثیر بسزایی در رفتار ماشین‌آلات معدنی دارد از این‌رو برای تخمین قطعات یدکی به‌طور دقیق‌تر و نزدیک‌تر به شرایط واقعی وارد کردن فاکتورهای ریسک مشهود امری اجتناب‌ناپذیر است. لذا در ادامه جهت تخمین قطعات یدکی، تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) در تحلیل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجایی که در داده‌ها فاکتور ریسک مشهود وابستگی به زمان وجود ندارد لذا مدل PHM برای توصیف رفتار خرابی و تخمین تعداد قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان که مبنی بر تابع (۵-۱۰) است استفاده می‌شود. حال برای تعیین تعداد قطعات یدکی مورد نیاز (N_t) در طول یک سال با کارکرد روزانه متوسط ۲۱/۵ ساعت و ۳۶۵ روز در سال، زمان کارکرد متوسط ۷۶۶۸ ساعت با توجه به روابط (۲-۳۰) با احتمال کمبود ۵ درصد برای سه سناریو

در جدول ۵-۱۶ به صورت جدول ۵-۱۸ و جدول ۵-۱۹ خواهد بود. برای نمونه مقادیر عددی دو پارامتر $\sigma(T)$ و $\bar{T}$ بر اساس رابطه (۵-۱۳) برای سناریو اول محاسبه می‌گردد.

$$\beta_s = \beta_{0s} = 0.86$$

$$\eta_s = \eta_{0s} \left[\exp \left(\sum_{i=1}^n z_i \alpha_i \right) \right]^{\frac{1}{\beta_{0s}}} = 63.63$$

$$\bar{T}_s = \eta_s \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta_s} \right) = 68.80 \quad (۵-۱۳)$$

$$\sigma_s(T) = \eta_s \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta_s} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta_s} \right)} = 80.42$$

جدول ۵-۱۸- تعداد ناخن موردنیاز باکت بیل مکانیکی برای یک سال بامدل ویبول-PHM

سناریو دوم	سناریو اول	پایه	پارامترها
۳۷/۷۷	۶۸/۸۰	۱۲۵/۳۰۲	میانگین ($\bar{T}$)
۴۴/۱۶	۸۰/۴۲	۱۴۶/۴۷۰	انحراف معیار ($\sigma(T)$)
۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۶۹	ضریب انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی ها (ζ)
۲۳۱	۱۳۲	۷۷	تعداد قطعات یدکی موردنیاز (N_t)

جدول ۵-۱۹- تعداد ناخن موردنیاز باکت بیل مکانیکی برای پنج سال بامدل ویبول-PHM

سال	تخمین قطعات یدکی بدون تأثیر فاکتورهای ریسک		تخمین قطعات یدکی با تأثیر فاکتورهای ریسک	
	پایه (اساسی)		سناریو اول	سناریو دوم
۱	۷۷		۱۳۲	۲۳۱
۲	۱۴۴		۲۵۲	۴۴۵
۳	۲۱۰		۳۷۰	۶۵۷
۴	۲۷۶		۴۸۷	۸۶۷
۵	۳۴۰		۶۰۳	۱۰۷۷

در بحث انبارداری، برای داده‌های ناخن باکت بیل مکانیکی تعداد سفارش اقتصادی (EOQ) و نقطه سفارش مجدد (Rep) با توجه به نرخ تقاضای سالیانه در سناریوهای مختلف با فرض هزینه معادل هر ناخن ۲ دلار، هزینه سفارش ۰/۵ دلار، هزینه نگهداری سالیانه ۰/۲ دلار (۱۰ درصد قیمت یک ناخن)،

متوسط زمان تأخیر در این حالت سه روز و سطح اطمینان ۹۰ درصد با استفاده از روابط (۲-۱۹)، (۲-۲۱) در جدول ۵-۲۰ و جدول ۵-۲۱ درج شده است. سناریوی اول نشان می‌دهد که در صورت رسیدن سطح انبار به ۴ ناخن باکت باید ۲۶ عدد ناخن باکت دیگر سفارش داده شود.

جدول ۵-۲۰- مقدار ارسال سفارش مجدد برای ناخن باکت بیل مکانیکی برای ۵ سال بامدل ویبول-PHM

ReP	مدیریت انبارداری بدون تأثیر فاکتورهای ریسک		مدیریت انبارداری با تأثیر فاکتورهای ریسک	
	پایه (اساسی)		سناریو اول	سناریو دوم
۱	۳		۴	۵
۲	۵		۶	۸
۳	۶		۷	۱۰
۴	۷		۸	۱۱
۵	۸		۹	۱۳

جدول ۵-۲۱- مقدار سفارش اقتصادی برای ناخن باکت بیل مکانیکی برای ۵ سال بامدل ویبول-PHM

EOQ	مدیریت انبارداری بدون تأثیر فاکتورهای ریسک		مدیریت انبارداری با تأثیر فاکتورهای ریسک	
	پایه (اساسی)		سناریو اول	سناریو دوم
۱	۲۰		۲۶	۳۴
۲	۲۷		۳۶	۴۸
۳	۳۳		۴۳	۵۸
۴	۳۸		۵۰	۶۶
۵	۴۲		۵۵	۷۴

۵-۴- جمع‌بندی فصل

در این فصل از رساله، به بررسی مطالعه موردی از ناوگان بارگیری و اجزاء (ناخن باکت بیل مکانیکی) براساس الگوریتم پیشنهادی پرداخته شد. در اولین مرحله پس از تعیین اجزاء موردنظر با توجه به محدودیت‌ها و مرزهای تعیین شده داده‌های موردنیاز از منابع مختلف اعم از گزارش‌های روزانه، گزارش‌های تعمیرگاه، اطلاعات نظارت، برداشت‌های حضوری در معدن، ملاقات و مصاحبه با متخصصین و هواشناسی گردآوری شده و پس از تشکیل بانک داده اولیه در مرحله بعد داده‌ها در قالب داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک مشهود استخراج شد. در سومین مرحله جدای از پروسه‌های قبلی تحلیل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن فاکتورهای ریسک مشهود برای نخستین بار فاکتورهای ریسک نامشهود به صورت تابع شکنندگی در محاسبات وارد شد. لذا انجام آزمون همگنی برای تعیین

وجود یا عدم وجود فاکتورهای ریسک نامشهود در تحلیل‌ها ضروری است و به دنبال آن مدل‌های رگرسیونی تحلیل قابلیت اطمینان نیز در دو دسته کلی مشهود (PHM، SCRM یا EPHM) و نامشهود (MPHM و EMPHM) تقسیم شدند که رفتار ناخن باکت بیل مکانیکی با توجه به داده‌های ثبت‌شده و تحلیل‌های انجام‌گرفته از مدل MPHM پیروی می‌کرد و درواقع متأثر از فاکتورهای ریسک نامشهود بود. محققین در این رساله برای بررسی رفتار سیستم و نمایش تأثیرات وسایل‌های مختلف در تحلیل‌ها جدای از مدل MPHM از دو مدل دیگر نیز استفاده شد تا به نوعی روند تکاملی تحلیل‌ها را به نمایش بگذارد. لذا سه مدل به ترتیب تابع رگرسیونی با شکنندگی، تابع کلاسیک و تابع رگرسیونی در نظر گرفته شد. در این مرحله در هر دسته مدل تابع مناسب با استفاده از آزمون‌های GOF تعیین شد و قابلیت اطمینان اجزاء محاسبه شد. در پنجمین مرحله نیز بر اساس توابع انتخاب‌شده در مرحله قبل برای هر مدل، تعداد قطعات یدکی موردنیاز، میزان سفارش بهینه و زمان ارسال سفارش بر اساس مصرف سالیانه اجزاء (ناخن باکت بیل مکانیکی) محاسبه شد. نتایج مطالعات انجام‌گرفته تأثیر چشمگیر و بارز فاکتورهای ریسک نامشهود را در تحلیل مدیریت قطعات یدکی نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده شامل:

الف. نتایج تخمین تعداد قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان با مدل MPHM برای سناریوهای موجود بر اساس فاکتور ریسک مؤثر به ترتیب ۱۳۹، ۲۴۱ و ۴۲۲ عدد و همچنین برای مدل کلاسیک ۲۱۴ عدد برای دومین سال پیش‌بینی شده است.

ب. با مدل PHM برای سناریوهای موجود بر اساس فاکتور ریسک مؤثر به ترتیب ۱۴۴، ۲۵۲ و ۴۴۵ عدد برای دومین سال پیش‌بینی شده است.

ج. در بحث انبارداری با مدل MPHM، سناریوی اول در سال دوم نشان می‌دهد که در صورت رسیدن سطح انبار به ۷ عدد ناخن باکت باید ۳۵ عدد ناخن باکت دیگر سفارش داده شود. همچنین با مدل کلاسیک در صورت رسیدن سطح انبار به ۷ عدد ناخن باکت باید ۳۳ عدد ناخن باکت دیگر سفارش داده شود.

د. با مدل PHM سناریوی اول در سال دوم نشان می‌دهد که در صورت رسیدن سطح انبار به ۶ عدد ناخن باکت باید ۳۶ عدد ناخن باکت دیگر سفارش داده شود.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- بحث و نتیجه‌گیری

حفظ و کنترل عملکرد یک سیستم صنعتی مخصوصاً ماشین‌آلات معدنی در هر شرایطی ضروری و واجب است. به‌طوری که در صنعت معدنکاری در بخش عملیات استخراج، میزان ماده معدنی استخراج‌شده به‌شدت به عملکرد ماشین‌آلات بستگی دارد. در این رساله، رویکردی برای مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان ارائه شده است. قابلیت اطمینان سیستم به‌عنوان شاخص عملکردی سیستم نشان‌دهنده رفتار آن در طول مدت‌زمان کارکردش و بر اساس رفتار آماری گذشته است. جدای از این عملکرد سیستم به‌شدت متأثر از شرایط محیطی و عوامل خارجی است. به‌طور مثال کارکرد یک دستگاه بیل مکانیکی در معدن سنگ آهن با کارکرد آن در معدن بوکسیت به‌شدت متفاوت خواهد بود. از این‌رو دستیابی به تحلیل‌های دقیق‌تر و واقعی‌تر نیازمند در نظر گرفتن این تأثیرات در شاخص‌های رفتاری است. عوامل محیطی و عملیاتی تحت عنوان "فاکتورهای ریسک مشهود" در مطالعات قابلیت اطمینان سیستم وارد می‌شوند. از آنجایی که تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود بر سیستم‌های مختلف متفاوت است لذا، انتخاب این فاکتورها بایستی پس از مطالعات و بررسی‌های دقیق محیط کاربری انتخاب شوند. تأثیر شرایط محیطی و عملیاتی بر شاخص عملکردی از دو جنبه مختلف قابل بررسی است: یک، تأثیر بر عملکرد سیستم دو، تأثیر بر عملکرد افراد. از آنجایی که روند پیشنهادی محققین برای مدیریت قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان است پس نتایج حاصل برای مدیریت قطعات یدکی در صورت صرف‌نظر از فاکتورهای ریسک نیز نادرست خواهد بود. به همین خاطر دومین هدف پس از مدیریت قطعات یدکی برای بسط مطالعات، وارد نمودن تأثیر شرایط محیطی قلمداد شد. شرایط محیطی مؤثر بر مدیریت قطعات یدکی در این رساله برای نخستین بار در دو قالب فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بررسی شد. فاکتورهای ریسک مشهود آن دسته از فاکتورهایی است که قابل مشاهده و اندازه‌گیری می‌باشند مانند تأثیر جنس سنگ یا دمای محیط در عملکرد سیستم و فاکتورهای ریسک نامشهود آن دسته فاکتورهایی است که غیر قابل مشاهده بوده و امکان سنجش مستقیم آن‌ها وجود ندارد مانند تأثیر تصمیمات نادرست مدیران رده بالا در وضعیت کارکرد سیستم پایین دست. دسته اخیر از فاکتورهای ریسک تحت تابعی به‌عنوان "تابع شکنندگی" در تخمین قابلیت اطمینان وارد شده و با مقادیر بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از ۱ مقدار آن را کم‌وزیاد می‌کند. ولی مشکل در رابطه با این مقدار از آنجایی شروع می‌شود که خود این مقدار قابل مشاهده نبوده لذا بایستی از طریق همگنی یا ناهمگنی داده‌ها اقدام به بررسی وجود آن شود. به بیان ساده نخست می‌بایست تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) در قابلیت اطمینان و تخمین دقیق آن وارد شود سپس اقدام به محاسبه مدیریت قطعات یدکی شود. از این‌رو در فصل دوم در نخستین گام قابلیت اطمینان و کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف مهندسی تعریف شد. اخیراً به منظور

محاسبات قابلیت اطمینان علاوه بر توابع کلاسیک آماری مانند نرمال، لاگ‌نرمال و بیبول و... که توانایی تحلیل فاکتورهای ریسک را نداشته و صرفاً با استفاده از داده‌های زمانی اقدام به تخمین می‌کنند از دسته دوم روش‌ها یعنی توابع رگرسیونی استفاده می‌شد. هرچند خود توابع کلاسیک نیز رگرسیون می‌باشند ولی، تنها قادرند ارتباط بین یک پارامتر وابسته (قابلیت اطمینان) با یک پارامتر مستقل (زمان) را نشان دهند درحالی‌که توابع رگرسیونی امکان تحلیل یک پارامتر وابسته (قابلیت اطمینان) و چندین پارامتر مستقل (فاکتورهای ریسک و زمان) را به‌طور هم‌زمان فراهم می‌آورند. ازجمله توابع رگرسیونی پرکاربرد و بنیادی در زمینه قابلیت اطمینان، تابع نرخ مخاطره متناسب (PHM) و زیرشاخه‌های مختلف آن است که به‌عنوان تابع نیمه پارامتریک در دو بخش به تحلیل سیستم می‌پردازد. بخش اول تابع اساسی که فقط شامل داده‌های زمانی بوده و بخش دوم تابع فاکتورهای ریسک مشهود که دربرگیرنده تأثیرات فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) است. همان‌طور که اشاره شد در این رساله به دنبال واردکردن تأثیر فاکتورهای نامشهود نیز بودیم که این تابع به شکل قدیمی آن قادر به تحلیل آن نیست. بدین جهت بسطی از تابع PHM تحت عنوان نرخ مخاطرات متناسب ترکیبی (MPHM) مورد استفاده قرار گرفت. این تابع کمبود PHM را جبران نموده و ناهمگنی به شکل ضربی در قابلیت اطمینان وارد می‌شود. با توجه به بحث انجام گرفته تا این مرحله تخمین قابلیت اطمینان و در ادامه آن مدیریت قطعات یدکی نیازمند رویکردی منسجم بود تا قادر به تحلیل هم‌زمان تمامی پارامترها باشد. رویکرد پیشنهادی در این رساله برای قابلیت اطمینان به‌طور دقیقی گره از این مشکل باز نمود. در الگوریتم پیشنهادی پس از تعیین نمونه موردی از سیستم ناوگان بارگیری و اجزاء (ناخن باکت بیل مکانیکی)، داده‌های مناسب در دو نوع داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک مشهود گردآوری شده و در نخستین گام آزمونی برای تعیین همگنی یا ناهمگنی داده‌ها انجام گرفته تا با استفاده از آن وجود یا عدم وجود فاکتورهای ریسک نامشهود مشخص شود. این آزمون تحلیل‌ها را به دودسته کلی مدل PHM (در صورت وجود فاکتور ریسک وابسته به زمان از SCRM یا EPHM استفاده می‌شود) و MPHMM (در صورت وجود فاکتور ریسک وابسته به زمان از EPHM استفاده می‌شود) تقسیم‌بندی نمود. گام بعدی و مهم‌ترین بخش رساله نحوه محاسبه مدیریت قطعات یدکی بر اساس قابلیت اطمینان می‌باشد. رویکرد پیشنهادی درواقع عصاره‌ای از عملکرد سیستم در طول زمان در قالب قابلیت اطمینان، تأثیرات فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود است.

رویکرد پیشنهادی از محاسبه دقیق قابلیت اطمینان سیستم شروع شده، سپس تعداد قطعات مورد نیاز اجزاء را تخمین زده و درنهایت میزان سفارش بهینه و زمان ارسال سفارش بر اساس مصرف سالیانه پیشنهاد می‌شود. این رویکرد در پنج مرحله تنظیم شد. اولین مرحله رویکرد، مرزبندی و انتخاب

سیستم است که به‌عنوان مرحله‌ای زمان‌بر، درنهایت ناخن باکت ۴ بیل‌مکانیکی کاترپیلا ر مدل 390DL به‌عنوان مورد مطالعه انتخاب شد. پس از تشکیل بانک داده‌های ۲۴ ماهه برای ۴ بیل‌مکانیکی داده‌های مورد نیاز در دو قالب داده‌های زمانی شامل زمان تا وقوع خرابی‌ها (TTFs) و فاکتورهای ریسک مشهود شامل نوبت‌کاری (Z_1)، نوع سنگ (Z_2)، گروه عملیاتی (Z_3)، دما (Z_4) و بارندگی (Z_5) استخراج شد. سپس وابستگی بین فاکتورهای ریسک به‌منظور همپوشانی نتایج و بروز مشکلات آتی در تحلیل بررسی شد که نتایج هیچ‌گونه وابستگی بین فاکتورهای ریسک با یکدیگر و با خود TTFs نشان نداد. در گام بعدی بررسی مستقل بودن و توزیع یکسان (iid) برای ارزیابی وجود یا عدم وجود روند و همبستگی انجام شد و با توجه به نتایج آزمون‌های روند و خودهمبستگی فرض iid در مورد TTFs ناخن باکت بیل‌مکانیکی کاترپیلا ر پذیرفته‌شد. در گام بعدی که آزمون R یا همگنی برای ارزیابی وجود یا عدم وجود فاکتورهای ریسک نامشهود انجام گرفت مقدار P-Value برای $R = 23/56$ برابر صفر است؛ که بیانگر وجود فاکتور ریسک نامشهود مؤثر بر قابلیت اطمینان ناخن باکت بیل‌مکانیکی کاترپیلا ر است. لذا توصیف رفتار خرابی‌های اجزاء بایستی با استفاده مدل MPHM یا تعدیل‌یافته آن EPMH انجام می‌شد. استفاده از روش‌های رگرسیونی و بسط‌های مختلف آن علاوه بر آزمون همگنی بر فرض متناسب بودن نرخ مخاطره استوار است که از آن به‌عنوان فرض PH نام برده می‌شود. این فرض درواقع بررسی می‌کند که آیا فاکتورهای ریسک مشهود در طول مدت‌زمان تحلیل مستقل از زمان هستند یا وابسته به آن، چراکه در صورت وابستگی به زمان باید تابع وابستگی به زمان برای آن تعریف شود. از آنجایی که نتایج تحلیل آزمون همگنی روش تحلیل داده‌های بیل‌مکانیکی را به سمت مدل MPHM سوق داد و خود این مدل زیرشاخه‌ای از PHM است لذا آزمون PH برای ارزیابی متناسب بودن نرخ مخاطرات انجام گرفت که در این رساله از دو نوع آزمون تحلیلی و ترسیمی برای نشان این فرض استفاده شد. همان‌طور که مشاهده شد، P(PH)-value برای هیچ‌یک از فاکتورهای ریسک در سطح معنادار ۵ درصد معنادار نیست. بنابراین فرض PH برای تمامی فاکتورهای ریسک برقرار است. آزمون ترسیمی $-\ln(-\ln R)$ بازمان برای ارزیابی فرض PH نیز با موازی بودن نمودارهای ترسیمی به ازای مقادیر مختلف هر فاکتور ریسک برقراری این فرض را تصدیق نمودند. در این رساله به‌منظور بررسی هرچه بیشتر باوجود تعیین مدل MPHM برای توصیف رفتار خرابی‌ها از مدل نرخ مخاطره متناسب PHM برای مقایسه نتایج حاصل استفاده شد. موضوع بعدی انتخاب تابع مناسب در هر دسته از مدل‌ها است که از طریق آزمون GOF باید مشخص شود. در این رساله از دو آماره AIC و BIC برای انتخاب مدل مناسب استفاده شد. نتایج تحلیل آزمون GOF با توجه به داشتن حداقل مقدار به ترتیب در مدل اول نمایی-MPHM (ExMPHM) و در مدل دوم ویبول-PHM (WePHM) را برای دو آماره فوق نشان داد. در ادامه تحلیل‌ها برای ورود تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط

محیطی مؤثر) و مقادیر آزمون‌های GOF از مدل ویبول - PHM (WePHM) استفاده شد. در این مدل ضرایب رگرسیون برای فاکتورهای ریسک مشهود مختلف تعیین شد و با توجه به ضرایب حاصل، فاکتور ریسک نوع سنگ به‌عنوان مؤثرترین فاکتور در محاسبه قابلیت اطمینان وارد شد. مسئله بعدی در مورد WePHM وارد نمودن مقدار فاکتور ریسک است که برای حل این مسئله نیز سه سناریوی مختلف بر اساس فاکتور ریسک مؤثر پیشنهاد شد. قابلیت اطمینان سناریوها در پایان ۸۰ ساعت کارکرد به ترتیب ۴۸/۳۲، ۲۹/۶۱ و ۱۳/۰۵ درصد محاسبه شد. در واقع این سه سناریو به‌خوبی نحوه تأثیرات فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) بر وضعیت عملکردی اجزاء را به نمایش گذاشته‌اند. پس درواقع صرف‌نظر از این تأثیرات نتایج کاملاً متفاوت خواهد داشت به همین دلیل تلاش می‌شود تا حتی‌الامکان تمامی فاکتورهای ریسک به درست‌ترین شکل ممکن در تحلیل وارد شود که متأسفانه با توجه به ماهیت برخی فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) گاهی غیرممکن است و دقیقاً به خاطر همین بود که در این رساله مبحث ناهمگنی در داده‌ها پیشنهاد شد تا از طریق آزمون R وجود یا عدم وجود فاکتورهای نامشهود را موردبررسی قرار دهد. در مدل اول که درواقع مدل اصلی توصیف رفتار ناخن باکت بیل مکانیکی است مقدار R، ۲۳/۵۶ به‌دست‌آمده که تأییدکننده وجود فاکتورهای ریسک نامشهود در داده‌ها است لذا از مدل ExMPHM با $\theta = 0.297$ به‌عنوان تابع قابلیت اطمینان استفاده شد. به عبارت ساده مدل اول ترکیبی از داده‌های زمانی، فاکتورهای ریسک مشهود و نامشهود بوده و درواقع کامل‌ترین تابع است. در این مدل نیز با توجه به ضرایب فاکتورهای ریسک، فاکتور ریسک نوع سنگ به‌عنوان مؤثرترین فاکتور در نظر گرفته شد. با توجه با زیربنای PHM مطابق مدل دوم، سه سناریوی مختلف برای فاکتور ریسک مؤثر تعریف شد. پس از محاسبه، قابلیت اطمینان سناریوها در پایان ۸۰ ساعت کارکرد به ترتیب ۷۱/۲۱، ۵۵/۰۲، ۳۵/۹۳ درصد و در مدل کلاسیک ۳۶/۹۳ درصد است. یکی از مؤثرترین راه‌ها برای حصول اطمینان از مناسب بودن مدل برازش شده، استفاده از باقیمانده‌ها است. لذا نمودار باقیمانده کاکس - اسنل برای مدل ExMPHM رسم شده است. اگر تابع مخاطره از خط ۴۵ درجه پیروی کند، می‌دانیم که تقریباً دارای یک توزیع نمایی با میزان مخاطره یک است و مدل به‌خوبی متناسب با داده‌ها برازش شده است. همچنین مناسب‌ترین مدل می‌تواند مدلی باشد که نمودار باقیمانده آن به خط نیمساز نزدیک‌تر باشد. با توجه به بحث انجام‌شده مدل نمایی - ExPHM به‌طور مناسبی به داده‌ها برازش شده است.

در گام بعدی مطابق الگوریتم ارائه‌شده برای هر دو مدل که قابلیت اطمینان آن‌ها بررسی شد، مدیریت قطعات یدکی محاسبه شد. نتایج تخمین تعداد قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان با مدل MPMH برای سناریوهای موجود بر اساس فاکتور ریسک مؤثر به ترتیب ۱۳۹، ۲۳۱ و ۴۲۲ عدد

همچنین در مدل کلاسیک ۲۱۴ عدد برای سال دوم پیش‌بینی شده است. همچنین با مدل PHM برای سناریوهای موجود بر اساس فاکتور ریسک مؤثر به ترتیب ۷۷، ۱۳۲ و ۲۳۱ عدد برای یک سال پیش‌بینی شده است. نتایج مطالعات انجام‌گرفته تأثیر چشمگیر و بارز فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) و نامشهود را در تحلیل مدیریت قطعات یدکی نشان می‌دهد. در رابطه با مدیریت انبارداری قطعات یدکی که بر هزینه‌های چرخه تولید محصول مؤثر است باید پس از تعیین تعداد قطعات یدکی موردنیاز، میزان سفارش بهینه و زمان ارسال سفارش بر اساس مصرف سالیانه اجزاء انجام‌شده است. به عنوان مثال سناریوی اول در سال اول در صورت رسیدن سطح انبار به ۵ عدد ناخن باکت باید ۲۶ عدد ناخن باکت بیل مکانیکی دیگر در مدل نمایی -MPHM، همچنین در مدل کلاسیک سناریوی اول در همین سال در صورت رسیدن سطح انبار به ۵ عدد ناخن باکت باید ۲۴ عدد ناخن باکت بیل مکانیکی و در آخر مدل ویبول -PHM در سناریوی اول در سال اول نشان می‌دهد که در صورت رسیدن سطح انبار به ۴ عدد ناخن باکت باید ۲۶ عدد ناخن باکت بیل مکانیکی دیگر سفارش داده شود. در این مرحله از مطالعه نیز اختلاف بارزی بین زمان سفارش و موجودی انبار در دو مدل با و بدون در نظر گرفتن فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) و نامشهود برای ناخن باکت وجود داشت که نشان‌دهنده تأثیر انکارناپذیر فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) و نامشهود در مقوله انبارداری قطعات است.

۲-۶- پیشنهادها

- در نظر گرفتن تأثیر فاکتورهای ریسک نامشهود در تحلیل شاخص‌های عملکردی (RAMS) در بخش‌های مختلف سیستم
- توجه هر چه بیشتر به شاخص عملکردی قابلیت پشتیبانی
- پیشنهاد رویکردی نوین برای تخمین قطعات یدکی و مدیریت آن‌ها برای قطعات تعمیرپذیر و در مرحله بعد ادغام رویکرد پیشنهادی با تأثیر فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) و نامشهود
- استفاده از شاخص قابلیت دسترسی در تخمین تعداد قطعات یدکی موردنیاز برای اجزاء تعمیرپذیر
- ارائه استراتژی بهینه نگهداری و تعمیرات (نت پیشگیرانه) بر اساس فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) و نامشهود
- مدیریت قطعات تجهیزات کارخانه فرآوری مبتنی بر فاکتورهای ریسک مشهود (شرایط محیطی مؤثر) و نامشهود.

منابع و مراجع

- Ahmadi, A. (2010), *Aircraft Scheduled Maintenance Programme Development Decision Support Methodologies and Tools*, Phd Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- Akaike, H. (1998), "A New Look at the Statistical Model Identification", in Parzen, E., Tanabe, K. and Kitagawa, G. (Eds.), *Selected Papers of Hirotugu Akaike*, Springer New York, New York, NY, pp. 215–222.
- Aksu, S., Aksu, S. and Turan, O. (2006), "Reliability and availability of pod propulsion systems", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 22 No. 1, pp. 41–58.
- Al'tshuler, V. (1969), "A method of constructing a mathematical model to study the reliability of mine transportation systems", *Journal of Mining Science*, Vol. 5 No. 1, pp. 72–76.
- Amini Khoshalan, H., Torabi, S.R., Hoseinie, S.H. and Ghodrati, B. (2015), "RAM analysis of earth pressure balance tunnel boring machines: A case study", *Int. Journal of Mining & Geo-Engineering*, Vol. 49 No. 2, pp. 173–185.
- Andrews, J., Poole, J. and Chen, W. (2013), "Fast Mission Reliability Prediction for Unmanned Aerial Vehicles", *Reliability Engineering & System Safety*.
- Ascher, H. (1983), "Regression analysis of repairable systems reliability", *Electronic Systems Effectiveness and Life Cycle Costing*, Springer, pp. 119–133.
- Ascher, H. (1997), "A full history proportional hazards model for preventive maintenance scheduling", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 13, pp. 187–198.
- Asfaw, Z.G. and Lindqvist, B.H. (2015), "Unobserved heterogeneity in the power law nonhomogeneous Poisson process", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 134, pp. 59–65.
- Asha G, Raja AV, Ravishanker N. (2018), Reliability modelling incorporating load share and frailty. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*;34:206–23. doi:10.1002/asmb.2294.
- Atashgar, K., MOLANA, S., Biglarian, A. and Sheikhalian, A. (2016), "Analysis of survival data of patient with breast cancer using Cox regression model".
- Bala, P.K. and Xavier, M. (2012), "Purchase Dependency Based Demand Forecasting In Improved Spare Parts Inventory Management", *International Journal of Research in Management, Economics and Commerce*, Vol. 2 No. 11, pp. 18–28.
- Barabadi, A. (2011), *Production Performance Analysis: Reliability, Maintainability and Operational Conditions*, University of Stavanger, Stavanger NORWAY, available at: http://brage.bibsys.no/uis/handle/URN:NBN:no-bibsys_brage_25901.
- Barabadi, A. (2012), "Reliability and Spare Parts Provision Considering Operational Environment: A Case Study", *International Journal of Performability Engineering*, Vol. 8 No. 5, p. 497.
- Barabadi, A., Barabady, J. and Markeset, T. (2010), "Application of accelerated failure model for the oil and gas industry in Arctic region", presented at the Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2010 IEEE International Conference on, IEEE, pp. 2244–2248.
- Barabadi, A., Barabady, J. and Markeset, T. (2011a), "A methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment condition", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 96 No. 12, pp. 1637–1646.
- Barabadi, A., Barabady, J. and Markeset, T. (2011b), "Maintainability analysis considering time-dependent and time-independent covariates", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 96 No. 1, pp. 210–217.
- Barabadi, A., J. Barabady, and T. Markeset, 2014. "Application of reliability models with covariates in spare part prediction and optimization—a case study". *Reliability Engineering & System Safety*. ۱۲۳: p. ۷-۱
- Barabady, J. (2005), "Reliability and maintainability analysis of crushing plants in Jajarm Bauxite Mine of Iran", presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings. Annual, IEEE, pp. 109–115.

- Barabady, J. and Kumar, U. (2005), "Maintenance Schedule by Using Reliability Analysis: A Case Study at Jajram Bauxite Mine of Iran", Vol. 2, presented at the 20th World Mining Congress, World Mining Congress, Tehran, Iran, pp. 831–838.
- Barabady, J. and Kumar, U. (2008), "Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 93 No. 4, pp. 647–653.
- Barlow, R.E. and Proschan, F. (1996), *Mathematical Theory of Reliability*, Vol. 17, Siam.
- Bondar', S. and Mernov, V. (1979), "Operational reliability of conveyer lines with intermediate storage capacity", *Journal of Mining Science*, Vol. 15 No. 3, pp. 268–270.
- Brewer, M.J., Butler, A. and Cooksley, S.L. (2016), "The relative performance of AIC, AICC and BIC in the presence of unobserved heterogeneity", *Methods in Ecology and Evolution*, Vol. 7 No. 6, pp. 679–692.
- Butorin, Y.M. and Gavrilenko, V. (1976), "Some aspects of the reliability of drilling equipment", *Soviet Mining*, Vol. 12 No. 1, pp. 62–65.
- Buzacott, J.A. (1970), "Markov approach to finding failure times of repairable systems", *Reliability, IEEE Transactions On*, Vol. 19 No. 4, pp. 128–134.
- Cafaro, G., Corsi, F. and Vacca, F. (1986), "Multistate Markov models and structural properties of the transition-rate matrix", *Reliability, IEEE Transactions On*, Vol. 35 No. 2, pp. 192–200.
- Cha, J.H. and Finkelstein, M. (2014), "Some notes on unobserved parameters (frailties) in reliability modeling", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 123, pp. 99–103.
- Chow, D.K. (1973), "Reliability of some redundant systems with repair", *Reliability, IEEE Transactions On*, Vol. 22 No. 4, pp. 223–228.
- Clauset, A. (2011). *Models and Simulation for Complex Systems*.
- Clayton, D. and Cuzick, J. (1985), "Multivariate generalizations of the proportional hazards model", *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, pp. 82–117.
- Coit, D.W. and English, J.R. (1999), "System reliability modeling considering the dependence of component environmental influences", presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 1999. Proceedings. Annual, IEEE, pp. 214–218.
- Cox, D.R. (1972), "Regression models and life-tables", *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pp. 187–220.
- Dale, C. (1985), "Application of the proportional hazards model in the reliability field", *Reliability Engineering*, Vol. 10 No. 1, pp. 1–14.
- Dhillon, B.S. (1986), "Bibliography of literature on mining equipment reliability", *Microelectronics Reliability*, Vol. 26 No. 6, pp. 1131–1138.
- Dhillon, B.S. (2008), *Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety*, Springer.
- Dhillon, B.S. and Rayapati, S.N. (1988), "Chemical-system reliability: a review", *Reliability, IEEE Transactions On*, Vol. 37 No. 2, pp. 199–208.
- Ding, F. and He, Z. (2011), "Cutting tool wear monitoring for reliability analysis using proportional hazards model", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 57 No. 5–8, pp. 565–574.
- Distefano, S. and Puliafito, A. (2009), "Reliability and availability analysis of dependent–dynamic systems with DRBDs", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94 No. 9, pp. 1381–1393.
- Distefano, S., Scarpa, M. and Puliafito, A. (2006), "Modeling distributed computing system reliability with DRBD", presented at the Reliable Distributed Systems, 2006. SRDS'06. 25th IEEE Symposium on, IEEE, pp. 106–118.
- Elevli, S., Uzgoren, N. and Taksuk, M. (2008), "Maintainability analysis of mechanical systems of electric cable shovels", *Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 67 No. 4, pp. 267–271.

- Faradmal, J., Talebi, A., Rezaianzadeh, A. and Mahjub, H. (2012), "Survival analysis of breast cancer patients using cox and frailty models", *Journal of Research in Health Sciences*, Vol. 12 No. 2, pp. 127–130.
- Fei-min, S., Bo-hui, C. and Jian, Y. (2009), "Study on construction and quantification of evaluation index system of mine ventilation system", *Procedia Earth and Planetary Science*, Vol. 1 No. 1, pp. 114–122.
- Freidina, E., Kovalenko, A. and Rudenko, O. (1975), "Effect of mine-transport-equipment reliability on the productivity of a quarry system", *Journal of Mining Science*, Vol. 11 No. 1, pp. 50–54.
- Gao, X., Barabady, J. and Markeset, T. (2010), "An approach for prediction of petroleum production facility performance considering Arctic influence factors", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 95 No. 8, pp. 837–846.
- Garakavi, A., Manevich, I. and Merkin, V. (1984), "Technological reliability and its safeguards in mining operations", *Journal of Mining Science*, Vol. 20 No. 6, pp. 456–462.
- Garmabaki, A., Ahmadi, A., Block, J., Pham, H. and Kumar, U. (2016), "A reliability decision framework for multiple repairable units", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 150, pp. 78–88.
- Garmabaki, A.H.S., Ahmadi, A., Mahmood, Y.A. and Barabadi, A. (2016), "Reliability Modelling of Multiple Repairable Units", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 32 No. 7, pp. 2329–2343.
- Ghodrati, B. (2005), *Reliability and Operating Environment Based Spare Parts Planning*, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- Ghodrati, B. (2006), "Weibull and Exponential Renewal Models in Spare Parts Estimation: A Comparison", *International Journal of Performability Engineering*, Vol. 2 No. 2, p. 135.
- Ghodrati, B., Akersten, P.-A. and Kumar, U. (2007), "Spare parts estimation and risk assessment conducted at Choghart Iron Ore Mine: A case study", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13 No. 4, pp. 353–363.
- Ghodrati, B., Banjevic, D. and Jardine, A. (2010), "Developing effective spare parts estimations results in improved system availability", presented at the Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual, IEEE, pp. 1–6.
- Ghodrati, B., Benjevic, D. and Jardine, A. (2012), "Product support improvement by considering system operating environment: A case study on spare parts procurement", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 29 No. 4, pp. 436–450.
- Ghodrati, B. and Kumar, U. (2005a), "Operating environment-based spare parts forecasting and logistics: a case study", *International Journal of Logistics Research and Applications*, Vol. 8 No. 2, pp. 95–105.
- Ghodrati, B. and Kumar, U. (2005b), "Reliability and operating environment-based spare parts estimation approach: a case study in Kiruna Mine, Sweden", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 11 No. 2, pp. 169–184.
- Ghodrati, B., Kumar, U. and Kumar, D. (2003), "Product support logistics based on product design characteristics and operating environment", presented at the 38th Annual International Logistics Conference and Exhibition: SOLE 2003, Society of Logistics Engineers, Huntsville, United States, p. 21.
- Gimel'shein, L.Y. and Nikeshin, B. (1967), "Quantitative reliability criteria for electromechanical systems in mines", *Journal of Mining Science*, Vol. 3 No. 2, pp. 199–202.
- Giorgio, M., Guida, M. and Pulcini, G. (2014), "Repairable system analysis in presence of covariates and random effects", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 131, pp. 271–281.
- Goel, L. and Gupta, R. (1984), "Analysis of a two-unit standby system with three modes and imperfect switching device", *Microelectronics Reliability*, Vol. 24 No. 3, pp. 425–429.
- Goodman, G.V.R. (1988), "An assessment of coal mine escapeway reliability using fault tree analysis", *Mining Science and Technology*, Vol. 7 No. 2, pp. 205–215.

- Gorjian Jolfaei, N. (2012), *Asset Health Prediction Using the Explicit Hazard Model*, Queensland University of Technology.
- Gorjian, N., Ma, L., Mittinty, M., Yarlagadda, P. and Sun, Y. (2010a), "The explicit hazard model-part 1: theoretical development", presented at the Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM'10., IEEE, pp. 1–10.
- Gorjian, N., Ma, L., Mittinty, M., Yarlagadda, P. and Sun, Y. (2010b), "A review on degradation models in reliability analysis", *Engineering Asset Lifecycle Management*, pp. 369–384.
- Gorjian, N., Mittinty, M., Ma, L., Yarlagadda, P. and Sun, Y. (2010), "The explicit hazard model-part 2: applications", presented at the Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM'10., IEEE, pp. 1–7.
- Gustafson, A. (2013), *Automation of Load Haul Dump Machines Comparative Performance Analysis and Maintenance Modeling*, Phd Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- Gustafson, A., Schunnesson, H., Galar, D., Kumar, U., 2012. The influence of the operating environment on manual and automated load-haul-dump machines: a fault tree analysis.
- Gutierrez, R.G. (2002), "Parametric frailty and shared frailty survival models", *Stata Journal*, Vol. 2 No. 1, pp. 22–44.
- Hall, R.A. and Daneshmend, L.K. (2003a), "Reliability Modelling of Surface Mining Equipment: Data Gathering and Analysis Methodologies", *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 17 No. 3, pp. 139–155.
- Hall, R.A. and Daneshmend, L.K. (2003b), "Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment", *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) Bulletin*, Vol. 96 No. 1072, pp. 159–165.
- Helsen, K. and Schmittlein, D.C. (1993), "Analyzing duration times in marketing: Evidence for the effectiveness of hazard rate models", *Marketing Science*, Vol. 12 No. 4, pp. 395–414.
- Hoseinie, S., Ahmadi, A., Ghodrati, B. and Kumar, U. (2013), "Reliability-centered maintenance for spray jets of coal shearer machine", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 20 No. 03, p. 1340006.
- Hoseinie, S., Ghodrati, B., Galar, D. and Juuso, E. (2015), "Optimal Preventive Maintenance Planning for Water Spray System of Drum Shearer", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48 No. 17, pp. 166–170.
- Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B. and Kumar, U. (2012a), "Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 18 No. 1, pp. 98–119.
- Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B. and Kumar, U. (2012b), "Reliability analysis of the cable system of drum shearer using the power law process model", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, pp. 1–15.
- Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R. and Kumar, U. (2011a), "Reliability and maintainability analysis of electrical system of drum shearers", *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, Vol. 17 No. 2, pp. 192–197.
- Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R. and Kumar, U. (2011b), "Reliability modeling of hydraulic system of drum shearer machine", *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, Vol. 17 No. 4, pp. 450–456.
- Hazrati Dastjerd, A., Nouri Gharahasanlou, A., Vahabi, Sh., Khodaiari, A., Barabadi, R. (2020)" R Mining navigation throughput capacity bottleneck detection (case study:Golgohar iron mine)". National Conference of Risk and Resilience Management in Mining Industries.
- "IBM - United States". (n.d.). , available at: <http://www.ibm.com/us-en/> (accessed 11 November 2015).
- "IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-02-06: 'reliability (performance)'"'. (2014), 24 January, available at: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-02-06> (accessed 24 January 2014).
- "IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 191-02-08: 'maintenance support performance'"'. (2014), 24 January, available at: <http://>

- www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-02-08 (accessed 24 January 2014).
- Ilgin, M.A. and Tunali, S. (2007), "Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34 No. 5–6, pp. 594–604.
- Ivko, V., Ovchinnikova, L. and Plotnikova, V. (1973), "A method of estimating the operational reliability of kinematic mechanized support systems", *Journal of Mining Science*, Vol. 9 No. 3, pp. 333–335.
- Jalali, S. and Forouhandeh, S. (2011), "Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction", *Safety Science*, Vol. 49 No. 5, pp. 664–669.
- Jiang, S.-T., Landers, T.L. and Rhoads, T.R. (2006), "Assessment of repairable-system reliability using proportional intensity models: A review", *Reliability, IEEE Transactions On*, Vol. 55 No. 2, pp. 328–336.
- Jianmin, C. and Renshu, Y. (2011), "Analysis of mine water inrush accident based on FTA", *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 11, pp. 1550–1554.
- Johnson, M.E., Tolley, H.D., Bryson, M.C. and Goldman, A.S. (1982), "Covariate analysis of survival data: a small-sample study of Cox's model", *Biometrics*, pp. 685–698.
- Kayrbekova, D., Barabadi, A. and Markeset, T. (2011), "Maintenance cost evaluation of a system to be used in Arctic conditions: a case study", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 17 No. 4, pp. 320–336.
- Kim, Y.H., Case, K.E. and Ghare, P. (1972), "A method for computing complex system reliability", *Reliability, IEEE Transactions On*, Vol. 21 No. 4, pp. 215–219.
- Kleinbaum, D.G. (2011), *Survival Analysis*, Springer.
- Kleinbaum, D.G. and Klein, M. (2012), "Survival Analysis: A Self-Learning Text", *Springer Science & Business Media*.
- Kumar, D. (1995), "Proportional hazards modelling of repairable systems", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 11 No. 5, pp. 361–369.
- Kumar, D. and Klefsjö, B. (1994a), "Proportional hazards model: a review", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 44 No. 2, pp. 177–188.
- Kumar, D. and Klefsjö, B. (1994b), "Proportional hazards model—an application to power supply cables of electric mine loaders", *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 1 No. 03, pp. 337–352.
- Kumar, D., Klefsjö, B. and Kumar, U. (1992), "Reliability analysis of power transmission cables of electric mine loaders using the proportional hazards model", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 37 No. 3, pp. 217–222.
- Kumar, D. and Westberg, U. (1996), "Proportional hazards modeling of time-dependent covariates using linear regression: a case study [mine power cable reliability]", *Reliability, IEEE Transactions On*, Vol. 45 No. 3, pp. 386–392.
- Kumar, D. and Westberg, U. (1997), "Maintenance scheduling under age replacement policy using proportional hazards model and TTT-plotting", *European Journal of Operational Research*, Vol. 99 No. 3, pp. 507–515.
- Kumar, U. (2003), "Service delivery strategy for mining systems", *Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries. South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 43–48.
- Kumar, U. and Huang, Y. (1993), "Reliability analysis of a mine production system-A case study", presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 1993. Proceedings., Annual, IEEE, pp. 167–172.
- Kumar, U. and Klefsjö, B. (1992), "Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 35 No. 3, pp. 217–224.

- Kumar, U., Klefsjö, B. and Granholm, S. (1989), "Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a Swedish mine", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 26 No. 4, pp. 341–361.
- Kumar, A., R.B. Chinnam, and F. Tseng, (2018): An HMM and polynomial regression based approach for remaining useful life and health state estimation of cutting tools. *Computers & Industrial Engineering*.
- Lakshmi, S. and Sundari, P.G. (2012), "A new mathematical model in weibull proportional hazards regression using GABAA", *Bulletin of Pure & Applied Sciences-Mathematics and Statistics*, Vol. 31 No. 1, pp. 101–107.
- Landers, T.L. and Soroudi, H.E. (1991), "Robustness of a semi-parametric proportional intensity model", *Reliability, IEEE Transactions On*, Vol. 40 No. 2, pp. 161–164.
- Lawless, J.F. (1987), "Regression methods for Poisson process data", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 82 No. 399, pp. 808–815.
- Levkovich, P. and Chalenko, N. (1969), "Use of reliability theory to calculate the required number of reserve longwall faces", *Journal of Mining Science*, Vol. 5 No. 2, pp. 160–165.
- Lin, C.-C. and Tseng, H.-Y. (2005), "A neural network application for reliability modelling and condition-based predictive maintenance", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25 No. 1–2, pp. 174–179.
- Ma, Z. (2008), "Survival analysis approach to reliability, survivability and prognostics and health management (phm)", presented at the Aerospace Conference, 2008 IEEE, IEEE, pp. 1–20.
- Markeset, T. and Kumar, U. (2003), "Integration of RAMS and risk analysis in product design and development work processes: a case study", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 9 No. 4, pp. 393–410.
- Markeset, T. and Kumar, U. (2005), "Product support strategy: conventional versus functional products", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 11 No. 1, pp. 53–67.
- Marseguerra, M. and Zio, E. (2000), "Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 68 No. 1, pp. 69–83.
- Martorell, S., Sanchez, A. and Serradell, V. (1999), "Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 64 No. 1, pp. 19–31.
- Mau, J. (1986), "On a graphical method for the detection of time-dependent effects of covariates in survival data", *Applied Statistics*, pp. 245–255.
- Moniri-Morad, A., Pourgol-Mohammad, M., Aghababaei, H. and Sattarvand, J. (2018), "Reliability-based covariate analysis for complex systems in heterogeneous environment: Case study of mining equipment", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, p. 1748006X18807091.
- Morad, A.M., Pourgol-Mohammad, M. and Sattarvand, J. (2014), "Application of reliability-centered maintenance for productivity improvement of open pit mining equipment: Case study of Sungun Copper Mine", *Journal of Central South University*, Vol. 21 No. 6, pp. 2372–2382.
- Morshedlou, A., Dehghani, H. and Hoseinie, S.H. (2014), "Reliability-based maintenance scheduling of powered supports in Tabas mechanized coal mine", *Journal of Mining and Environment*, Vol. 5 No. 2, pp. 113–120.
- Mouli, C., Chamarthi, S., Gä, R.C. and Vă, A.K. (2014), "Reliability modeling and performance analysis of dumper systems in mining by KME method", *IJCET (2)*, pp. 255–258.
- Nan, M.S., Nicolescu, C., Jula, D., Bolovan, C., Voicu, G.V. and Petre, G. (2011), "Practical aspects regarding spare parts reliability evaluation within an integrated management system", *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, Vol. 5 No. 2, pp. 238–246.
- Newby, M. (1994), "Perspective on Weibull proportional-hazards models", *Reliability, IEEE Transactions On*, Vol. 43 No. 2, pp. 217–223.

- Nollet, G. and Prince, D. (2003), "Rotating equipment reliability for surface operation. Part II: Oil analysis in a mine", *CIM Bulletin*, Vol. 96 No. 1067, pp. 82–86.
- Nouri Gharahasanlou, A., Khalokakaie, R., Ataei, M. (2016), "Throughput Capacity Analysis(Case Study: Sungun Copper Mine)", *CIVILICA*, Vol. 02, presented at the 2nd International Conference on Engineering and Applied Sciences, available at: http://www.civilica.com/Paper-ICEASCONF02-ICEASCONF02_036=Throughput-Capacity-AnalysisCase-Study-Sungun-Copper-Mine.html (accessed 23 January 2017).
- Nouri Gharahasanlou, A., Khalokakaie, R., Ataei, M., Barabadi, A. and Einian, V. (2017), "Risk based maintenance strategy: a quantitative approach based on time-to-failure model", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, pp. 1–10.
- Nouri Gharahasanlou, A., Khalokakaie, R., Ataei, M. and Fatorachi, S. (2017), "Availability analysis of mining machinery in Sungun copper mine", *Geotechnical Engineering Journal*, Vol. 1 No. 2, pp. 61–72.
- Nouri Gharahasanlou, A., Khalokakaie, R., Ataei, M. and Ghodrati, B. (2017), "Operating Environment-Based Availability Importance Measures for Mining Equipment (Case Study: Sungun Copper Mine)", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 17 No. 1, pp. 56–67.
- Nouri Qarahasanlou, A. (2017), 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, February.
- Nouri Qarahasanlou, A., et al. (2019) .Spare part requirement prediction under different maintenance strategies". *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 33(3): p. 182-169.
- Ntuen, C.A. (1991), "An economic preventive maintenance scheduling model with truncated gamma function", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 31 No. 1, pp. 31–38.
- Pérez-Ocón, R. and Montoro-Cazorla, D. (2004), "A multiple system governed by a quasi-birth-and-death process", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 84 No. 2, pp. 187–196.
- Petrov, N. and Butorina, O. (1986), "Reliability analysis of ventilation systems", *Soviet Mining*, Vol. 22 No. 6, pp. 491–496.
- Pham, H. (2006), *System Software Reliability*, Springer.
- Pham, H. and Wang, H. (1996), "Imperfect maintenance", *European Journal of Operational Research*, Vol. 94 No. 3, pp. 425–438.
- Pijnenburg, M. (1991), "Additive hazards models in repairable systems reliability", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 31 No. 3, pp. 369–390.
- Pourhoseingholi, M.A., Hajizadeh, E., Moghimi Dehkordi, B., Safaee, A., Abadi, A. and Zali, M.R. (2007), "Comparing Cox regression and parametric models for survival of patients with gastric carcinoma", *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, Vol. 8 No. 3, p. 412.
- Prasad, P. and Rao, K. (2002), "Reliability models of repairable systems considering the effect of operating conditions", presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2002. Proceedings. Annual, IEEE, pp. 503–510.
- Raftery, A.E. (1995), "Bayesian model selection in social research", *Sociological Methodology*, Vol. 25, pp. 111–164.
- Rahadiyan Wijaya, A. (2012), *Methods for Availability Improvements of a Scaling Machine System*, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- Rahimdel, M.J., Ataei, M. and Khalokakaie, R. (2016), "Reliability Analysis and Maintenance Scheduling of the Electrical System of Rotary Drilling Machines", *Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety*, Springer, pp. 623–632.
- Rahimdel, M.J., Ataei, M., Khalokakaie, R. and Hoseinie, S.H. (2014), "Maintenance Plan for a Fleet of Rotary Drill Rigs/Harmonogram Utrzymania I Konserwacji Floty Obrotowych Urządzeń Wiertniczych", *Archives of Mining Sciences*, Vol. 59 No. 2, pp. 441–453.

- Rahimdel, M.J., Hosienie, S.H., Ataei, M. and Khalokakaei, R. (2013), "The reliability and maintainability analysis of pneumatic system of rotary drilling machines", *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, Vol. 94 No. 2, pp. 105–111.
- Rausand, M. and Høyland, A. (2003), *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, Vol. 396, Wiley-Interscience.
- Rod B, Barabadi A, Naseri M. (2020), 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*. 36: 05020012.
- Sakamoto, Y., Ishiguro, M. and Kitagawa, G. (1986), "Akaike information criterion statistics", *Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel*, Vol. 83, pp. 902–926.
- Samanta, B., Sarkar, B. and Mukherjee, S. (2004), "Reliability modelling and performance analyses of an LHD system in mining", *South African Institute Mining And Metallurgy*, Vol. 104, pp. 1–8.
- Sammarco, J.J. (2002), "Addressing the safety of programmable electronic mining systems: lessons learned", Vol. 1, presented at the Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the, IEEE, pp. 692–698.
- Sankavaram, C., Kodali, A., Pattipati, K., Wang, B., Azam, M.S. and Singh, S. (2011), "A prognostic framework for health management of coupled systems", presented at the Prognostics and Health Management (PHM), 2011 IEEE Conference on, IEEE, pp. 1–10.
- Schwarz, G. (1978), "Estimating the dimension of a model", *The Annals of Statistics*, Vol. 6 No. 2, pp. 461–464.
- Shpiganovich, A. and Maslovskaya, T. (1982), "Effect of the reliability of electrical equipment on the parameters of sectional bulk transport and the performance of mining machinery", *Journal of Mining Science*, Vol. 18 No. 6, pp. 503–506.
- Shyur, H., Elsayed, E. and Luxhøj, J.T. (1999), "A general model for accelerated life testing with time-dependent covariates", *Naval Research Logistics (NRL)*, Vol. 46 No. 3, pp. 303–321.
- Simon, F., Javad, B. and Abbas, B. (2014), "Availability analysis of the main conveyor in the Svea Coal Mine in Norway", *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 24 No. 5, pp. 587–591.
- Singh, J. (1989), "A warm standby redundant system with common cause failures", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 26 No. 2, pp. 135–141.
- Slimacek V, Lindqvist BH. (2016). Nonhomogeneous Poisson process with nonparametric frailty. *Reliability Engineering & System Safety* 2016;149:14–23. doi:10.1016/j.ress.2015.12.005.
- Slimacek V, Lindqvist BH (2016),. Reliability of wind turbines modeled by a Poisson process with covariates, unobserved heterogeneity and seasonality. *Wind Energy* 2016;19:1991–2002. doi:10.1002/we.1964.
- Slimacek, V. and Lindqvist, B.H. (2017), "Nonhomogeneous Poisson process with nonparametric frailty and covariates", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 167, pp. 75–83.
- Smith, C.H. and Schaefer, M.K. (1985), "Optimal inventories for repairable redundant systems with aging components", *Journal of Operations Management*, Vol. 5 No. 3, pp. 339–349.
- Soldatov, A. (1969), "Reliability of blasting equipment", *Journal of Mining Science*, Vol. 5 No. 5, pp. 518–523.
- Sun, Y., Ma, L., Mathew, J., Wang, W. and Zhang, S. (2006), "Mechanical systems hazard estimation using condition monitoring", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20 No. 5, pp. 1189–1201.
- Tanaka, A., Noda, K. and Aoki, K. (2006), "Reliability of flammable gas detection methods in Japanese coal mines", *Mining Technology*, Vol. 115 No. 1, pp. 1–11.
- Tian, Z., Lin, D. and Wu, B. (2012), "Condition based maintenance optimization considering multiple objectives", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 23 No. 2, pp. 333–340.

- Vagenas, N., Kazakidis, V., Scoble, M. and Espley, S. (2003), "Applying a maintenance methodology for excavation reliability", *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 17 No. 1, pp. 4–19.
- Vagenas, N., Runciman, N. and Clément, S.R. (1997), "A methodology for maintenance analysis of mining equipment", *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 11 No. 1, pp. 33–40.
- Vaupel, J.W., Manton, K.G. and Stallard, E. (1979), "The impact of heterogeneity in individual frailty on the dynamics of mortality", *Demography*, Vol. 16 No. 3, pp. 439–454.
- Vayenas, N. and Wu, X. (2009), "Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 23 No. 3, pp. 227–238.
- Wienke, A. (2010), *Frailty Models in Survival Analysis*, CRC Press.
- Wijaya, A.R., Lundberg, J. and Kumar, U. (2012), "Downtime analysis of a scaling machine", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 26 No. 3, pp. 244–260.
- Wei, Y. and C. Yang, (2018) Predictive Modeling of Mining Induced Ground Subsidence with Survival Analysis and Online Sequential Extreme Learning Machine. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, pp. 3573–3581
- Xu, R. and Gamst, A. (2007), "On proportional hazards assumption under the random effects models", *Lifetime Data Analysis*, Vol. 13 No. 3, pp. 317–332.
- Yin, R.K. (2008), *Case Study Research: Design and Methods*, Vol. 5, SAGE Publications, Incorporated.
- You, M.-Y., Li, H. and Meng, G. (2011), "Control-limit preventive maintenance policies for components subject to imperfect preventive maintenance and variable operational conditions", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 96 No. 5, pp. 590–598.
- Zio, E. (2007), *An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis*, World Scientific Publishing Company.
- Zuashkiani, A., Banjevic, D. and Jardine, A.K. (2006), "Incorporating expert knowledge when estimating parameters of the proportional hazards model", presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 2006. RAMS'06. Annual, IEEE, pp. 402–408.
- Zuashkiani, A., Banjevic, D. and Jardine, A.K. (2003), "Applications of Proportional Hazards Model in Condition Based Maintenance", Second National Conference in Reliability and Maintenance, Tehran.
- Zaki R, Barabadi, A., Qarahasanlou, AN., Garmabaki A. (2019), A mixture frailty model for maintainability analysis of mechanical components: a case study. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 10: 1646–1653.
- Zamani Arabshah, A., Bakhshandeh Amnieh, H., Mirabedi, M., Qarahasanlou, AN. (2020) "Reliability Analysis of Mining Equipment's Considering by Operating Environmental Conditions - Case Study of Gol Gohar mine No. 1 Sirjan". National Conference of Risk and Resilience Management in Mining Industries.

پیوست

پیوست نمونه‌ی از داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی
پیوست الف - داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی هیتاچی

Code	System Code	Bucket Teeth	Shift	Failure Status	TBF (Hr)	Rock Type	Temperture (C)	Rel.Humidity (%)
1	470-2	5	N	F	408	1	22	53
	470-2	5	N	F	422	5	19	28
	470-2	5	D	F	447	6	8	57
	470-2	5	D	F	212	6	14	32
	470-2	5	D	F	866	6	27	43
	470-2	5	D	F	602	1	16	40
	470-2	5	D	F	267	6	11	58
2	470-3	5	N	F	749	6	29	37
	470-3	5	D	F	475	6	28	31
	470-3	1	N	S	21	5	27	40
	470-3	1	D	S	9	1	16	60
	470-3	5	D	F	667	6	6	77
	470-3	5	D	F	335	5	11	61
	470-3	5	D	F	645	1	22	21
	470-3	2	N	S	392	6	17	51
	470-3	5	D	F	14	6	3	54
3	470-4	1	D	S	46	6	2	52
	470-4	4	D	S	10	1	4	56
	470-4	5	D	F	328	6	10	43
	470-4	5	D	F	10	4	21	33
	470-4	1	D	S	25	6	22	34
	470-4	2	D	S	562	6	29	25
	470-4	5	D	F	56	6	22	27
	470-4	5	D	F	192	6	3	55
	470-4	5	D	F	239	6	11	45
4	470-5	5	D	F	104	6	10	56
	470-5	5	N	F	299	6	23	40
	470-5	5	D	F	236	6	29	32
	470-5	2	N	S	459	5	10	52
	470-5	5	D	F	7	5	15	41
	470-5	5	D	F	169	6	7	59

پیوست ب - داده‌های خرابی ناخن باکت بیل مکانیکی کاترپیلا ۳۹۰

TBF	status	shift	Tempreature	Humidity	Kind rock	team	Machine Code	TTF
59.80	0.00	3.00	6.74	20.90	1.00	3.00	1.00	59.80
14.28	0.00	1.00	2.59	11.07	2.00	2.00	1.00	74.08
26.19	1.00	2.00	11.24	19.13	1.00	1.00	1.00	100.27
26.68	1.00	3.00	12.45	18.18	1.00	1.00	1.00	126.95
21.82	1.00	1.00	10.36	17.33	1.00	2.00	1.00	148.77
53.60	1.00	2.00	8.09	15.20	1.00	4.00	1.00	202.37
93.29	1.00	2.00	3.88	31.37	2.00	2.00	1.00	295.66
5.81	1.00	3.00	3.88	31.37	2.00	3.00	1.00	301.48
8.33	1.00	1.00	2.47	30.85	2.00	4.00	1.00	309.81
73.68	1.00	2.00	9.14	28.47	2.00	4.00	1.00	383.49
271.01	1.00	1.00	9.94	37.36	1.00	2.00	1.00	654.50
73.11	1.00	2.00	9.82	36.20	1.00	3.00	1.00	727.61
17.50	1.00	2.00	12.94	35.03	2.00	2.00	1.00	745.12
38.75	1.00	3.00	11.55	30.27	2.00	1.00	1.00	783.87
5.40	1.00	1.00	11.55	30.27	2.00	3.00	1.00	789.27
8.66	1.00	3.00	11.55	30.27	2.00	1.00	1.00	797.92
20.58	1.00	3.00	11.29	28.25	2.00	4.00	1.00	818.50
3.81	1.00	3.00	12.44	27.51	2.00	3.00	1.00	822.31
1.06	0.00	1.00	12.44	27.51	2.00	2.00	1.00	823.37
165.39	1.00	1.00	10.04	36.53	2.00	1.00	1.00	988.75
47.07	1.00	2.00	13.13	38.69	2.00	1.00	1.00	1035.83
14.67	1.00	1.00	11.32	37.50	2.00	3.00	1.00	1050.50
5.22	1.00	2.00	11.32	37.50	2.00	4.00	1.00	1055.72
2.98	1.00	3.00	11.32	37.50	2.00	1.00	1.00	1058.71
39.76	1.00	3.00	7.98	21.53	2.00	4.00	1.00	1098.47
4.10	1.00	1.00	7.98	21.53	2.00	2.00	1.00	1102.57
16.28	1.00	3.00	14.02	39.05	2.00	4.00	1.00	1118.84
104.69	1.00	2.00	22.10	19.73	2.00	2.00	1.00	1223.53
95.38	1.00	1.00	21.46	17.72	2.00	1.00	1.00	1318.91
87.87	1.00	2.00	22.51	16.10	2.00	2.00	1.00	1406.78
14.77	1.00	1.00	23.05	16.44	2.00	1.00	1.00	1421.55
249.94	1.00	1.00	2.55	3.54	2.00	1.00	1.00	1671.49
89.87	1.00	3.00	26.06	12.83	2.00	4.00	1.00	1761.36
86.92	1.00	3.00	28.20	21.87	2.00	1.00	1.00	1848.28
3.24	1.00	1.00	28.20	21.87	2.00	3.00	1.00	1851.52
64.70	1.00	1.00	27.18	17.15	2.00	2.00	1.00	1916.22
5.09	1.00	2.00	27.18	17.15	2.00	4.00	1.00	1921.31
14.97	1.00	3.00	27.58	17.64	2.00	1.00	1.00	1936.28
6.79	1.00	2.00	27.58	17.64	2.00	3.00	1.00	1943.07
88.87	1.00	2.00	30.64	15.41	2.00	3.00	1.00	2031.94
260.00	1.00	2.00	31.51	18.03	2.00	2.00	1.00	2291.94

ادامه پیوست ب								
TBF	status	shift	Tempreature	Humidity	Kind rock	team	Machine Code	TTF
24.85	1.00	3.00	30.03	17.35	2.00	2.00	1.00	2316.79
7.97	1.00	2.00	30.03	17.35	2.00	1.00	1.00	2324.76
5.43	1.00	3.00	29.64	16.91	2.00	2.00	1.00	2330.19
25.46	1.00	2.00	30.11	16.71	2.00	4.00	1.00	2355.65
9.22	1.00	3.00	7.32	5.03	2.00	1.00	1.00	2364.87
30.65	1.00	3.00	21.55	9.45	2.00	3.00	1.00	2395.52
3.50	1.00	1.00	21.55	9.45	2.00	1.00	1.00	2399.01
35.16	1.00	1.00	31.36	15.30	2.00	4.00	1.00	2434.18
4.71	0.00	1.00	29.88	15.12	1.00	1.00	1.00	2438.89
301.84	1.00	2.00	27.63	21.35	2.00	2.00	1.00	2740.72
6.70	1.00	3.00	27.79	18.33	2.00	1.00	1.00	2747.42
66.87	1.00	1.00	28.79	17.06	2.00	3.00	1.00	2814.29
262.61	1.00	3.00	26.70	20.92	1.00	4.00	1.00	3076.91
19.66	1.00	1.00	25.50	17.49	2.00	1.00	1.00	3096.56
8.54	1.00	2.00	25.50	17.49	2.00	2.00	1.00	3105.11
27.58	1.00	3.00	24.81	17.01	2.00	3.00	1.00	3132.69
144.73	1.00	2.00	24.48	10.00	1.00	1.00	1.00	3277.42
9.22	1.00	3.00	14.67	17.08	1.00	2.00	1.00	3286.64
60.45	1.00	3.00	27.60	25.10	1.00	1.00	1.00	3347.09
267.43	1.00	2.00	20.92	24.64	1.00	3.00	1.00	3614.52
11.53	1.00	3.00	21.36	21.87	1.00	2.00	1.00	3626.05
169.64	1.00	2.00	24.35	16.84	2.00	2.00	1.00	3795.69
263.18	0.00	2.00	18.79	24.82	2.00	3.00	1.00	4058.86
69.97	1.00	1.00	18.74	7.40	2.00	4.00	1.00	4128.84
36.44	1.00	1.00	13.86	21.35	2.00	2.00	1.00	4165.28
35.79	0.00	1.00	19.44	32.23	2.00	1.00	1.00	4201.07
1.40	1.00	2.00	19.44	32.23	2.00	1.00	1.00	4202.47
4.27	1.00	3.00	18.62	30.68	2.00	3.00	1.00	4206.74
4.82	1.00	1.00	18.62	30.68	2.00	1.00	1.00	4211.56
4.23	1.00	1.00	18.62	30.68	2.00	1.00	1.00	4215.79
6.05	1.00	2.00	18.62	30.68	2.00	2.00	1.00	4221.83
129.61	1.00	1.00	16.60	21.46	2.00	1.00	1.00	4351.45
322.66	1.00	2.00	9.89	26.13	1.00	3.00	1.00	4674.11
48.70	1.00	2.00	7.66	39.47	2.00	1.00	1.00	4722.81
5.00	1.00	2.00	7.66	39.47	2.00	1.00	1.00	4727.81
14.07	1.00	2.00	7.15	38.87	2.00	2.00	1.00	4741.88
36.78	0.00	1.00	5.95	38.12	2.00	3.00	1.00	4778.65
2.29	1.00	1.00	8.10	37.21	2.00	2.00	1.00	4780.94
55.84	1.00	3.00	8.09	37.18	2.00	2.00	1.00	4836.78
33.99	1.00	1.00	10.27	39.19	2.00	3.00	1.00	4870.78
77.48	1.00	3.00	8.20	33.07	2.00	1.00	1.00	4948.26
225.29	1.00	3.00	14.61	34.04	1.00	3.00	1.00	5173.55

ادامه پیوست ب								
TBF	TBF	TBF	TBF	TBF	TBF	TBF	TBF	TBF
215.01	1.00	1.00	19.81	27.21	1.00	4.00	1.00	5388.55
277.58	1.00	1.00	16.49	29.07	1.00	3.00	1.00	5666.14
72.25	0.00	1.00	17.00	29.44	1.00	1.00	1.00	5738.39
924.40	1.00	2.00	31.24	17.47	1.00	3.00	1.00	6662.79
14.95	1.00	1.00	31.70	16.94	2.00	2.00	1.00	6677.74
106.57	1.00	3.00	31.71	28.30	2.00	1.00	1.00	6784.31
270.80	1.00	3.00	30.83	23.47	2.00	1.00	1.00	7055.11
52.58	1.00	3.00	30.66	16.53	1.00	3.00	1.00	7107.68
249.37	1.00	2.00	26.73	30.81	2.00	4.00	1.00	7357.05
28.30	1.00	1.00	27.73	26.24	1.00	2.00	1.00	7385.35
66.05	1.00	3.00	29.14	29.29	1.00	2.00	1.00	7451.41
24.55	1.00	2.00	28.45	32.01	1.00	3.00	1.00	7475.96
29.03	1.00	1.00	27.01	25.22	1.00	1.00	1.00	7504.99
0.96	1.00	1.00	27.01	25.22	1.00	1.00	1.00	7505.94
185.88	1.00	2.00	23.34	35.77	2.00	4.00	1.00	7691.83
18.36	1.00	2.00	22.94	34.03	2.00	3.00	1.00	7710.19
41.60	1.00	3.00	22.79	33.93	2.00	4.00	1.00	7751.79
40.63	1.00	1.00	22.57	34.98	1.00	3.00	1.00	7792.42
40.81	1.00	1.00	24.04	31.72	2.00	2.00	1.00	7833.23
20.14	1.00	1.00	23.57	29.31	1.00	3.00	1.00	7853.37
9.66	1.00	2.00	23.57	29.31	2.00	4.00	1.00	7863.03
257.52	1.00	3.00	17.89	11.19	2.00	3.00	1.00	8120.55
22.11	1.00	3.00	19.06	12.01	2.00	2.00	1.00	8142.66
57.13	1.00	3.00	18.11	11.62	2.00	1.00	1.00	8199.80
56.55	1.00	1.00	19.84	5.05	2.00	1.00	1.00	8256.35
86.67	1.00	1.00	12.95	5.00	1.00	3.00	1.00	8343.02
111.60	1.00	2.00	14.36	7.96	1.00	1.00	1.00	8454.62
8.38	1.00	3.00	15.50	8.94	1.00	4.00	1.00	8463.00
2.56	1.00	3.00	15.50	8.94	1.00	4.00	1.00	8465.56
54.53	1.00	1.00	14.31	12.24	2.00	1.00	1.00	8520.09
25.25	1.00	2.00	12.99	12.33	2.00	2.00	1.00	8545.34
28.03	1.00	3.00	14.40	8.44	2.00	2.00	1.00	8573.37
29.97	1.00	1.00	15.19	9.20	2.00	2.00	1.00	8603.35
68.86	1.00	1.00	12.20	8.11	2.00	2.00	1.00	8672.20
43.97	1.00	3.00	13.02	7.44	2.00	3.00	1.00	8716.17
12.65	1.00	1.00	11.93	5.66	2.00	1.00	1.00	8728.82
24.99	1.00	3.00	9.69	8.42	2.00	3.00	1.00	8840.86
125.12	1.00	2.00	10.35	9.30	1.00	2.00	1.00	8965.98
119.02	1.00	3.00	11.34	7.83	2.00	4.00	1.00	9085.00
81.93	0.00	3.00	11.34	7.83	2.00	4.00	1.00	9166.93
176.03	0.00	3.00	7.23	27.35	1.00	3.00	2.00	9342.96
88.58	1.00	3.00	9.36	36.40	2.00	1.00	2.00	9431.54

Abstract

Open-pit mining with high production rate requires large machineries. Deployment and maintenance of these machineries require huge investment. Unit operations of mining involve drilling, blasting, loading and hauling which loading occupies a crucial role in production rate and if it stops, the whole operation will stop. Unforeseen stops will increase maintenance and repair expenses, decrease profit, delay fulfilling the orders, and ultimately reduce the company's credit and will lead to customer dissatisfaction. Spare parts management is part of product support and is very effective in product's life cycle cost. Availability of spare parts could decrease the system downtime and increase its efficiency which result in improvement of project profitability. In this thesis, the reliability index is used for unloading spare parts. On completion of this approach, the impact of environmental conditions added to this analysis as "observed risk factors" to make the results as close as possible to reality. If we miss considering the harsh working conditions in mines, there will be a major defect in our analysis. however we know that it is impossible to determine and import all the observed risk factors in the analysis because some risk factors such as managerial decision-making, difference of brands, or the skill of operators, despite being observable, have not been recorded or correctly categorized and remained unknown due to various reasons including impossibility of quantification, lack of both information and accuracy, lack of expertise and shortage of time in data collection interval. These risk factors also added to the analysis as "unobserved risk factors". To give more consideration to the effect of observed and unobserved risk factors on reliability function (estimation of related parameters) and ultimately the spare parts provision based on resultant reliability function, we suggest a five-step algorithm. For this purpose the expansions based on Cox regression models have been used, because these models are able to simultaneously analyze the performance data (time data) and effective environmental conditions (observed and unobserved risk factors). Thereafter, in order to validate the suggested algorithm for spare parts provision based on observed and unobserved risk factors, a case study of the loading fleet (Caterpillar 390DL bucket nail excavator, Golgohar Sirjan Iron Mine No. 1) was selected. After establishing the database within 24 months for 4 excavators, the required data collected in two formats: time data including time to failures (TTFs), and observed risk factors including working shift (Z_1), rock type (Z_2), operation team (Z_3), temperature (Z_4), precipitation (Z_5) and Excavator code (Z_6). The value of maximum likelihood ratio equals 23.56, which confirm the existence of unobserved risk factors. Therefore, the exponential mixed proportional hazard model (MPHM) with 0.297 as the frailty value used for the reliability function. The results of spare parts management with the mixed proportional hazard model in one year for the existing scenarios are 76, 129 and 222 respectively, and the classical exponential function predicted to be 112. Finding of this study shows the significant effect of unobserved risk factors on spare parts analysis.

Keywords: Reliability, Spare parts, Observed and Unobserved Covariates, Operating environment, Mining machinery



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics

PhD Thesis in Mineral Exploitation

**The Spare Parts Management Based on Reliability
Considering Observed and Unobserved Covariates
(Case Study: Mineral Machinery)**

By: Reza Barabadi

Supervisors:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Reza Khalokakaie

Advisors:

Dr. Ali Nouri Qarahasanlou

February 2021
